sociedade & natureza

DOI: 10.14393/SN-v38-2026-83078
Recebido: 11 Junho, 2026 | Aceito: 09 Setembro, 2026 | Publicado: 26 Outubro, 2026

Artigos

Análise da Influência do Fenômeno ENOS no Índice de Vegetação por Diferença Normalizada (NDVI) em Lavouras de Soja de Jari, Rio Grande do Sul, Brasil

Analysis of the Influence of the ENSO Phenomenon on the Normalized Difference Vegetation Index (NDVI) in Soybean Fields of Jari, Rio Grande do Sul, Brazil

Eric Moises Beilfuss[1]
Carina Petsch[2]
Romario Trentin[3]

Palavras-chave
Expansão Agrícola
Monitoramento de Culturas
Precipitação
Sensoriamento Remoto

Resumo
Diante da expansão das lavouras de soja no Rio Grande do Sul (RS), é fundamental investigar os impactos causados pela estiagem associada a fenômenos climáticos como o *El Niño*-Oscilação Sul (ENOS). O objetivo desta pesquisa é analisar o comportamento do Índice de Vegetação por Diferença Normalizada (NDVI) em resposta à atuação do fenômeno ENOS, em lavouras de soja e culturas de entressafra no município de Jari (RS), entre outubro de 2022 e março de 2024. Metodologicamente, foram usadas imagens NDVI obtidas no *Google Earth Engine*, a partir de imagens Sentinel-2, dados pluviométricos e validação dos dados em campo. Os resultados indicaram variações consideráveis na precipitação mensal em relação à média histórica. Em 9 dos 18 meses analisados, as precipitações ficaram abaixo da média histórica mensal. A estiagem associada à *La Niña* comprometeu o desenvolvimento das plantas, sendo que em campo, foi observada a necessidade de replantio da soja em janeiro de 2023 e uso de técnicas de irrigação. O NDVI indicou que apenas 13% da área de cultura da soja apresentava plantas em estado muito saudável. O período de entressafra e a transição para um período mais chuvoso, associado ao *El Niño*, demonstrou predominância de classes de vegetação muito saudável, entre junho e outubro de 2023. Entre janeiro e março de 2024, mais de 90% das áreas foram classificadas como muito saudáveis, indicando que não houve escassez hídrica. Conclui-se que o ENOS teve influência nos valores de NDVI observados, portanto, é fundamental que sejam desenvolvidas estratégias de mitigação e adaptação à estiagem no município de Jari (RS).

Keywords
Agricultural Expansion
Crop Monitoring
Precipitation
Remote Sensing

Abstract
Given the expansion of soybean fields in Rio Grande do Sul (RS), it is essential to investigate the impacts caused by drought associated with climate phenomena such as the El Niño-Southern Oscillation (ENSO). This study aimed to analyze the behavior of the Normalized Difference Vegetation Index (NDVI) in response to ENSO activity in soybean fields and off-season crops in the municipality of Jari (RS) between October 2022 and March 2024. The methodology used rainfall data and NDVI images obtained through Google Earth Engine from Sentinel-2 imagery, with field validation of the data. The results indicated considerable variation in monthly precipitation relative to the historical average. In 9 of the 18 months analyzed, precipitation was below the historical monthly average. Drought associated with La Niña impaired plant development, and field observations showed the need for soybean replanting in January 2023 and the use of irrigation techniques. NDVI indicated that only 13% of the area under soybean cultivation contained plants classified as very healthy. The off-season period and the transition to a wetter period associated with El Niño showed a predominance of vegetation classified as very healthy between June and October 2023. Between January and March 2024, more than 90% of the areas were classified as very healthy, indicating that there was no water shortage. It was concluded that ENSO influenced the observed NDVI values; therefore, it is essential to develop drought mitigation and adaptation strategies in the municipality of Jari (RS).

[1]Universidade Federal de Santa Maria – UFSM, RS, Brasil. ericmoisesb@outlook.com
[2]Universidade Federal de Santa Maria – UFSM, RS, Brasil. carinapetsch@gmail.com
[3]Universidade Federal de Santa Maria – UFSM, RS, Brasil. carinapetsch@gmail.com

INTRODUÇÃO

No contexto da expansão agrícola, a soja (*Glycine max*) se destaca como uma das principais culturas, atuando intensamente na transformação do uso e ocupação da terra (Anholeto; Massuquetti, 2014; Chiaravalloti *et al.*, 2022; Gass *et al.*, 2024). Atualmente, a soja é a maior fonte mundial de proteína para alimentação animal e a segunda maior fonte de óleo vegetal (Song *et al.*, 2021), desempenhando um papel central nos sistemas de produção agrícola em diversos países (Pagano; Miransari, 2016).

Na América do Sul, de 2000 a 2019, a área cultivada com soja mais que dobrou, passando de 26,4 Mha para 55,1 Mha (Song *et al.*, 2021), sendo que o Brasil é um dos maiores produtores do grão (Crusiol *et al.*, 2018). Na safra 2024/25, o Rio Grande do Sul (RS) foi responsável por aproximadamente 9,7% da produção nacional de soja, com uma produção estimada em 16,6 milhões de toneladas (Conab, 2025), e, segundo dados do MapBiomas, em 2025, cerca de 24,3% do território gaúcho estava ocupado pela cultura. Entre 2001 e 2020, a área destinada ao cultivo de soja aumentou em 100,5% no Rio Grande do Sul (Torres *et al.*, 2023), sendo que o crescimento da cultura é particularmente notável nas regiões central e sul do estado (Castro, 2020).

A ocorrência de fenômenos climáticos em larga escala, como o *El Niño* Oscilação Sul (ENOS), exerce influência significativa em diversas culturas, especialmente durante a fase de crescimento das plantas, devido às variações nos padrões de precipitação e temperatura (Jacóbsen *et al.*, 2002; Júnior *et al.*, 2020; De la casa *et al.*, 2021). Nesse sentido, o RS apresenta uma variação latitudinal propícia para a ocorrência de diversos fenômenos meteorológicos, incluindo *El Niño* e *La Niña* (Cera *et al.*, 2017). Apesar do aumento na produção de soja nas últimas décadas, no RS, a produtividade ainda é fortemente influenciada pela variabilidade da precipitação associada ao fenômeno ENOS (Pilau *et al.*, 2022). Em anos de *La Niña*, a redução das precipitações pode favorecer a ocorrência de *déficit hídrico*, comprometendo o desenvolvimento e a produtividade da cultura, enquanto os períodos de *El Niño* tendem a apresentar maior disponibilidade hídrica para a soja, embora o excesso de precipitação também possa representar impactos para o cultivo (Pilau *et al.*, 2022).

Nesse contexto, o Sensoriamento Remoto (SR) tem se consolidado como uma alternativa viável para monitorar os efeitos da estiagem nas plantas, devido a possibilidade de análises em escalas temporais e espaciais mais amplas do que seria possível com métodos convencionais (Crusiol *et al.*, 2018; West *et al.*, 2019; Amaral *et al.*, 2024). Entre as diversas técnicas de SR, os índices de vegetação (IVs) se destacam como ferramentas valiosas para o estudo dos padrões das assinaturas espectrais e temporais da soja ao longo de seu ciclo fenológico (Morlin carneiro *et al.*, 2020; Amaral *et al.*, 2024). Esses IVs permitem correlacionar o desenvolvimento da soja com fatores que influenciam seu crescimento e produção, como clima, solo e relevo (Sobrinho Neto; Danelichen, 2023).

Dentre os IVs mais utilizados na análise da vegetação e culturas agrícolas, destaca-se o Índice de Vegetação por Diferença Normalizada (NDVI), proposto por Rouse *et al.* (1973). O NDVI apresentou resultados promissores na identificação da vegetação e no monitoramento do estresse vegetativo, o que o torna especialmente relevante para a agricultura comercial e estudos de monitoramento de uso da terra (Huang *et al.*, 2021; Mantovani; Lelis, 2023; Crusiol *et al.*, 2024). Ademais, o NDVI é importante para o acompanhamento de estiagens, para avaliar as condições da soja nesses períodos críticos (Yagci *et al.*, 2015).

