



ISSN:1984-2295

Revista Brasileira de Geografia Física

Homepage: <https://periodicos.ufpe.br/revistas/rbgf>



Influência de secas e ondas de calor na produtividade de milho e da soja na região Sul do Brasil

Cláudio Eduardo Lemes de Andrade¹; Rosandro Boligon Minuzzi²

¹ Acadêmico em Agronomia, Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, SC, Brasil. E-mail: claudiolemes717@gmail.com

² Professor, Departamento de Engenharia Rural, Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, SC, Brasil. E-mail: rbminuzzi@hotmail.com

Artigo recebido em 20/10/2025 e aceito em 28/12/2025

RESUMO

Este estudo teve como objetivo avaliar a influência de ondas de calor (OC) e de secas na produtividade de milho e da soja em alguns municípios localizados no Rio Grande do Sul e Santa Catarina. Um evento de seca foi considerado a sequência de pelo menos sete dias em que diferença entre a precipitação e a evapotranspiração de referência foi menor ou igual a 1 mm. Uma OC considerou-se uma sequência de pelo menos três dias em que a temperatura máxima foi igual ou maior a um dado limiar, definido pelo percentil 0,90 da referida data, com um intervalo de cinco dias. Para cada evento de OC e de seca foi atribuído um peso de acordo com o número de dias quentes (dividido por três) e secos (dividido por sete), respectivamente. Os pesos atribuídos as OC e secas foram somados e o valor obtido considerado, respectivamente, como o índice de onda de calor (IOC) e índice de seca (IS) para cada ano agrícola (outubro a março). A variação na produtividade de ambas as culturas possui maior resposta ao déficit hídrico ocasionado pelas secas do que com o estresse térmico por temperaturas elevadas oriundas de OC. Em média as secas foram responsáveis por reduzir a produtividade de ambas as culturas (2241,8 a 4935,4 kg.ha⁻¹ e de 1295,8 a 2584 kg.ha⁻¹ para o milho e a soja, respectivamente) cerca de duas a cinco vezes a mais do que as ondas de calor.

Palavras-chave: Déficit hídrico, Estresse térmico, Temperatura máxima.

Influence of drought and heat waves on maize and soybean yield in the Southern region of Brazil

ABSTRACT

This study aimed to evaluate the influence of heat waves (HW) and droughts on maize and soybean yield in some cities located in the Rio Grande do Sul and Santa Catarina. A drought event was considered a sequence of at least seven days in which the difference between precipitation and reference evapotranspiration was less than or equal to 1 mm. A HW was considered a sequence of at least three days in which the maximum daily temperature was equal to or greater than a given threshold, defined by the 0.90th percentile of the given date, with a five-day interval. Each HW and drought event was weighted according to the number of hot (divided by three) and dry (divided by seven) days, respectively. The weights assigned to HW and drought events were added, and the resulting values were considered, respectively, the heat wave index (HWI) and drought index (DI) for each agricultural year (October to March). Yield variations in both crops respond more to water deficits caused by droughts than to heat stress caused by high temperatures caused by HW. Droughts were responsible for reducing yields of both crops (2241,8 to 4935,4 kg.ha⁻¹ and 1295,8 to 2584 kg.ha⁻¹ for maize and soybean, respectively) approximately two to five times more than heat waves.

Keywords: Water deficit, Heat stress, Maximum temperature.

Introdução

Todos os tipos de seca têm a redução na precipitação como origem, e fatores como altas temperaturas, ventos fortes e baixa umidade relativa tendem a exacerbar os efeitos do evento. A deficiência de chuvas simultaneamente com o aumento da evapotranspiração, diminui a umidade

do solo, chegando a um balanço hídrico negativo que compromete a produtividade, se enquadrando como uma seca agrícola (Jesus et al., 2020; Gonçalves et al., 2021).

As secas podem ocorrer em várias regiões do mundo, inclusive em regiões úmidas e sub-

úmidas como no Sul do Brasil, e impactar drasticamente a agricultura, bem-estar da população, turismo e ecossistemas. Alguns impactos diretos desse fenômeno são a redução na produtividade de culturas, mudanças no uso e na cobertura da terra, baixos níveis de água, falta de água para o abastecimento, maior risco de incêndios, aumento das taxas de mortalidade de gado e destruição de recursos ecológicos. A redução na produtividade de culturas geralmente resulta em uma menor quantidade de renda para os agricultores, aumento do preço de alimentos e, conseqüentemente, desemprego e migração (Carlos et al., 2021; Geirinhas et al., 2021).

