



**A paper from the Proceedings of the
17th International Conference on Precision Agriculture and 11th Brazilian
Congress on Precision and Digital Agriculture
13-16 July 2026
Porto Alegre, Brazil**

**DELIMITAÇÃO ESPACIAL DE ZONAS DE MANEJO POR ÍNDICES DE
VEGETAÇÃO EM AGRICULTURA DE PRECISÃO**

LUIZ GUSTAVO KERN¹, LUIZ FELIPE SILVEIRA PAVÃO¹, ANDRÉ MÜLLICH¹, GABRIEL KAEFER SEGANFREDO¹, EMANOEL ROLIM FARIAS DA SILVA¹, IVAN CARLOS MALDANER², LUCIANO ZUCUNI PES², MARCELO SILVEIRA FARIAS², JAQUELINE SGARBOSSA²

¹ Pós Graduando em Agricultura de Precisão, Depto. de Ensino, Colégio Politécnico, Universidade Federal de Santa Maria, UFSM, Santa Maria, RS, Fone: (51) 98056-4521, kernluizgustavo@gmail.com.

¹ Pós Graduando em Engenharia Agrícola, Depto. de Ensino, Colégio Politécnico, Universidade Federal de Santa Maria, UFSM, Santa Maria, RS, Fone: (55) 99152-2828, felipepavao14@gmail.com.

¹ Pós Graduando em Agricultura de Precisão, Depto. de Ensino, Colégio Politécnico, Universidade Federal de Santa Maria, UFSM, Santa Maria, RS, Fone: (55) 99665-0633, andre.mullich@hotmail.com.

¹ Graduando em Agronomia, Depto. de Ensino, Colégio Politécnico, Universidade Federal de Santa Maria, UFSM, Santa Maria, RS, Fone: (42) 99154-6317, gabrielkseganfredo@gmail.com.

¹ Graduando em Agronomia, Depto. de Ensino, Colégio Politécnico, Universidade Federal de Santa Maria, UFSM, Santa Maria, RS, Fone: (55) 9713-2400, emanoelrolim80@gmail.com.

² Professor Dr. Eng. Agrícola, Depto. de Ensino, Colégio Politécnico, Universidade Federal de Santa Maria, UFSM, Santa Maria, RS, Fone: (55) 99694-3096, ivan.maldaner@ufsm.br.

² Professor Dr. Ciência do Solo, Depto. de Ensino, Colégio Politécnico, Universidade Federal de Santa Maria, UFSM, Santa Maria, RS, Fone: (55) 99631-7788, lucianopes@politecnico.ufsm.br.

² Professor Dr. Agronomia, Depto. de Ensino, Colégio Politécnico, Universidade Federal de Santa Maria, UFSM, Santa Maria, RS, Fone: (55) 99104-7258, Marcelo.farias@ufsm.br.

² Professor Dr. Agronomia, Depto. de Ensino, Colégio Politécnico, Universidade Federal de Santa Maria, UFSM, Santa Maria, RS, Fone: (55) 99637-8482, sgarbossa.jaqueline@ufsm.br.

Abstract.

Precision agriculture has incorporated remote sensing as an essential tool for characterizing the spatial variability of agricultural crops. Among the available spectral indices, vegetation indices stand out for their ability to represent vegetative vigor and spatial patterns associated with crop performance. This study aimed to evaluate the spatial stability of spectral indices obtained from a median composition for the delimitation of management zones and to analyze their agreement with a productivity map in soybean production.

The study was conducted in a 14-hectare area located in the Agricultural Area of the Polytechnic College – UFSM, Brazil. Surface reflectance images (Level 2A) from the Sentinel-2 satellite (MSI sensor) were acquired between 2019 and 2025 during the month of February, corresponding to the soybean grain-filling stage. Only previously selected images free of atmospheric noise were considered. From these images, a median composite was generated to reduce variability and highlight persistent spatial patterns.

The resulting map was classified into three zones of potential productivity (low, medium, and high) using quantile-based thresholds. For validation, a productivity map from the 2024/2025 crop season was used, generated from data collected by a Massey Ferguson MF 32 combine harvester equipped with the YieldTrakk® system. The use of single-year productivity data aimed to evaluate the ability of the spectral composition to represent the current productive condition of the crop.

The productivity data were subjected to outlier filtering and interpolated using the QGIS Smart Map plugin, and subsequently classified into three equivalent zones. Pearson's correlation indicated a significant positive relationship between the spectral indices and productivity ($r = 0.62$; $p < 0.05$). Spatial overlap analysis demonstrated agreement rates of 53% in the low productivity zone, 33% in the medium productivity zone, and 71% in the high productivity zone.

To assess the applicability of the methodology, the same median-based index approach (2019–2025) was applied to a second area located in the northern region of the state of Rio Grande do Sul, Brazil. Unlike the first area, no productivity data was available. Therefore, the evaluation focused on the spatial coherence of the generated zones. The zone classified as having low potential coincided with areas used for winter pasture and with the lowest altitude portions of the area, according to the Digital Elevation Model, indicating a consistent relationship between topographic position, land use, and spectral response. This analysis suggests that the method maintains coherence even in the absence of productivity data, reinforcing its practical applicability. The results demonstrate that median compositions of spectral indices, when obtained during a phenologically appropriate period, are able to capture persistent spatial patterns associated with productivity variability. Furthermore, this approach shows potential as an alternative tool for delineating management zones in areas without historical productivity monitoring, contributing to greater efficiency in the specific management of soybeans in each location.

Keywords.

Precision agriculture, Soybean productivity, Remote sensing, Spectral vegetation indices, Site-specific management units.

Tradução.