Diante da frequência crescente de episódios de estiagem no RS, é fundamental analisar como as plantações de soja respondem em termos de biomassa e saúde da planta à escassez hídrica. Especialmente em Jari (RS), que apresentou um crescimento da cultura da soja principalmente em terrenos mais declivosos e rasos, nas últimas décadas (Beilfuss *et al.*, 2022). Atualmente, cerca de 35% das lavouras de soja se desenvolvem em Neossolos. Os solos rasos apresentam perfis superficiais e uma capacidade reduzida de retenção de umidade, aumentando o risco de estresse hídrico durante períodos de estiagem (Streck, 2018). Quando associados a áreas de maior declividade, que favorecem o escoamento superficial e podem limitar a infiltração e o armazenamento de água no solo, e à variabilidade das condições de precipitação associada ao ENOS, esses fatores podem potencializar a vulnerabilidade hídrica das lavouras de soja, especialmente em períodos de *déficit* de precipitação.

Diante desse contexto, o objetivo do trabalho foi analisar o comportamento do NDVI em resposta à atuação do fenômeno ENOS, em lavouras de soja e culturas de entressafra de Jari (RS), durante as safras de 2022/2023 e 2023/2024. Os objetivos específicos são: (i) caracterizar a precipitação em Jari (RS) e a atuação do ENOS no período de análise; (ii)

avaliar a eficácia do NDVI, no contexto de Jari (RS), validando os resultados a partir de trabalhos de campo em 3 datas; e (iii) utilizar o NDVI para monitorar o comportamento das lavouras de soja durante os meses de outubro de 2022 a março de 2024.

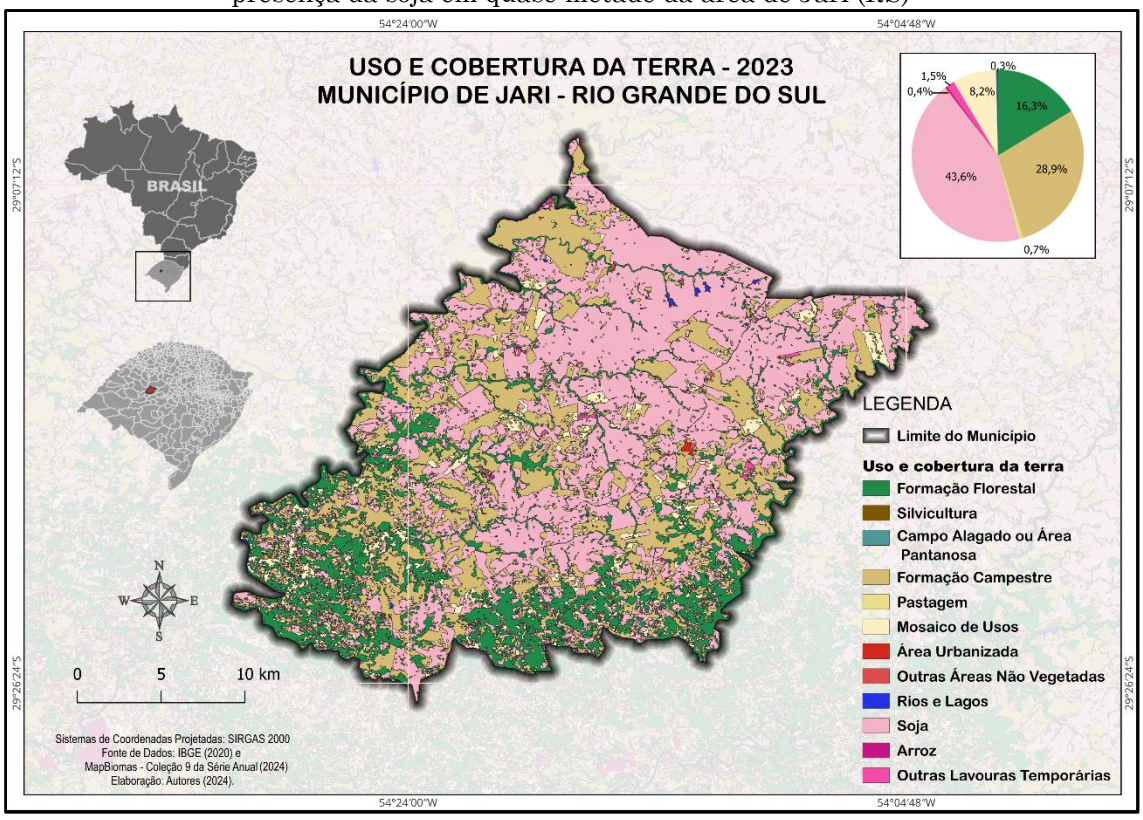
MATERIAIS E MÉTODOS

Este item se destina a apresentação da área de estudo e das abordagens metodológicas adotadas na pesquisa.

Caracterização da área de estudo

O município de Jari (RS) está localizado entre as coordenadas geográficas 29°08'52" a 29°46'07" de latitude sul e 54°07'59" a 54°50'45" de longitude oeste (Figura 1), com uma área de 853,080 km². Segundo os dados do IBGE referentes a 2021, Jari (RS) apresentava um PIB *per capita* de R$ 135.082,01. Em relação à composição do Valor Adicionado Bruto (VAB) municipal, a maior parcela correspondia ao setor agropecuário, que totalizou aproximadamente R$ 377,84 milhões, representando 80,6% do VAB do município (Beilfuss 2022, Beilfuss 2025).

Figura 1 – Localização do município e uso e cobertura da terra, em 2023, sendo possível observar a presença da soja em quase metade da área de Jari (RS)



Fonte: Os autores (2024).

No que diz respeito ao uso e cobertura da terra (Figura 1), o município de Jari (RS), em 2023, apresentava predominância da cultura da soja em seu território, estendendo-se do norte ao sul, principalmente nas porções centrais, cobrindo aproximadamente 373,9 km² (43,6%). Por outro lado, a Formação Campestre, estava presente em 248 km² (28,9%), em áreas localizadas principalmente a noroeste, sudoeste e sudeste do município. Além disso, a Formação Florestal ocupava uma área de 140 km² (16,3%), prevalecendo especialmente no Sul, associada ao Rebordo do Planalto. Os dados temporais indicam um aumento de 330% de área ocupada de soja no período de 2000 a 2022 (Beilfuss *et al.*, 2024).

No que diz respeito ao relevo, as cotas altimétricas variam de 130 a 460 metros e quanto a declividade, predominam as classes de 2-5% (375,8 km²) e 5-15% (349 km²), respectivamente correspondendo a 44% e 40,9% da área do município. Jari (RS) está incluído na Unidade denominada Planalto Meridional, caracterizada pelo predomínio de declives suavizados e desníveis topográficos locais pouco pronunciados, formado principalmente por rochas vulcânicas de idade Mesozóica (Guareschi; Nummer, 2014). Dessa maneira,

conforme Beilfuss *et al.* (2022), o município apresenta predominância de colinas suavemente onduladas (65,1%), o que facilitou a expansão da cultura da soja.

O município de Jari (RS) está na zona de clima subtropical II, com precipitação anual de 1.500 a 1.700 mm, segundo Rossato (2011). Ainda segundo a autora, a porção noroeste está em transição para o clima subtropical III, com precipitações anuais de 1.700 a 1.800 mm. Beilfuss *et al.* (2022) apontaram que a média anual de precipitação em Jari é de 1.922 mm, variando entre 1.000 mm e 2.800 mm, no período de 1990 a 2020, portanto, com valores superiores aos dados de Rossato (2011). Esses dados são importantes para entender o comportamento da precipitação e seu impacto na agricultura local.

Banco de Dados e Processamento dos Produtos de SR

O primeiro procedimento da pesquisa consistiu no *download* dos arquivos de NDVI gerados na plataforma *Google Earth Engine* (GEE) (Gorelick *et al.*, 2017), a partir de imagens ortorretificadas de alta resolução e multiespectrais do Sentinel-2 (COPERNICUS/S2_SR_HARMONIZED).