Quanto às ondas de calor, não há uma unanimidade quanto ao critério para definição de sua ocorrência. No entanto, é consenso que este tipo de evento caracteriza-se como um período de dias seguidos excepcionalmente quentes em relação ao clima do local, podendo representar sérios problemas à economia e a saúde, incluindo aumento da mortalidade humana, seca e qualidade da água, incêndios florestais, escassez de energia e perdas na produtividade agrícola (WMO, 2025).

A região Sul do Brasil possui boa parte de sua economia dependente do agronegócio, sendo a 2º maior produtora de milho e de soja do país. De 2014 a 2024, a Mesorregião Noroeste do Rio Grande do Sul e a Serrana de Santa Catarina ocuparam a 1º e 2ª posição como maiores produtores nos seus Estados, respectivamente, de milho e de soja (IBGE, 2025).

A produtividade de grãos passa por diversos e importantes fatores relacionados às pesquisas agrícolas, dentre esses fatores, destacam-se quatro: o clima, o espaço, a tecnologia e a cadeia produtiva (Silva et al., 2022). No que tange a questão climática, Junges et al. (2022) mostraram os impactos na produtividade agrícola e animal no Rio Grande do Sul devido as elevadas temperaturas máximas e ondas de calor observadas no Estado em janeiro de 2022.

Considerando que o Brasil é um dos maiores produtores mundiais de alimentos e depende fortemente da economia agrícola, a situação se torna preocupante, pois, além da necessidade de contribuir na garantia da segurança alimentar global, o país precisa manter sua

capacidade produtiva para sustentar a demanda interna e o comércio internacional (Libinski, 2024). Por esses motivos que os modelos para estimativa de safras agrícolas são baseados prioritariamente na precipitação e temperatura do ar, principalmente quando integrados a outras variáveis, como encontrado por Bal et al. (2022). Os autores mostraram que o impacto de veranicos foi maior sobre a produtividade das seis principais culturas de sequeiro na Índia usando o Índice de Veranico do que em comparação com a precipitação total indicada pelo Índice de Precipitação Padronizada. Percebe-se que o estudo de Bal et al. (2022) é um exemplo que para diminuir as incertezas dos dados de entrada relacionados aos parâmetros meteorológicos, nas estimativas de produtividade para níveis similares a realidade, deve-se priorizar a inserção de dados relacionados a eventos extremos como variáveis preditoras, por serem reconhecidamente as mais influentes na variação da produtividade.

Considerando a importância que o Rio Grande do Sul e Santa Catarina possuem no cenário agrícola nacional e os danos de eventos meteorológicos extremos decorrentes da falta de água e temperaturas elevadas, o objetivo deste estudo foi avaliar a influência de ondas de calor e de secas na produtividade de milho e da soja em alguns municípios localizados nas principais regiões produtoras dos referidos Estados.

Material e métodos

Dados diários de precipitação, umidade relativa (UR), temperatura mínima e máxima do ar de 2002 a 2022 foram obtidas de estações meteorológicas pertencentes ao INMET (Instituto Nacional de Meteorologia) e localizadas nos municípios de São Luiz Gonzaga, Cruz Alta, Campos Novos e Passo Fundo, conforme indicado na Figura 1. De acordo com a metodologia de Köppen, o clima dos dois primeiros municípios é classificado como subtropical úmido, com verões quentes (Cfa) e de Campos Novos e Passo Fundo como sendo temperado úmido, com verões amenos (Cfb).

