



USO DO SENSORIAMENTO REMOTO PARA AVALIAÇÃO DE SECA EM ÁREAS AGRÍCOLAS DE PEQUENA ESCALA: ESTUDO DE CASO DA SECA NA REGIÃO CENTRAL DO RIO GRANDE DO SUL

Remote sensing to assess drought in small-scale agricultural areas: a case study of drought in the central region of Rio Grande do Sul

Uso de la detección remota para la evaluación de la sequía en zonas agrícolas de pequeña escala: un estudio de caso de sequía en la región central de Rio Grande do Sul

Lidiane Cristina Oliveira Costa  

Centro Nacional de Monitoramento e Alertas de Desastres Naturais (Cemaden)

lidiane.costa@cemaden.gov.br

Suelen Roballo Fisher  

Centro Nacional de Monitoramento e Alertas de Desastres Naturais (Cemaden)

suelen.roballo@cemaden.gov.br

Ana Paula Martins Amaral Cunha  

Centro Nacional de Monitoramento e Alertas de Desastres Naturais (Cemaden)

ana.cunha@cemaden.gov.br

Resumo: Este estudo avaliou o uso de índices de sensoriamento remoto para monitorar os impactos da seca na produção de soja em pequenas áreas (<2km²). O estudo se concentrou em sete áreas localizadas em Santiago (RS), abrangendo dois ciclos de cultivo (Safrá 1: 2018-2019 e Safrá 2: 2019-2020). Dados de precipitação derivados de satélite foram usados para calcular o Índice de Precipitação Padronizada (SPI) e caracterizar os eventos de seca que ocorreram entre 2018 e 2020 na área de estudo. Além disso, dados de temperatura foram utilizados para avaliar a ocorrência de eventos de calor extremo durante o período de análise. Os dados do *Enhanced Vegetation Index* (EVI) foram empregados para avaliar os efeitos do déficit hídrico na produção de soja. Os resultados indicaram três eventos de seca entre 2018 e 2020, sendo que o período mais intenso e severo ocorreu entre fevereiro

e abril de 2020, coincidindo com a fase de plantio em todas as áreas. Além disso, foram identificadas seis ondas de calor, incluindo uma em março de 2020, que coincidiu com o evento de seca severa, formando um evento composto de seca-calor. A análise dos dados do EVI revelou um impacto mais significativo do déficit hídrico na Safra 2, particularmente em parcelas não irrigadas, resultando em menor produtividade. No geral, o estudo demonstrou a viabilidade de utilizar técnicas de sensoriamento remoto para monitorar os impactos da seca na produção agrícola, mesmo em pequenas áreas.

Palavras-chave: Seca agrícola. Eventos Extremos. Índices de Secas. Sensoriamento Remoto.

Abstract: This study evaluated the use of remote sensing indices to monitor drought impacts on soybean production in small areas (<2km²). The study focused on seven areas located in Santiago (RS), spanning two crop cycles (Crop-1: 2018-2019 and Crop-2: 2019-2020). Satellite-derived precipitation data were used to calculate the Standardized Precipitation Index (SPI) and characterize the drought events that occurred between 2018 and 2020 in the study area. Additionally, temperature data were utilized to assess the occurrence of extreme heat events during the analysis period. The Enhanced Vegetation Index (EVI) data was employed to evaluate the effects of water deficit on soybean production. The results indicated three drought events between 2018 and 2020, with the most intense and severe period occurring between February and April 2020, coinciding with the planting phase in all areas. Furthermore, six heatwaves were identified, including one in March 2020, which coincided with the severe drought event, forming a compound drought-heat occurrence. Analysis of the EVI data revealed a more significant impact of water deficit on Crop 2, particularly in non-irrigated plots, resulting in lower productivity. Overall, the study demonstrated the feasibility of utilizing remote sensing techniques to monitor drought impacts on agricultural production, even in small areas.

Keywords: Agricultural drought. Extreme Events. Drought Indexes. Remote sensing.

Resumen: Este estudio evaluó el uso de índices de teledetección para monitorear los impactos de la sequía en la producción de soja en áreas pequeñas (<2 km²). El estudio se centró en siete áreas ubicadas en Santiago (RS), que abarcan dos ciclos de cultivo (Cultivo-1: 2018-2019 y Cultivo-2: 2019-2020). Los datos de precipitación derivados de satélite se utilizaron para calcular el Índice de precipitación estandarizado (SPI) y caracterizar los eventos de sequía que ocurrieron entre 2018 y 2020 en el área de estudio. Además, los datos de temperatura se utilizaron para evaluar la ocurrencia de eventos de calor extremo durante el período de análisis. Los datos del Índice de Vegetación Mejorado (EVI) se emplearon para evaluar los efectos del déficit de agua en la producción de soja. Los resultados indicaron tres eventos de sequía entre 2018 y 2020, ocurriendo el período más intenso y severo entre febrero y abril de 2020, coincidiendo con la fase de siembra en todas las áreas. Además, se identificaron seis olas de calor, incluida una en marzo de 2020, que coincidió con el evento de sequía severa, formando una ocurrencia compuesta de sequía y calor. El análisis de los datos de EVI reveló un impacto más significativo del déficit de agua en el Cultivo 2, particularmente en las parcelas sin riego, lo que resultó en una menor productividad. En general, el estudio demostró la viabilidad de utilizar técnicas de teledetección para monitorear los impactos de la sequía en la producción agrícola, incluso en áreas pequeñas.

Palabras clave: Sequía agrícola. Eventos extremos. Índices de sequía. Teledetección.

Submetido em: 10/02/2023

Aceito para publicação em: 10/07/2023

Publicado em: 30/07/2023

1. INTRODUÇÃO

A base da economia na Região Sul do país é constituída pela agricultura e pecuária, as quais são altamente sensíveis às variações climáticas. A Região Sul é considerada a maior produtora de cereais, leguminosas e oleaginosas, com aproximadamente 37% da produção total do Brasil (IBGE, 2019). Em particular, o Estado do Rio Grande do Sul (RS) é o terceiro maior produtor e exportador de grãos do Brasil, responsável por aproximadamente 15,5% da safra total do país (IBGE, 2021). A principal cultura no estado gaúcho é a soja, cujo aumento da produção no início dos anos 2000 foi impulsionado principalmente pela aplicação da tecnologia e profissionalização dos produtores rurais (DE MELO *et al.*, 2004, CONAB, 2017). Entre os anos de 2018 e 2020, 42 municípios apresentaram produção média superior a 100 mil toneladas/ano e juntos são responsáveis por 43,3% da produção estadual (IBGE, 2021).

Apesar do destaque na produção agrícola e pecuária, os eventos de secas ocorridos nos últimos anos causaram prejuízos econômicos em toda a Região Sul, mas sobretudo aos produtores do Rio Grande do Sul (RS) (FECOAGRO, 2023). Em razão dos impactos das condições de seca registrados dos últimos 3 anos, no início de 2023, o Governo Federal autorizou um repasse de R\$430 milhões para mitigar os impactos na agricultura (FECOAGRO, 2023). Estima-se que 93% das perdas na safra de soja, no Rio Grande do Sul, ocorrem em razão do déficit hídrico (BERLATO e FONTANA, 2003), sendo a disponibilidade de água o principal fator limitante para o rendimento da produção (MOTA *et al.*, 1996). Para obter uma alta produtividade na colheita é necessário um acumulado entre 450 a 850 mm de precipitação total por ciclo, dependendo do clima e da duração do período de crescimento dos grãos (DOORENBOS; KASSAM, 1980; REICHARDT, 1987). Para a soja, o período reprodutivo é aquele no qual a cultura demanda maiores quantidades de água (CARDOSO *et al.*, 2020). A ocorrência de déficit hídrico nesse período crítico é o responsável pela redução do rendimento final, mesmo que a quantidade de água ideal tenha sido atingida no somatório de todo ciclo (BERGAMASCHI *et al.*, 2004; MONTEIRO, 2009). De acordo com Matzenauer *et al.* (2002), é frequente a ocorrência de déficit hídrico durante o período crítico da soja, culminando em uma redução no rendimento de grãos em nove a cada vinte safras.

Na Safra de 2019/2020, o déficit hídrico foi responsável pela redução de rendimento de grãos de soja no RS. Em relação à safra anterior (2018/2019) a perda foi em torno de 1.385

kg ha⁻¹, o que correspondeu à 56% do rendimento médio de safra 2018/2019 (CARDOSO *et al.*, 2020). De forma a suprir a falta de chuva e diminuir os prejuízos na produção agrícola em situações críticas, uma parcela dos produtores utiliza o recurso de irrigação (FARIAS, 1994). A irrigação das culturas agrícolas consiste no suprimento de água às plantas na quantidade necessária e no momento adequado para se obter a melhor rendimento e qualidade do produto (GOMES, 2004; GRIMM *et al.*, 1998). O RS possui 19,5% da área nacional irrigada, sendo um dos principais polos de expansão recente de irrigação por pivôs centrais, principalmente para produção de grãos no noroeste do estado (ANA, 2021). A contínua expansão do uso de irrigação tem como objetivo diminuir o impacto no rendimento e no desenvolvimento das culturas causado pela falta de chuva, garantindo assim uma menor perda de produtividade (SCHMITZ, 2018).