Foram buscadas imagens de cada um dos meses de análise, no período de outubro de 2022 a março de 2024. Ressalta-se que o Sentinel-2 mostrou-se adequado à escala espacial da pesquisa por apresentar resolução espacial de 10 m, permitindo a análise da cobertura vegetal em escala de município. Bem como, o GEE foi utilizado por facilitar o processamento e a análise das imagens de SR ao longo do período estudado.

A escolha das datas considerou os pressupostos de Da Silva *et al.* (2017), que utilizaram o SR para monitorar a soja desde o preparo do solo até a colheita. Nesta pesquisa, também foi investigada a etapa de entressafra, visando observar como os agricultores preparam o solo para o próximo ciclo de plantio da soja. Ademais, foi considerado o calendário de semeadura da soja estabelecido pela Portaria SDA nº 261, de 4 de julho de 2022, e pela Portaria SDA nº 840, de 11 de julho de 2023.

O NDVI foi criado para explorar características únicas das plantas, como a absorção de luz solar na porção visível do espectro, realizada pela clorofila presente nas folhas, e a reflexão na porção do infravermelho próximo (NIR), determinada pela estrutura celular das plantas. Assim, valores mais altos de NDVI indicam uma vegetação mais densa e verde (Yagci *et al.*, 2015). Segundo Rouse *et al.* (1973), o NDVI é expresso pela Equação 1 abaixo.

$$NDVI = (NIR - Red) / (NIR + Red) \quad (1)$$

Onde: Red e NIR representam, respectivamente, os valores de reflectância na região do vermelho e infravermelho próximo do espectro eletromagnético de objetos na superfície terrestre.

As imagens de NDVI baixadas do GEE foram inseridas em um banco de dados no QGIS 3.30.0 (Qgis Development Team, 2023). Em seguida, foi realizado o recorte das imagens *raster* utilizando o *shapefile* das lavouras de soja, disponibilizado pelo projeto MapBiomas (Souza *et al.*, 2020). Os dados da plataforma MapBiomas já foram validados conforme as pesquisas de Beilfuss *et al.* (2022), Beilfuss *et al.* (2024), Beilfuss *et al.* (2025a), Beilfuss *et al.* (2025b) e Beilfuss *et al.* (2025c). Os limites das classes de NDVI foram definidos com base em Crusiol *et al.* (2024), com os seguintes intervalos: de -1 a 0: Alvo não vegetal ou planta sem atividade fisiológica, incluindo corpos d'água, áreas sombreadas e outros alvos sem cobertura vegetal; de 0 a 0,33: planta não saudável; de 0,33 a 0,66: planta moderadamente saudável; e de 0,66 a 1: planta muito saudável. Por fim, a área de cada classe foi calculada utilizando a ferramenta r.*report*.

Trabalho de Campo

Foram realizados trabalhos de campo nos dias 25 de janeiro de 2023, 12 de julho de 2023 e 27 de janeiro de 2024 para a análise das lavouras de soja no verão e uso e cobertura da terra no período de entressafra, no outono, inverno e primavera. Durante essas visitas, foram baixadas imagens de NDVI do GEE correspondentes às datas ou a períodos próximos aos dias de campo. Ao todo, foram visitados 30 pontos, nos quais se registraram fotografias com coordenadas geográficas, utilizando o aplicativo *SW Maps* e drones *Mavic Air Pro* e Mini *Mavic*. Em seguida, foi feita a comparação entre os valores de NDVI obtidos com as imagens de satélite e as fotografias obtidas em campo. Para isso, cada fotografia foi associada ao seu respectivo ponto de localização geográfica, permitindo identificar, na imagem de satélite, o valor de NDVI correspondente à mesma posição registrada em campo.

Obtenção dos Dados de Precipitação

Os dados pluviométricos do município de Jari (RS) foram obtidos na plataforma HidroWeb (ANA, 2025), mantida pela Rede Hidrometeorológica Nacional, com base nas informações da estação 02954005, referentes ao período de 2022 a 2024. A média mensal histórica foi calculada considerando um período de 30 anos (1994 a 2024). Para a análise da influência do fenômeno ENOS, utilizou-se o *Oceanic Niño Index* (ONI).

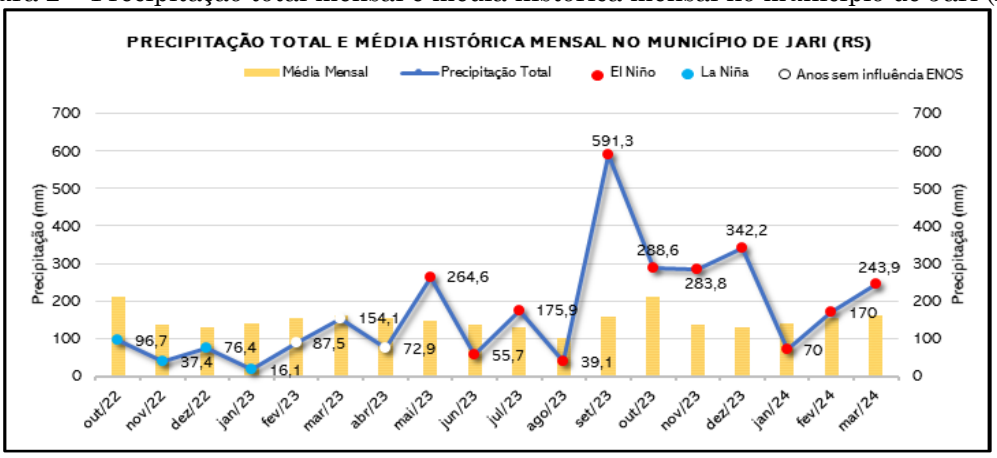
RESULTADOS

Este item se refere à apresentação dos dados de precipitação, análise e validação do NDVI em campo, e observação do comportamento anual do NDVI em áreas em que a soja é plantada, em Jari (RS), entre outubro de 2022 e março de 2024.

Precipitação Registrada no Período de Análise do NDVI da Soja

Os valores da média mensal histórica de Jari (RS), indicam uma variação entre 102 mm e 212 mm, sendo respectivamente referente aos meses de agosto e outubro. Entre outubro de 2022 e março de 2024, o município de Jari (RS) apresentou variações significativas na precipitação total mensal, em relação à média mensal histórica (Figura 2). Ao longo dos 18 meses avaliados, em 9 meses as precipitações ficaram abaixo da média histórica mensal.

Figura 2 – Precipitação total mensal e média histórica mensal no município de Jari (RS)



Fonte: Os autores (2024).

Alguns dados merecem destaque. Em setembro de 2023, o acumulado de precipitação atingiu 591,3 mm, um valor significativamente superior à média histórica de 156 mm. Em contraste, janeiro de 2023 registrou apenas 16,1 mm, muito abaixo da média mensal histórica de 141 mm. Essas flutuações da precipitação em relação às médias históricas mensais podem ser parcialmente explicadas pela atuação do ENOS. Os meses associados ao *El Niño*, como setembro, outubro, novembro e dezembro de 2023, coincidiram com aumentos significativos na precipitação, demonstrando o impacto desse fenômeno no incremento da precipitação. Por outro lado, períodos influenciados pela *La Niña*, entre outubro de 2022 e janeiro de 2023, apresentaram reduções nos níveis de precipitação. Contudo, a relação entre esses fenômenos e as variações pluviométricas nem sempre é linear, podendo ser influenciada por outros fenômenos climáticos.

Trabalho de Campo e Validação do NDVI nas Áreas com a Cultura de Soja

Durante as saídas de campo realizadas em janeiro de 2023 e janeiro de 2024, foi observada uma diferença significativa na cobertura vegetal das lavouras (Figura 3). Em janeiro de 2023, o período de estiagem retardou o plantio e prejudicou o crescimento das plantas, sendo que em diversas lavouras visitadas os agricultores haviam feito o replantio. Os valores de NDVI, na sua maioria, representavam áreas com predominância de palhada ou mistura de *pixels* de palhada com a soja no estádio vegetativo e em condições de deficiência hídrica. Nesta primeira data de verificação em campo (Figura 4 A), apenas 13% da área de cultura de soja apresentava plantas em estado muito saudável, enquanto 39% eram consideradas não saudáveis.

