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

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

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

Gustavo Ferreira de Souza
Centro Universitário de Caratinga – UNEC, Carrera de Agronomía, Caratinga, Minas Gerais, Brasil.
Cargill Bioenergia, Quirinópolis, Goiás, Brasil.
Correo electrónico: gustsvosalomoni@gmail.com
Formación: Grado en Geografía, Maestría en Ingeniería Urbana y Doctorado en Geografía.

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.

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

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

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.

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. Introducción

La caña de azúcar (Saccharum spp., híbrido) es una planta perenne adaptada a las regiones tropicales, con una elevada capacidad para producir y almacenar sacarosa [1]. Brasil ocupa una posición destacada en la producción mundial del cultivo. En la zafra 2019/2020, la producción nacional superó los 650 millones de toneladas [2], correspondientes a más del 40% del total mundial. La materia prima se destina principalmente a la fabricación de azúcar y etanol. Durante décadas, el sistema productivo estuvo asociado a la quema previa del cañaveral, una práctica con importantes impactos ambientales. La expansión de la cosecha mecanizada redujo esta práctica y modificó la gestión de los residuos generados. Entre estos residuos se encuentran el bagazo, de naturaleza fibrosa, y la vinaza, un efluente líquido con elevada carga orgánica.

En el área de estudio, el proceso productivo comienza con el arrendamiento de propiedades aptas para el cultivo de caña de azúcar. A continuación, se realizan las etapas de preparación y sistematización del suelo, plantación, aplicación de fertilizantes y plaguicidas, riego, cosecha, transporte y procesamiento industrial para producir etanol, azúcar y energía eléctrica.

En la unidad industrial, la caña cosechada se muele y la fracción fibrosa sólida, denominada bagazo, se separa del jugo. Después de la fermentación y la destilación, se genera vinaza como residuo líquido. Considerando la producción estimada de 29 mil millones de litros de etanol en la zafra 2020/2021 y la relación adoptada en el estudio, se generarían aproximadamente 319 mil millones de litros de vinaza. En lugar de desecharse, la vinaza puede volver a aplicarse en las áreas agrícolas como fuente de agua y nutrientes para el ciclo siguiente. También existen procesos experimentales para aprovecharla en la producción de biogás. La aplicación agrícola de vinaza como fertilizante y fuente de agua se denomina fertirrigación. Su composición incluye nutrientes de interés agronómico, como se presenta en la Tabla 1.

Tabla 1. Principales parámetros de la composición química de la vinaza (Fuente: Embrapa).

Parámetro	**Rango**
pH	4,4–4,6
Temperatura	80–100 °C
Demanda de oxígeno	19.800 mg/L
Nitrógeno (N)	480–710 mg/L
Fósforo (P_2O_5)	9–200 mg/L
Potasio (K_2O)	3.340–4.600 mg/L
Calcio (CaO)	1.330–4.570 mg/L

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

Parámetro	Rango
Magnesio (MgO)	580–700 mg/L
Sulfato (SO_4)	3.700–3.730 mg/L
Carbono (C)	8.700–12.100 mg/L
Materia orgánica	3.800 mg/L

La fertirrigación con vinaza se realiza poco después de la cosecha, preferiblemente en un plazo de hasta 20 días, con el propósito de favorecer el rebrote y reducir el riesgo de daño a las yemas. En condiciones adecuadas, el mismo cañaveral puede cosecharse durante aproximadamente cinco ciclos y, en situaciones específicas, alcanzar hasta diez cortes.

Sin embargo, las cosechas posteriores tienden a presentar una reducción de la productividad, estimada en este estudio en alrededor del 10% por ciclo, aunque este comportamiento puede variar según el ambiente de producción y el manejo adoptado.