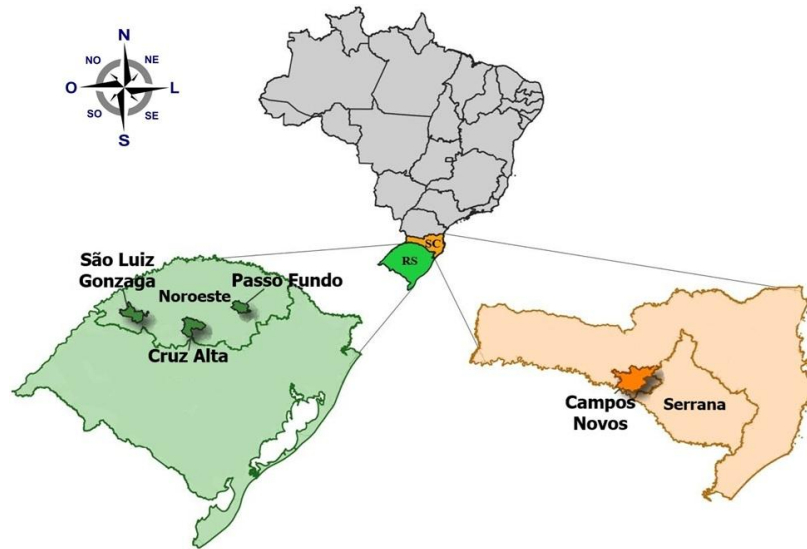


Figura 1. Localização das estações meteorológicas utilizadas no estudo em suas respectivas mesorregiões de Santa Catarina (SC) e no Rio Grande do Sul (RS).

Diante da disponibilidade de dados meteorológicos, a evapotranspiração de referência (ET_o) diária foi estimada usando o método de Romanenko (Equação 1), por ter apresentado bons desempenhos na estimativa nas regiões em estudo (Turcato e Minuzzi, 2024, Turcato e Minuzzi, 2025).

$$ET_o = 4,5 \left(1 + \frac{t}{25} \right)^2 \left(1 - \frac{e_a}{e_s} \right) \quad (1)$$

onde, t é temperatura média diária do ar (°C), e_s é a pressão de saturação do vapor d'água (hPa), estimada usando a equação de Tetens (equação 2) e e_a é a pressão real do vapor d'água (hPa), estimada usando equação da umidade relativa (equação 3).

$$e_s = 6,108 \cdot 10^{\left(\frac{7,5 \cdot t}{237,3 + t} \right)} \quad (2)$$

$$e_a = \frac{e_s \cdot UR}{100} \quad (3)$$

Os dados de produtividade de milho (1^o safra) e da soja das safras 2002/2003 a 2021/2022 para os municípios foram obtidos pela base de dados do Sistema IBGE de Recuperação Automática (IBGE-SIDRA).

Os dados de produtividade do IBGE foram inicialmente submetidos ao teste de regressão linear, para averiguar por meio da significância do coeficiente de inclinação a

existência de tendência de aumento estatisticamente significativa a 5% para a soja e o milho, devido ao efeito de tecnologias incorporadas no sistema de produção das culturas no decorrer do período analisado. Assim, quando necessário retirar a tendência tecnológica dos dados de produtividade daquele decorrente da variabilidade climática interanual, foi utilizada a equação 4.

$$Y = Y_i - (Y_{ix} - Y_o) \quad (4)$$

onde, Y , Y_i , Y_{ix} , Y_o , são a produtividade do ano i corrigido, a produtividade original do ano i , a produtividade do ano i estimado pelo modelo de regressão linear e a produtividade do primeiro ano da série histórica estimada pelo modelo de regressão, respectivamente.

Considerando que a seca agrícola está relacionada com a disponibilidade de água no solo, optou-se em usar a evapotranspiração na definição de um dia chuvoso. Desta forma, considerou-se aquele em que a diferença entre a precipitação e a ET_o foi maior ou igual a 1 mm ($P - ET_o \geq 1$ mm), pois uma lâmina de água menor do que essa geralmente não infiltra no solo. Um evento de 'seca' foi considerado a sequência de pelo menos sete dias não chuvosos ou dias secos ($P - ET_o < 1$ mm), no período de 1^o de outubro a 31 de março, por envolver o período predominantemente de cultivo de ambas as culturas usadas no estudo. Foi atribuído peso para cada seca de acordo com o número de dias não chuvosos (secos). Assim, seguindo o proposto por Bal et al. (2022), o valor do peso foi obtido

dividindo o número de dias secos por sete. Por exemplo, o peso a ser atribuído para um evento de seca com duração de sete dias, foi 1,0; com duração de 10 dias, foi 1,43. Para cada ano agrícola (outubro a março), os pesos atribuídos as secas foram somados e o valor obtido considerado como o índice de seca (IS) para o referido ano agrícola.