Em contraste, em janeiro de 2024, os valores se aproximaram de 1, correspondendo a estádios

de reprodução e fechamento das entrelinhas de plantas no terreno, sendo que havia o predomínio de 91% das áreas classificadas como muito saudáveis (Figura 4 B). Nesse sentido, foi possível analisar a correspondência entre o NDVI e os pontos observados em campo, além de observar os impactos do fenômeno ENOS nas plantações.

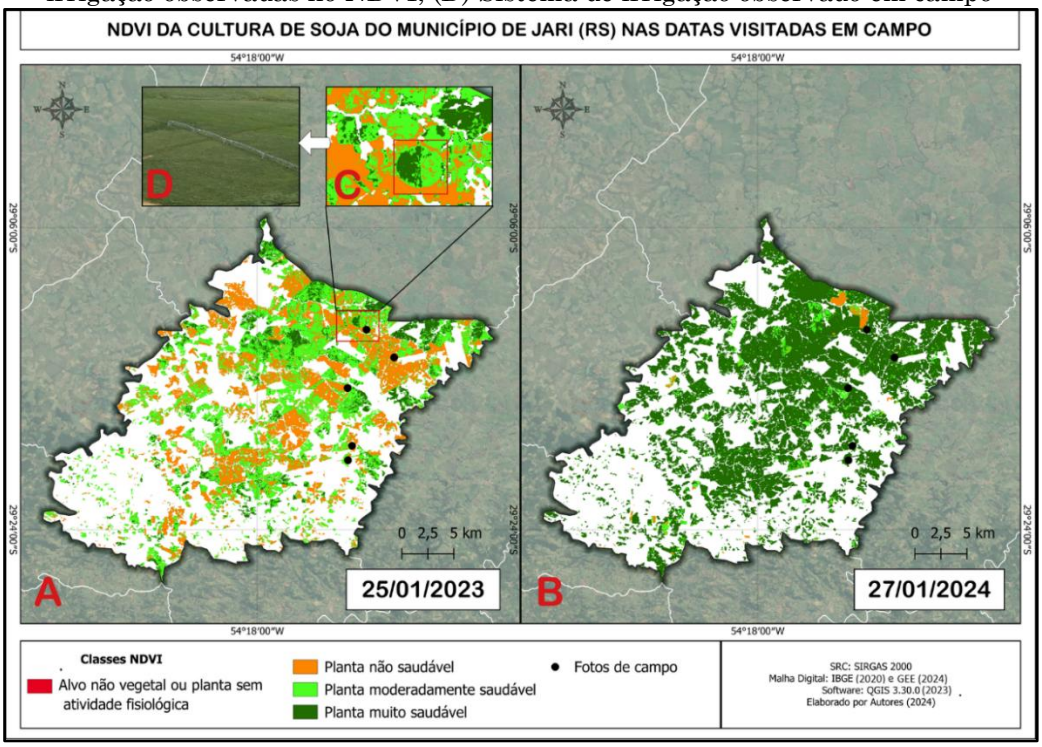
Figura 3 – Fotografias de alguns dos pontos visitados em campo, mostrando as safras de 2022/2023 e 2023/2024 com seus respectivos valores de NDVI

Ponto	Fotografia 25/01/2023	Fotografia 27/01/2024
54°12′58,430″W 29°21′33,760″S	 Valor NDVI = 0.288	 Valor NDVI = 0.922
54°12′21,110″W 29°19′1,160″S	 Valor NDVI = 0.162	 Valor NDVI = 0.861
54°12′36,320″W 29°15′31,620″S	 Valor NDVI = 0.214	 Valor NDVI = 0.915
54°9′50,920″W 29°13′41,930″S	 Valor NDVI = 0.154	 Valor NDVI = 0.901
54°11′30,060″W 29°12′4,210″S	 Valor NDVI = 0.174	 Valor NDVI = 0.906

Fonte: Os autores (2024).

Diante da estiagem observada em janeiro de 2023, os agricultores adotaram algumas práticas agrícolas, como a irrigação, especialmente nas áreas ao norte do município que concentram as maiores propriedades (Figura 4 D). A análise do NDVI demonstrou que esta técnica foi eficiente, pois as plantas se enquadram nas categorias mais saudáveis e outras em estado moderado (Figura 4 C).

Figura 4 – NDVI nas lavouras de soja no município de Jari (RS) para a data de 25/01/2023 (A) e 27/01/2024 (B); (C) Aproximação para a porção ao norte do município para enfatizar as áreas com irrigação observadas no NDVI; (D) Sistema de irrigação observado em campo

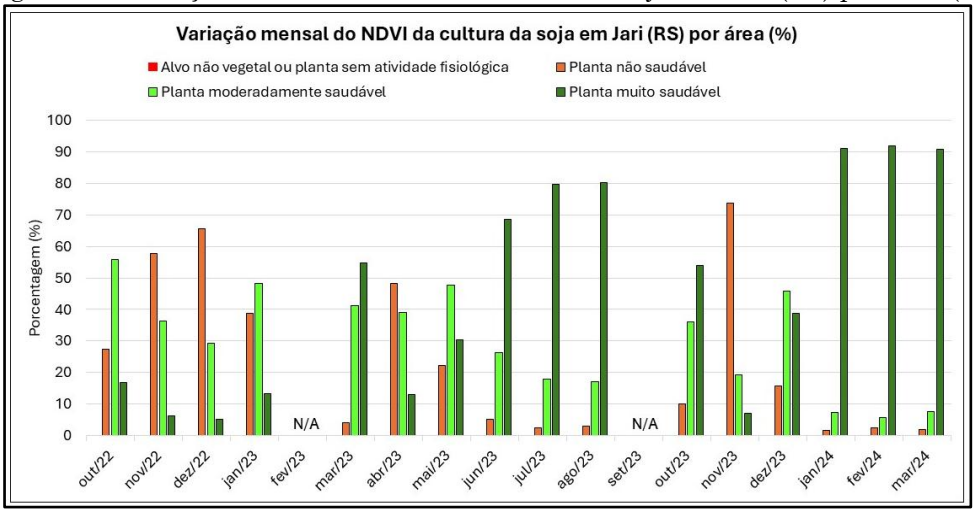


Fonte: Os autores (2024).

Análise Mensal do NDVI e Impactos do Fenômeno ENOS

A análise mensal do NDVI para as duas safras (Figura 5) revelou o impacto da estiagem em 2022, o que resultou no atraso do plantio, conforme verificado também em campo. Em outubro de 2022, houve o predomínio de plantas moderadamente saudáveis (55%), devido ao início do preparo do solo para o plantio de soja. Entre novembro de 2022 e dezembro de 2022, predominou a classificação de plantações como não saudáveis, devido à presença de palhada, sem a germinação da soja. O replantio realizado no mês de janeiro, combinado ao aumento da precipitação em fevereiro e março de 2023, favoreceu o desenvolvimento da cultura. Em março de 2023, os valores de NDVI indicavam a predominância de plantas muito saudáveis (54,7%), principalmente nas porções a norte e noroeste do município (Figura 6). A maturação e colheita ocorreram entre abril e maio de 2023.