A Agricultura de Precisão incorporou o Sensoriamento Remoto como uma ferramenta essencial para caracterizar a variabilidade espacial das culturas agrícolas. Dentre os índices espectrais disponíveis, os índices de vegetação se destacam por sua capacidade de representar o vigor vegetativo e os padrões espaciais associados ao desempenho das culturas. Este estudo teve

como objetivo avaliar a estabilidade espacial dos índices espectrais obtidos a partir de uma composição mediana para a delimitação de zonas de manejo e analisar sua concordância com um mapa de produtividade na produção de soja.

O estudo foi conduzido em uma área de 14 hectares localizada na Área Agrícola do Colégio Politécnico – UFSM, Brasil. Imagens de reflectância de superfície (Nível 2A) do satélite Sentinel-2 (sensor MSI) foram adquiridas entre 2019 e 2025 durante o mês de fevereiro, correspondendo à fase de enchimento de grãos da soja. Somente imagens previamente selecionadas e livres de ruído atmosférico foram consideradas. A partir dessas imagens, foi gerada uma composição mediana para reduzir a variabilidade e destacar padrões espaciais persistentes.

O mapa resultante foi classificado em três zonas de potencial de produtividade (baixo, médio e alto) usando limiares baseados em quantis. Para validação, foi utilizado um mapa de produtividade da safra 2024/2025, gerado a partir de dados coletados por uma colhedora Massey Ferguson MF 32 equipada com o sistema *YieldTrakk*®. A utilização de dados de produtividade de um único ano teve como objetivo avaliar a capacidade da composição espectral em representar a condição produtiva atual da lavoura.

Os dados de produtividade foram submetidos à filtragem de outliers e interpolados utilizando o *plugin Smart Map* do QGIS, sendo posteriormente classificados em três zonas equivalentes. A correlação de Pearson indicou uma relação positiva significativa entre os índices espectrais e a produtividade ($r = 0,62$; $p < 0,05$). A análise de sobreposição espacial demonstrou taxas de concordância de 53% na zona de baixa produtividade, 33% na zona de produtividade média e 71% na zona de alta produtividade.

Para avaliar a aplicabilidade da metodologia, a mesma abordagem de índice baseada na mediana (2019–2025) foi aplicada a uma segunda área localizada na região norte do estado do Rio Grande do Sul, Brasil. Diferentemente da primeira área, não havia dados de produtividade disponíveis. Portanto, a avaliação focou-se na coerência espacial das zonas geradas. A zona classificada como de baixo potencial coincidiu com áreas utilizadas para pastagem de inverno e com as porções de menor altitude da área, de acordo com o Modelo Digital de Elevação, indicando uma relação consistente entre posição topográfica, uso da terra e resposta espectral. Essa análise sugere que o método mantém a coerência mesmo na ausência de dados de produtividade, reforçando sua aplicabilidade prática.

Os resultados demonstram que as composições medianas de índices espectrais, quando obtidas durante um período fenologicamente apropriado, são capazes de capturar padrões espaciais persistentes associados à variabilidade da produtividade. Além disso, essa abordagem mostra potencial como uma ferramenta alternativa para a delimitação de zonas de manejo em áreas sem monitoramento histórico de produtividade, contribuindo para maior eficiência no manejo específico da soja em cada local.

Palavras-chave.

Agricultura de precisão, Produtividade da soja, Sensoriamento remoto, Índices espectrais de vegetação, Unidades de manejo específicas do local.

1. Introdução

A Agricultura de Precisão (AP) tem sido impulsionada pelo uso de tecnologias capazes de aprimorar o monitoramento e a gestão da variabilidade espacial e temporal dos sistemas produtivos. Nesse contexto, o Sensoriamento Remoto (SR) tem se consolidado como ferramenta essencial ao possibilitar a obtenção de informações espectrais da superfície terrestre em diferentes escalas no contexto agrícola (PONZONI et al., 2015). A integração entre dados orbitais e

informações obtidas em campo, como mapas de produtividade, fornece subsídios indispensáveis para a caracterização do potencial produtivo de talhões agrícolas e para o planejamento de estratégias de manejo mais eficientes (FORMAGGIO et al., 2017).

A partir de índices espectrais extraídos das imagens de satélite, torna-se possível identificar padrões de variabilidade associadas à resposta fotossintética da vegetação, vigor das plantas e às condições de umidade no solo, e com isso, determinar áreas de diferentes variações produtivas e limitações como deficiência nutricional, estresse hídrico ou ocorrência de pragas e doenças (SCHAPARINI, 2021). Dessa forma, o uso das informações contribui para o direcionamento de boas práticas como aplicação localizada de insumos, definição de pontos de amostragem de solo e delimitação de zonas de manejo, fatores que reduzem as incertezas e favorecem a maior eficiência produtiva.

A cultura da soja é uma das principais *commodity* do país e possui grande importância econômica, além de exercer influência expressiva no balanço comercial e Produto Interno Bruto (PIB) do agronegócio. Segundo Cruz et al., (2025) entre 2010 e 2025 observou-se crescimento superior a 120% da área cultivada com soja, acompanhado por alterações expressivas no preço médio da cultura. Portanto, desenvolver métodos capazes de monitorar a variabilidade espacial e temporal ao longo do ciclo produtivo é fundamental para evitar possíveis fatores que podem comprometer o rendimento. Nesse sentido, o SR permite identificar as mudanças no desenvolvimento da cultura e permite a partir dos índices espectrais fornecer indicadores para a tomada de decisão.

Entre os índices espectrais (IVs), o NDVI (*Normalized Difference Vegetation Index*), destaca-se como um dos mais consolidados e utilizados na agricultura, sobretudo na cultura da soja (ROUSE et al., 1974). Com ele, é possível estimar a produtividade, monitorar o vigor vegetativo, identificar padrões de variabilidade temporal e gerar alertas relacionados a riscos na lavoura. Entretanto, sua interpretação pode ser influenciada por fatores como cobertura do solo, presença de palhada, estágio fenológico da cultura e saturação em áreas de elevada biomassa, uma vez que seu cálculo não corrige diretamente os efeitos da reflectância do solo e de diferentes condições de superfície (ALMEIDA et al., 2009). Ainda assim, estudos recentes reforçam a aplicabilidade dos índices espectrais na análise das condições dos talhões e identificação de ambientes de produção e zonas de manejo (VEIVERBERG, 2023; OLIVEIRA, 2021; MELOS, 2023).