La vinaza se transporta hasta las áreas agrícolas por canales abiertos, tuberías o camiones. En las áreas abastecidas por canales se utilizan equipos de enrollamiento automático, denominados hidro-roll, para distribuir el efluente sobre el cañaveral, como se ilustra en la Figura 1. El monitoreo de este proceso es complejo y puede variar entre propiedades, aunque esta etapa afecta directamente a la productividad de las parcelas. En un área de 20 ha, por ejemplo, el hidro-roll puede reposicionarse cada 60 m para fertirrigar una franja de aproximadamente 350 m, correspondiente a la longitud de la tubería recogida automáticamente. Los vacíos en la distribución pueden reducir la productividad y, en situaciones más graves, comprometer la supervivencia de las plantas.

La productividad de la caña de azúcar también depende de las plagas, las enfermedades, las condiciones del suelo y la calidad de la preparación del área. Aun así, durante el período seco y especialmente después de la cosecha, la fertirrigación con vinaza desempeña un papel relevante. La falta de aplicación o su realización tardía puede intensificar el estrés del cultivo y reducir su potencial productivo.

El sistema de fertirrigación puede operar continuamente después de la cosecha y exige sincronización entre la generación, el transporte y la aplicación de vinaza. Los ritmos inadecuados de aplicación pueden provocar acumulación o desbordamiento en los canales y aumentar el riesgo de impactos ambientales, incluso sobre los cursos de agua y las aguas subterráneas.

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

1.1 Teledetección aplicada al manejo de la caña de azúcar

La teledetección se utiliza en la agricultura de precisión aplicada a la caña de azúcar desde finales de la década de 1970 [4], [5]. La serie Landsat constituye una de las fuentes de datos satelitales más utilizadas en este contexto [5], con aplicaciones registradas en Brasil, Australia, Sudáfrica y Tailandia. También se utilizaron imágenes SPOT (Système Probatoire pour l'Observation de la Terre), con mejor resolución espacial que otros sensores disponibles en aquel momento, principalmente en Australia, Sudáfrica e India [6]. Los datos MODIS, con menor resolución espacial, entre 250 y 1.000 m, se emplearon en la clasificación de áreas de caña de azúcar en Brasil y Mozambique. Sin embargo, presentaron limitaciones, como la confusión espectral con pastizales, a pesar de su elevada frecuencia de revisita.



(a) (b) (c)

Figura 1. Esquema de aplicación de la vinaza: transporte por el canal (a), conducción al hidro-roll (b) y distribución en el campo (c).

Con una resolución espacial de aproximadamente 1.000 m, Duveiller et al. [7] utilizaron la Fracción de Radiación Fotosintéticamente Activa Absorbida (FPAR), calculada a partir de datos SPOT VEGETATION, para estimar la productividad agrícola en el estado de São Paulo, Brasil. Otros estudios investigaron datos SAR (radar de apertura sintética) para cartografiar y monitorear cañaverales. Johnson y Kinsey-Henderson [8], por ejemplo, combinaron datos SPOT y ERS-1 para cartografiar el uso del suelo en una extensa región productora de caña de azúcar en Australia.

Los datos SAR se señalan con frecuencia como una alternativa a las imágenes ópticas cuando la nubosidad limita la observación de la superficie, especialmente durante la estación lluviosa. Baghdadi et al. [9] evaluaron el potencial de los sensores TerraSAR-X, ASAR/ENVISAT y PALSAR/ALOS para monitorear cañaverales en la isla de Reunión mediante enfoques multitemporales. Los autores relacionaron el coeficiente de retrodispersión SAR (σ^0) con el NDVI, la altura de las plantas y la cosecha. Entre los principales resultados, observaron que: 1) pueden identificarse parcelas cosechadas; 2) la altura de las plantas mostró

una mejor relación con datos adquiridos con mayores ángulos de incidencia; 3) las polarizaciones cruzadas HV o VH fueron ligeramente superiores a las copolarizaciones HH o VV para caracterizar el estado del cultivo; y 4) la banda X mostró una sensibilidad potencialmente menor a la rugosidad del suelo que las bandas L y C. A pesar de estos avances, todavía son relativamente pocos los estudios sobre aplicaciones de SAR en caña de azúcar.