Quanto as ondas de calor, foi considerado o evento em que ocorra uma sequência de pelo menos três 'dias quentes'. Como 'dia quente', considerou-se aquele em que a temperatura máxima do dia foi igual ou maior a um dado limiar, definido pelo percentil 0,90 da referida data, com um intervalo de cinco dias. Isso significa que haverá um limiar para cada dia do período 1º de outubro a 31 de março. Por exemplo, o percentil 0,90 do dia 10 de janeiro, foi obtido da série histórica de temperatura máxima que abrangeu o período de 5 a 15 de janeiro.

De forma semelhante ao proposto para secas, aos eventos de ondas de calor também foi atribuído peso para cada ocorrência de acordo com a duração ou o número de 'dias quentes'. Assim, o valor do peso foi obtido dividindo o número de 'dias quentes' por três. Por exemplo, o

peso a ser atribuído para uma onda de calor com duração de três dias, foi 1,0; com duração de sete dias, foi 2,3. Para cada ano agrícola, os pesos atribuídos as ondas de calor foram somados e o valor obtido considerado como o índice de onda de calor (IOC) para o referido ano agrícola.

O teste de Mann-Kendall foi empregado para avaliar a tendência do IS e do IOC, aos níveis de probabilidade de 90% (tendência leve), 95% (tendência moderada) e 99% (tendência forte).

O coeficiente de correlação de Pearson foi usado para averiguar a correlação entre o IS e o IOC com a produtividade do milho e da soja.

O coeficiente de inclinação da regressão linear entre a produtividade e cada um dos índices foi multiplicado pela média do IS e do IOC dos anos agrícolas de 2002 a 2022 para avaliar de forma resumida e representativa para cada local a perda nas produtividades decorrentes de secas e das ondas de calor.

Gráficos de dispersão das anomalias de precipitação e temperatura do ar de cada ano agrícola e das anomalias dos IS e IOC foram elaborados para averiguar quais condições climáticas estão mais associadas a altas e, ou, baixas produtividades de milho e de soja.

Resultados e discussão

Os valores de Z obtidos pela aplicação do teste de Mann-Kendall indicam que desde o início do presente século, não houve tendência significativa para eventos de seca e de ondas de calor no período outubro a março em nenhum dos níveis de probabilidades considerados (Tabela 1). Em várias áreas da Europa e da África tem sido observado desde a década de 1950, tendências

crescentes nos eventos de secas agrícolas e ecológicas devido ao aumento da demanda evaporativa, sendo mais evidentes do que as tendências crescentes de seca meteorológica. No entanto, no continente americano as tendências quanto às citadas secas ainda são incerto, bem como, a confiabilidade quanto à contribuição humana para tais comportamentos (Douville et al., 2021; Seneviratne et al., 2021).

Tabela 1. Tendências climáticas para seca agrícola e ondas de calor de 2002 a 2022 com uso do valor de Z de Mann-Kendall para alguns municípios do Rio Grande dos Sul e de Santa Catarina.

	Seca	Onda de calor
Passo Fundo		
Z	-0,09	0
valor-p	0,9224	1
São Luiz Gonzaga		
Z	-0,45	-0,03
valor-p	0,3445	0,9712
Cruz Alta		
Z	0,45	0,57
valor-p	0,6490	0,5666
Campos Novos		
Z	-0,79	0,99
valor-p	0,4260	0,3200

Em estudo para o Paraná, Salton et al. (2021) consideraram um período seco, como o número de dias consecutivos com precipitação

inferior a 1 mm. Também não encontraram tendência temporal de aumento ou redução do número de períodos secos no Estado. Em outro

estudo no Paraná, mas no Oeste e Sudoeste do Estado, Schmoeller e Limberger (2023) mostraram que apesar do aumento no total de chuva anual, os dias consecutivos secos (úmidos) aumentaram (diminuíram) desde meados da década de 1970, apesar de que, as referidas tendências não foram unânimes entre todas as localidades analisadas na região.

