



Índices de vegetação e sua correlação com a produtividade da cultura da soja em área irrigada e de sequeiro

Henrique SLAIFFER ¹, Eduardo Leonel BOTTEGA ², Zanandra Boff de OLIVEIRA ²,
Ezequiel SARETTA ²

¹ Irridrop Irrigação, Revenda Valley, Passo Fundo, RS, Brasil.

² Universidade Federal de Santa Maria, Cachoeira do Sul, RS, Brasil.

*E-mail: eduardo.bottega@uol.com.br

Submetido em: 21/10/2024; Aceito em: 27/08/2025; Publicado em: 01/09/2025.

RESUMO: Este estudo objetivou mapear as respostas espetrais da cultura da soja durante seu ciclo de desenvolvimento, a partir do cálculo dos índices de vegetação NDVI, NDMI e NDRE, em lavoura irrigada e em cultivo de sequeiro, em ano agrícola com déficit hídrico, em Cachoeira do Sul - RS; além disso, mapear a variabilidade espacial da produtividade de soja em lavouras irrigada e sequeiro; e, avaliar a correlação espacial entre os índices de vegetação com a produtividade de soja. Os índices de vegetação foram obtidos na plataforma Crop Monitoring. O mapeamento da produtividade da soja foi realizado por uma colhedora de grãos com sistema de geoposicionamento. As análises estatísticas e geoestatísticas foram realizadas nos programas computacionais Statistic e QGIS 3.28. Todos os índices de vegetação apresentaram correlação espacial significativa com a produtividade da soja. No cultivo em sequeiro, os índices NDVI, NDMI e NDRE apresentaram correlação positiva e significativa com a produtividade de soja aos 43 e 48 dias após a semeadura. No cultivo irrigado, os índices NDVI, NDMI e NDRE apresentaram correlação positiva e significativa com a produtividade de soja, aos 128 dias após a semeadura.

Palavras-chave: agricultura de precisão; sensoriamento remoto; *Glycine max* L.; NDVI; NDRE.

Vegetation index and its correlation with soybean yield in irrigated and rainfed areas

ABSTRACT: This study aimed to map the spectral responses of soybean crops during their development cycle, based on the calculation of the vegetation indices NDVI, NDMI, and NDRE, in irrigated and dryland crops, in a water-deficit agricultural year, in Cachoeira do Sul, Rio Grande do Sul. Furthermore, to map the spatial variability of soybean productivity in irrigated and dryland crops, and to evaluate the spatial correlation between vegetation indices and soybean productivity. The vegetation indices were obtained from the Crop Monitoring platform. Soybean productivity mapping was performed using a grain harvester with a geopositioning system. Statistical and geostatistical analyses were performed using the software Statistic and QGIS 3.28. All vegetation indices showed significant spatial correlation with soybean productivity. In dryland cultivation, the NDVI, NDMI, and NDRE indices showed a positive and significant correlation with soybean yield at 43 and 48 days after sowing. In irrigated cultivation, the NDVI, NDMI, and NDRE indices showed a positive and significant correlation with soybean yield at 128 days after sowing.

Keywords: precision agriculture; remote sensing; *Glycine max* L.; NDVI; NDRE.

1. INTRODUÇÃO

A soja (*Glycine max* L.) é uma das principais culturas cultivadas no mundo, com grande representação no cenário econômico e expressivo impacto no agronegócio brasileiro. É cultivada especialmente nas regiões Centro-Oeste e Sul do Brasil, e é destaque da agricultura nacional assim como na balança comercial, sendo a principal exportação do agronegócio brasileiro. Entre 1985 e 2020, o cultivo da soja superou 4,3% da área total de agricultura mapeada no Brasil. Além disso, a produção nacional chegou a 147,3 milhões de toneladas e a produtividade média da cultura ultrapassou 3.200 kg ha⁻¹ na safra 2023/2024 (Companhia Nacional de Abastecimento – CONAB, 2024). No Rio Grande do Sul, estimou-se 6,68 milhões de hectares de área plantada com produção esperada de 22,24 milhões de toneladas

(EMATER, 2024). Até 2021, cerca de 190 mil ha eram, contabilizando 3.208 sistemas de irrigação por pivô central, localizados principalmente nas regiões do Planalto Médio, Alto Uruguai e Missões (MARTINS et al., 2021).

Após a instalação do pivô central, um dos grandes desafios enfrentados pelo agricultor irrigante é o uso eficiente da água. Isso ocorre por alguns motivos, podendo citar a falta de informação ou mesmo de treinamento adequado para o manuseio do sistema, ou ainda a falta de conhecimento sobre a variação dos atributos relacionados com o armazenamento de água no solo. Nesse cenário, ferramentas da agricultura de precisão podem ser utilizadas para orientar o manejo da água de irrigação, reduzindo os custos, fornecendo água na quantidade adequada e no momento correto para cada local da lavoura.

Considerando que a planta é o principal sensor indicativo da qualidade do meio onde está inserida, o monitoramento de seu crescimento pode indicar variações existentes no campo de produção. Para uma análise quantitativa da biomassa verde e dos respectivos parâmetros de crescimento e desenvolvimento da vegetação, podem ser aplicados os índices de vegetação. O sensoriamento remoto associado a esses índices pode auxiliar no aumento da produção da soja, quando utilizado como ferramenta de monitoramento de desenvolvimento (SILVA et al., 2023).

Estes índices são produtos da aplicação das técnicas de sensoriamento remoto e buscam relacionar as informações captadas pelos sensores com a vegetação presente na área imageada. Alguns índices de vegetação empregados na agricultura são o Índice de Vegetação por Diferença Normalizada (NDVI), o Índice de Umidade por Diferença Normalizada (NDMI) e o Índice da Borda do Vermelho de Diferença Normalizada (NDRE).

O NDVI é um dos mais utilizados para monitoramento agrícola, devido à sua correlação com a vegetação, já que utiliza bandas espectrais obtidas no vermelho e infravermelho próximo, que possuem significativa correlação com o verde ou porções fotossinteticamente ativas das plantas. Este índice apresenta uma forte correlação linear com o crescimento das culturas (SHIRATSUCHI et al., 2014).

O NDMI é capaz de quantificar o conteúdo de água nos tecidos esponjosos do mesófilo do dossel da planta em ecossistemas de alta biomassa (DAS et al., 2022). A interpretação do seu valor absoluto permite reconhecer imediatamente locais sob estresse hídrico.