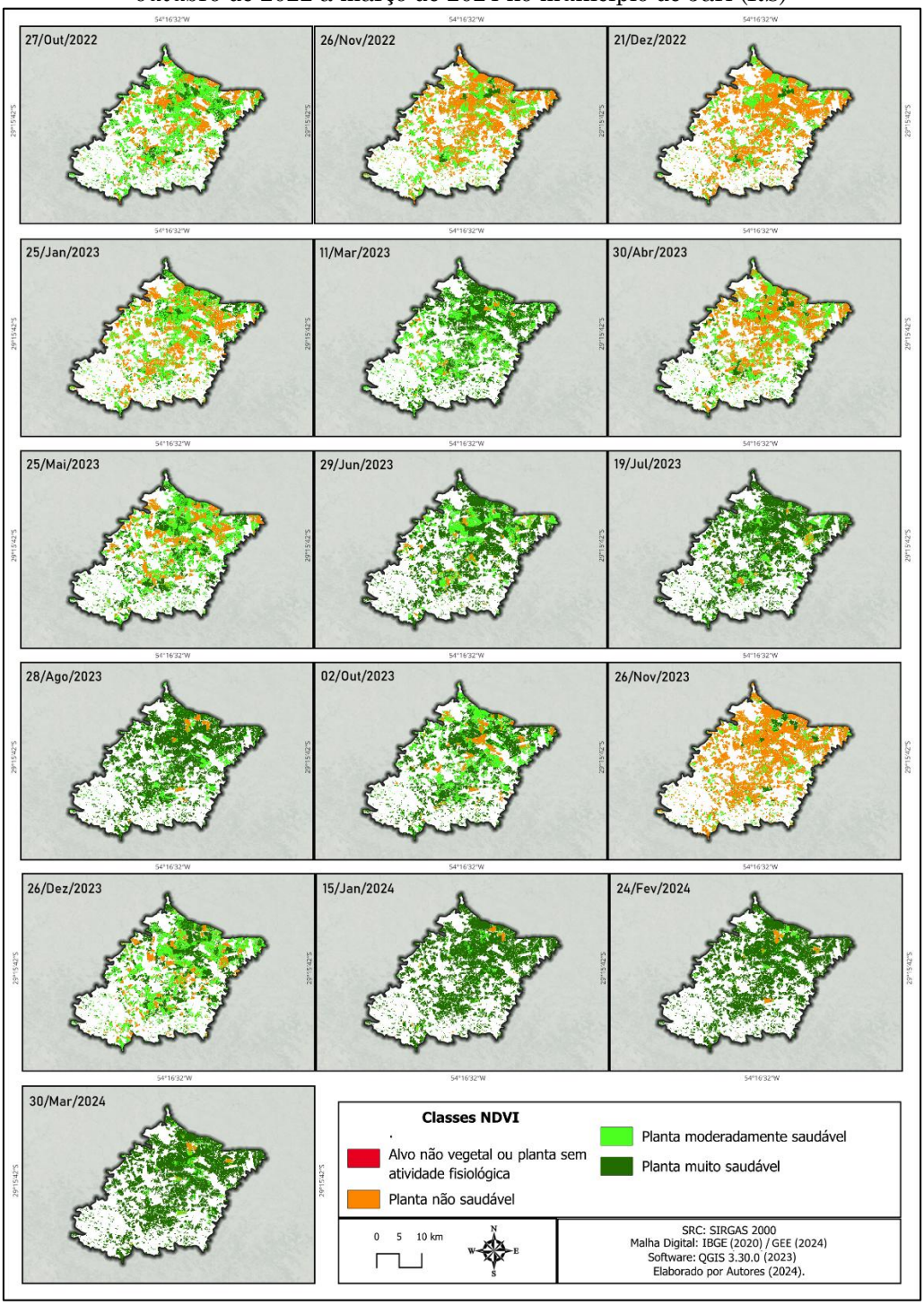
Figura 5 – Variação mensal do NDVI da cultura da soja em Jari (RS) por área (%)



O termo N/A se refere a meses sem imagens de satélite, devido a cobertura de nuvens.

Fonte: Os autores (2024).

Figura 6 – Mosaico de aplicação do NDVI no Uso e Cobertura da Terra da soja para os meses de outubro de 2022 a março de 2024 no município de Jari (RS)

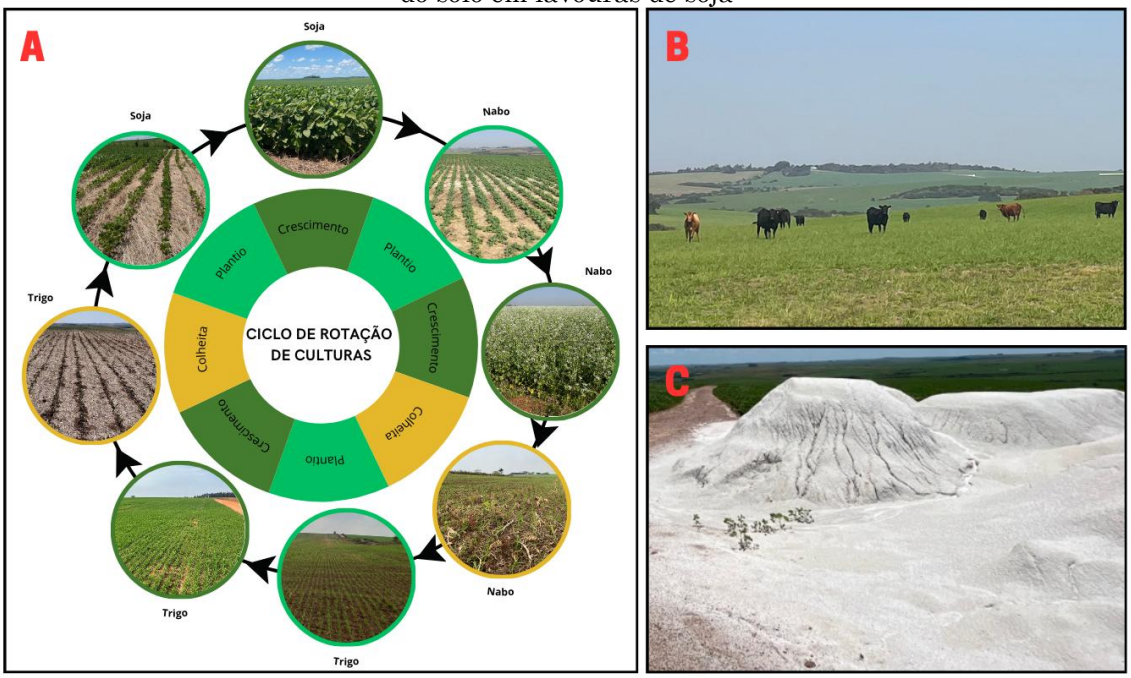


Fonte: Os autores (2024).

Durante o período de entressafra (junho a outubro de 2023), os agricultores mantiveram a cobertura vegetal, o que resultou em NDVI com plantas muito saudáveis, devido à presença de nabo forrageiro, aveia e azevém. Em novembro, as áreas apresentaram uma predominância de plantas não saudáveis (74%), devido à preparação do solo para a safra de 2023/2024. Em dezembro de 2023, houve o início do crescimento e a maior densidade das plantas resultaram em um aumento nas áreas classificadas como moderadamente saudáveis (46%), como é possível observar na Figura 5. Entre janeiro e março de 2024, a classe de plantas muito saudáveis predominou com mais de 90% (Figura 5), devido a um período de precipitação próxima a valores da média histórica, portanto, ocorreu o cumprimento do calendário agrícola sem intercorrências.

Observou-se em campo que no período de entressafra pode haver o plantio de trigo, nabo, aveia, ou a associação com o gado. Diante do exposto, foram observados alguns padrões distintos em Jari (RS): (i) pequenas lavouras, sobretudo na porção sul do município, cultivam soja durante o verão e utilizam as lavouras no inverno para a criação de gado (Figura 7 B); (ii) grandes lavouras no norte do município adotam um ciclo de três culturas no ano (Figura 7 A), com plantio de nabo, trigo e, em seguida, soja e investem em técnicas de correção do solo, como a aplicação de calcário (Figura 7 C), além de práticas de irrigação para otimizar a produção (Figura 4 D). Como resultado, as porções localizadas ao norte mantiveram algumas plantações classificadas como saudáveis ao longo de todo o período analisado, mesmo nos meses de menor precipitação.

Figura 7 – (A) Ciclo de rotação de culturas evidenciadas a partir das saídas de campo no município de Jari (RS); (B) Lavouras de inverno utilizadas para o gado; (C) Utilização do calcário para correção do solo em lavouras de soja



Fonte: Os autores (2024).

DISCUSSÕES

O período de estudo escolhido foi importante para observar o comportamento do NDVI da cultura de soja e lavouras de entressafra, em um período de oscilação da precipitação, em Jari (RS). Diante do aumento de eventos extremos de precipitação ou estiagem no RS, Zanon *et al.* (2016) apontam que é crucial a realização de estudos destinados a avaliar a influência dos fatores climáticos na produção de soja nesse estado. Embora tenha havido um aumento dos acumulados de precipitação a partir da atuação do *El Niño*, em 9 dos 18 meses os valores de precipitação foram abaixo da média histórica mensal, o que é preocupante para o plantio e desenvolvimento da cultura de soja.