Na região agrícola do MATOPIBA, mesmo que o estudo de Moraes et al. (2024) tenha envolvido período desde a década de 1970, o cenário mais crítico encontrado pelos autores foi somente entre 2010 e 2019, em que as “secas severas” surgiram nos estados da Bahia, Piauí e Norte do Maranhão, com eventos extremos na região que atingiram a categoria de “seca extrema”. Nesse período e região do país, mais especificamente de 2012 a 2019, Farias e Sousa (2020) indicaram que secas intensas ocorreram no Semi-árido do Nordeste do Brasil, causando uma complexa teia de impactos que se estenderam por vários setores da sociedade. Os autores detalharam que as secas de curta duração, muitas vezes ocorreram acompanhadas por altas temperaturas e ventos fortes, causando a depleção potencial da umidade do solo no período de crescimento das plantas. Encontraram correlação entre as secas severas e extremas na região central da Paraíba com anomalias positivas da temperatura da superfície do Pacífico central, isto é, condição caracterizada pela ocorrência do El Niño. No outro extremo do Brasil, mais especificamente no Paraná, as secas severas e moderadas ocorrem mais frequentemente na condição de La Niña, enquanto as mais fracas são registradas na condição de El Niño (Salton et al., 2021).

É habitual que estudos que envolvem tendências climáticas de eventos meteorológicos extremos apresentem divergências, pois há de se considerar alguns prováveis motivos, como as

diferentes definições que caracterizam um evento de seca e de onda de calor e o tamanho e período da série histórica usada nos estudos. Séries mais curtas podem resultar em falsas conclusões quanto as reais tendências climáticas em longo prazo, pois podem culminar com períodos reconhecidamente influenciados por fenômenos climáticos de escala planetária como a Oscilação Decadal do Pacífico que ocasiona flutuações no clima na escala interdecadal, principalmente na precipitação. No Rio Grande do Sul, Silva e Minuzzi (2025) encontraram que desde os anos de 1970 a tendência de aumento das temperaturas e a maior frequência de meses secos, mais persistentes e de maior intensidade, associados com a quase inexistência de tendências na chuva, sugere que o mesoclima de quatro regiões do Estado está tendendo para um ambiente mais quente, seco e de chuvas irregulares. Na região de Tupanciretã, próxima de São Luiz Gonzaga e Cruz Alta, a década de 2010 foi a que registrou o maior número de meses secos, eventos de seca e de maior duração em média, corroborando ao achado por Moraes et al. (2024) na região do MATOPIBA.

No entanto, a ocorrência e intensidade dos eventos de seca possuem correlação significativa com a produtividade da soja e do milho e, com as ondas de calor em alguns dos municípios analisados. Os coeficientes de determinação (R^2) indicam que neste século as secas explicaram de 37% a 57% e de 48% a 54% das variações na produtividade do milho e da soja, respectivamente (Tabela 2). Usando variáveis de temperatura e precipitação em modelos econométricos, Lisbinski (2024) concluiu que aumento de 1% na precipitação pluviométrica resultou em aumento de 0,83% e 11,4% na quantidade produzida de soja e do milho, respectivamente, na Mesorregião Noroeste do RS.

Tabela 2. Coeficientes de regressão linear e valor-p da correlação entre secas e ondas de calor com a produtividade da soja e do milho em alguns municípios do Rio Grande do Sul e de Santa Catarina

	Soja		Milho	
	Seca	Onda de calor	Seca	Onda de calor
Passo Fundo				
r	0,69	0,64	0,66	0,75
R ²	0,48	0,41	0,44	0,58
Valor-p	0,0007	0,0028	0,0014	0,0001
Coeficiente inclinação	-152,1	-173,3	-388,1	-544,8
Perda produtividade (kg.ha ⁻¹)	-1782,8	-519,9	-4548,5	-1634,3
São Luiz Gonzaga				
r	0,71	0,76	0,71	0,35
R ²	0,50	0,58	0,50	0,12
Valor-p	0,0008	0,0002	0,0008	0,1553
Coeficiente inclinação	-187,7	-203,4	-358,5	-224,1
Perda produtividade (kg.ha ⁻¹)	-2584,0	-519,8	-4935,4	-542,6
Cruz Alta				
r	0,71	0,78	0,61	0,70
R ²	0,50	0,61	0,37	0,49
Valor-p	0,0007	0,0002	0,0057	0,0005
Coeficiente inclinação	-144,2	-202,9	-180,8	-329,6
Perda produtividade (kg.ha ⁻¹)	-1820,5	-612,1	-2241,8	-994,3
Campo Novos				
r	0,73	0,34	0,75	0,40
R ²	0,54	0,12	0,57	0,16
Valor-p	0,0004	0,1534	0,0003	0,0917
Coeficiente inclinação	-140,3	-71,83	-341,6	-199,6
Perda produtividade (kg.ha ⁻¹)	-1295,8	-247,4	-3155,7	-687,6

Quanto às ondas de calor, houve maior divergência nos resultados, de forma que, em Campos Novos, esse evento meteorológico não exerce influência de forma significativa na produtividade de ambas as culturas, assim como, em São Luiz Gonzaga para o milho, mas sim para a soja (58%). Em Cruz Alta e Passo Fundo as ondas de calor explicaram de 41% a 61% as variações na produtividade da soja e do milho. Em suma, em termos de abrangência espacial há um predomínio dos eventos de seca exercer maior influência na produtividade das culturas.