O NDRE apresentou melhor capacidade de expressar a atividade fotossintética do dossel nos estágios fenológicos mais avançados (fase reprodutiva). Seu mapeamento possibilita a indicação de locais que podem estar sendo atingidos pelo tráfego intenso de máquinas agrícolas, falhas populacionais, presença de doenças ou pragas em final de ciclo. Ou ainda, encontrar locais em que os sistemas de irrigação não estejam fornecendo água em quantidade adequada para o desenvolvimento final do ciclo da cultura (SAMPAIO et al., 2021).

Considerando a importância da cultura da soja e do uso racional da água, o presente estudo teve por objetivos: mapear a resposta espectral da cultura durante seu ciclo de desenvolvimento, a partir do cálculo dos índices de vegetação NDVI, NDMI e NDRE, em lavoura irrigada e em cultivo de sequeiro, para um ano agrícola considerado com déficit hídrico; mapear a variabilidade espacial da produtividade em lavouras irrigada e sequeiro; e avaliar a correlação espacial entre os índices de vegetação com a produtividade.

2. MATERIAIS E MÉTODOS

O estudo foi desenvolvido no município de Cachoeira do Sul, região central do estado do Rio Grande do Sul, em uma propriedade destinada à produção de grãos, com coordenadas centrais $30^{\circ}21'58.0''$ de latitude sul e $53^{\circ}01'20.8''$ de longitude oeste, com altitude média de 140 m. O solo da região foi classificado como Argissolo Vermelho (EMBRAPA, 2013). O clima da região é classificado como subtropical úmido com verão quente (Cfa), com temperatura média anual de 20°C e precipitação média de 1500 mm no ano (ALVARES et al., 2013).

Foram utilizados dois talhões de cultivo da propriedade, um irrigado sob pivô central (Figura 1A) e outro sem

irrigação (Figura 1B). Em cada talhão foi estabelecida uma grade amostral com pontos espaçados em 50 m na linha e 75 m na entrelinha, gerada no Sistema de Informação Geográfica Quantum Gis (QGIS Development Team, 2020), versão 3.10.11 (A Coruña), utilizando a ferramenta *Vetor >>> Investigar >>> Criar grade*. A área do pivô possuía 38 ha, com 95 pontos amostrais, e a de sequeiro 31,7 ha e 80 pontos amostrais.

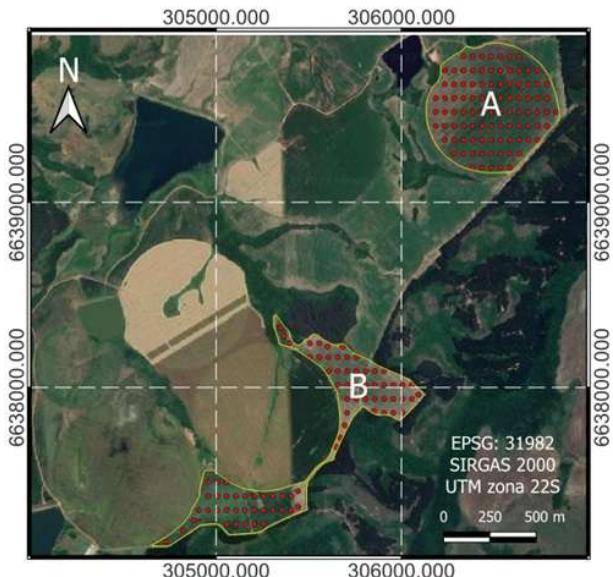


Figura 1. Polígonos delimitadores das áreas de estudo e a grade de pontos amostrais.

Figure 1. Polygons delimiting the study areas and the grid of sampling points.

A cultivar semeada foi a Brasmax Compacta IPRO, com a tecnologia Intacta RR2 PRO ciclo tardio (148 dias), grupo de maturação 6.5 e peso de mil grãos de 177 g. Como características principais, possui um alto potencial de ramificação aliado a um alto teto produtivo, sendo indicada para ambientes de alta tecnologia (BRASMAX, 2023). Na área irrigada, a semeadura ocorreu no dia 04/11/2020 e na área de sequeiro, no dia 05/11/2020. A semeadura da soja foi realizada sob resteva de trigo, cultivado como cultura antecessora em ambas as áreas, e a população de plantas adotada foi de 220 mil plantas por hectare.

Os tratos culturais empregados nas áreas seguiram as recomendações agronômicas para o cultivo da cultura da soja. O manejo da irrigação no pivô foi conduzido pela empresa Irriga Global, que presta consultoria para a propriedade. Segundo relatório fornecido pela empresa, durante o ciclo da cultura da soja foram realizadas seis visitas, sendo recomendadas aplicações de lâminas de irrigação equivalentes a 14,2 mm, nas seguintes frequências e meses do ano agrícola estudado: 02 irrigações em dezembro de 2020, 03 irrigações em janeiro, 03 irrigações em fevereiro e 03 irrigações em março de 2021.

A colheita foi realizada entre os dias 11/04/2021 e 13/04/2021 (sequeiro), e de 14/04/2021 a 15/04/2021 (irrigada), utilizando uma colhedora automotriz da marca New Holland, modelo CR 9060. A colhedora estava equipada com o monitor IntelliViewTM IV, para o mapeamento e o monitoramento de produtividade e detecção de umidade dos grãos colhidos.

Os dados obtidos pelo sistema sensor da colhedora foram filtrados para remoção de possíveis valores discrepantes

(outliers). Os valores outliers são comuns em mapas de colheita, eles representam pontos que apresentam valores altos ou baixos em relação à distribuição dos dados. Esse tipo de dado, no mapeamento da produtividade de grãos, é ocasionado devido a erros de sensores (falhas de calibração ou desgaste em sensores de colhedoras podem gerar registros incorretos de produtividade), problemas de georreferenciamento (atrasos no sinal do GPS ou falhas na sincronização entre fluxo de grãos e posição podem deslocar ou distorcer dados) e variações operacionais (mudanças bruscas na velocidade da colhedora, curvas fechadas, paradas e reinícios de operação podem produzir leituras anômalas).

A filtragem dos dados de produtividade foi realizada utilizando-se o programa computacional MapFilter (MALDANER et al., 2022). O software executa a filtragem espacial dos dados através de uma análise global e uma análise local isotrópica e anisotrópica, considerando os valores da vizinhança. Os dados são classificados como consistentes, inadequados (fora do intervalo definido) ou duvidosos. Cada talhão foi filtrado utilizando um raio de busca de 10 metros e um coeficiente de variação de 10% para a média. Pontos identificados como duvidosos ou fora do intervalo definido foram removidos da base de dados.