Las revisiones de Moran et al. [4] y Abdel-Rahman y Ahmed [5] identificaron diversas aplicaciones de la teledetección en el manejo de la caña de azúcar. La siguiente lista sintetiza estas aplicaciones:

N.º	Aplicación
1	Clasificación de parcelas de caña
2	Cartografía de la extensión del área
3	Identificación y edad de maduración
4	Discriminación varietal
5	Mediciones puntuales
6	Predicción del rendimiento en la cosecha
7	Variabilidad del suelo
8	Monitoreo del cultivo
9	Identificación de las causas de variaciones productivas
10	Cartografía de condiciones climáticas
11	Evaluación topográfica
12	Identificación de períodos operativos

Los puntos 6, 7, 8, 9 y 12 de esta síntesis se relacionan directa o indirectamente con el monitoreo de la fertirrigación con vinaza, tema central de este artículo. Los lanzamientos de los satélites Sentinel-1, en 2014, y Sentinel-2, en 2015, ampliaron las posibilidades de observación multitemporal de los cañaverales. En este contexto, el estudio tiene como objetivo evaluar la utilidad de los datos Sentinel-2 y Sentinel-1 para identificar y cuantificar los efectos asociados a la distribución inadecuada de vinaza en áreas de caña de azúcar. Para ello, combinamos series multitemporales de imágenes Sentinel con datos de productividad de las parcelas. Finalmente, buscamos proponer un método de análisis de imágenes que permita apoyar el monitoreo de la aplicación de vinaza y del desarrollo del cultivo.