Apesar do avanço das geotecnologias, a análise do grande volume de dados disponíveis ainda é o maior desafio, especialmente em razão da dificuldade de aquisição, processamento, organização e interpretação dos resultados. Dessa forma, as ferramentas digitais como QGIS e *Google Earth Engine*, tem ampliado as possibilidades de processamento e análise espacial, permitindo trabalhar com diferentes conjuntos de dados, como por exemplo, imagens de satélite com registros desde a semeadura até a colheita da cultura (ZHAO et al., 2021). Além disso, sensores de produtividade embarcados em colhedoras possibilitam a geração de mapas de produtividade em alta resolução espacial, os quais são utilizados como referência para validar ou comparar padrões obtidos por meio dos IVs.

Nesse contexto, a delimitação de zonas de manejo a partir de IVs apresenta potencial para auxiliar na interpretação da variabilidade e planejamento de práticas agrícolas. Assim, este estudo teve como objetivo avaliar a estabilidade espacial de índices espectrais obtidos a partir de composições de imagens orbitais para a delimitação de zonas de manejo e analisar sua concordância com mapas de produtividade da cultura da soja. Especificamente, buscou-se: (i) avaliar o nível de associação entre produtividade e índices espectrais; (ii) comparar os resultados em talhões distintos, com e sem disponibilidade de mapa de produtividade, a fim de verificar diferenças relacionadas às características espaciais e de manejo; e (iii) identificar zonas de manejo tanto nos índices espectrais quanto nos mapas de produtividade.

2. Materiais e métodos

3.1 Caracterização da área de estudo

O estudo foi conduzido em dois talhões agrícolas localizados no estado do Rio Grande do Sul, Brasil. A primeira área denominada Campo Nativo, situa-se na Área Agropecuária do Colégio Politécnico da Universidade Federal de Santa Maria (UFSM), no município de Santa Maria, nas coordenadas centrais aproximadas de 29°43'40'' S e 53°45'19'' W, com altitude ortométrica média de aproximadamente 100 m. A segunda área, denominada Campo da Casa, localiza-se no município de Santa Bárbara do Sul, nas coordenadas centrais aproximadas de 28°26'58.53''S e 53°20'16.73''W, com altitude ortométrica média de aproximadamente 495 m.

De acordo com a classificação climática de Köppen-Geiger, ambas as áreas estão inseridas em domínio de clima subtropical úmido, tipo Cfa, caracterizado por precipitação distribuída ao longo do ano e verões quentes. A área localizada em Santa Maria situa-se na Depressão Central do Rio Grande do Sul, com relevo suavemente ondulado, onde estudos sobre a relação solo-paisagem destacam a ocorrência expressiva de Argissolos e Planossolos na Depressão Central ondulado (RIO GRANDE DO SUL, 2024).

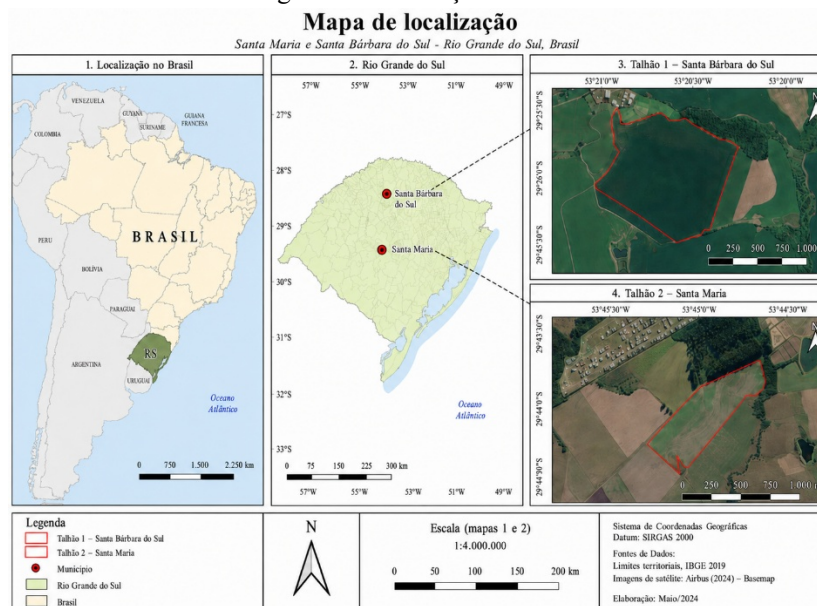
Por outro lado, o talhão localizado em Santa Bárbara do Sul está inserido na região do Planalto Meridional, onde predominam ambientes agrícolas consolidados, com uso intensivo de culturas anuais, especialmente soja e cereais de inverno. Na região predominam solos profundos e argilosos, como Latossolos e Nitossolos (RIO GRANDE DO SUL, 2024). Essa condição, combinada à altitude mais elevada em relação à área de Santa Maria, pode influenciar o regime térmico, a disponibilidade hídrica e o desenvolvimento fenológico da cultura. As principais características das áreas de estudo estão apresentadas na Tabela 1.

Tabela 1: Características das áreas de estudo

Atributo	Área 1 — Campo Nativo, Santa Maria/RS	Área 2 — Campo da Casa, Santa Bárbara do Sul/RS
Coordenadas centrais	29°43'40'' S; 53°45'19'' W	28°26'58,53'' S; 53°20'16,73'' W
Altitude ortométrica média	aproximadamente 100 m	aproximadamente 495 m
Classificação climática	Cfa	Cfa
Região geomorfológica	Depressão Central	Planalto Meridional
Solo predominante regional	Argissolos e Planossolos	Latossolos e Nitossolos
Disponibilidade de mapa de produtividade	Sim	Não

Fonte: Dos autores (2026).