Diversos estudos utilizaram o NDVI para monitorar os efeitos da estiagem sobre a soja (Crusiol *et al.*, 2018; Pei *et al.*, 2021; Tavares *et al.*, 2022; Zhang *et al.*, 2023). Em Jari (RS), a aplicação desse índice demonstrou eficiência, pois os valores refletiram adequadamente as condições observadas em campo, resultantes tanto da estiagem quanto de precipitações próximas ou acima das médias históricas. Nesse contexto, destaca-se que a validação em campo é fundamental para compreender a complexidade da resposta espectral dos objetos nas imagens Sentinel-2, especialmente durante o período de estiagem. Nesse período, foram identificadas lavouras com diferentes condições de cobertura, como predominância de solo exposto, presença de palhada e soja cobrindo as entrelinhas, evidenciando a complexidade espectral destes *pixels*.

A análise dos dados de NDVI e precipitação entre outubro de 2022 e março de 2024, em Jari (RS), permitiu observar a variação temporal desses indicadores ao longo do período analisado. Os períodos de estiagem, como entre outubro de 2022 e janeiro de 2023, tiveram um impacto direto nas plantações, com valores de NDVI indicativos de estresse hídrico e baixo

desenvolvimento vegetativo. Portanto, os resultados encontrados nesta pesquisa reforçam a influência do clima como o principal fator que impacta diretamente a produção agrícola, já que a cultura da soja exige disponibilidade hídrica adequada durante seu ciclo e apresenta alta sensibilidade ao estresse hídrico (Basal *et al.*, 2020; Zhang *et al.*, 2023). A sensibilidade ao estresse hídrico, em Jari (RS), se agrava diante da expansão da soja para porções de solos rasos e declivosos, segundo dados de Beilfuss *et al.* (2022). Os solos rasos apresentam baixa capacidade de retenção da umidade (Pilau *et al.*, 2018), e conforme observado nos padrões mensais de NDVI, os solos mais profundos do norte do município de Jari (RS) mantêm mais áreas com a soja na classe de saudável.

Evidentemente, ressalta-se que há outros fatores além do climático que podem alterar os valores de NDVI de uma lavoura. Condições como incêndios, inundações, mudanças no uso e na cobertura da terra e infestações por pragas, também podem reduzir os valores do índice (Yagci *et al.*, 2015). Além disso, alguns cultivares podem responder de forma diferente à estiagem, conforme exposto por Tavares *et al.* (2022). Diante do exposto, o investimento realizado pelos agricultores desempenha um papel crucial, como observado em campo. Grandes produtores, em particular, apresentam maior capacidade de adaptação durante períodos de estiagem, além de adotar práticas como correção de solo e rotação de culturas, além disso, estas grandes lavouras já ocupam condições do meio físico mais propensas ao cultivo da soja. São questões que podem ser aprofundadas em outros estudos.

Autores como Sampaio *et al.* (2021) e Silva *et al.* (2023) em seus trabalhos de monitoramento da cultura da soja com NDVI constataram uma limitação no uso do NDVI devido a sua tendência à saturação em condições de alta biomassa e dossel fechado. Sampaio *et al.* (2021) indicaram que em estágios fenológicos mais avançados da soja, o NDVI perde a sensibilidade para diferenciar variações do vigor vegetativo. De modo similar Silva *et al.* (2023) relataram que o NVDI atinge seu nível de saturação exatamente quando a soja atinge o máximo de seu desenvolvimento vegetativo. No presente trabalho em função do período de validação dos dados (mês de janeiro) que indica um estágio de desenvolvimento intermediário da soja não constatou-se este problema e, nos meses subsequentes da análise constatou-se de forma mais clara a diferença obtida na possível saturação dos dados apenas em ano chuvoso.

CONSIDERAÇÕES FINAIS

Diante da expansão da cultura de soja do RS, aumento da incidência de eventos extremos, e atuação do fenômeno ENOS, é crucial realizar estudos e validar técnicas de SR que permitam o monitoramento dos impactos climáticos nas lavouras do estado. O uso das imagens Sentinel-2 permitiu o acompanhamento temporal mensal, além de uma resolução espacial adequada a um município de aproximadamente 850 km². Ademais, o uso do GEE permitiu o rápido processamento das imagens, sem demandar de computadores robustos para aplicar as técnicas de Geoprocessamento.

A ocorrência da *La Niña* nesse período contribuiu para a redução da precipitação, ocasionando atrasos no plantio e a necessidade de práticas de manejo emergenciais, como o replantio em áreas afetadas. Entretanto, a intensidade dos efeitos da estiagem não ocorreu de forma homogênea entre as lavouras, uma vez que investimentos em manejo técnico e em sistemas de irrigação contribuíram para minimizar os impactos do *déficit* hídrico em determinadas propriedades. Alguns agricultores da porção norte recorreram a técnicas de irrigação, sobretudo em propriedades de maior extensão e com maior nível de investimento na cultura.

Por outro lado, a transição para um cenário influenciado pelo *El Niño*, a partir de maio de 2023, resultou em um aumento significativo das precipitações, que, por sua vez, favoreceu o desenvolvimento das plantas na entressafra. No pico da safra de soja, em janeiro de 2024, 91% das lavouras de soja foram classificadas como muito saudáveis, em contraste com apenas 13% durante a safra de janeiro de 2023.

As flutuações no NDVI ao longo do período analisado, associadas principalmente à atuação do fenômeno ENOS, demonstram o potencial de ocorrência de problemas econômicos no município de Jari (RS) decorrentes da estiagem e da consequente redução na produção de soja. Considerando que o PIB do município é, em sua maioria, dependente desta cultura, é emergencial que sejam pensadas estratégias de mitigação e adaptação frente às mudanças climáticas, bem como a inserção de outras fontes de renda no município.

Entre as estratégias que podem ser consideradas, destacam-se a elaboração de um Zoneamento Agrícola de Risco Climático (ZARC) para subsidiar o planejamento das atividades agrícolas, a adoção de práticas de manejo que contribuam para a conservação da umidade do solo, o uso de sistemas de irrigação em áreas com

viabilidade técnica e a diversificação das culturas agrícolas. Essas medidas podem auxiliar os produtores na redução da vulnerabilidade aos períodos de estiagem e, no âmbito da gestão municipal, contribuir para o planejamento de ações voltadas à redução dos impactos econômicos associados à variabilidade climática. Além disso, para estudos futuros, recomenda-se a ampliação do recorte espacial e temporal, incluindo outros municípios produtores de soja, bem como a realização de análises comparativas entre diferentes áreas, de modo a acompanhar a evolução do fenômeno e ampliar a compreensão dos efeitos das variabilidades climáticas sobre a produção agrícola.

REFERÊNCIAS

AGÊNCIA NACIONAL DE ÁGUAS E SANEAMENTO BÁSICO (ANA). **HidroWeb: sistema de informações hidrológicas.** Brasília, DF: ANA, 2025. Disponível em: https://www.snirh.gov.br/hidroweb/. Acesso em: 8 out. 2024.

AMARAL, L. R.; OLDONI, H.; BAPTISTA, G. M.; FERREIRA, G. H.; FREITAS, R. G.; MARTINS, C. L.; SANTOS, A. F. Remote sensing imagery to predict soybean yield: a case study of vegetation indices contribution. **Precision Agric**, v. 25, p. 2375–2393,2024. https://doi.org/10.1007/s11119-024-10174-5

ANHOLETO, C. D.; MASSUQUETTI, A. A soja brasileira e gaúcha no período 1994-2010: uma análise da produção, exportação, renda e emprego. **Revista Economia e Desenvolvimento**. v. 13, n. 2, 2014. Disponível em: https://periodicos.ufpb.br/index.php/economia/article/view/26561. Acesso em: 11 jun. 2026.