O padrão de precipitação no RS é considerado relativamente homogêneo com acumulados totais entre 1.200 a 2.100 mm, sem uma estação seca definida (BERLATO, 1992; RADIN *et al.*, 2017). Apesar disso, ressalta-se que a variabilidade interanual de precipitação na região afeta o rendimento da produção agrícola (BERLATO; FONTANA, 2003; CARDOSO *et al.*, 2020; WREGGE *et al.*, 2012). Sistemas de grande escala influenciam o regime de precipitação na Região Sul do país, tais como o *El Niño*/Oscilação Sul (ENOS) (GRIMM *et al.*, 1998, 2000) e a Oscilação Decadal do Pacífico (ODP) (ANDREOLI; KAYANO, 2005; FERNANDES *et al.*, 2021; SILVA; SILVA, 2016). A diversidade de fenômenos que atuam na variação da precipitação do RS também influencia na intensidade, na distribuição e frequência da ocorrência de eventos extremos tais como períodos de estiagem ou enchentes (BRAZ *et al.*, 2017).

No que se refere a episódios do ENOS, durante sua fase de *La Niña* (*El Niño*) há um favorecimento de precipitação abaixo (acima) da média climatológica na Região Sul do país (BERGAMASCHI *et al.*, 2004; BERLATO *et al.*, 2005; FONTANA; BERLATO, 1997; GRIMM *et al.*, 1998; JACÓBSEN *et al.*, 2004; NEDEL *et al.*, 2010). Por outro lado, estudos tais como Braz *et al.* (2017) mostraram um maior número de dias de déficit hídrico durante anos neutros do ENOS. Os autores mostraram que 48,6% dos registros (210 dias) seguidos por 43,28% estação relacionados com a atuação do *La Niña* (187 dias) e 8,10% com *El Niño* (35 dias).

Fernandes *et al.* (2021) identificaram a ocorrência de eventos de seca de intensidade severa na Região Sul entre setembro/2006 a janeiro/2007, de julho/2012 a fevereiro/2013 e de março/2020 a maio/2020. No que se refere a influência do fenômeno ENOS, o ano de 2006

foi de neutralidade entre os meses de abril a agosto e a partir de setembro de 2006 até o final do ano, houve influência do *El Niño*, de intensidade fraca. Por outro lado, o fim de 2011 e início de 2012 estava sob influência de *La Niña* de intensidade moderada e condições de neutralidade no final do ano de 2012. Nesse mesmo estudo, os autores sugerem que tanto a seca mais recente que atingiu a região entre 2019 e 2020, como as secas de 2000, 2006 e 2012 estavam sob a influência da fase fria (ou negativa) da ODP.

Diferentes dados ambientais estimados por sensoriamento remoto têm sido amplamente utilizados com a finalidade de avaliar as condições de secas e os impactos do déficit hídrico na produção agrícola (CUNHA et al., 2015; FIGUEIREDO et al., 2016; QIU et al., 2022). Fernandes et al. (2021), por exemplo, além de utilizar diversos índices de seca para a avaliação espaço-temporal do fenômeno na região Sul, utilizou o *Vegetation Healthy Index* (VHI) para estimar os impactos em áreas agroprodutivas. Além do VHI, outros índices de vegetação são utilizados para estimar os impactos da seca na vegetação, como por exemplo, o *Enhanced Vegetation Index* (EVI). Vários estudos mostram que há alta correlação entre o EVI e índices padronizados de precipitação (HELALI, et al., 2023).

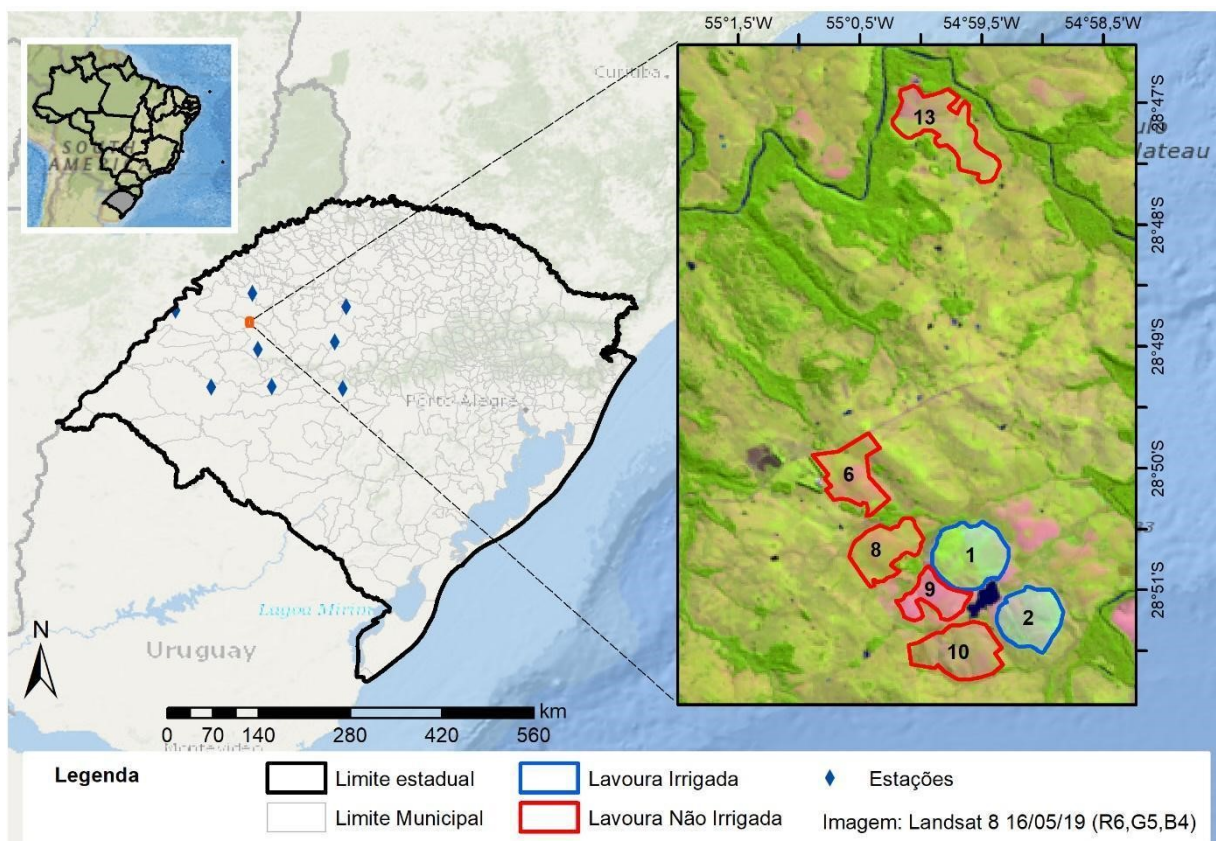
O uso de índices de seca, tais como índices padronizados de precipitação ou índices de vegetação, auxilia no monitoramento das condições hídricas durante o desenvolvimento da cultura e são importantes na avaliação dos impactos. Uma vez que a rede observacional de dados hidrometeorológicos no Brasil ainda é muito deficiente, utilizar apenas dados observacionais in situ para o monitoramento da seca e avaliação de seus impactos, torna-se uma tarefa desafiadora, especialmente considerando a extensão do Brasil e toda sua heterogeneidade. Nesse contexto, o presente estudo consiste na avaliação do uso de índices de sensoriamento para o monitoramento e diagnóstico da seca em uma área de plantio na região central do Rio Grande do Sul. Dispor de ferramentas que possibilitem o diagnóstico de condições de seca em tempo “quase real” são essenciais como apoio em tomadas de decisão, especialmente de curto prazo e com a finalidade de reduzir possíveis impactos decorrentes da seca.