Figura 1. Localização da área de estudo.



Fonte: Autores (2026)

A cultura avaliada foi a soja, conduzida na safra 2024/2025. A cultivar utilizada foi a BMX Zeus 55157 RSF IPRO, pertencente ao grupo de maturidade 5.5, com ciclo aproximado de 128 dias para o Rio Grande do Sul, porte controlado, alto potencial produtivo e resistência ao acamamento (UNIAGRO, 2026).

3.2 Dados de produtividade

Os dados de produtividade foram obtidos na safra de 2024/25 no talhão Campo Nativo por meio de uma colhedora automotriz Massey Ferguson MF 4690 equipada com o sistema *Yieldtrakk®*, que utiliza sensores ópticos para o registro da produtividade em tempo real e georreferenciada.

O processamento e a análise dos dados de produtividade foram realizados no *software* QGIS com o objetivo de remover registros inconsistentes associados a falhas de leitura, paradas da colhedora, sobreposição de passadas, bordaduras, valores extremos e possíveis erros de posicionamento. A filtragem dos dados foi realizada com o apoio do *plugin Smart Map* também no QGIS. Após a remoção dos ruídos, os dados de produtividade foram interpolados pelo método de *Krigagem* ordinária disponível no *plugin* para gerar o mapa final da produção.

Posteriormente o mapa de produtividade foi classificado em 3 zonas de manejo a partir do método de Quantis onde busca selecionar as classes em percentuais iguais. As classes geradas correspondem à Zona 1 (menor produtividade), Zona 2 (zona de média produtividade) e Zona 3 (alta produtividade).

3.3 Aquisição e processamento das imagens orbitais

Foram utilizadas imagens de reflectância de superfície (Nível 2A) do satélite Sentinel-2 (sensor MSI) referentes ao período de 2019 e 2025 correspondentes à fase de enchimento de grãos da soja que buscou representar o período de maior relação entre vigor vegetativo e produtividade final da cultura. Foram consideradas apenas imagens previamente analisadas e livres de ruído atmosférico como nuvens, sombras de nuvens, por exemplo. Para análise, foi utilizado o índice de vegetação por diferença normalizada (NDVI).

O NDVI é calculado pela seguinte equação que foi desenvolvida por ROUSE et al. (1973).

$$NDVI = \frac{NIR - R}{NIR + R} \quad (1)$$

Em que:

NIR corresponde à reflectância na faixa espectral do infravermelho próximo (0,76 a 0,90 μm);

R corresponde à reflectância na faixa espectral do vermelho (0,63 a 0,69 μm).

Os valores de NDVI variam teoricamente de -1 a 1. Valores mais elevados indicam maior vigor vegetativo, biomassa e atividade fotossintética, enquanto valores menores ou próximo de 0 indicam a presença de solo exposto, corpos hídricos ou superfícies não vegetadas (ROUSE et al. 1973).

3.4 Composição histórica de NDVI e delimitação das zonas de manejo

Foi elaborada uma composição histórica do índice para cada talhão. Para isso, os mapas anuais de NDVI correspondentes ao período de enchimento de grãos foram recortados pelos limites dos talhões e padronizados para a mesma resolução espacial, sistema de coordenadas e extensão espacial.

A composição histórica foi obtida por meio da sobreposição dos pixels e extração dos valores médios de NDVI entre os anos de 2019 e 2025. Essa composição teve como objetivo representar padrões espaciais persistentes de vigor vegetativo, reduzindo a influência de variações pontuais de uma única safra e destacando ambientes com maior estabilidade temporal.

A partir da composição histórica de NDVI, os talhões foram classificados em três zonas de manejo: Zona 1, de baixo potencial; Zona 2, de médio potencial; e Zona 3, de alto potencial. A classificação foi realizada pelo método de quantis, mantendo o mesmo número de classes utilizado para o mapa de produtividade. A Zona 1 foi associada aos menores valores de NDVI histórico, a Zona 2 aos valores intermediários e a Zona 3 aos maiores valores de NDVI histórico.

3.5 Análise de correlação entre NDVI e produtividade

No talhão Campo Nativo, onde havia disponibilidade de mapa de produtividade, a relação entre o NDVI e a produtividade da soja foi avaliada por meio do coeficiente de correlação de Pearson. Para essa análise, foram extraídos pares de valores de NDVI e produtividade espacialmente correspondentes, considerando a mesma resolução espacial e o mesmo limite do talhão.

A correlação foi calculada entre os valores contínuos de NDVI no período de enchimento de grãos e os valores contínuos de produtividade, adotando-se nível de significância de 95%. O coeficiente de Pearson foi calculado conforme a Equação 2:

$$r = \frac{\sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})(y_i - \bar{y})}{\sqrt{\sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2} \cdot \sqrt{\sum_{i=1}^n (y_i - \bar{y})^2}} \quad (2)$$

Onde:

x_i = valores da variável X (ex.: produtividade, $t\ ha^{-1}$), y_i = valores da variável Y (ex.: NDVI), $\bar{x}$ = média de X, $\bar{y}$ = média de Y e n = número de pares de observações (pontos comparados).

3.6 Concordância espacial entre zonas de NDVI e zonas de produtividade

Para avaliar a capacidade das zonas de manejo derivadas do NDVI em representar o padrão produtivo observado em campo, realizou-se o cruzamento espacial entre o mapa de zonas de NDVI histórico e o mapa de zonas de produtividade da safra 2024/2025. Os mapas classificados foram sobrepostos para identificar a correspondência entre as classes de NDVI e produtividade em cada pixel ou unidade espacial analisada. A concordância espacial foi agrupada em três categorias:

- a) concordância exata, quando a zona de NDVI se sobrepôs com a zona de produtividade (1-1, 2-2 ou 3-3);
- b) concordância leve, quando a diferença ocorreu entre classes vizinhas (1-2, 2-1, 2-3 ou 3-2);
- c) ausência de concordância, quando ocorreu inversão entre classes extremas (1-3 ou 3-1).