BASAL, O.; SZABÓ, A.; VERES, S. Physiology of soybean as affected by PEG-induced drought stress. **Current Plant Biology**, v. 22, p. 100135, 2020. https://doi.org/10.1016/j.cpb.2020.100135

BEILFUSS, E. **Elaboração e análise do atlas geoambiental do município de Jari-RS**. Trabalho de Conclusão de Curso (Bacharelado em Geografia) – Universidade Federal de Santa Maria, Santa Maria, 2022.

BEILFUSS, E. M.; PETSCH, C.; BEN, F. D.; ROBAINA, L. E. D. S.; TRENTIN, R.; SCCOTI, A. A. V. **Atlas Geoambiental de Jari-RS**, 2022. https://doi.org/10.29327/5385445

BEILFUSS, E. M.; PETSCH, C.; TRENTIN, R. Dinâmica do uso e cobertura da terra em Jari (RS) e cenários de expansão da soja entre 2025-2030. **Revista RA'EGA**. v.60, n12, p. 209 - 229,2024. http://dx.doi.org/10.5380/raega.v60i0.95302

BEILFUSS, E. **Análise espacial da cultura da soja e sua interação com o meio físico e a precipitação pluviométrica**: um estudo no município de Jari (RS), utilizando técnicas de geoprocessamento. Dissertação (Mestrado em Geografia) – Universidade Federal de Santa Maria, Santa Maria, 2025.

BEILFUSS, E.; PETSCH, C.; TRENTIN, R. Determinantes espaciais na expansão da cultura de soja no município de Jari (RS) entre 1985-2021. **Geo UERJ**, Rio de Janeiro, v. 47, 2025a.https://doi.org/10.12957/geouerj.2025.80528

BEILFUSS, E.; PETSCH, C.; TRENTIN, R. Fragmentação da paisagem causada pela recente expansão agrícola no município de Jari (RS). **Revista Continentes**, [S.l.], v. 1, n. 27, p. 21, oct. 2025b. https://doi.org/10.51308/continentes.v1i27.641

BEILFUSS, E.; PETSCH, C.; TRENTIN, R.; KELLEM DA ROSA, K. Análise das alterações do uso e cobertura da terra em áreas de preservação permanente em Jari (RS). **Para Onde!?**, Porto Alegre, v. 19, n. 2, 2025c. https://doi.org/10.22456/1982-0003.146633

CASTRO, A. Evolução da Produção de Soja no Rio Grande do Sul: Um Comparativo entre Mesorregiões do Estado. *In*: **Anais do Salão Internacional de Ensino, Pesquisa e Extensão**, v. 5, n. 2, 2020.

CERA, J. C.; STRECK, N. A.; FENSTERSEIFER, C. A. J.; FERRAZ, S. E. T.; BEXAIRA, K. P.; SILVEIRA, W. B.; CARDOSO, Â. P. Soybean yield in future climate scenarios for the state of Rio Grande do Sul, Brazil. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, v. 52, p. 380-392, 2017. https://doi.org/10.1590/S0100-204X2017000600002

CHIARAVALLOTI, R. M.; SKARLATIDOU, A.; HOYTE, S.; BADIA, M. M.; HAKLAY, M.; LEWIS, J. Extreme citizen science: Lessons learned from initiatives around the globe. **Conservation Science and Practice**, v. 4, n. 2, p. e577, 2022. https://doi.org/10.1111/csp2.577

COMPANHIA NACIONAL DE ABASTECIMENTO. Acompanhamento da safra brasileira de grãos: safra 2024/25. Brasília, DF: Conab, 2025.

CRUSIOL, L., SIBALDELLI, R., FARIAS, J., NANNI, M., FURLANETTO, R., OLIVEIRA JUNIOR, A. D., GONCALVES, S. **50 anos do NDVI**: desmistificando o índice e ponderando sua utilização para o monitoramento da soja na era digital. 2024. Disponível em: http://www.infoteca.cnptia.embrapa.br/infoteca/handle/doc/1164458. Acesso em: 12 ago. 2024.

CRUSIOL, L.; NANNI, M., FURLANETTO, R.; SIBALDELLI, R.; MERTZ-HENNING, L. M.; NEPOMUCENO, A.; FARIAS, J. Sensoriamento remoto como suporte ao monitoramento do déficit hídrico na cultura da soja. *In*: **Congresso Brasileiro de Soja**, 8., Goiânia. Inovação,

tecnologias digitais e sustentabilidade da soja: anais. Brasília, DF: Embrapa, 2018. Disponível em: http://www.alice.cnptia.embrapa.br/alice/handle/doc/1093188. Acesso em: 23 ago. 2024.

DA SILVA, C. A.; NANNI, M. R.; TEODORO, P. E.; SILVA, G. F. C. Vegetation indices for discrimination of soybean areas: A new approach. **Agronomy Journal**, v. 109, n. 4, p. 1331-1343, 2017. https://doi.org/10.2134/agronj2017.01.0003

DE LA CASA, A. C.; OVANDO, G. G.; DÍAZ, G. J. ENSO influence on corn and soybean yields as a base of an early warning system for agriculture in Córdoba, Argentina. **European Journal of Agronomy**, v. 129, p. 126340, 2021. https://doi.org/10.1016/j.eja.2021.126340

GASS, S. L. B.; DA SILVA, D. M.; DE ARRUDA, S. F. A leitura e representação da paisagem rural como instrumento de gestão municipal: uma proposta para Santo Cristo, Rio Grande do Sul, Brasil. **Agua y Territorio/Water and Landscape**, n. 23, p. e7266-e7266, 2024. https://doi.org/10.17561/at.23.7266

GOOGLE EARTH ENGINE. **Mountain View: Google**, [s. d.]. Disponível em: https://earthengine.google.com/. Acesso em: 10 out. 2024.

GORELICK, N.; HANCHER, M.; DIXON, M.; ILYUSHCHENKO, S.; THAU, D.; MOORE, R. Google Earth Engine: planetary-scale geospatial analysis for everyone. **Remote Sensing of Environment**, v. 202, p. 18-27, 2017. https://doi.org/10.1016/j.rse.2017.06.031

GUARESCHI, V.; NUMMER, A. Depressões fechadas e cabeceiras de drenagem na bacia hidrográfica do arroio lajeado taquarembó - planalto meridional do rs. **Revista Geonorte**, [S. l.], v. 5, n. 19, p. 107–112, 2014. Disponível em: //periodicos.ufam.edu.br/index.php/revista-geonorte/article/view/1467. Acesso em: 18 out. 2024.

HUANG, S.; TANG, L.; HUPY, J. P.; WANG, Y.; SHAO, G. A commentary review on the use of normalized difference vegetation index (NDVI) in the era of popular remote sensing. **Journal of Forestry Research**, v. 32, n. 1, p. 1-6, 2021. https://doi.org/10.1007/s11676-020-01155-1

INSTITUTO BRASILEIRO DE GEOGRAFIA E ESTATÍSTICA. **Malha Municipal Digital: 2020**. Rio de Janeiro: IBGE, 2020. Disponível em: https://www.ibge.gov.br/geociencias/organizacao-do-territorio/malhas-territoriais/15774-malhas.html?edicao=42093. Acesso em: 10 out. 2024.

JACÓBSEN, L. O.; FONTANA, D. C.; SHIMABUKURO, Y. E. Efeitos associados ao *El Niño* e *La Niña* cobertura vegetal do Rio Grande do Sul. *In*: **Congresso Brasileiro de Meteorologia**, 12. p. 849-855. 2002.

JÚNIOR, R. D. S. N.; FRAISSE, C. W.; KARREI, M. A. Z.; CERBARO, V. A.; PERONDI, D. Effects of the *El Niño* Southern Oscillation phenomenon and sowing dates on soybean yield and on the occurrence of extreme weather events in southern Brazil. **Agricultural and Forest Meteorology**, v. 290, p. 108038, 2020. https://doi.org/10.1016/j.agrformet.2020.108038

MANTOVANI, J. R.; LELIS, L. R. M. Algoritmo para mapeamento dos usos do solo e cobertura vegetal a partir do uso do NDVI: um estudo aplicado no nordeste de Mato Grosso do Sul. **Cerrados**, v. 21, n. 2, p. 3-34, 2023. https://doi.org/10.46551/rc24482692202317

MAPBIOMAS. Projeto MapBiomas: **Coleção 9 da Série Anual de Mapas de Cobertura e Uso da Terra do Brasil (1985–2023)**. São Paulo: MapBiomas, 2024. Disponível em: https://brasil.mapbiomas.org/colecoes-mapbiomas/. Acesso em: 10 out. 2024.