Em Chapecó, no Oeste catarinense, Minuzzi e Medeiros (2025) encontraram que a variação na produtividade agrícola possui maior resposta ao déficit hídrico ocasionado por secas agrícolas (46% e 39% para o milho e a soja, respectivamente), do que com o estresse térmico por temperaturas elevadas oriundas de ondas de calor.

Na soja, o déficit hídrico impacta de forma direta a cultura, desde o plantio até a produção e a colheita de grãos. O déficit hídrico altera o metabolismo primário da planta, particularmente diminuindo a taxa de assimilação líquida de CO₂ (Cui et al., 2021; Zhara et al., 2023). Então, menores taxas de fotossíntese líquida resultam em menor produção de carboidratos primários, tais como amido e

sacarose, cruciais para a respiração celular e síntese de ATP.

Uma hipótese para a ausência de correlação entre a produtividade das culturas em Campos Novos com as ondas de calor pode ter relação com o clima do município. Dentre os municípios analisados, é o de maior altitude e mais frio, isto é, os limiares de temperatura máxima usados para definir um dia quente e, consequentemente, uma onda de calor, não são elevados o suficiente para trazer prejuízos significativos ao desenvolvimento das culturas. Zhang et al. (2021) afirmam que temperaturas elevadas durante estágios críticos do milho, como a polinização e o enchimento de grãos, podem causar estresse térmico, resultando em queda significativa de produtividade, de modo que cada grau acima de 30 °C pode reduzir os rendimentos em até 1,7% sob condições de estresse hídrico.

Os sinais negativos unânimes dos coeficientes de inclinação oriundo das regressões lineares indicam que quanto maior a intensidade e frequência de secas e das ondas de calor, menor a produtividade de milho e da soja. Desde o início deste século, a redução na produtividade nos municípios afetados a cada safra de milho tem sido entre 180,8 a 388,1 kg.ha⁻¹ e de 329,6 a 577,8 kg.ha⁻¹ e na soja, de 140,3 a 187,7 kg.ha⁻¹ e 173,3 a 203,4 kg.ha⁻¹, devido, respectivamente, as secas e as ondas de calor. Para o período estudado de 20

anos, em média as secas foram responsáveis por reduzir à produtividade de ambas as culturas (2241,8 a 4935,4 kg.ha⁻¹ e de 1295,8 a 2584 kg.ha⁻¹ para o milho e a soja, respectivamente), cerca de duas a cinco vezes a mais do que as ondas de calor (994,3 a 1634,3 kg.ha⁻¹ e de 612,1 a 519,9 kg.ha⁻¹ para o milho e soja, respectivamente).

Assim como outras adversidades meteorológicas, percebe-se como as secas geralmente devem ser entendidas como testes importantes para a governança e podem abrir janelas de oportunidade para mudanças institucionais significativas e novas práticas de gestão (Lemos et al., 2020). Mesmo em regiões de clima úmido com uma regularidade no regime de chuvas anual como no Sul do Brasil, Ambrosio et al. (2024) ressaltam que as secas têm cada vez

mais desafiado a segurança hídrica de usuários de água e ecossistemas em todo o mundo, ao estressar sistemas socioecológicos já pressionados pelo crescimento populacional, pela demanda crescente por água e pela degradação ambiental. As principais medidas adotadas na busca de soluções para esta problemática têm sido a construção de reservatórios, perfuração de poços, implantação de sistemas de irrigação e transposição de água. Essas ações têm por finalidade melhorar a garantia de acesso à água. A adoção de políticas proativas, com foco na preparação e no gerenciamento de riscos para as secas, proporciona uma diminuição dos danos causados à economia e dos custos envolvidos na recuperação desses desastres (Gonçalves et al., 2021).