O mapeamento dos índices de vegetação foi realizado utilizando as ferramentas disponíveis no programa Crop Monitoring. Foram gerados mapas representativos do período de novembro de 2020 até abril de 2021, de forma a capturar o comportamento espectral do dossel de plantas durante seu período de desenvolvimento. Apenas imagens com menos de 30% de cobertura por nuvens foram utilizadas. O programa opera com imagens de resolução de 10 metros do satélite Sentinel 2, com atualizações regulares a cada quatro a seis dias, permitindo o download do mapa do índice de vegetação desejado. As imagens são pré-processadas pela plataforma, que realiza correções radiométricas e atmosféricas (CROP MONITORING, 2024).

O NDVI foi calculado utilizando a Equação 1, proposta por Jensen (1996). Os valores de NDVI podem variar de -1 a 1, sendo que valores próximos de 1 indicam a presença de vegetação fotossinteticamente ativa e valores menores ou próximos de zero indicam a presença de solo exposto (ROUSE et al., 1974).

$$NDVI = \frac{NIR-R}{NIR+R} \quad (01)$$

em que: NIR é a refletância no comprimento de onda correspondente ao infravermelho próximo (0,76 a 0,90 μm); R é a refletância no comprimento de onda correspondente ao vermelho (0,63 a 0,69 μm).

Para o cálculo do NDMI, foi utilizada a Equação 2, proposta por Gao (1996). Seus valores podem variar entre -1 e 1, sendo que cada valor corresponde a uma situação agronômica diferente, independentemente da cultura (CROP MONITORING, 2024).

$$NDMI = \frac{NIR-SWIR}{NIR+SWIR} \quad (02)$$

em que: SWIR é a refletância na banda do infravermelho de ondas curtas (1,3 a 2,5 μm).

Por fim, o NDRE foi calculado a partir da Equação 3, proposta por Barnes et al. (2000).

$$NDRE = \frac{NIR-RedEdg}{NIR+RedEdge} \quad (03)$$

em que: RedEdge é a refletância na banda da borda do vermelho (0,715 μm).

Na escala padrão, os valores de NDRE variam de -1 a +1. Valores de -1 a 0 indicam solo descoberto ou uma cultura em desenvolvimento, e valores de 0,1 a +1 são indicativos de culturas saudáveis, e em estágios fenológicos mais avançados (CROP MONITORING, 2024).

O banco de dados utilizado nas análises estatísticas descritivas e análise de correlação de Pearson foi construído em planilha Microsoft Excel. Para ambas as condições irrigadas e secas, foram estruturadas pastas de trabalho, onde cada ponto amostral da grade (id) foi associado às seguintes informações: longitude (m), latitude (m), produtividade de soja (Mg ha⁻¹), valores de NDVI, NDMI e NDRE para as datas com imagens não nubladas (cobertura de nuvens inferior a 30%).

Os mapas de NDVI, NDMI e NDRE, gerados no Crop Monitoring, foram salvos em arquivos *Tag Image File Format* (.TIFF) e posteriormente carregados no QGIS. Após filtrados, os dados de produtividade também foram trabalhados no QGIS.

No tratamento espacial dos dados de produtividade, em um primeiro momento, foi calculado o índice de Moran, que se trata de uma estatística que avalia o grau de autocorrelação espacial do conjunto de dados, indicando ou não a existência de variabilidade espacial. Uma vez significativo esse índice, procedeu-se à modelagem da variabilidade espacial da produtividade a partir do ajuste de semivariogramas, para ambas as análises foi utilizado o plugin Smart-Map (PEREIRA et al., 2022). O mesmo possibilita a predição e o mapeamento de atributos do solo e das plantas em locais não amostrados, com interpolação dos dados utilizando Krigagem Ordinária e técnicas de Machine Learning por meio do Support Vector Machine (SVM). Sua interação com o QGIS se dá a partir de layers (Shapefile e GeoTIFF).

Uma vez construídos os mapas da variabilidade espacial da produtividade e dos índices de vegetação, obteve-se o valor dessas variáveis nos pontos das grades amostrais (Figura 1), com sobreposição das camadas. A extração dos valores *raster* das camadas foi realizada utilizando o plug-in *Point Sampling Tool*. O arquivo contendo os valores das variáveis foi salvo no formato *Comma separate values* (.csv), para posterior inserção na planilha.

Os resultados foram analisados por estatística descritiva, utilizando-se o programa estatístico Statistica, versão 7. Identificaram-se os valores de mínimo e máximo e calcularam-se a média, o desvio padrão e o coeficiente de variação.

Foi calculado o coeficiente de correlação de Pearson ($p<0,05$) entre os índices de vegetação e a produtividade, considerando os valores destas variáveis em cada um dos pontos das grades amostrais apresentadas na Figura 1. O coeficiente é uma medida adimensional que pode assumir valores entre -1 e +1. O mesmo mede a intensidade e a direção de relações lineares. A intensidade consiste no grau de relacionamento entre as duas variáveis, sendo que quanto mais próximo dos extremos (-1 a +1) mais forte a correlação. A direção diz respeito ao tipo de correlação, sendo que a correlação positiva representa que os valores altos de uma variável correspondem a valores altos da outra variável, e a correlação negativa representa que valores altos de uma das variáveis correspondem a valores baixos de outra.

3. RESULTADOS

Na Figura 2 são apresentados os gráficos de precipitação pluviométrica acumulada para os meses de outubro de 2020 a março de 2021 (Figura 2a) e da precipitação pluviométrica diária (Figura 2b) para os meses de menor precipitação (novembro e dezembro de 2020 e fevereiro de 2021). Conforme apresentado na Figura 2b, a primeira chuva após a semeadura da cultura da soja ocorreu em 15/11/2020, com uma altura de 3 mm. Para garantir uma boa germinação, a semente da soja necessita absorver, no mínimo, 50% do seu peso. Nessa fase, o conteúdo de água no solo deve permanecer entre 50% e 85% do total máximo disponível. Conforme a planta vai se desenvolvendo, a necessidade de água vai aumentando, atingindo o máximo durante a floração-enchimento de grãos (7 a 8 mm dia⁻¹) e começa a decrescer depois deste período.