MORLIN CARNEIRO, F.; ANGELI FURLANI, C. E.; ZERBATO, C.; CANDIDA DE MENEZES, P.; DA SILVA GÍRIO, L. A.; FREIRE DE OLIVEIRA, M. Comparison between vegetation indices for detecting spatial and temporal variabilities in soybean crop using canopy sensors. **Precision Agric**, v. 21, p. 979–1007, 2020. https://doi.org/10.1007/s11119-019-09704-3

NOAA. ENSO: Oceanic Niño Index (ONI). Disponível em: https://origin.cpc.ncep.noaa.gov/products/analysis_monitoring/ensostuff/ONI_v5.php. Acesso em: 12 ago. 2024.

PAGANO, M. C.; MIRANSARI, M. The importance of soybean production worldwide. In: Abiotic and biotic stresses in soybean production. **Academic Press**, 2016. p. 1-26. https://doi.org/10.1016/B978-0-12-801536-0.00001-3

PEI, F.; ZHOU, Y.; XIA, Y. Application of normalized difference vegetation index (NDVI) for the detection of extreme precipitation change. **Forests**, v. 12, n. 5, p. 594, 2021. https://doi.org/10.3390/f12050594.

PILAU, F. G.; BATTISTI, R.; DALMAGO, G. A. Requerimento de irrigação suplementar e eficiência climática para a cultura da soja no Rio Grande do Sul. **Agrometeoros**, 26, 317-325. 2018. http://dx.doi.org/10.31062/agrom.v26i2.26392

PILAU, F. G.; MARIN, F. R.; GRUBERT, D. D. V.; DALMAGO, G. A.; ROMANELLI, T. L. Impact of ENSO-related rainfall variability on soybean yield in the state of Rio Grande do Sul, Brazil. **Agrometeoros**, v. 30, 2022. http://dx.doi.org/10.31062/agrom.v30.e027115

QGIS DEVELOPMENT TEAM. *QGIS* **Geographic Information System. Version** 3.30.0. [S. l.]: Open Source Geospatial Foundation Project, 2023.

ROSSATO, M. **Os climas do Rio Grande do Sul**: variabilidade, tendências e tipologia. 2011. 240 f, Tese de Doutorado. Tese (Doutorado em Geografia) - Universidade Federal do Rio Grande

do Sul, Porto Alegre (RS), 2011. Disponível em: https://lume.ufrgs.br/handle/10183/32620. Acesso em: 15 ago. 2024.

ROUSE, J. W.; HASS, R.; SCHELL, J. A.; DEERING, D. W. Monitoramento de sistemas de vegetação nas grandes planícies com o ERTS. **Simpósio Satélite-1 da Tecnologia dos Recursos da Terra**, v. 3, p. 10-14, 1973.

SAMPAIO, M. I. R.; KUNZ, A.; HILLEBRAND, F. L. ZAMBERLAM, 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**, Curitiba, v. 9, n. 4, p. 350-362, out./dez. 2021. https://doi.org/10.3895/rbgeo.v9n4.14449

SILVA, E. C.; TRENTIN, C. B.; SILVA, I. S. O índice de vegetação NDVI e EVI no monitoramento do cultivo da soja no município de Querência - MT, safra 2020/2021. **Revista Contexto Geográfico**, Maceió, v.8, n. 16, p.90-99, jul. 2023. https://doi.org/10.28998/contegeo.8i16.15694

SOBRINHO NETO, F. S.; DANELICHEN, V. H. Estudo do Uso de Índices de Vegetação nas Culturas do Brasil. **Uniciências**, [S. l.], v. 26, n. 2, p. 100–107, 2023. https://doi.org/10.17921/1415-5141.2022v26n2p100-107

SONG, X. P.; HANSEN, M. C.; POTAPOV, P.; ADUSEI, B.; PICKERING, J.; ADAMI, M.; TYUKAVINA, A. Massive soybean expansion in South America since 2000 and implications for conservation. **Nature Sustainability**, v. 4, n. 9, p. 784-792, 2021. https://doi.org/10.1038/s41893-021-00729-z

SOUZA JR, C. M.; Z. SHIMBO, J.; ROSA, M. R.; PARENTE, L. L.; A. ALENCAR, A.; RUDORFF, B. F.; AZEVEDO, T. Reconstructing three decades of land use and land cover changes in Brazilian biomes with Landsat archive and earth engine. **Remote Sensing**, v. 12, n. 17, p. 2735, 2020. https://doi.org/10.3390/rs12172735

STRECK, E. V. **Solos do Rio Grande do Sul**. UFRGS, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Departamento de Solos, Faculdade de Agronomia, 2018.

TAVARES, C. J.; RIBEIRO JUNIOR, W. Q.; RAMOS, M. L. G.; PEREIRA, L. F.; CASARI, R. A. D. C. N.; PEREIRA, A. F.; MERTZ-HENNING, L. M. Water stress alters morphophysiological, grain quality and vegetation indices of soybean cultivars. **Plants**, v. 11, n. 4, p. 559, 2022. https://doi.org/10.3390/plants11040559

TORRES, R.; ZORZI, A. L.; OZAKI, V. A.; MARTINS, G. Expansão do cultivo de soja no Rio Grande do Sul: Seu efeito sobre a gestão de riscos e composição agrícola. **Desenvolvimento em Questão**, v. 21, n. 59, p. e14086-e14086, 2023. https://doi.org/10.21527/2237-6453.2023.59.14086

WEST, H.; QUINN, N.; HORSWELL, M. Remote sensing for drought monitoring & impact assessment: Progress, past challenges and future opportunities. **Remote Sensing of Environment**, [S.l.], v. 232, 2019. https://doi.org/10.1016/j.rse.2019.111291

YAGCI, A. L.; DI, L.; DENG, M. The effect of corn–soybean rotation on the NDVI-based drought indicators: a case study in Iowa, USA, using Vegetation Condition Index. **GIScience e Remote Sensing**, v. 52, n. 3, p. 290-314, 2015. https://doi.org/10.1080/15481603.2015.1038427

ZANON, A. J.; STRECK, N. A.; GRASSINI, P. Climate and management factors influence soybean yield potential in a subtropical environment. Agronomy Journal, v. 108, n. 4, p. 1447-1454, 2016. https://doi.org/10.2134/agronj2015.0535

ZHANG, Y.; ZHANG, L.; WANG, J.; DONG, G.; WEI, Y. Quantitative analysis of NDVI driving factors based on the geographical detector model in the Chengdu-Chongqing region, China. **Ecological Indicators**, v. 155, p. 110978, 2023. https://doi.org/10.1016/j.ecolind.2023.110978

CONTRIBUIÇÃO DOS AUTORES

Eric Moises Beilfuss: Conceitualização, Curadoria dos dados, Análise dos dados, Metodologia, Pesquisa, *Design* da apresentação de dados, Redação do manuscrito original, Redação –revisão e edição. Carina Petsch: Análise dos dados, Metodologia, Pesquisa, *Design* da apresentação de dados, Redação do manuscrito original, Redação –revisão e edição. Romario Trentin: Análise dos dados, Metodologia, Pesquisa, *Design* da apresentação de dados, Redação do manuscrito original, Redação –revisão e edição.

EDITOR ASSOCIADO: Silvio Carlos Rodrigues.

DISPONIBILIDADE DE DADOS: Os dados que fundamentam os resultados deste estudo poderão ser disponibilizados pelo autor correspondente, mediante solicitação devidamente justificada. [Eric Moises Beilfuss].

Este é um artigo de acesso aberto distribuído nos termos da Licença de Atribuição Creative Commons, que permite o uso irrestrito, distribuição e reprodução em qualquer meio, desde que o trabalho original seja devidamente citado.