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

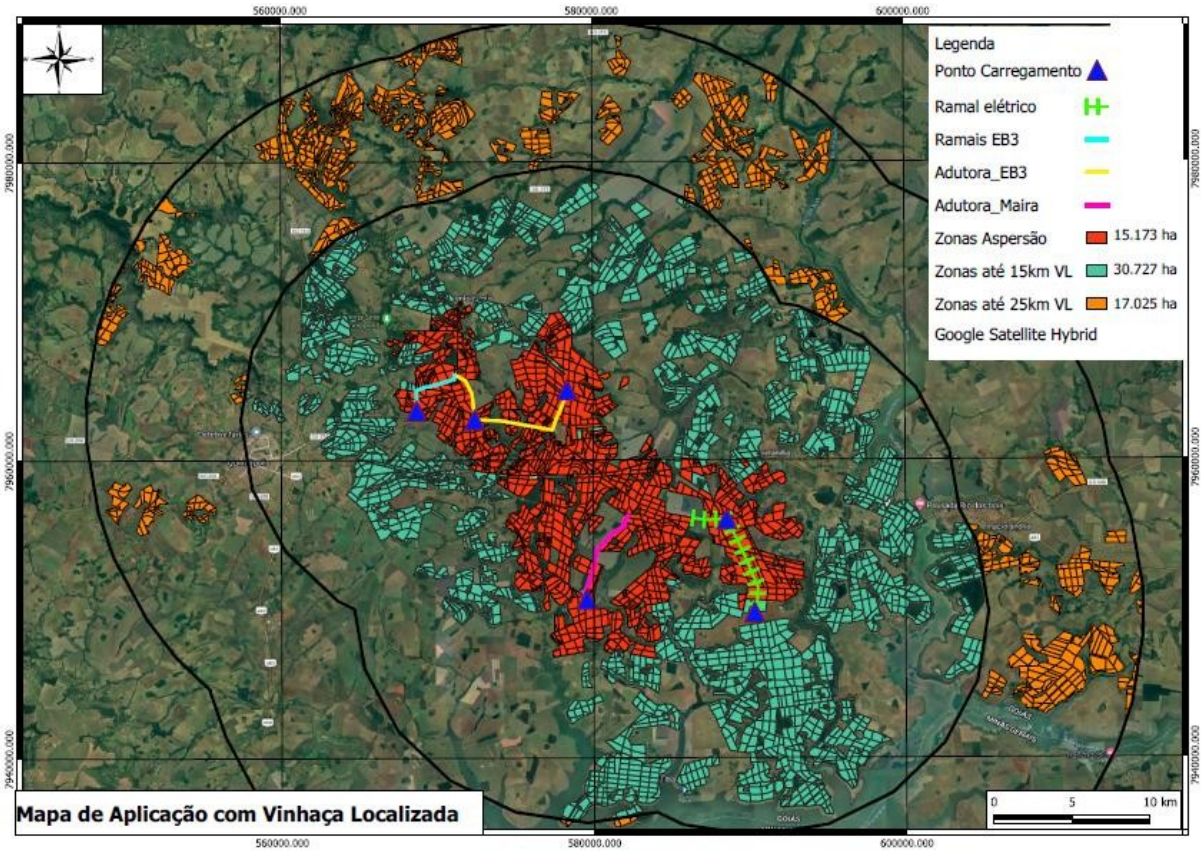


Figura 2. Localización del área de estudio, parcelas de caña de azúcar y zonas de aplicación de vinaza. El área de interés corresponde al sector fertirrigado por aspersión.

Rótulos del mapa: Leyenda; Punto de carga; Ramal eléctrico; Ramales EB3; Tubería principal EB3; Tubería principal Maira; Zonas de aspersión; Zonas hasta 15 km VL; Zonas hasta 25 km VL; Google Satellite Hybrid; Mapa de aplicación localizada de vinaza.

2. Metodología

2.1 Área de estudio

El área de estudio se localiza en el extremo sur del estado de Goiás, cerca del municipio de Quirinópolis y del límite con Minas Gerais (Figura 2), y se encuentra en la cuenca del río Paraná. El conjunto analizado comprende 768 parcelas, representadas en amarillo en la Figura 2, con un área media de aproximadamente 16 ha. Estas parcelas forman parte del área de producción de São João Cargill, SJC Bioenergia, empresa que proporcionó los datos utilizados en este estudio. Según los datos disponibles, la operación abarcaba cerca de 150 mil ha de caña de azúcar y una producción aproximada de 15 millones de toneladas.

La región presenta una precipitación anual aproximada de 1.500 mm, concentrada principalmente entre octubre y abril, y una temperatura media de alrededor de 25 °C. El relieve

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

es suavemente ondulado, con pendientes de hasta el 6%. Los suelos varían de textura arenosa a franco-arcillosa.

2.2 Datos auxiliares

Los datos auxiliares fueron proporcionados por SJC Bioenergia y consistieron en hojas de cálculo de control organizadas por parcelas, con áreas de entre 12 y 60 ha. Estos registros contenían información descriptiva utilizada en la selección de las unidades de muestreo, según los criterios presentados a continuación.