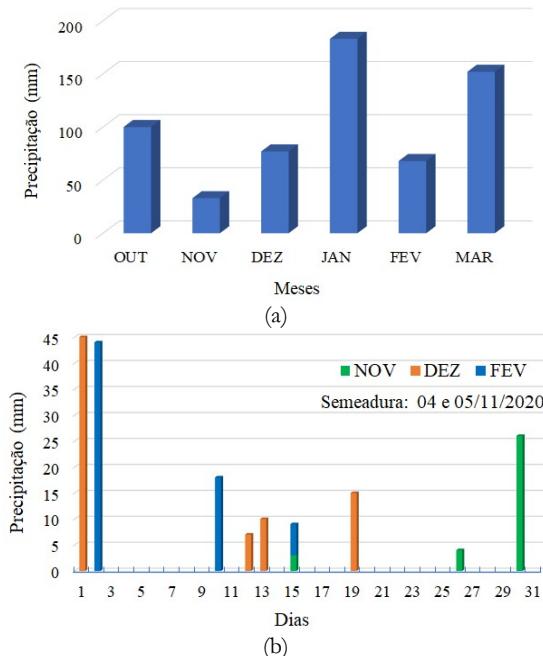


Figura 2. Precipitação mensal entre outubro de 2020 a março de 2021 (a) e precipitação diária para novembro e dezembro de 2020 e fevereiro de 2021.

Figure 2. Monthly rainfall from October 2020 to March 2021 (a) and daily rainfall for November and December 2020 and February 2021.

A necessidade total de água para a cultura, para a obtenção do máximo rendimento, varia entre 450 a 800 mm ciclo⁻¹, dependendo das condições climáticas, manejo da cultura e duração de seu ciclo (FARIAS et al., 2007). Na safra 2020/21 houve predomínio de La Niña, com chuvas abaixo da média, além da irregular distribuição conforme se observa na Figura 2b. Ocorreram intervalos com mais de 10 dias sem chuva nos meses analisados.

Os dados de produtividade gerados pelo sistema de mapeamento da colhedora apresentaram pontos com valores duvidosos e fora do intervalo definido. Na Figura 3 é apresentada a visualização de plotagem dos pontos de produtividade pelo software MapFilter, indicando os pontos consistentes (em verde), duvidosos (em vermelho) e fora do intervalo definido (em amarelo).

A produtividade de soja apresentou variabilidade espacial em ambas as condições mapeadas. Na Figura 4 são apresentados os mapas referentes aos indicadores e mapas temáticos de variabilidade espacial da produtividade. O índice de Moran apresentou valor positivo para ambas as áreas,

ilustrando a correlação espacial da produtividade, com diferença significativa ($p < 0,05$).

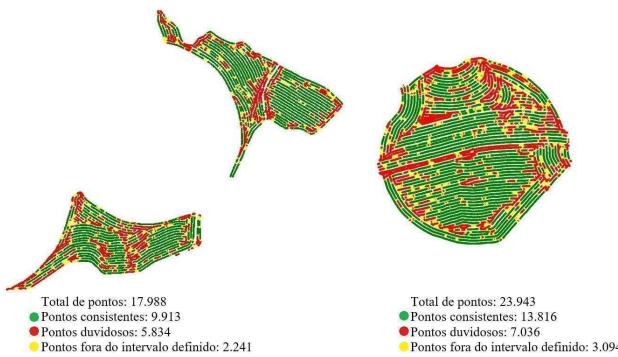


Figura 3. Mapas ilustrativos da filtragem dos dados de produtividade de soja para a área de sequeiro (esquerda) e para a área irrigada por pivô central (direita).

Figure 3. Illustrated maps of the filtering of soybean yield data for the rainfed area (left) and the center pivot irrigated area (right).

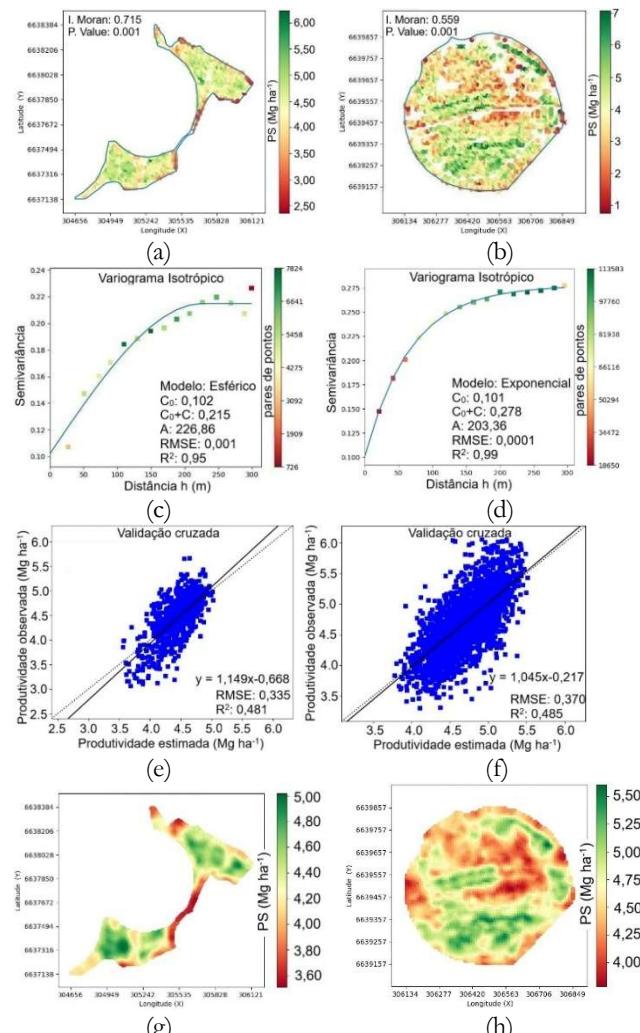


Figura 4. Mapas referentes ao índice de Moran, ilustrativo da autocorrelação espacial da produtividade de soja para as áreas de sequeiro (a) e irrigado (b), semivariogramas ajustados para as áreas de sequeiro (c) e irrigado (d), gráficos de validação cruzada para as áreas de sequeiro (e) e irrigado (f) e mapas temáticos de variabilidade espacial da produtividade de soja ($Mg ha^{-1}$) para as áreas de sequeiro (g) e irrigado (h).

Figure 4. Moran index maps, illustrating the spatial autocorrelation of soybean yield for rainfed (a) and irrigated (b) areas, semivariograms adjusted for rainfed (c) and irrigated (d) areas, cross-validation graphs for the rainfed (e) and irrigated (f) areas and thematic maps of spatial variability of soybean yield ($Mg ha^{-1}$) for the rainfed (g) and irrigated (h) areas.