2. METODOLOGIA

2.1. Área de Estudo

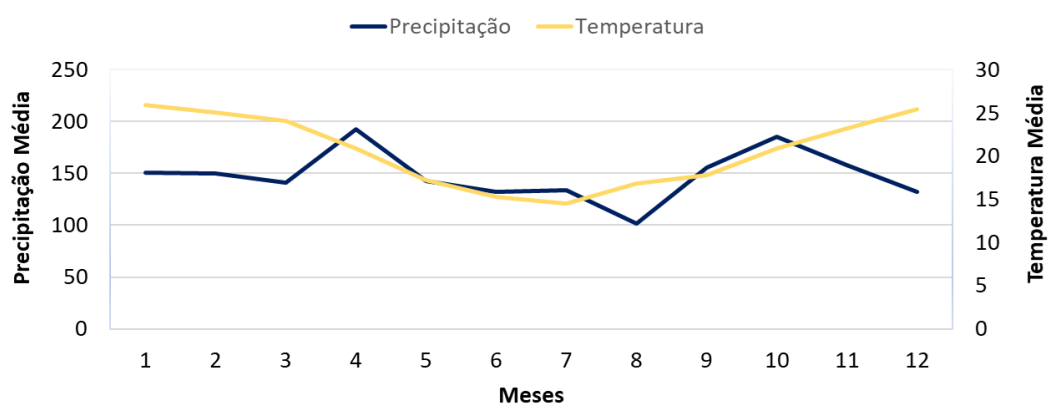
A região de estudo corresponde a uma área rural no município de Santiago/RS e foram consideradas sete parcelas de plantio de soja, sendo duas delas irrigadas, com uma área total de 596,9 ha (Figura 1). No que se refere a climatologia, é possível observar uma precipitação bem distribuída ao longo do ano (Figura 2), sem estação seca definida e precipitação média em torno de 1.900 mm/ano (BERLATO, 1992; GOMES, 2004; MARQUES; RAO, 1999; NIMER, 1989). Em termos de temperatura, os meses mais frios são de maio a setembro, com temperaturas médias entre 14°C a 17°C e de outubro a abril com média acima de 20°C (Figura 2).

Figura 1 – Área de Estudo e Identificação das parcelas estudadas no município de Santiago/RS.



Fonte: Elaborado pelos autores (2023).

Figura 2 – Precipitação média mensal considerando o período de 1981 a 2010 (CHIRPS) e temperatura média mensal considerando o período de 2000 a 2021 para a área de estudo.

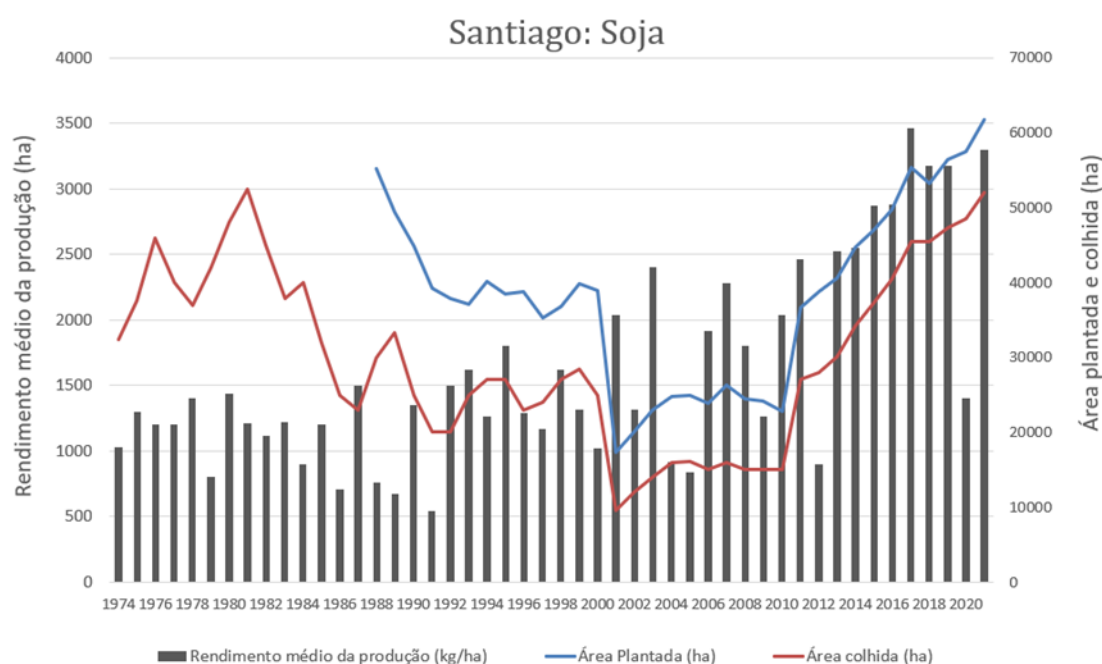


Fonte: *Climate Hazards Group Infrared Precipitation with Stations (CHIRPS)* e Estação São Luiz Gonzaga – INMET.

O município de Santiago faz parte de uma área altamente produtiva no setor agrícola, destacando-se principalmente a cultura da soja. Em Santiago, o plantio de soja tem se destacado como o maior rendimento do setor agrícola, sendo que em 1990 a contribuição da soja nos rendimentos do município era de 48,76%; em 2011 de 71,04%; e em 2021 foi de 89,9% (IBGE, 2021). Segundo a EMBRAPA (2020), a soja se adapta melhor nas regiões com temperaturas que oscilam entre 20°C e 30°C, climatologia encontrada na região de estudo (Figura 2).

Na Figura 3, é apresentada a evolução temporal das áreas plantadas e colhidas, assim como o rendimento médio da cultura de soja para o município de Santiago, no período de 1974 a 2021. Observa-se que o rendimento da produção é altamente sensível às condições climáticas, como as ocorrências de secas que coincidiram com uma redução no rendimento da produção de soja. De acordo com o Atlas Socioeconômico do RS (ATLAS SOCIOECONÔMICO RIO GRANDE DO SUL, 2022), nas duas últimas décadas, os anos com maior número de ocorrência de seca no RS foram 2004, com 346 registros; 2005, com 448, 2009 com 279; 2012 com 381; e 2020 com 500 registros.

Figura 3 - Evolução da área plantada, área colhida e rendimento médio da cultura de soja para o município de Santiago.



Fonte: IBGE, Pesquisa Agrícola Municipal (2021).

2.2. Dados de Precipitação

Em áreas onde a densidade de estações meteorológicas, ou mesmo o período de dados disponíveis são insuficientes, a tarefa de monitorar a intensidade da seca e possíveis impactos na produção agrícola torna-se desafiadora. Embora a interpolação espacial dos dados de precipitação forneça informações importantes sobre as condições atuais da seca, é necessário considerar, além da falta de dados, as incertezas associadas ao processo de interpolação (CUNHA *et al.*, 2017; RHEE *et al.*, 2010). Por outro lado, dados de precipitação estimados por sensoriamento remoto são consistentemente disponibilizados e podem ser utilizados para o diagnóstico do déficit hídrico (NGUYEN *et al.*, 2018; SHEN *et al.*, 2020). No presente estudo, utilizou-se o conjunto de dados de precipitação provido pelo *Climate Hazards Group Infrared Precipitation with Stations* (CHIRPS). O produto CHIRPS possui uma resolução espacial de 0,050 graus, ou aproximadamente 5 km, próximo à linha do Equador, cobertura geográfica de 50°S a 50°N, com dados de 1981 até os dias atuais e disponibilizado em conjuntos de dados diários, pentadais e mensais (COSTA *et al.*, 2019). Os dados de precipitação do CHIRPS foram validados utilizando dados observacionais de precipitação coletados de estações

meteorológicas instaladas nas proximidades da área de estudo, como mostrado na Figura 1. Para a validação calculou-se a Raiz Quadrada do Erro Médio (RMSE), o Erro Médio Absoluto (MAE) e o Coeficiente de Determinação (R²).

2.3. Índice Padronizado de Precipitação (SPI)

Dentre os métodos tradicionais de avaliação e monitoramento da seca, destaca-se o Índice de Precipitação Padronizado (SPI) (MCKEE *et al.*, 1993), que é calculado a partir de séries temporais de longo prazo de precipitação. O SPI baseia-se na distribuição de probabilidades da precipitação e pode ser calculado em diferentes escalas de tempo. No cálculo, a precipitação é ajustada à uma função de distribuição de probabilidade gamma e, em seguida, a função de distribuição normal inversa é utilizada para reescalar os valores de probabilidade. Mais informações sobre o cálculo do SPI podem ser encontradas em vários estudos anteriores, incluindo Mckee (1993). Assim, para o cálculo do SPI foram utilizados dados mensais de precipitação oriundos do CHIRPS para o período de 1981 a 2020. Nesse estudo, calculamos o SPI na escala de 1 mês com a finalidade de avaliar as condições de déficit de chuva mensal ao longo dos ciclos agrícolas, conforme definido na Tabela 1.