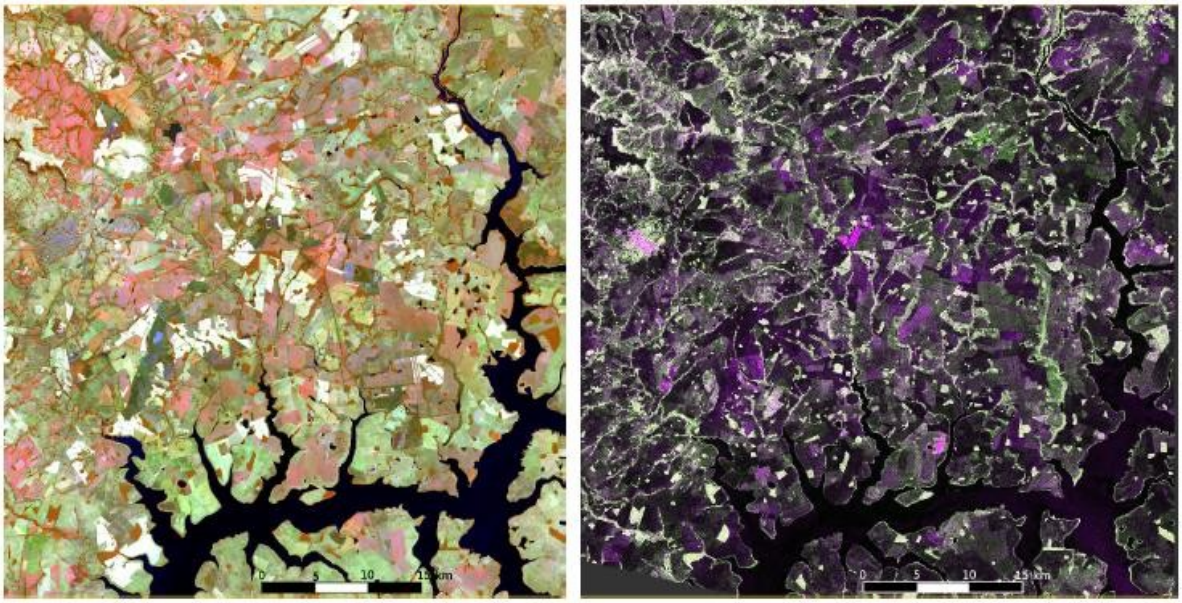


Figura 3. Composición en color de las imágenes Sentinel-2 (a), del 2 de agosto de 2018, y Sentinel-1 (b), del 1 de agosto de 2018. La composición Sentinel-2 corresponde al realce «Vegetación saludable», disponible en SNAP, con el infrarrojo en rojo, SWIR en verde y azul en azul. La composición Sentinel-1 utiliza VV en rojo, VH en verde y la diferencia VV − VH en azul.

Las parcelas de producción debían:

• estar localizadas en el área atendida por el sistema de distribución de vinaza mediante bombas y tuberías largas, excluyendo áreas sin aplicación o atendidas por otros métodos, principalmente camiones;

• pertenecer al cuarto o quinto ciclo de cosecha; y

• presentar datos descriptivos completos.

En este estudio, el cuarto y el quinto ciclo corresponden al cuarto y quinto año de cultivo del mismo cañaveral. Este criterio se adoptó porque la productividad tiende a disminuir a lo largo de los cortes sucesivos, con una reducción media estimada en aproximadamente el 10%

por ciclo. Después de un determinado número de cortes, que puede alcanzar ocho o nueve según las condiciones de cultivo, se renueva el cañaveral y se realiza una nueva implantación.

2.3 Imágenes y procesamiento de imágenes

Las imágenes Sentinel-1 y Sentinel-2 se obtuvieron del Sentinel Data Hub de la Agencia Espacial Europea para el período de 2018 a 2019, con el fin de representar diferentes etapas de desarrollo del cultivo y permitir la comparación con los datos de cosecha de 2019. Una única escena cubrió toda el área de estudio. Las fechas de adquisición utilizadas en los análisis se presentan en las Tablas 2 y 3.

Las imágenes Sentinel-2 se procesaron en el software SNAP a partir de productos de reflectancia. El sensor dispone de 13 bandas espectrales distribuidas en resoluciones espaciales de 10, 20 y 60 m. Las tres bandas de 60 m tienen aplicaciones específicas: aerosoles costeros (B1), vapor de agua (B9) y detección de nubes cirros (B10).

Estas tres bandas no se utilizaron. Se seleccionaron imágenes con baja interferencia de nubes sobre el área de interés. Las cuatro bandas de 10 m se mantuvieron en su resolución original, mientras que las bandas de 20 m se remuestrearon a 10 m mediante el método bilineal. A continuación, las imágenes se recortaron según la extensión de los polígonos de las parcelas evaluadas. La Figura 3 presenta las imágenes de agosto de 2018 en composición en color, con los polígonos seleccionados superpuestos.

SNAP también se utilizó para calcular índices espectrales. Tras la evaluación visual de los productos, considerando parcelas con problemas previamente conocidos, se seleccionaron SAVI (Índice de Vegetación Ajustado al Suelo) y NDWI (Índice de Agua de Diferencia Normalizada), por presentar una mejor discriminación de las porciones con posible falta de uniformidad en la aplicación de vinaza.