A partir desse cruzamento, foi calculado o percentual de área correspondente a cada tipo de concordância. Também foi elaborada uma matriz de cruzamento entre as zonas de NDVI e as zonas de produtividade para avaliar a estabilidade individual de cada classe.

3.7 Distribuição da produtividade nas zonas de NDVI

Foram analisadas a mediana, a amplitude interquartil, os valores extremos e a sobreposição entre as distribuições de produtividade de cada zona. Essa etapa foi utilizada como complemento à análise espacial, permitindo interpretar a coerência estatística das zonas delimitadas. O Índice de Eficiência de Manejo (IE) foi calculado para quantificar a capacidade das zonas delimitadas em explicar a variabilidade produtiva do talhão. Esse índice baseia-se na redução da variabilidade interna da produtividade dentro das zonas de manejo em relação à variabilidade total observada na área, sendo expresso pela seguinte equação 3:

$$IE(\%) = \left(1 - \frac{SQ_{interno}}{SQ_{total}} \right) \times 100 \quad (3)$$

Em que:

$SQ_{interno}$ corresponde à soma dos quadrados dentro das zonas de manejo, calculada a partir dos desvios dos valores de produtividade em relação à média de cada zona;

SQ_{total} corresponde à soma total dos quadrados, calculada a partir dos desvios dos valores de produtividade em relação à média geral do talhão.

Valores mais elevados de IE indicam maior eficiência das zonas de manejo em representar a variabilidade produtiva da área, pois demonstram menor variabilidade interna dentro de cada zona e maior distinção entre os ambientes delimitados. Dessa forma, o índice foi utilizado como métrica complementar para avaliar a eficiência das zonas geradas a partir do NDVI histórico.

3.9 Aplicação da metodologia na área sem mapa de produtividade

A metodologia também foi aplicada ao talhão Campo da Casa, localizado em Santa Bárbara do Sul, onde não havia disponibilidade de mapa de produtividade obtido por monitor de colheita. Nesse caso, a composição histórica de NDVI foi utilizada para delimitar zonas de manejo com base nos padrões espaciais persistentes de vigor vegetativo. Como não foi possível realizar validação direta com produtividade, a interpretação das zonas foi conduzida de forma qualitativa, considerando a coerência espacial entre as classes de NDVI, o relevo da área e o histórico de uso do talhão. Para isso, as zonas de manejo foram comparadas com o Modelo Digital de Elevação (MDE) COPERNICUS DEM de 30m de resolução espacial para identificar relações entre a resposta espectral da cultura e a posição no relevo.

Essa abordagem permitiu avaliar a aplicabilidade da metodologia em áreas sem mapas de produtividade, verificando se os padrões espaciais derivados do NDVI histórico apresentavam coerência com atributos ambientais observáveis, como altimetria, posição na paisagem e histórico de uso agrícola.

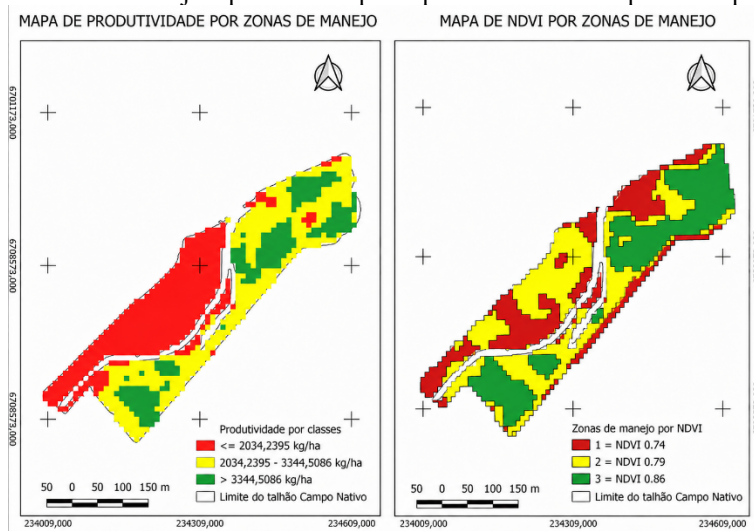
3. Resultados

4.1 Padrões Espaciais e Correlação entre NDVI e Produtividade

A análise inicial da variabilidade espacial do talhão Campo Nativo (Figura 2) demonstrou que as zonas de manejo derivadas da série histórica de NDVI (2019-2026) refletem o padrão produtivo observado na safra 2024/2025. O mapa de produtividade indicou variações entre 723 e 4.654 kg/ha, em paralelo com as classes de vigor vegetativo que apresentaram valores médios de NDVI de 0,74 (baixo potencial), 0,79 (médio potencial) e 0,86 (alto potencial).

Na primeira área (Campo Nativo), as zonas de manejo derivadas do NDVI foram comparadas com as obtidas a partir do mapa de produtividade e os resultados apresentados pelos mapas indicam que as zonas de manejo derivadas do NDVI apresentaram variabilidade produtiva semelhante às zonas de produtividade. Ao analisar o mapa da figura x, observa-se que as áreas de alto potencial produtivo (Zona 3) concentram-se predominantemente na porção nordeste da área de estudo, sobrepondo com as zonas de maior vigor vegetativo. A associação quantitativa entre essas variáveis foi confirmada pela correlação de Pearson, que indicou uma relação linear positiva e significativa ($r = 0,63$; $p < 0,05$) entre o NDVI no período de enchimento de grãos e a produtividade final da soja. Esse resultado indica que a resposta espectral da cultura nessa fase fenológica é um indicador confiável para a estimativa da variabilidade produtiva (SANTOS, 2025). Os resultados indicam que o padrão espectral registrou classes de produtividade do talhão com maior estabilidade nas classes extremas (menor e maior potencial) e maior transição na classe intermediária.