Para fins de caracterização dos eventos de secas ocorridos durante as safras 2018-2019 e 2019-2020, métricas de severidade e intensidade da seca foram calculadas. A severidade é calculada a partir do somatório, em valores absolutos, do SPI mensal, durante um evento de seca (UNDRR, 2021). Um evento de seca, por sua vez, é iniciado quando os valores de SPI forem menores ou iguais a -0,8 (seca moderada) por pelo menos dois meses consecutivos e, finaliza quando os valores seguintes de SPI em um passo de tempo forem maiores ou iguais a 0, também por pelo menos dois meses consecutivos. A intensidade da seca neste estudo é definida como a razão entre a severidade e a duração do evento de seca (UNDRR, 2020).

2.4. Dados de Temperatura

Além da identificação dos eventos de secas, dados observacionais diários de temperaturas máximas (TMAX) e mínimas (TMIN) foram utilizados com a finalidade de avaliar se durante as duas safras também ocorreram eventos de calor extremo. Assim, calculou-se o percentil 90 dos dados diários de TMAX e TMIN para definir os dias em que ambas as

temperaturas, de forma simultânea, foram superiores ao percentil 90. Se tais condições ocorrem em três ou mais dias consecutivos, configura-se uma onda de calor (MARENGO *et al.*, 2021). Para essa análise, utilizou-se dados da estação de São Luiz Gonzaga/RS (28°25'12.0" S, 54°57'36.0" O) do Instituto Nacional de Meteorologia (INMET, 2022).

2.5. Índice de Vegetação Melhorado (EVI)

O acompanhamento do crescimento vegetativo da soja foi realizado por meio do *Enhanced Vegetation Index* (EVI), um índice de vegetação amplamente utilizado para acompanhamento da saúde da vegetação (*greenness*), tal como para acompanhamento de safra agrícola (FIGUEIREDO *et al.*, 2016; HATFIELD; PRUEGER, 2010; QIU *et al.*, 2022). As principais vantagens do EVI em relação ao NDVI são sua maior sensibilidade em áreas com vegetação mais densa e a consideração de correções atmosféricas, o que resulta na redução de ruídos nos dados (USG, 2023). Além disso, ao levar em conta as correções atmosféricas, o EVI consegue compensar os efeitos negativos causados por partículas atmosféricas, melhorando a qualidade e a confiabilidade dos resultados obtidos.

Para o cálculo do EVI foram utilizadas imagens providas pelo *Land Remote Sensing Satellite* (Landsat 8). A Tabela 1 apresenta as imagens Landsat 8 utilizadas nesse estudo, período de plantio de cada uma das parcelas e as datas das imagens com nuvem, destacadas em azul claro. O primeiro processamento realizado nas imagens consistiu na aplicação do fator de escala. É importante ressaltar que esse pré-processamento foi necessário devido ao fato de as imagens serem da Coleção-2 Level-2 do Landsat, a fim de corrigir erros associados aos valores de reflectância de superfície que estavam fora da escala adequada (1-65455, com 0 sendo atribuído como 'NoData') (USGS, 2023). Essa etapa de pré-processamento é fundamental para garantir a consistência e a confiabilidade dos dados, permitindo uma análise precisa e correta das informações contidas nas imagens. A aplicação do fator de escala é um passo importante para normalizar as intensidades de reflectância e garantir a interpretação correta dos dados obtidos. (USGS, 2023)

Posteriormente foi calculado o EVI para todas as imagens, conforme a Equação 1 (USG, 2023), e extraído o valor médio para cada uma das parcelas. Para as imagens com cobertura de nuvens, os valores foram desconsiderados e estimados a partir da média do mês posterior

e anterior à imagem com nuvem. O EVI foi analisado para cada uma das parcelas, levando em consideração o período de plantio e colheita de ambas as safras.

Além disso, foram calculados os acumulados de precipitação utilizando os dados do CHIRPS. No caso da Safra 1, o cálculo do acumulado de precipitação foi realizado no período de 1º de novembro de 2018 a 16 de maio de 2019. Já para a Safra 2, o cálculo foi feito no período de 1º de novembro de 2019 a 18 de maio de 2020. Os acumulados de precipitação foram calculados de acordo com as datas das imagens (conforme a Tabela 1). Por exemplo, para a imagem de 12 de fevereiro de 2020, o acumulado de precipitação considerou o período de 28 de janeiro de 2020 a 12 de fevereiro de 2020. Em outras palavras, o acumulado de precipitação compreendeu o intervalo de tempo entre o primeiro dia após a data da imagem anterior até a data da imagem em análise.

Por fim, para validar a produção, foram utilizados dados de campo referentes às áreas destacadas na Figura 1 para ambas as safras. Esses dados de campo forneceram informações sobre a produtividade das culturas e foram utilizados para avaliar e comparar os resultados obtidos a partir das análises do EVI.

$$(1) \quad \text{EVI} = 2.5 * ((\text{Band 5} - \text{Band 4}) / (\text{Band 5} + 6 * \text{Band 4} - 7.5 * \text{Band 2} + 1))$$

Tabela 1 - Data das imagens Landsat 8 utilizadas de acordo com o plantio e colheita de cada parcela.

Parcelas							Safra 1
1	2	6	8	9	10	13	
							05/11/2018
							21/11/2018
							07/12/2018
							23/12/2018
							08/01/2019
							24/01/2019
							09/02/2019
							25/02/2019
							13/03/2019
							29/03/2019
							14/04/2019
							30/04/2019
							16/05/2019

Parcelas							Safra 2
1	2	6	8	9	10	13	
							08/11/2019
							24/11/2019
							10/12/2019
							26/12/2019
							11/01/2020
							27/01/2020
							12/02/2020
							28/02/2020
							15/03/2020
							31/03/2020
							16/04/2020
							02/05/2020
							18/05/2020

Áreas Irrigadas

Áreas Não Irrigadas

Imagens com nuvens

Fonte: Elaborado pelos autores (2023).

3. RESULTADOS E DISCUSSÕES

3.1. Validação dos dados de chuva

A Tabela 2 apresenta os resultados da comparação dos dados observacionais de precipitação com aqueles estimados por satélite (CHIRPS). De modo geral, os dados de precipitação do CHIRPS correspondem satisfatoriamente aos dados observados, o que é evidenciado pelo coeficiente de correlação médio de 0,8 e pelos valores de RMSE e MAE mais baixos (média de 23,59). Dessa maneira, em razão da falta de estações meteorológicas inseridas na área de estudo (Figura 1), optou-se por utilizar os dados de precipitação do CHIRPS.

Tabela 2 - Comparação dos dados diários de precipitação do CHIRPS x dados de estação.

NOME	CODIGO	LAT	LON	RMSE	MAE	R2
Cruz Alta	A853	-28.6034	-53.6736	32.75	22.4	0.81
Tupanciretã	A886	-29.0894	-53.8267	35.99	26.29	0.78
São Vicente do Sul	A889	-29.7021	-54.6943	31.37	20.21	0.81
São Luiz Gonzaga	A852	-28.4171	-54.9624	40.18	27.78	0.78
São Borja	A852	-28.6501	-56.0163	35.41	25.59	0.82
Santiago	A830	-29.1916	-54.8857	36.96	26.59	0.78
Santa Maria	A803	-29.725	-53.7205	21.02	16.29	0.9

Fonte: Elaborado pelos autores (2023).

3.2. Análise dos eventos de secas

A partir dos dados de SPI-1, foi possível fazer a caracterização dos eventos de secas ocorridos entre os anos de 2018 a 2020 na área de estudo. No período analisado, o evento de seca ocorrido entre fevereiro e abril de 2020, embora tenha sido o de menor duração, foi aquele com maior severidade (-3.55) e intensidade (-1.18, Tabela 3). A intensidade da seca é uma métrica importante na estimativa dos possíveis impactos do evento de seca na produção agrícola, principalmente se ocorrer durante o período de desenvolvimento da cultura.

De acordo com a literatura, entre fevereiro e abril de 2020, a atuação de bloqueios atmosféricos sobre a Região Sul do país dificultou a entrada de umidade e, conseqüentemente, a ocorrência de chuva sobre o RS (TAZZO *et al.*, 2022). Ocorreram apenas eventos de chuva isolados, que proporcionaram totais acumulados com valores, em alguns casos, significativos, porém, a distribuição temporal permaneceu irregular em todas as regiões do Estado (CARDOSO *et al.*, 2020; JUNGES, 2020), o que pode ser verificado pelos valores de SPI negativos. Em grande escala, a atuação da ODP na sua fase fria ou negativa contribuiu para as anomalias negativas de precipitação no verão do RS (FERNANDES *et al.*, 2021).

Tabela 3 - Caracterização dos eventos de secas em termos da duração, severidade e intensidade entre os anos de 2018 a 2020.

Evento	Duração (meses)	Severidade	Intensidade
Fev-Ago/2018	7	-3.41	-0.49
Fev-Abr/2020	3	-3.55	-1.18
Ago-Dez/2020	5	-3.52	-0.70

Fonte: Elaborado pelos autores (2023).