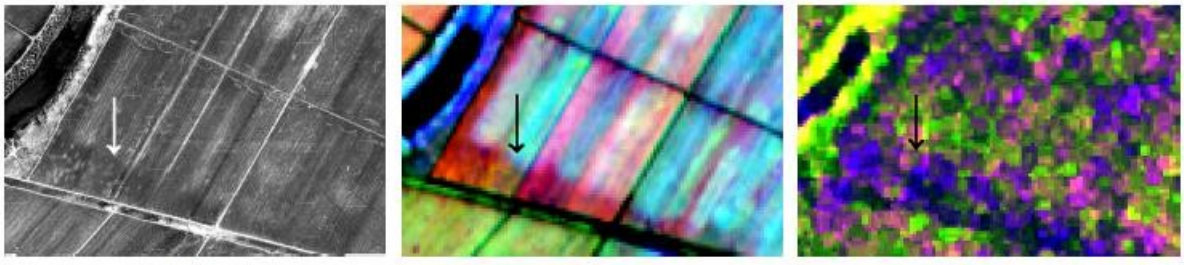


Figura 4. Ejemplo de posible estrés nutricional asociado a la distribución irregular de vinaza en parcelas de caña de azúcar: (a) imagen de Google Earth con una ligera diferencia tonal; (b) composición multitemporal de SAVI obtenida con imágenes Sentinel-2 de agosto, septiembre y noviembre de 2018; y (c) composición en color Sentinel-1 con VV, VH y la relación VV/VH.

Las imágenes Sentinel-1 también se procesaron en SNAP. El flujo incluyó eliminación de ruido térmico, calibración radiométrica, corrección geométrica del terreno mediante el método Range-Doppler y filtrado de moteado Lee Refinado. Los productos disponían de las polarizaciones VV y VH, y la relación VV/VH se añadió como tercera variable. Al igual que las imágenes Sentinel-2, los datos se recortaron al área de estudio.

El procesamiento consistió principalmente en extraer estadísticas por parcela. Para cada polígono se calcularon la media, la desviación estándar, la mediana, el mínimo y el máximo. Esta etapa se realizó con la herramienta Objects Radiometric Statistics de Orfeo ToolBox (OTB; CNES, 2002–2018), a partir del archivo vectorial de las parcelas seleccionadas.

El procesamiento de las imágenes consistía principalmente en extraer parámetros estadísticos de las imágenes de cada rodal. Para cada parcela se extrajeron las siguientes variables: media, desviación estándar, mediana, valor mínimo y valor máximo. Esta operación se realizó utilizando «ObjectsRadiometricStatistics» de Orpheo Tool Box (OTB, Copyright © 2002–2018 CNES) y un shapefile de las parcelas seleccionadas.

2.4 Prueba estadística

Como el objetivo era definir un enfoque que facilitara la identificación de problemas en la fertirrigación, se consideraron tres limitaciones. La primera se refiere al período de cosecha, que se extiende de abril a noviembre y exige el uso de varias imágenes para representar las diferentes etapas del cultivo. La segunda deriva del número de cortes del cañaveral: como la productividad tiende a disminuir a lo largo de las cosechas, el tonelaje no puede interpretarse aisladamente como variable dependiente. La tercera, y más relevante, se relaciona con la escala de registro de la productividad, disponible por finca y no por parcela. Esta agregación puede dificultar la identificación de fallas localizadas de fertirrigación, ya que una misma finca puede contener parcelas con y sin problemas de aplicación.

Para reducir estas limitaciones, se identificaron visualmente parcelas con indicios de problemas de fertirrigación, caracterizados por heterogeneidad espacial en las fechas observadas, y parcelas con distribución aparentemente homogénea de vinaza. Estos conjuntos formaron dos grupos de comparación. La Figura 4 presenta ejemplos de áreas con señales visuales de falta de uniformidad en una imagen de Google Earth, en una composición multitemporal Sentinel-2 y en una composición multipolarizada Sentinel-1.