Na Figura 5 são apresentados os gráficos do comportamento médio do NDVI (a), NDMI (b) e NDRE (c) na área de sequeiro ($_S$) e na área irrigada ($_I$), durante o ciclo de desenvolvimento da cultura da soja. Foi observado que, até o final de fevereiro, os maiores valores médios foram para a área irrigada. Posteriormente, o comportamento se inverteu. O aumento nos valores dos índices na área de sequeiro pode ter sido resultante da retomada de desenvolvimento da soja, provocada pela disponibilidade de água resultante das chuvas ocorridas no mês de março. Os valores máximos estimados foram antecipados em cerca de 10 dias na área irrigada em relação ao sequeiro.

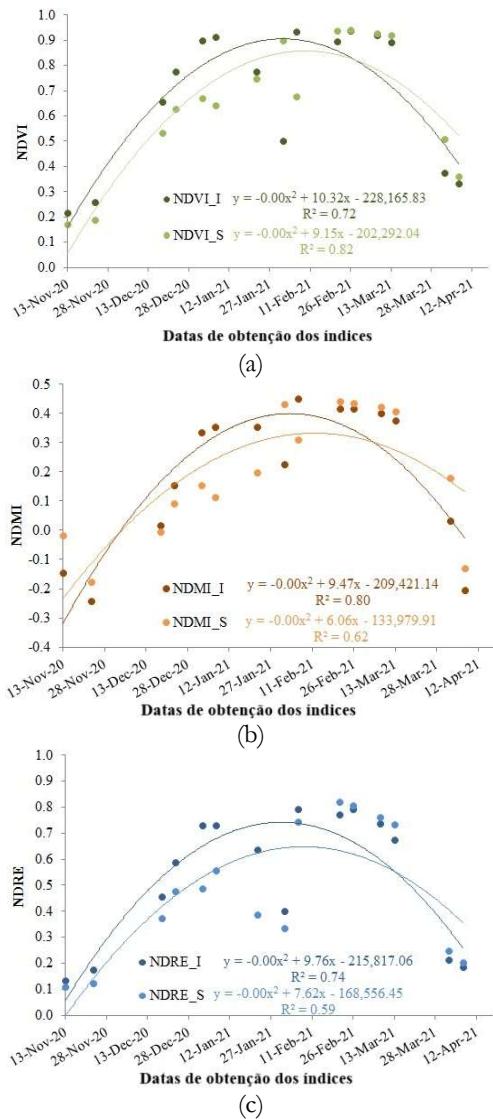


Figura 5. Valores médios dos índices de vegetação NDVI (a), NDMI (b) e NDRE (c) nos cultivos de sequeiro (S) e irrigado (I), durante o ciclo da cultura da soja.

Figure 5. Average values of the vegetation index NDVI (a), NDMI (b) and NDRE (c) in rainfed (S) and irrigated (I) crops, during the soybean crop cycle.

Na Tabela 1 é apresentado o resultado da análise estatística descritiva da produtividade de soja ($PS, \text{Mg ha}^{-1}$), NDVI, NDMI e NDRE para o cultivo da soja em sequeiro e irrigado por pivô central. O valor médio, para todas as variáveis estudadas, apresentou-se maior para o cultivo irrigado quando comparado ao cultivo em sequeiro, conforme ilustrado na Figura 5. Os menores coeficientes de variação ($CV\%$) foram observados para os índices de

vegetação calculados para o cultivo irrigado, indicando que, neste cultivo, houve menor dispersão relativa do conjunto de dados, ou seja, maior homogeneidade no desenvolvimento da cultura, provavelmente justificada pelo suprimento hídrico via irrigação, em períodos de déficit de água.

Tabela 1. Estatística descritiva dos valores de produtividade de soja ($PS, \text{Mg ha}^{-1}$) e dos índices de vegetação NDVI, NDMI e NDRE para o cultivo em sequeiro e irrigado.

Table 1. Descriptive statistics of soybean yield values ($PS, \text{Mg ha}^{-1}$) and vegetation index NDVI, NDMI and NDRE for rainfed and irrigated cultivation.

Variáveis	Mín.	Média	Máx.	Desvio Padrão	CV (%)
Cultivo em sequeiro					
PS	3,59	4,41	5,00	0,27	6,09
NDVI	0,00	0,65	0,96	0,06	9,14
NDMI	-0,25	0,19	0,57	0,04	18,66
NDRE	-0,09	0,50	0,86	0,05	10,78
Cultivo irrigado					
PS	3,96	4,64	5,40	0,34	7,33
NDVI	0,02	0,69	0,95	0,05	7,13
NDMI	-0,34	0,20	0,51	0,03	16,31
NDRE	-0,18	0,53	0,83	0,04	7,50

Na Tabela 2 são apresentados os coeficientes de correlação de Pearson entre a produtividade de soja e os índices de vegetação, para as diferentes datas de desenvolvimento da cultura da soja.

4. DISCUSSÃO

Ao se trabalhar com dados de produtividade, oriundos de sistemas de mapeamento embarcados em colhedoras combinadas de grãos, a filtragem é importante, pois garante que os mapas gerados representam, de forma fiel, a realidade observada no campo. As falhas presentes em mapas podem ser ocasionadas por erros de posicionamento, produtividades improvavelmente altas e baixas, largura da plataforma incorreta, umidade de grãos, distância entre pontos, intervalo de enchimento e limites estatísticos para dados discrepantes (MENEGATTI; MOLIN, 2004).

Estudos conduzidos por Maldaner et al. (2022), Spekken et al. (2013) e Vega et al. (2019) buscaram desenvolver e testar filtros para identificar e excluir outliers espaciais no conjunto de dados espaciais de alta densidade. Dependendo do filtro utilizado, é possível diminuir o efeito pepita e melhorar a caracterização de variabilidade.

Maldaner et al. (2022) utilizaram um filtro composto por uma análise de dados globais, anisotrópica e anisotrópica local considerando valores da vizinhança. A mediana para classificar um determinado ponto espacial no conjunto de dados apresentou o melhor desempenho na remoção de dados outliers. No script elaborado por Vega et al. (2019), utilizou-se o índice de Moran de autocorrelação espacial e o gráfico de Moran para remoção dos dados discrepantes. Já Spekken et al. (2013) desenvolveram um software genérico capaz de excluir pontos inconsistentes, enfatizando que a filtragem deve ser realizada com boa definição dos limites superiores e inferiores de identificação das outliers, para que não haja perda de dados consistentes.