De acordo com a definição de onda calor adotada neste estudo (MARENGO *et al.*, 2021), no período entre 2018 a 2020, ocorreram 6 ondas de calor na região de estudo (Tabela 4). Dessas, a mais longa ocorreu em junho de 2019, com duração de 7 dias (Tabela 4). Em relação aos períodos das safras 1 e 2, observa-se que apenas na Safra 2 (novembro de 2019 a maio de 2020) ocorreram três eventos de ondas de calor, sendo duas em meses consecutivos (novembro e dezembro). Entre os dias 27 a 30 de dezembro de 2020, a temperatura máxima variou de 38,5 a 40,1^o C (aproximadamente 7^oC acima da média), já entre os dias 12 a 14 de março, variou entre 38,3^o a 39,5^o C (aproximadamente 8^oC acima da média). Por outro lado, durante a Safra 1 (novembro de 2018 a maio de 2019) não foi identificada nenhuma onda de calor. Destaca-se, que a onda de calor registrada no mês de março de 2020 (5 dias), ocorreu concomitantemente com o evento de seca mais severa e intensa (fevereiro a abril de 2020), configurando assim um evento composto de seca-calor. De modo geral, o aumento da temperatura do ar e maior disponibilidade de energia solar alteram o aspecto da vegetação e contribuem para o aumento dos valores de EVI, no entanto, o déficit de chuvas pode incorrer

em falta de umidade na fase inicial do desenvolvimento das lavouras, causando estresse nas plantas por conta do déficit hídrico, agravado pelas altas temperaturas, levando então à redução do EVI (FERRARI *et al.*, 2015; FONTANA *et al.*, 2007; MOREIRA, L. C. J.; TEIXEIRA, A. S.; GALVÃO, 2015).

Tabela 4 - Número de dias dos eventos de ondas de calor registrados entre 2018 a 2020.

	Jan	Fev	Mar	Abr	Mai	Jun	Jul	Ago	Set	Out	Nov	Dez
2018				5								
2019						7				3	3	4
2020			5									

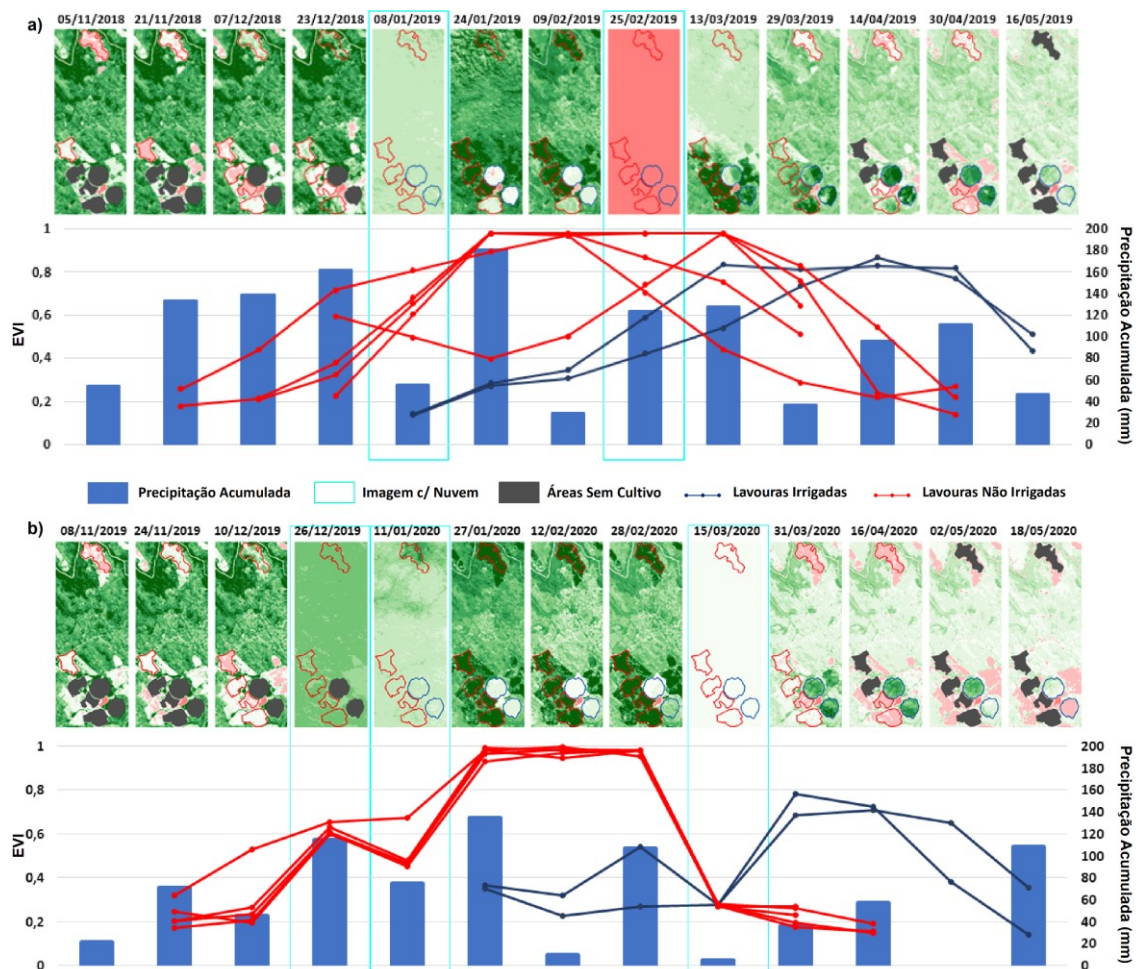
Fonte: Elaborado pelos autores (2023).

3.3. Impactos da seca nas safras 2018-2019 e 2019-2020

A produção para cada uma das parcelas utilizadas no presente estudo (Tabela 5) representa a verdade em campo que posteriormente foi analisada em conjunto com os dados de EVI e precipitação. A produtividade foi fornecida pelos proprietários da fazenda, sendo calculada a partir do volume colhido em sacas pela área do plantio em hectares. Como é possível observar, a produção total da Safra 2 (2019-2020) foi 26% menor em comparação com a Safra 1 (2018-2019). As menores diferenças de produção foram observadas nas parcelas irrigadas (1 e 2), onde a produtividade por hectare foi de 60 para 55 sacas. Em contrapartida, as parcelas não irrigadas apresentaram a produtividade reduzida, mas sem um padrão de perda entre elas. As maiores quedas na produtividade ocorreram nas parcelas 6 e 8, redução de 25 e 24 sacas/ha, respectivamente. As parcelas 9, 10 e 13 tiveram uma redução respectivamente de 16, 17 e 8 sacas/ha (Tabela 5).

O impacto verificado, a partir dos registros da Produção Agrícola Municipal (IBGE, 2021) e pelo dado de campo das parcelas (Tabela 5), também pode ser observado por meio da série temporal do EVI e precipitação (Figura 4). A correlação entre as variáveis de precipitação e índices de vegetação é demonstrada em estudos tais como de Mo *et al.* (2019), Roustá *et al.* 2020 e Molenga *et al.* (2019), que encontraram correlação entre 0,46 e 0,54. Além disso, o índice de vegetação se mostra sensível à variabilidade de precipitação (LI *et al.*, 2021).

Figura 4 - Evolução temporal dos dados de EVI e precipitação para as safras 1 e 2. a) Safra 1 (2018-2019). b) Safra 2 (2019-2020).



Fonte: Elaborado pelos autores (2023). Imagens: Landsat 8. Precipitação: CHIRPS.

De acordo com a EMBRAPA (2020), existem duas principais fases no ciclo de plantio da soja, a primeira é o período vegetativo (PE), que vai do início do seu desenvolvimento até a primeira flor, e o período reprodutivo (PR), que é da abertura da primeira flor até a maturação da planta. A falta ou excesso da água em quaisquer dessas fases pode impactar a produção e o rendimento da safra.

Tabela 5 - Plantio, colheita e produção por parcela para as Safras 1 e 2.

	Parcela	Área (ha)	Plantio	Colheita	Produtividade sacas/hectare	Irrigada
Safr 1	6	112	semana 4 de novembro/18	mar/19	50	Não irrigada
	8	77	semana 1 de dezembro/18	mar/19	52	Não irrigada
	9	64	semana 2 de dezembro/18	abr/19	56	Não irrigada
	10	86,5	semana 3 de dezembro/18	abr/19	52	Não irrigada
	13	142	semana 3 de novembro/18	abr/19	54	Não irrigada
	1	105	semana 4 de janeiro/19	mai/19	60	Irrigada
Safr 2	2	74,4	semana 5 de janeiro/19	mai/19	60	Irrigada
	6	112	semana 4 de novembro/19	mar/20	25	Não irrigada
	8	77	semana 1 de dezembro/19	mar/20	28	Não irrigada
	9	64	semana 2 de dezembro/19	abr/20	40	Não irrigada
	10	86,5	semana 3 de dezembro/19	abr/20	35	Não irrigada
	13	142	semana 2 de novembro/19	abr/20	46	Não irrigada
	1	105	semana 4 de janeiro/20	mai/20	55	Irrigada
2	74,4	semana 5 de janeiro/20	mai/20	55	Irrigada	

Fonte: Elaborado pelos autores (2023).