Se evaluaron dos enfoques estadísticos: 1) correlación de Pearson entre el tonelaje de caña por hectárea (TCH) y las bandas e índices derivados de Sentinel-2, así como las

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

polarizaciones y la relación de polarización de Sentinel-1; y 2) análisis de varianza (ANOVA) para verificar si las parcelas con indicios de problemas de fertirrigación presentaban medias diferentes de las observadas en las parcelas sin estos indicios, además de identificar las bandas, polarizaciones e índices con mayor capacidad de separación entre los grupos.

3. Resultados y discusión

La Tabla 2 presenta las correlaciones de Pearson entre el tonelaje de caña por hectárea (TCH), el número de cosechas (NH) y las bandas individuales de tres imágenes Sentinel-2.

Tabla 2. Correlación de Pearson entre el tonelaje de caña por hectárea (TCH), el número de cosechas (NH) y las bandas individuales de Sentinel-2.
Los coeficientes destacados en negrita son superiores a 0,2 o inferiores a −0,2 y presentan significación estadística de $p < 0,01$.
Tabla 2. Correlación de Pearson entre el tonelaje de caña por hectárea (TCH), el número de cosechas (NH) y las bandas individuales de Sentinel-2.

Banda S-2	Rango 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	Rojo	-0,03	-0,12	**-0,26**	0,08	-0,02	**0,32**
5	Borde rojo 1	-0,04	-0,03	**-0,27**	0,08	-0,05	**0,33**
6	Borde rojo 2	-0,03	0,12	0,10	0,08	**0,41**	**-0,39**
7	Borde rojo 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**

Todos los números en negrita son superiores a 0,2 o inferiores a −0,2 y son significativos con $p < 0,01$.

En la primera imagen, adquirida el 4 de abril de 2018, ninguna banda presentó una correlación relevante, superior a 0,2 o inferior a −0,2, con TCH o NH. Este resultado puede estar asociado al hecho de que muchas parcelas aún no habían sido cosechadas y, por tanto, reflejaban los efectos del ciclo anterior. En la segunda imagen, del 9 de noviembre de 2018, se observaron correlaciones significativas, aunque débiles a moderadas, entre −0,20 y −0,27, en las bandas del visible, del borde rojo y del infrarrojo de onda corta. Aunque la mayoría de las parcelas probablemente ya habían sido cosechadas, las diferencias de etapa de desarrollo entre ellas pueden haber reducido la expresión del efecto investigado. En la imagen del 18 de abril de 2019, se observaron correlaciones moderadas, de alrededor de 0,40, entre TCH y las bandas de borde rojo 2 y 3 y del infrarrojo cercano. Las bandas también presentaron correlación con el número de cosechas, compatible con la tendencia de reducción de la productividad en los cortes sucesivos.

La Tabla 3 presenta las correlaciones de Pearson entre TCH, NH, los índices NDWI y SAVI derivados de las imágenes Sentinel-2 y las polarizaciones y la relación de polarización de las imágenes Sentinel-1. En términos generales, NDWI presentó una mayor frecuencia de resultados significativos, mientras que SAVI alcanzó correlaciones de mayor magnitud, especialmente en la imagen del 18 de abril de 2019, correspondiente a una etapa más avanzada de desarrollo del cultivo. La correlación positiva entre TCH y SAVI sugiere que el índice responde al vigor vegetativo y puede ayudar a estimar la productividad relativa. Por otro lado, la correlación negativa entre NH y SAVI indica una reducción del vigor a medida que aumenta el número de cortes. En las fechas de julio y agosto de 2018, los signos de las correlaciones también pueden haber estado influidos por las diferencias entre las fechas de cosecha y por las etapas de rebrote de las parcelas.