Portanto, através da viabilidade da remoção automatizada de erros do monitor de produção, fica claro o seu benefício nas decisões de gerenciamento. Após filtragem dos dados, o Índice de Moran univariado indicou haver autocorrelação

espacial significativa para a produtividade de soja tanto no cultivo irrigado quanto em sequeiro (Figura 4a e 4b); portanto, houve variabilidade espacial.

Tabela 2. Índice de correlação de Pearson entre os valores de produtividade de soja (PS) e os índices de vegetação NDVI, NDMI e NDRE.

Table 2. Pearson correlation index between soybean yield (PS) and vegetation index NDVI, NDMI and NDRE.

Data	PS × NDVI	PS × NDMI	PS × NDRE
----- Sequeiro -----			
13nov2020	-0,06	-0,02	-0,02
23nov2020	-0,58*	-0,37*	-0,54*
18dez2020	0,57*	0,43*	0,53*
23dez2020	0,54*	0,47*	0,54*
28dez2020	0,24*	0,26*	0,23*
02jan2021	0,29*	0,22*	0,20
07jan2021	0,30*	0,27*	0,27*
06fev2021	0,00	0,06	0,07
16fev2021	-0,28*	-0,20	-0,26*
21fev2021	0,26*	0,06	0,29*
26fev2021	0,20	-0,01	0,26*
08mar2021	0,20	0,18	0,37*
13mar2021	0,21	0,16	0,26*
02abr2021	-0,12	-0,09	-0,42*
07abr2021	-0,30*	-0,25*	-0,40*
----- Irrigado -----			
13nov2020	-0,14	0,02	-0,17
23nov2020	0,19	0,03	0,02
18dez2020	0,34*	0,23*	0,28*
23dez2020	0,22*	0,18	0,18
02jan2021	0,21*	0,17	0,17
07jan2021	0,11	0,21*	0,16
22jan2021	-0,09	-0,06	-0,08
01fev2021	0,14	0,15	0,14
06fev2021	0,06	0,07	0,15
21fev2021	-0,13	-0,13	-0,13
26fev2021	0,03	-0,03	0,39*
08mar2021	0,52*	0,34*	0,56*
13mar2021	0,60*	0,48*	0,63*
02abr2021	0,34*	0,08	0,12
07abr2021	0,50*	0,45*	0,22*

*Coeficiente de correlação de Pearson significativo a 5% de probabilidade.

*Significant Pearson correlation coefficient at 5% probability.

O modelo teórico de semivariância, ajustado à variância empírica de produtividade observada no cultivo irrigado, foi o modelo esférico (Figura 4c, R^2 de 0,95), e o exponencial para sequeiro (Figura 4d, R^2 de 0,99). O modelo esférico indica uma maior mudança de dependência espacial com a distância. Já o modelo exponencial pressupõe pequena quantidade entre valores para pequenos intervalos (BOTTEGA et al. 2013). Trabalhos conduzidos por Vieira et al. (2010) e Montanari et al. (2011) encontraram ajustes de semivariogramas exponenciais quando estudaram a produtividade da soja, o que indica que o modelo exponencial pode ser utilizado para explicar o comportamento espacial dessa variável.

O valor do alcance obtido para os modelos ajustados foi de 226,86 metros para a produtividade de soja no cultivo em sequeiro, e 203,36 metros para o irrigado. Esses valores são superiores à menor distância entre pontos amostrais, 50 m, por isso as interpolações por krigagem ordinária podem ser

consideradas confiáveis. Segundo Corá et al. (2004), o valor do alcance determina o número de valores usados na interpolação, portanto, pode influenciar na qualidade das estimativas.

Isso foi verificado pelo RMSE obtido na análise de validação cruzada, que fornece uma medida da magnitude média dos erros de previsão em relação às unidades da variável de interesse (quanto mais próximo de zero, mais preciso é o modelo). Neste estudo foi observado RMSE de 0,001 no cultivo de sequeiro e 0,0001 no cultivo irrigado, indicando boa precisão nas previsões de valores em locais não amostrados.

Foi observado que os valores de NDVI variam em função do desenvolvimento da cultura (Figura 5a). Valores próximos de 0 foram identificados nas fases iniciais de desenvolvimento, em virtude da pequena área foliar. Consequentemente, resulta em baixa refletância nas imagens dos dias 13/11/20 a 23/11/20, apresentando uma coloração em tons mais avermelhados. Os maiores valores do NDVI foram obtidos entre 93 e 123 dias após semeadura, representados pelas imagens dos dias 06/02/21 a 08/03/21. Possivelmente a cultura estava no estádio reprodutivo, com elevada atividade fotossintética dessa cultivar (RODRIGUES et al., 2013).

Os resultados apresentados na Tabela 2 indicam que a correlação de Pearson se alterou ao longo do ciclo da soja, ou seja, o grau de relacionamento entre as duas variáveis. Coeficientes de correlação significativos entre o NDVI e a produtividade de soja em cultivo de sequeiro foram obtidos em nove das 15 datas estudadas. Entre o NDMI e o NDRE com a produtividade de soja, foram obtidos coeficientes significativos em sete e 12 datas, respectivamente, para as 15 datas estudadas. Entre esses valores significativos, para o NDVI e o NDMI, os meses de novembro de 2020 a janeiro de 2021 corresponderam à predominância de seis para sete eventos. Enquanto para o índice NDRE, sua predominância de eventos significativos se deu tanto no início, de novembro a dezembro, quanto a partir do mês de fevereiro de 2021.

Os maiores coeficientes de correlação (negativos e positivos) entre os índices e a produtividade ocorreram nas datas 23 de novembro, 18 e 23 de dezembro de 2020. De acordo com a classificação proposta por Callegari-Jacques (2003), são regulares, pois se situam na faixa entre 0,30 e 0,60. Em 23 de novembro de 2020, foi observado o coeficiente de correlação da produtividade com NDVI no valor de -0,58, com o NDMI de -0,37 e com o NDRE de -0,54, constituindo os extremos negativos. O maior coeficiente de correlação significativo positivo da produtividade da soja com o NDVI foi observado para 18 de dezembro de 2020, com valor de 0,57. Já para o NDMI e NDRE, 23 de dezembro de 2020, sendo os valores de 0,47 e 0,54, respectivamente.

Desses valores significativos dos índices, foi observada predominância de ocorrência em todos os índices no início do ciclo, no dia 18/12/2020, e no final, nos dias 08/03/2021 a 13/03/2021, períodos em que a cultura apresenta significativas mudanças na sua área foliar. O maior número de coeficientes significativos para sequeiro, inclusive negativos, especialmente para o início de desenvolvimento da cultura, 18 dias após a semeadura.