Figura 2: Mapa de zonas de manejo a partir do mapa de produtividade e de potencial produtivo por NDVI

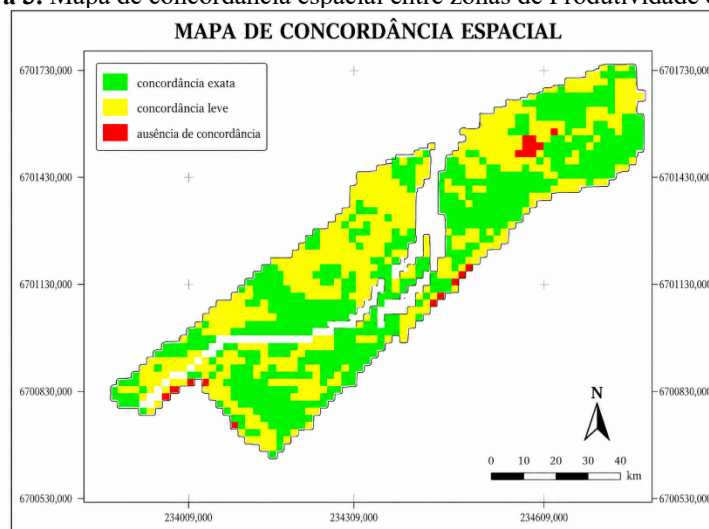


Fonte: Dos autores (2026).

4.2 Concordância Espacial e Validação das Zonas de Manejo

A análise de concordância espacial (Figura 3) evidencia que as zonas de manejo derivadas do NDVI foram capazes de reproduzir o padrão de variabilidade produtiva do talhão. Observa-se predominância de áreas com concordância exata e divergências entre classes vizinhas (1-2; 2-1; 2-3; 3-2).

Figura 3. Mapa de concordância espacial entre zonas de Produtividade e NDVI



Fonte: Dos autores (2026).

De modo geral, esse resultado é esperado, uma vez que a produtividade apresenta grande variação espacial no talhão analisado, enquanto o critério para classificação em zonas de manejo estabelece limites categóricos com grande influência das unidades de classes definidas entre áreas de baixo, médio e alto potencial (MOLIN, 2002). Como a natureza da variabilidade a campo ocorre de forma variada, valores de produtividade e NDVI que estão muito próximos à linha de corte das classes tendem a oscilar para a zona vizinha. Assim, a análise indica que as discrepâncias

observadas ocorreram predominantemente nessas regiões de transição, enquanto as inversões entre ambientes extremos foram muito pouco frequentes.

A interpretação espacial é corroborada pelos resultados quantitativos de área. Verificou-se a partir da média de sobreposição exata entre as 3 classes que 52,07% da área total do talhão apresentou concordância exata entre as zonas delimitadas pelo NDVI e as obtidas a partir do mapa de produtividade da safra. As divergências leves (classes vizinhas) representaram 46,36% da área, o que indica que os erros estão associados às regiões de transição entre ambientes produtivos. Por outro lado, as inversões entre zonas de baixo e alto potencial representaram apenas 1,57% da área total, representando percentual insignificante.

Para compreender a estabilidade de cada classe individualmente, a matriz de cruzamento entre as zonas (Tabela 1) detalha o percentual de cada classe entre as zonas.

Tabela 1. Matriz de cruzamento entre as zonas geradas pelo NDVI histórico e as zonas de produtividade real.

Zona NDVI	Prod. Zona 1	Prod. Zona 2	Prod. Zona 3
Zona 1	55,93%	38,98%	5,08%
Zona 2	44,81%	34,25%	20,94%
Zona 3	0,99%	27,23%	71,78%

Fonte: Dos autores (2026).

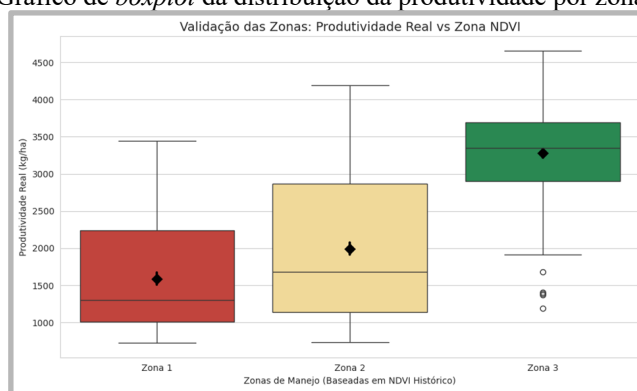
A análise do cruzamento evidencia maior estabilidade nas zonas extremas. Destaca-se a eficiência da Zona 3, na qual 71,78% da área se sobrepôs à mesma classe de alta produtividade. De forma semelhante, a Zona 1 apresentou quase 56% de concordância exata com a baixa produtividade, com índices muito baixos (5,08%) de associação com a Zona 3. Em contraste, a Zona 2 apresentou a menor estabilidade, com apenas 34,25% da área na mesma classe e dividindo o restante de sua área com as classes extremas (44,81% associada à Zona 1 e 20,94% à Zona 3). Essa resposta indica que a classe intermediária representa uma zona de transição a campo, e não uma classe com limites altamente definidos. De modo geral, o padrão demonstra que a metodologia preservou adequadamente a delimitação dos ambientes extremos da área de estudo e demonstra ser uma ferramenta eficiente para a tomada de decisão em campo com taxa variável de adubação, sementes ou direcionamento de amostragem de solo.