La Tabla 4 presenta los resultados del análisis de varianza utilizado para probar la hipótesis nula de igualdad entre las medias de los grupos con y sin indicios visuales de problemas de fertirrigación. Para NDWI, la hipótesis nula se rechazó en dos de las seis fechas, el 30 de septiembre de 2018 y el 18 de abril de 2019, con un nivel de significación del 5%, con $p = 0,036$ y $p = 0,046$, respectivamente. Para SAVI, la diferencia fue significativa únicamente el 30 de septiembre de 2018, con $p = 0,038$.

La Tabla 4 presenta los resultados del análisis de varianza utilizado para probar la hipótesis nula de igualdad entre las medias de los grupos con y sin indicios visuales de problemas de fertirrigación. Para NDWI, la hipótesis nula se rechazó en dos de las seis fechas, el 30 de septiembre de 2018 y el 18 de abril de 2019, con un nivel de significación del 5%, con $p = 0,036$ y $p = 0,046$, respectivamente. Para SAVI, la diferencia fue significativa únicamente el 30 de septiembre de 2018, con $p = 0,038$.

4. Conclusión

El estrés nutricional asociado a la aplicación irregular o parcial de vinaza en áreas de caña de azúcar resultó visualmente identificable en las imágenes Sentinel, particularmente en los productos ópticos de Sentinel-2. Sin embargo, la amplia ventana de cosecha dificulta la construcción de un procedimiento sistemático de monitoreo. Variables como el número de cortes pueden enmascarar el efecto de la fertirrigación cuando el análisis se limita a las medias radiométricas de las parcelas. La interpretación visual incorpora simultáneamente aspectos relacionados con la tonalidad, el color, la forma, el tamaño, el contexto espacial y la evolución temporal. Otra limitación se refiere a la disponibilidad de los datos de productividad a escala

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

de finca y no por parcela, lo que redujo la capacidad de relacionar directamente las fallas locales de aplicación con los resultados productivos.

Tabla 3. Correlación de Pearson entre el tonelaje de caña por hectárea (TCH), el número de cosechas (NH), los índices SAVI y NDWI y las variables derivadas de Sentinel-1.

Fecha imagen 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****

Fecha imagen 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****

Los coeficientes destacados en negrita son superiores a 0,2 o inferiores a −0,2. * significativo al 95%; ** significativo al 99%.

Tabla 4. Análisis de varianza entre parcelas con y sin indicios visuales de problemas de fertirrigación, considerando los índices SAVI y NDWI en seis fechas de imágenes Sentinel-2.

Fecha imagen S-2	NDWI Prueba F	NDWI Significación (p)	SAVI Prueba F	SAVI Significación (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 al 95%.

A pesar de estas limitaciones, los resultados permiten destacar cuatro aspectos principales: 1) Sentinel-2, de naturaleza óptica, presentó una mayor capacidad de identificación de los problemas de fertirrigación que Sentinel-1, aunque los datos SAR siguen siendo relevantes en períodos con nubosidad; 2) los índices SAVI y NDWI sintetizaron mejor los efectos asociados al estado del cultivo que las bandas analizadas individualmente; 3) las imágenes adquiridas al final del ciclo, poco antes de la cosecha, tendieron a evidenciar mejor los efectos acumulados de la aplicación irregular, aunque esta identificación puede producirse demasiado tarde para la corrección operativa; y 4) factores como la preparación del suelo, las plagas, las malezas y las replantaciones parciales pueden producir patrones similares y deben considerarse en la interpretación.

Como mejora del proceso, se recomienda que los registros de campo se organicen por parcela y se vinculen a las respectivas fechas de cosecha y de aplicación de vinaza.

Agradecimientos

Este proyecto forma parte de la tesis doctoral de Gustavo Ferreira de Souza, desarrollada en el Departamento de Geografía de la Universidad Federal de Minas Gerais. Los autores agradecen a SJC Bioenergia el suministro de los datos de producción de caña de azúcar y a la Agencia Espacial Europea la disponibilidad de las imágenes Sentinel.

Referencias

[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.