Para o cultivo irrigado, foi observada significância na correlação produtividade com NDVI em sete dos 15 períodos, enquanto para NDMI e NDRE foram cinco. Todos os coeficientes de correlação foram positivos, possivelmente pelo melhor estabelecimento do dossel de

plantas e, consequentemente, maior aporte de biomassa. Os maiores valores foram observados em 13/03/2021, 129 dias após a semeadura, nos valores de 0,60 para o NDVI, 0,48 para o NDMI e 0,63 para o NDRE (Tabela 2).

5. CONCLUSÕES

Os índices de vegetação NDVI, NDMI e NDRE apresentam variações espaciais nas áreas estudadas, durante o ciclo de desenvolvimento da cultura da soja, em cultivo irrigado e em cultivo em sequeiro.

Os maiores valores médios dos índices de vegetação estudados são observados para a resposta espectral da cultura da soja em cultivo irrigado.

A produtividade da cultura da soja apresenta variabilidade espacial em ambos os cultivos. Em sequeiro, o valor médio observado foi de 4,41 Mg ha⁻¹ e na área irrigada de 4,64 Mg ha⁻¹.

Todos os índices de vegetação estudados apresentam correlação espacial significativa com a variabilidade espacial na produtividade da cultura da soja, em cultivo irrigado e em cultivo em sequeiro.

No cultivo da soja em sequeiro, o maior valor de correlação significativa foi positivo observado entre o NDVI e a produtividade de soja (0,57), ocorrendo 43 dias após a semeadura. Para os índices NDMI e NDRE, estes valores foram de 0,47 e 0,54 respectivamente, observados em 48 dias após a semeadura.

No cultivo da soja irrigada, os maiores valores de correlação significativa também foram positivos, sendo os valores 0,60, 0,48 e 0,63 observados, respectivamente, para a correlação da produtividade com os índices NDVI, NDMI e NDRE, 128 dias após a semeadura.

6. REFERÊNCIAS

ALVARES, C. A.; STAPE, J. L.; SENTELHAS, P. C.; GONCALVES, J. L. de M.; SPAROVEK, G. Köppen's climate classification map for Brazil. *Meteorologische Zeitschrift*, v. 22, n. 6, p. 711-728, 2013. <https://doi.org/10.1127/0941-2948/2013/0507>

BARNES, E. M.; CLARKE, T. R.; RICHARDS, S. E.; COLAIZZI, P. D.; HABERLAND, J.; KOSTRZEWSKI, M.; WALLER, P.; CHOI, C.; RILEY, E.; THOMPSON, T.; LASCANO, R. J.; LI, H.; MORAN, M. S. Coincident detection of crop water stress, nitrogen status and canopy density using ground-based multispectral data. In: INTERNATIONAL CONFERENCE ON PRECISION AGRICULTURE, 5th. *Proceedings...* Bloomington, 2000. 15p. Disponível em: <https://www.cabidigitallibrary.org/doi/full/10.5555/20023117563>. Acesso em: 13 Abr. 2023.

BRASMAX. **Brasmax Compacta IPRO**. 2023. Disponível em: <<https://brasmaxgenetica.com.br/cultivares/compactaipro>>. Acesso em: 13 Abr. 2023.

BOTTEGA, E. L.; QUEIROZ, D. M.; PINTO, F. A. C.; SOUZA, C. M. A. Variabilidade espacial de atributos do solo em sistema de semeadura direta com rotação de culturas no cerrado brasileiro. *Revista Ciência Agronômica*, v. 44, n. 1, p. 1-9, 2013. <https://doi.org/10.1590/S1806-66902013000100001>

CALLEGARI-JACQUES, S. M. Bioestatística: princípios e aplicações. Porto Alegre: Aramed, 2003. 255p.

CONAB_Companhia Nacional de Abastecimento. **Acompanhamento da safra brasileira de grãos**. Brasília, DF, v.11 - Safra 2023/24, n.12 - Décimo segundo levantamento, p. 1-116, setembro 2024. Disponível em: <<https://www.gov.br/conab/pt-br/atuacao/informacoes-agropecuarias/safras/safra-de-graos/boletim-da-safra-de-graos/12o-levantamento-safra-2023-2024/boletim-da-safra-de-graos>>. Acesso em: 13 Set. 2024.

CORÁ, J. E.; ARAUJO, A. V.; PEREIRA, G. T.; BERALDO, J. M. G. Variabilidade espacial de atributos do solo para adoção do sistema de agricultura de precisão na cana-de-açúcar. *Revista Brasileira de Ciência do Solo*, v. 28, n. 6, p. 1013-1021, 2004. <https://doi.org/10.1590/S0100-06832004000600010>

CROP MONITORING. **Software de gestão agrícola**. Disponível em: <<https://crop-monitoring.eos.com/login>>. Acesso em: 13 Set. 2024.

DAS, P. B.; MUKUND, D. B.; SAROJ, K. B.; SUJOY, M.; BUDDOLLA, J.; SWARUP, S.; SANTA, R. J.; DIBYENDU, A.; SOUMIT, K. B.; KIRANMAY, S.; PRASHANT, K. S.; PUNEET, S. C. Shifting cultivation induced Burn area dynamics using ensemble approach in Northeast India. *Trees, Forests and People*. v. 7, e100183, 2022. <https://doi.org/10.1016/j.tfp.2021.100183>

EMBRAPA_Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária. **Sistema Brasileiro de Classificação de Solos**. 3. ed. Brasília: Embrapa Informação Tecnológica, 2013. 353p.

EMATER_Empresa de Assistência Técnica e Extensão Rural. **Emater/RS-Ascar divulga atualização da estimativa da safra de verão 2023/24**. Disponível em: <<https://www.agricultura.rs.gov.br/emater-rs-ascar-divulga-atualizacao-da-estimativa-da-safra-de-verao-2023-24#:~:text=Correspondente%20%C3%A0%20produtividade%20destas%20culturas,produtividade%20de%2070%2C83%25>>. Acesso em: 13 Set. 2024.

FARIAS, J. R. B.; NEPOMUCENO, A. L.; NEUMAIER, N. **Ecofisiologia da Soja**. Londrina: Embrapa Soja: 2007. 8 p. (Circular Técnica, 48)

GAO, B. C. NDWI: a normalized difference water index for remote sensing of vegetation liquid water from space. *Remote Sensing of Environment*, v. 58, n. 3, p. 257-266, 1996. [https://doi.org/10.1016/S0034-4257\(96\)00067-3](https://doi.org/10.1016/S0034-4257(96)00067-3)

JENSEN, J. R. **Introductory digital image processing: a remote sensing perspective**. 2. ed. Upper Saddle River: Prentice-Hall, 1996. 384p.