4.2 Distribuição percentual do cruzamento entre zonas

A análise de dispersão, representada pelo gráfico exploratório de *boxplot* (Figura 4), ilustra a distribuição da produtividade dentro de cada zona de manejo, demonstrando a relação positiva entre o vigor vegetativo histórico e a colheita observada. A Zona 1 concentrou os menores valores obtidos, enquanto a Zona 3 exibiu as maiores produtividades, confirmando seu alto potencial e estabilidade.

Apesar da sobreposição observada entre as distribuições nas Zonas 1 e 2, verifica-se uma diferença entre os tetos produtivos das classes, indicando que o NDVI foi capaz de separar os diferentes potenciais. A maior dispersão interquartil observada na Zona 2 é explicada pelo fato desta atuar como uma área que possui variações tanto de baixa quanto de alta produtividade, uma característica já evidenciada na matriz de cruzamento. De modo geral, a análise do *boxplot* corrobora com os padrões espaciais e comprova que o zoneamento representa adequadamente a realidade produtiva, mesmo diante da variabilidade interna das classes.

Figura 4. Gráfico de *boxplot* da distribuição da produtividade por zonas de manejo



Fonte: Dos autores (2026)

4.3 Indicadores de Desempenho Estatístico e Relação Fenológica

Os resultados obtidos estão de acordo com a literatura, que aponta maiores valores de correlação em fases próximas ao pico vegetativo. A fase reprodutiva inicial tende a apresentar maior resposta espectral, corroborando com os resultados obtidos em ambos os talhões (SCHIRMBECK et al., 2020). De forma semelhante, os maiores valores de NDVI ocorrem no pico do ciclo vegetativo, com queda gradual até a colheita (PONTES et al., 2010; FARIAS et al., 2023). Além disso, o Índice de Eficiência de Manejo (IE) de 44,5% demonstra que quase metade da variabilidade produtiva total do talhão pode ser explicada por meio destas três zonas, otimizando futuras intervenções.

Tabela 2: Indicadores quantitativos da relação entre NDVI histórico e produtividade.

Indicador	Valor	Interpretação
Correlação de Pearson	0,63	Associação positiva moderada entre as classes
Índice de Eficiência de Manejo (IE)	44,5%	Parte relevante da variabilidade produtiva é explicada pelas zonas

Fonte: Dos autores (2026).

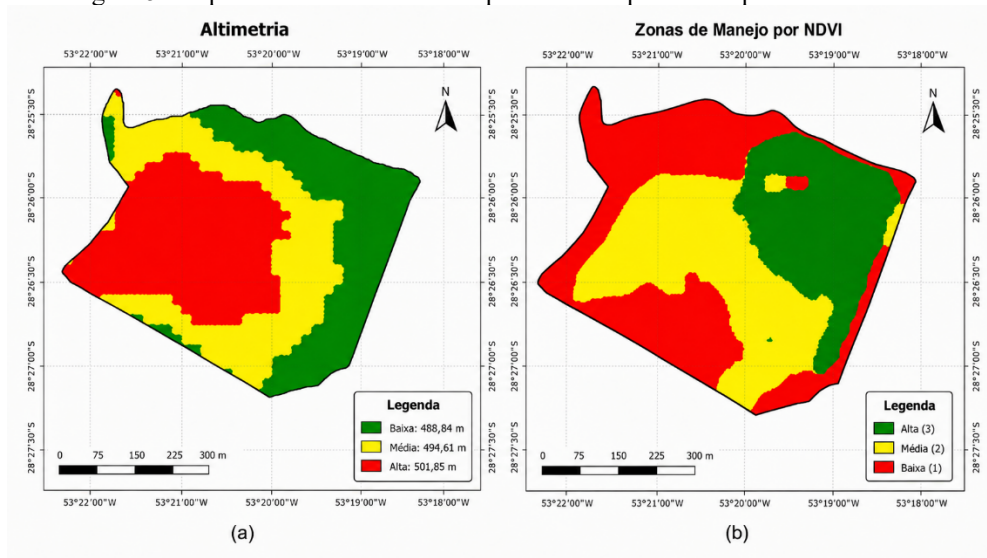
4.4 Aplicação da Metodologia na Área 2 (Campo da Casa)

Para atestar a aplicabilidade da metodologia em um contexto agrícola sem a presença de mapas de produtividade (monitor de colheita), a mesma abordagem de composição histórica de NDVI foi aplicada à segunda área de estudo, denominada Campo da Casa, localizada em Santa Bárbara do Sul - RS. Nesse cenário, a avaliação não pôde ser realizada por validação direta. Portanto, a interpretação baseou-se na relação espacial das zonas de manejo em relação aos atributos ambientais e topográficos.

Os resultados demonstraram uma forte correlação qualitativa entre a resposta espectral e a variabilidade produtiva do talhão. A zona classificada como de baixo potencial produtivo (Zona 1) concentrou-se nas regiões de menor altitude do terreno, conforme verificado no Modelo Digital de Elevação (MDE). Por outro lado, as áreas de menor vigor são destinadas historicamente ao uso com pastagem de inverno e presença do gado.

Os resultados evidenciam a relação entre a altitude, o uso da terra e a resposta espectral da cultura. As regiões mais baixas do relevo frequentemente apresentam maior limitação ambiental, seja por dinâmicas hídricas distintas ou características edáficas, fatores que foram observados pelas imagens de satélite (MENESES, 2022).

Figura 5: Mapa altimétrico e resultado por zonas de potenciais produtivo do talhão da casa



Fonte: Dos autores (2026).

4. Conclusão

Os resultados deste estudo demonstram que a utilização de composições de NDVI é uma ferramenta essencial para a delimitação de zonas de manejo. Embora a predição não reproduza a produtividade exata pixel a pixel, o método observa com precisão o gradiente produtivo da lavoura (concordância exata de 52,1% e SSIM de 0,67). O principal resultado obtido por essa metodologia é a baixa ausência de concordância (1,57%), o que indica que o modelo raramente classifica os potenciais produtivos extremos de maneira inversa.