No estudo de caso realizado, o impacto do baixo volume de precipitação na produção é evidente na Safra 2 (2019-2020), como ilustrado na Figura 4b. Essa figura mostra que os valores do EVI apresentam um crescimento não contínuo, com quedas nos valores devido aos baixos acumulados de precipitação.

Em condições normais, com chuvas acumuladas dentro do esperado, espera-se que os valores do EVI cresçam gradualmente e fique constante durante o período de estação de crescimento, que geralmente dura cerca de dois meses (EMBRAPA, 2020; ESQUERDO, 2007). No entanto, devido aos baixos acumulados de precipitação na Safra 2, observa-se uma interrupção no crescimento do EVI, refletindo a falta de água disponível para as plantas e afetando negativamente a vegetação e a produção.

Na Safra 1 (2018-2019), a curva dos valores de EVI é mais constante, exceto na parcela 10. Além disso, a chuva é melhor distribuída, embora em 3 períodos observa-se um menor volume acumulado de precipitação durante os períodos de PE e PR. Ressalta-se ainda que

além do déficit na precipitação, na Safra 2, houveram registros de eventos de calor em novembro, dezembro/19 e em março/20, conforme mostrado anteriormente (Tabela 4).

Na Safra 2, durante o período reprodutivo da soja, que ocorreria aproximadamente a partir da imagem de 27/01/2020, quando a precipitação é fundamental para o ganho de biomassa, observou-se baixos volumes de precipitação, 253 mm em janeiro, 63 mm em fevereiro, 162 mm em março e 74 mm em abril. Na data de 15/03/2020 o acumulado de chuva foi de 6 mm, culminando na redução dos valores de EVI (Figura 4b).

Apesar dessas condições adversas, as parcelas irrigadas, embora também tenham sofrido queda durante o PE, conseguiram manter uma curva do índice de vegetação, o EVI, mais próxima do esperado para uma produção adequada (ESQUERDO, 2007). É importante ressaltar que houve uma redução na produtividade dessas parcelas, de 60 para 55 sacas/ha em comparação com a safra anterior, devido aos efeitos do PE. No entanto, o desempenho das parcelas irrigadas foi relativamente melhor em relação às demais, apresentando uma curva de EVI que se aproximou mais do padrão esperado para uma produção saudável.

Esses resultados indicam que o uso de sistemas de irrigação foi capaz de mitigar, em certa medida, os impactos negativos do estresse hídrico durante o PE. Enquanto as parcelas não irrigadas foram mais afetadas pela falta de água, as parcelas irrigadas se beneficiaram do suprimento adicional de água, permitindo um crescimento mais consistente das plantas e resultando em uma curva de EVI mais próxima do desejado.

A seca de maior intensidade e severidade (Tabela 2) ocorreu justamente durante o período reprodutivo, importante fase do ciclo da soja. Segundo Gonçalves (2020), durante a safra 2019/2020, na região onde está localizado o município de Santiago (6), choveu aproximadamente 40% a menos do que era esperado e, além disso, observou-se a redução da evapotranspiração em 26%, gerando assim um impacto na produção estimado em 53%.

Outro estudo, que avaliou as perdas econômicas para soja de 2016 a 2020, apontou a safra 2019/2020 como quebra de produtividade severa para o RS (MARCELO HIRAKURI, 2021), o prejuízo para essa safra segundo autores foi de R\$6.896 bilhões. De acordo com (ROVANI, 2020), o cálculo do ponto de equilíbrio, ou seja, valor mínimo de produtividade sem que haja lucro ou prejuízo, para a safra de 2019/2020, foi de 32,83 sacas/ha para áreas não arrendadas, e de 45,96 sacas/ha para áreas arrendadas. A diferença do ponto de equilíbrio de terras arrendadas para terras não arrendadas se dá pelos gastos com arrendamento, o que encarece

a produção. Isso indica que, em caso de não arrendamento, parcelas inseridas na área de estudo (6 e 8) poderiam ter apresentado prejuízo econômico, porém, caso as parcelas sejam arrendadas, 4 delas poderiam indicar prejuízos e uma no ponto de equilíbrio (parcela 13). Ressalta-se que apenas as parcelas irrigadas não apresentariam prejuízos independente se a área plantada fosse arrendada ou não, contudo, ainda assim houve uma queda na produção, que pode estar associada ao evento composto de seca-calor ocorrido durante a safra, mas especialmente em março/2020.

4. CONSIDERAÇÕES FINAIS

Esse estudo partiu da dificuldade em avaliar a intensidade e o impacto da seca na produção agrícola por falta ou insuficiência de dados observacionais *in situ*. Desse modo, foram utilizados índices de sensoriamento remoto para o monitoramento e diagnóstico da seca em uma área de plantio na região central do Rio Grande do Sul, durante a safra de soja nos períodos de 2018/2019 e 2019/2020.

De forma geral, os resultados obtidos a partir das análises efetuadas com os dados de sensoriamento remoto, seja para precipitação, temperatura ou índice de vegetação, indicaram a queda na produção na safra de 2019/2020 no sul do país. Tais resultados corroboram com os relatados em artigo e relatórios, bem como visto pela queda da produtividade em dados da Produção Agrícola Municipal (PAM-IBGE) e pelos dados de validação das parcelas na região de estudo, seja para as parcelas irrigadas ou não irrigadas.

O evento combinado de seca com ondas de calor, principalmente aquele ocorrido em março de 2020, pode ter intensificado os impactos do déficit hídrico, contribuindo para a redução da produtividade de todas as parcelas da área de estudo. O evento composto de seca e calor pode ser uma explicação para a queda de 10 sacas/ha nas parcelas irrigadas. Mesmo com essa redução, as parcelas irrigadas ainda apresentaram um impacto menor em termos de produtividade em comparação com as demais parcelas.

Os dados disponíveis de sensoriamento remoto, de forma gratuita, demonstraram ser eficientes para o monitoramento do impacto da seca, ainda que para pequenas parcelas, como foi o caso deste estudo, com área das parcelas entre 64 ha a 142 ha. Por outro lado, o sensoriamento remoto também permite o monitoramento operacional e sistemático de

grandes áreas de forma rápida e eficiente, o que é essencial para a gestão do risco de seca em regiões extensas e com diversas culturas. O monitoramento sistemático da seca agrícola é fundamental para garantir a segurança alimentar, reduzir os impactos econômicos e sociais da seca e promover medidas de adaptação às mudanças climáticas.

AGRADECIMENTOS

Os autores agradecem ao Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico (CNPq) pelo apoio financeiro (projeto 444321/2018-7, processo 301206/2022-8) deste trabalho. Este artigo é uma contribuição do Instituto Nacional de Ciência e Tecnologia (INCT) para Mudanças Climáticas Fase 2, financiado pelo projeto CNPq Processo 465501/2014-1 e FAPESP Processo 2014/50848-9 e 2017/09659-6, e financiado pelo projeto CNPQ Processo 406667/2022-5.

REFERÊNCIAS

- ANA. **Atlas Irrigação. Uso da água na agricultura irrigada.** [S. l.: s. n.], 2021. 2021.
- ANDREOLI, R. V.; KAYANO, M. T. ENSO-related rainfall anomalies in South America and associated circulation features during warm and cold Pacific decadal oscillation regimes. **International Journal of Climatology**, [s. l.], v. 25, n. 15, p. 2017–2030, 2005. Disponível em: <https://onlinelibrary.wiley.com/doi/10.1002/joc.1222>.
- ATLAS SOCIOECONÔMICO RIO GRANDE DO SUL. **Estiagens e Secas.** [S. l.: s. n.], 2022. Disponível em: <https://atlassocioeconomico.rs.gov.br/estiagens-e-secas>.
- BERGAMASCHI, H.; DALMAGO, G. A.; BERGONCI, J. I.; BIANCHI, C. A. M.; MÜLLER, A. G.; COMIRAN, F.; HECKLER, B. M. M. Distribuição hídrica no período crítico do milho e produção de grãos. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, [s. l.], v. 39, n. 9, p. 831–839, 2004.
- BERLATO, M. A. As condições de precipitação pluvial no Estado do Rio Grande do Sul e os impactos das estiagens na produção agrícola. **Agrometeorologia aplicada à irrigação**, [s. l.], v. 2, p. 11–23, 1992.
- BERLATO, M. A.; FARENZENA, H.; FONTANA, D. C. Associação entre El Niño Oscilação Sul e a produtividade do milho no Estado do Rio Grande do Sul. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, [s. l.], v. 40, n. 5, p. 423–432, 2005.
- BERLATO, M. A.; FONTANA, D. C. **El Niño e La Niña: impactos no clima, na vegetação e na agricultura do Rio Grande do Sul: aplicações de previsões climáticas na agricultura.** [S. l.]: Editora da UFRGS, 2003. 2003.