MALDANER, L. F.; MOLIN, J. P.; SPEKKEN, M. Methodology to filter out outliers in high spatial density data to improve maps reliability. *Scientia Agricola*, v. 79, n. 1, e20200178, 2022. <https://doi.org/10.1590/1678-992X-2020-0178>

MARTINS, J. D.; PETRY, M. T.; MANTOVANELLI, B. C.; FERRAZZA, C. M. Mapeamento da área irrigada por pivô central em nível de bacia hidrográfica no extremo sul do Brasil. *Irriga*, v. 1, n. 2, p. 281-296, 2021.

MENEGATTI, L. A. A.; MOLIN, J. P. Remoção de erros em mapas de produtividade via filtragem de dados brutos. *Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental*, v. 8, n. 1, p. 126-134, 2004.

MONTANARI, R.; LIMA, R. C.; BONINI, A. S.; MARQUES, L. S.; MINGUINI, R.; CARVALHO, M. P.; PAZ FERREIRO, J.; COSTA, N. R. Variabilidade dos

atributos de um latossolo vermelho sob plantio direto no cerrado brasileiro e produtividade da soja. **Cadernos Lab. Xeólico de Laxe**, v. 36, p. 219 - 237, 2011.

PEREIRA, G. W.; VALENTE, D. S. M.; QUEIROZ, D. M.; COELHO, A. L. F.; COSTA, M. M.; GRIFF, T. Smart-Map: An open-source QGIS plugin for digital mapping using machine learning techniques and ordinary kriging. **Agronomy**, v. 12, n. 6, e1350, 2022. <https://doi.org/10.3390/agronomy12061350>

QGIS Development Team, 2020. **QGIS Geographic Information System**. Open Source Geospatial Foundation Project. Disponível em: <http://qgis.osgeo.org>. Acesso em: 13 Set. 2024.

RODRIGUES, S. P.; FONTANA, D. C.; MORAES, O. L. L.; ROBERTI, D. R. NDVI e fluxo de CO₂ em lavoura de soja no Rio Grande do Sul. **Revista Brasileira de Meteorologia**, v. 28, n. 1, p. 95-104, 2013. <https://doi.org/10.1590/S0102-77862013000100011>

ROUSE, J. W.; HAAS, R. H.; SCHELL, J. A.; DEERING, D. W. Monitoring Vegetation Systems in the Great Plains with ERTS. NASA. **Goddard Space Flight Center 3d ERTS-1 Symposium**, v. 1, Sect. A. p. 309-317. 1974. Disponível em: <<https://ntrs.nasa.gov/citations/19740022614>>. Acesso em: 13 Set. 2024.

SAMPAIO, M. I. R.; KUNZ, A.; HILLEBRAND, F. L.; ZAMBERLAN, J. F.; IDALINO, F. D. Análise dos índices de vegetação NDVI e NDRE em imagens obtidas por meio de sensor embarcado em um RPAS para as culturas da soja (*Glycine max*) e milho (*Zea mays*) irrigados. **Revista Brasileira de Geomática**, v. 9, n. 4, p. 350-362, 2021. <http://dx.doi.org/10.3895/rbgeo.v9n4.14449>

SHIRATSUCHI, L. S.; BRANDAO, Z. N.; VICENTE, L. E.; VICTORIA, D. de C.; DUCATI, J. R.; OLIVEIRA, R. P. de; VILELA, M. de F. Sensoriamento remoto: conceitos básicos e aplicações na agricultura de precisão. In: BERNARDI, A. C. C.; NAIME, J. M.; RESENDE, A. V. et al. **Agricultura de precisão: resultados de um novo olhar**. Brasília: Embrapa, 2014. Disponível em: <<https://www.embrapa.br/busca-de-publicacoes/-/publicacao/1003275/sensoriamento-remoto-conceitos-basicos-e-aplicacoes-na-agricultura-de-precisao>>. Acesso em: 13 Set. 2024.

SILVA, E. C.; TRENTIN, C. B.; SILVA, I. S. Índices de vegetação NDVI e EVI no monitoramento do cultivo da soja no município de Querência - MT, safra 2020/2021. **Revista Contexto Geográfico**, v. 8, n. 15, p. 90-99, 2023. <https://doi.org/10.28998/contegeo.8i16.15694>

SPEKKEN, M.; ANSELMI, A. A.; MOLIN, J. P. A simple method for filtering spatial data. **Precision Agriculture**, v. 13, p. 259-266, 2013.

VEGA, A.; CÓRDOBA, M.; CASTRO-FRANCO, M.; BALZARINI, M. Protocol for automating error removal from yield maps. **Precision Agriculture**, v. 20, p. 1-15, 2019. <https://doi.org/10.1007/s11119-018-09632-8>

VIEIRA, S. R.; FILHO, O. G.; CHIBA, M. K.; MELLIS, E. V.; DECHEN, S. C. F.; MARIA, I. C. Variabilidade espacial dos teores foliares de nutrientes e da produtividade da soja em dois anos de cultivo em um latossolo vermelho. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v. 34, n. 5, p. 1503-1514, 2010. <https://doi.org/10.1590/S0100-06832010000500003>

Agradecimentos: À empresa ConnectFarm LTDA, que gentilmente forneceu parte do banco de dados utilizado nas análises deste estudo.

Contribuições dos autores: H.S.: coleta de dados, análises estatísticas, redação (original); E.L.B.: conceitualização, metodologia, supervisão, análises estatísticas, redação (original); Z.B.d.O.: metodologia, redação (revisão e edição); E.S.: metodologia, redação (revisão e edição). Todos os autores leram e concordaram com a versão publicada do manuscrito.

Financiamentos: Não Aplicável.

Disponibilidade de dados: Os dados desta pesquisa poderão ser obtidos via e-mail, mediante solicitação ao autor correspondente, contendo justificativa clara dos fins de uso dos mesmos.

Conflito de interesses: Os autores declaram não haver conflitos de interesses.



Copyright: © 2025 by the authors. This article is an Open-Access article distributed under the terms and conditions of the Creative Commons **Attribution-NonCommercial (CC BY-NC)** license (<https://creativecommons.org/licenses/by-nc/4.0/>).