O trabalho apresenta uma metodologia robusta que pode ser aplicada tanto em áreas validadas por monitores de colheita quanto em áreas desprovidas desse recurso. A relação espacial com a topografia do terreno, observada no segundo talhão, atesta sua viabilidade prática comercial,

No entanto, algumas limitações devem ser consideradas. A resolução espacial do satélite Sentinel-2 (10 m), embora adequada para a escala de talhão, pode apresentar limitações na detecção de variações em microescala. A validação em campo foi restrita à safra de 2024/2025. Portanto, recomenda-se para trabalhos futuros a avaliação com várias safras e a integração do zoneamento espectral com variáveis biofísicas, edáficas e geofísicas de alta resolução para aprimorar a robustez preditiva.

Por fim, conclui-se que a integração de séries temporais de satélites com dados de produtividade é uma abordagem consolidada para o manejo de ambientes de produção e contribui diretamente para a otimização de recursos e maior precisão no cultivo de grãos.

REFERÊNCIAS

- ALMEIDA, T. S. dos; FONTANA, D. C. Desempenho dos índices de vegetação NDVI e PVI para a cultura da soja em diferentes condições hídricas e de sistema de manejo do solo. Anais XIV Simpósio Brasileiro de Sensoriamento Remoto, Natal, Brasil, INPE p. 17-22, 2009.
- C., ROUSE, J. W., HAAS, R. H., SHELL, J. A., DEERING, D. W., HARLAN, J. C., ROUSE, J. W., ROUSE, J., HASS, R. H. Monitoring the vernal advancement and retrogradation (green wave effect) of natural vegetation. Greenbelt: NASA, 371p. 1974.
- CRUZ, G, L da; JUNIOR, E, F. Trajetória e importância econômica da soja para o Brasil. **Editora Poisson**. Ciências Rurais no século XXI – V.7. 2025.
- FORMAGGIO, A. R; SANCHES, I. D. Sensoriamento Remoto em Agricultura. São José dos Campos, SP: Oficina de Textos, 2017.
- MELOS, N, D. Uso de análise multivariada para identificação de zonas de potenciais produtivos agrícolas. Dissertação (Pós-Graduação em Agricultura de Precisão) - Universidade Federal de Santa Maria. Santa Maria, p.118.2023.
- MENESES, B, A. Balanço da radiação fotossinteticamente ativa na soja e o uso de dados espectrais, oriundos de sensores remotos, para estimativa da produtividade primária líquida. Dissertação (Pós-Graduação em Fitotecnia) - Universidade Federal do Rio Grande do Sul. Porto Alegre, p.81.2021.
- MENESES, G, P, G. Índice de vegetação, altitude e produtividade de grãos na definição de zonas de manejo. Trabalho de Conclusão de Curso (Graduação em Agronomia) - Universidade Federal de Uberlândia. Uberlândia, p.18.2022.
- MOLIN, J, P. Modelos Multiespectrais para a estimativa de produtividade da cultura da soja (Glycine max L. Departamento de Engenharia Rural, ESALQ/USP. Piracicaba. p. 12, 2002.
- OLIVEIRA, V, H, D de. Unidades de gestão diferenciada por meio de índices de vegetação e mapas de produtividade. Dissertação (Pós-Graduação em Engenharia Agrícola) - Universidade Estadual do Oeste do Paraná. Cascavel, p.69.2021.
- PONZONI, F. J; SHIMABUKURO, Y. E; KUPLICH, T. M. Sensoriamento Remoto da vegetação. São José dos Campos, SP: Oficina de Textos, 2012.
- RIO GRANDE DO SUL. Secretaria de Planejamento, Governança e Gestão. *Clima, temperatura e precipitação*. In: Atlas Socioeconômico do Rio Grande do Sul. 8. ed. Porto Alegre: Secretaria de Planejamento, Governança e Gestão, 2024a. Disponível em: <https://atlassocioeconomico.rs.gov.br/clima-temperatura-e-precipitacao>. Acesso em: 14 jun. 2026.
- RIO GRANDE DO SUL. Secretaria de Planejamento, Governança e Gestão. *Tipos de solo*. In: Atlas Socioeconômico do Rio Grande do Sul. 8. ed. Porto Alegre: Secretaria de Planejamento, Governança e Gestão, 2024b. Disponível em: <https://atlassocioeconomico.rs.gov.br/solos>. Acesso em: 14 jun. 2026.
- SANTOS, M, C, L. Modelos multiespectrais para a estimativa de produtividade da cultura da soja (glycine max l). Trabalho de Conclusão de Curso (Graduação em Agrimensura e Cartográfica) - Universidade Federal de Uberlândia. Uberlândia, p.50.2025.

UNIAGRO NEGÓCIOS. Semente de soja Brasmax - BMX Zeus 55I57 RSF IPRO. Garibaldi: Uniagro Negócios, s.d. Disponível em: <https://www.uniagronegocios.com.br/produtos/detalhe/semente-de-soja-brasmax-bmx-zeus-55i57-rsf-ipro>. Acesso em: 14 jun. 2026.

VEIVERBERG, K, T. Delineamento de zonas potenciais para manejo diferenciado em nível de talhão a partir de dados de colheita e de imagens de satélite. Dissertação (Pós-Graduação em Agricultura de Precisão) - Universidade Federal de Santa Maria. Santa Maria, p.55.2016.

ZHAO, Qiang; YU, Le; LI, Xuecao; PENG, Dailiang; ZHANG, Youguang; GONG, Peng. Progresso e tendências na aplicação do Google Earth e do Google Earth Engine. **MDPI**. EUA. 2021. Disponível em: <https://www.mdpi.com/2072-4292/13/18/3778>. Acesso em: 14 de junho de 2026.