BRAZ, D. F.; PINTO, L. B.; CAMPOS, C. R. J. de. Ocorrência De Eventos Severos Em Regiões Agrícolas Do Rio Grande Do Sul. **Geosciences = Geociências**, [s. l.], v. 36, n. 1, p. 89–99, 2017.

CARDOSO, L. S.; JUNGES, A. H.; TAZZO, I. F.; VERONE, F.; TAROUÇO, A. K.; OLIVEIRA, A. M. R.; BREMM, C. Análise da estiagem na safra 2019/2020 e impactos na agropecuária do Rio Grande do Sul. **Porto Alegre: SEAPDR/DDPA**, [s. l.], v. 6, p. 8–57, 2020.

COMPANHIA NACIONAL DE ABASTECIMENTO. Acompanhamento de Safra Brasileira de Grãos. Brasília, v.4, Safra 2016/2017, n.6, **Sexto levantamento**, mar. 2017.

COSTA, J. C.; PEREIRA, G.; SIQUEIRA, M. E.; DA SILVA CARDOZO, F.; DA SILVA, V. V. VALIDAÇÃO DOS DADOS DE PRECIPITAÇÃO ESTIMADOS PELO CHIRPS PARA O BRASIL. **Revista Brasileira de Climatologia**, [s. l.], v. 24, 2019. Disponível em: <https://revistas.ufpr.br/revistaabclima/article/view/60237>.

CUNHA, A. P. M.; ALVALÁ, R. C.; NOBRE, C. A.; CARVALHO, M. A. Monitoring vegetative drought dynamics in the Brazilian semiarid region. **Agricultural and Forest Meteorology**, [s. l.], v. 214–215, p. 494–505, 2015. Disponível em: <https://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S0168192315007157>.

CUNHA, A. P. M. do A.; SANTANA DE BARROS BRITO, S.; ROSSATO, L.; CÉLIA DOS SANTOS ALVALÁ, R.; CARVALHO, M. A.; ZERI, M.; CUNNINGHAM, C.; PAULA DOS REIS MACIEL, A.; SOARES ANDRADE, E.; MARCIA DA SILVA PINTO VIEIRA, R. Avaliação De Indicador Para O Monitoramento Dos Impactos Da Seca Em Áreas De Pastagens no Semiárido Do Brasil. **Revista Brasileira de Cartografia**, [s. l.], n. 69, p. 89–106, 2017. Disponível em: www.emdat.be/.

DE MELO, R. W.; FONTANA, D. C.; BERLATO, M. A. Indicadores de produção de soja no Rio Grande do Sul comparados ao zoneamento agrícola. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, [s. l.], v. 39, n. 12, p. 1167–1175, 2004.

DOORENBOS, J.; KASSAM, A. H. **Efectos del agua sobre el rendimiento de los cultivos**. [S. l.]: Organización de las Naciones Unidas para la Agricultura y la Alimentación., 1980. 1980.

EMBRAPA. Tecnologias de Produção de Soja. **Sistemas de Produção**, [s. l.], p. 347, 2020.

ESQUERDO, J. Utilização de perfis multi-temporais do NDVI/AVHRR no acompanhamento da safra de soja no oeste do Paraná. **Campinas, SP. 186p. Tese (Doutorado em Engenharia Agrícola)**. UNICAMP--Universidade Estadual de Campinas, [s. l.], 2007.

FARIAS, J. R. B. **Climatic requeriments**. In: EMBRAPA. **Centro Nacional de Pesquisa de Soja . Tropical soybean: improvement and production**. Rome, Italy: [s. n.], 1994.

FECOAGRO. Federação das Cooperativas Agropecuárias do Estado do Rio Grande do Sul (FecoAgro/RS). **FecoAgro/RS reivindica ações imediatas para auxiliar produtores atingidos pela estiagem** Disponível em: <https://www.fecoagrors.com.br/single-post/fecoagro-rs-reivindica-a%C3%A7%C3%B5es-imediatas-para-auxiliar-produtores-atingidos-pela-estiagem> Acesso em 02 de maio de 2023.

FERNANDES, V. R.; CUNHA, A. P. M. do A.; PINEDA, L. A. C.; LEAL, K. R. D.; COSTA, L. C. O.; BROEDEL, E.; FRANÇA, D. D. A.; ALVALÁ, R. C. dos S.; SELUCHI, M. E.; MARENGO, J. Secas E Os

Impactos Na Região Sul Do Brasil. **Revista Brasileira de Climatologia**, [s. l.], v. 28, n. May, 2021.

FERRARI, E.; DA PAZ, A.; DA SILVA, A. C. Déficit hídrico e altas temperaturas no metabolismo da soja em semeaduras antecipadas. **Nativa**, [s. l.], v. 3, n. 1, p. 67–77, 2015.

FIGUEIREDO, G. K. D. A.; BRUNSELL, N. A.; HIGA, B. H.; ROCHA, J. V.; LAMPARELLI, R. A. C. Correlation maps to assess soybean yield from EVI data in Paraná State, Brazil. **Scientia Agricola**, [s. l.], v. 73, p. 462–470, 2016.

FONTANA, D. C.; ALMEIDA, T. S.; JACÓBSEN, L. O. Caracterização da dinâmica temporal dos Campos do Rio Grande do Sul por meio de imagens AVHRR/NOAA. **Revista Brasileira de Agrometeorologia**, [s. l.], v. 15, n. 1, p. 69–83, 2007.

FONTANA, D. C.; BERLATO, M. A. Influência do El Niño Oscilação Sul sobre a precipitação pluvial no estado do Rio Grande do Sul. **Revista Brasileira de Agrometeorologia**, [s. l.], v. 5, n. 1, p. 127–132, 1997.

GOMES, A. C. Caracterização climática de Santiago, RS para fins agrícolas. 2004. 25f. **Monografia (Especialização em Ciências Ambientais)--Universidade Regional Integrada do Alto Uruguai e das Missões, Santiago, RS**, [s. l.], 2004.

GONÇALVES, S. L. **Impactos da deficiência hídrica na produtividade da soja no estado do Rio Grande do Sul , safra 2019 / 2020**. Londrina, PR: [s. n.], 2020.

GRIMM, A. M.; BARROS, V. R.; DOYLE, M. E. Climate variability in southern South America associated with El Niño and La Niña events. **Journal of Climate**, [s. l.], v. 13, n. 1, p. 35–58, 2000.

GRIMM, A. M.; FERRAZ, S. E. T.; GOMES, J. Precipitation Anomalies in Southern Brazil Associated with El Niño and La Niña Events. **Journal of Climate**, [s. l.], v. 11, n. 11, p. 2863–2880, 1998. Disponível em: [http://journals.ametsoc.org/doi/10.1175/1520-0442\(1998\)011%3C2863:PAISBA%3E2.0.CO;2](http://journals.ametsoc.org/doi/10.1175/1520-0442(1998)011%3C2863:PAISBA%3E2.0.CO;2)HATFIELD, J. L.; PRUEGER, J. H. Value of using different vegetative indices to quantify agricultural crop characteristics at different growth stages under varying management practices. **Remote Sensing**, [s. l.], v. 2, n. 2, p. 562–578, 2010.

HELALI, J., ASAADI, S., JAFARIE, T., HABIBI, M., SALIMI, S., MOMENPOUR, S. E., ... & SAEIDI, V. (2022). Drought monitoring and its effects on vegetation and water extent changes using remote sensing data in Urmia Lake watershed, Iran. **Journal of Water and Climate Change**, 13(5), 2107-2128.

IBGE. **Levantamento Sistemático da Produção Agrícola**. [S. l.: s. n.], 2019. Disponível em: https://biblioteca.ibge.gov.br/visualizacao/periodicos/2415/epag_2019_jan.pdf. .

IBGE. **Pesquisa Agrícola Municipal - 1974 a 2021**. [S. l.: s. n.], 2021.

IBGE. **Sinopse do Censo Demográfico 2010**. Rio de Janeiro: Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística - IBGE, 2011. 2011. Disponível em: <http://www.ibge.gov.br/home/estatistica/populacao/censo2010/sinopse.pdf>.

INMET, INSTITUTO NACIONAL DE METEOROLOGIA. **Precipitação**. Brasília, 2022. Disponível em: <https://portal.inmet.gov.br/dadoshistoricos>. Acesso em: 11 dez. 2022

JACÓBSEN, L. O.; FONTANA, D. C.; SHIMABUKURO, Y. E. Efeitos associados a El Niño e La Niña na vegetação do Estado do Rio Grande do Sul, observados através do NDVI/NOAA. **Revista brasileira de meteorologia**. Brasília. Vol. 19, n. 2 (2004), p. 129-140, [s. l.], 2004.

JUNGES, A. H. et al. Condições meteorológicas ocorridas em março de 2020 e situação das principais culturas agrícolas no estado do Rio Grande do Sul. n. 11, Porto Alegre. 2020. p. 6–17. Disponível em: <https://www.agricultura.rs.gov.br/upload/arquivos/202105/25144308-comunicado-agrometeorol-gico-11-mar-o-revisado.pdf>.

MARCELO HIRAKURI, H. Perdas econômicas geradas por estresses bióticos e abióticos na produção brasileira de soja no período 2016-2020. **Embrapa**, [s. l.], p. 7, 2021.

MARENGO, J. A.; AMBRIZZI, T.; BARRETO, N.; CUNHA, A. P.; RAMOS, A. M.; SKANSI, M.; MOLINA CARPIO, J.; SALINAS, R. The heat wave of October 2020 in central South America. **International Journal of Climatology**, [s. l.], v. 42, n. 4, p. 2281–2298, 2021. Disponível em: <https://onlinelibrary.wiley.com/doi/10.1002/joc.7365>.

MATZENAUER, R.; BERGAMASCHI, H.; BERLATO, M. A.; MALUF, J. R. T.; BARNI, N. A.; BUENO, A. C.; DIDONÉ, I. A.; ANJOS, C. S. dos; MACHADO, F. A.; SAMPAIO, M. dos R. **Consumo de água e disponibilidade hídrica para milho e soja no Rio Grande do Sul**. [S. l.]: Fepagro Porto Alegre, 2002. 2002.

MCKEE, T. B.; NOLAN, J.; KLEIST, J. The relationship of drought frequency and duration to time scales. **Preprints, Eighth Conf. on Applied Climatology, Amer. Meteor. Soc.**, [s. l.], 1993.

MLENGA, Daniel H.; JORDAAN, Andries J.; MANDEBVU, Brian. Integrating standard precipitation index and normalised difference vegetation index for near-real-time drought monitoring in Eswatini. **Jàmbá: Journal of Disaster Risk Studies**, v. 11, n. 1, p. 1-9, 2019.

MO, Kangle et al. Spatiotemporal variation of correlation between vegetation cover and precipitation in an arid mountain-oasis river basin in northwest China. **Journal of Hydrology**, v. 574, p. 138-147, 2019.

MONTEIRO, J. E. B. A. **Agrometeorologia dos Cultivos: O fator meteorológico na produção agrícola**. [S. l.: s. n.], 2009. 2009. Disponível em: https://acervodigital.ufpr.br/bitstream/handle/1884/47918/agrometeorologia_dos_cultivos.pdf.

MOREIRA, L. C. J.; TEIXEIRA, A. S.; GALVÃO, L. S. Utilização de índices de vegetação obtidos de dados multiespectrais e hiperespectrais para detectar estresse salino na cultura do arroz. In: 2015, João Pessoa. **Anais [...]**. João Pessoa: SIMPÓSIO BRASILEIRO DE SENSORIAMENTO REMOTO, 2015.

MOTA, F. S. da; AGENDES, M. O. de O.; ALVES, E. G. P.; SIGNORINI, E. Análise agroclimática da necessidade de irrigação da soja no Rio Grande do Sul. **Revista Brasileira de Agrometeorologia**, [s. l.], v. 4, n. 1, p. 133–138, 1996.

NEDEL, A. S.; SAUSEN, T. M.; SAITO, S. M. Zoneamento dos desastres naturais ocorridos no estado do Rio Grande do Sul no período 2003--2009-Parte I. Seca. In: XVI CONGRESSO BRASILEIRO DE METEOROLOGIA: SAÚDE E MEIO AMBIENTE, 2010, [s. l.], . **Anais [...]**. [S. l.: s. n.], 2010.

NGUYEN, P.; OMBADI, M.; SOROOSHIAN, S.; HSU, K.; AGHAKOUCHAK, A.; BRAITHWAITE, D.; ASHOURI, H.; THORSTENSEN, A. R. The PERSIANN family of global satellite precipitation data: a review and evaluation of products. **Hydrology and Earth System Sciences**, [s. l.], v. 22, n. 11, p. 5801–5816, 2018.

NIMER, E. **Climatologia do Brasil**. Rio de Janeiro: Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística, 1989. 1989.

QIU, R.; LI, X.; HAN, G.; XIAO, J.; MA, X.; GONG, W. Monitoring drought impacts on crop productivity of the US Midwest with solar-induced fluorescence: GOSIF outperforms GOME-2 SIF and MODIS NDVI, EVI, and NIRv. **Agricultural and Forest Meteorology**, [s. l.], v. 323, p. 109038, 2022.

RADIN, B.; MATZENAUER, R.; DE MELO, R. W.; WREGGE, M. S.; STEINMETZ, S. Quantificação e distribuição sazonal da precipitação pluvial nas regiões ecoclimáticas do Rio Grande do Sul. **Revista Brasileira de Geografia Física**, v.10, n.4 (2017) 1161-1169, 2017.

REICHARDT, K. **Água em sistemas agrícolas**. [S. l.]: Manole, 1987. 1987. Disponível em: <https://repositorio.usp.br/item/000762227>.

RHEE, J.; IM, J.; CARBONE, G. J. Monitoring agricultural drought for arid and humid regions using multi-sensor remote sensing data. **Remote Sensing of environment**, [s. l.], v. 114, n. 12, p. 2875–2887, 2010.

ROUSTA, Iman et al. Impacts of drought on vegetation assessed by vegetation indices and meteorological factors in Afghanistan. **Remote Sensing**, v. 12, n. 15, p. 2433, 2020.

ROVANI, E. **Custo de produção das culturas de soja e milho da safra 2019/2020 em uma propriedade rural do estado do Rio Grande do Sul**. [S. l.: s. n.], 2020.

SCHMITZ, A. F. S. **Viabilidade da implantação de um projeto de irrigação pivô central, em uma unidade de produção agrícola no município de Ijuí-RS**. 2018. - Universidade Regional do Noroeste do estado do Rio Grande do Sul, [s. l.], 2018.

SHEN, Z.; YONG, B.; GOURLEY, J. J.; QI, W.; LU, D.; LIU, J.; REN, L.; HONG, Y.; ZHANG, J. Recent global performance of the Climate Hazards group Infrared Precipitation (CHIRP) with Stations (CHIRPS). **Journal of Hydrology**, [s. l.], v. 591, p. 125284, 2020. Disponível em: <https://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S0022169420307447>.

SILVA, M. E. S.; SILVA, C. B. Influência da oscilação decadal do pacífico e do padrão Pacific South America no clima da América do Sul para o período 1970-2003. **Revista Brasileira de Climatologia**, [s. l.], v. 19, 2016.

TAZZO, I. F.; VARONE, F.; CARDOSO, L. S.; JUNGES, A. H. Condições meteorológicas ocorridas em fevereiro de 2022 e situação das principais culturas agrícolas no estado do Rio Grande do

Sul. **Comunicado Agrometeorológico, Porto Alegre**, [s. l.], n. 35, p. 6–21, 2022.

UNDRR. **GAR. Special Report on Drought 2021**. Geneva: [s. n.], 2021.

USG. **Landsat Enhanced Vegetation Index**. [S. l.: s. n.], 2023. Disponível em: https://www.usgs.gov/landsat-missions/landsat-enhanced-vegetation-index#:~:text=In Landsat 8-9%2C EVI,* Band 2 %2B 1. Acesso em: 13 dez. 2022.

USGS. **How do I use a scale factor with Landsat Level-2 science products?**. [S. l.: s. n.], 2023. Disponível em: https://www.usgs.gov/faqs/how-do-i-use-scale-factor-landsat-level-2-science-products#qt-news_science_products. Acesso em: 13 dez. 2022.

WREGE, M. S.; STEINMETZ, S.; REISSER JUNIOR, C.; DE ALMEIDA, I. R.; MARCOS SILVEIRA WREGE, C. **Atlas climático da região sul do Brasil: estados do Paraná, Santa Catarina e Rio Grande do Sul**. [S. l.]: Pelotas: Embrapa Clima Temperado; Colombo: Embrapa Florestas, 2012., 2012. 2012.