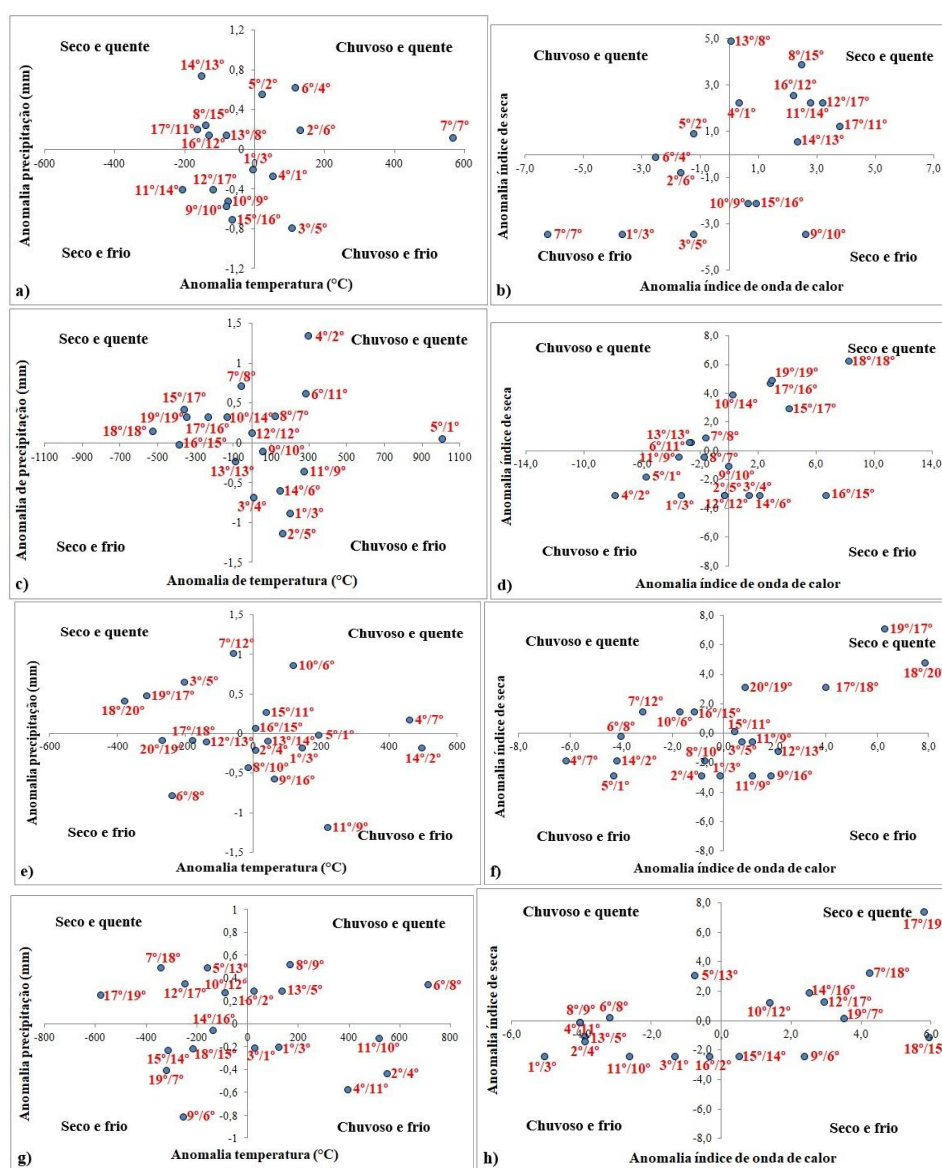


Figura 2. Gráficos de dispersão indicando as condições climáticas que se enquadram a classificação dos anos agrícolas de maior a menor produtividade do milho (1º dígito) e da soja (2º dígito) baseadas nas anomalias de precipitação total e temperatura média do ar e nos IS e IOC, respectivamente, para Campos Novos (2a e 2b), Cruz Alta (2c e 2d), Passo Fundo (2e e 2f) e São Luiz Gonzaga (2g e 2h).

A Figura 2 consta de gráficos de dispersão destacando as condições climáticas observadas no período outubro a março de cada ano e, respectivas classificações de maior a menor produtividade do milho e da soja nos quatro municípios. Para as anomalias baseadas nos índices de seca (IS) e de onda de calor (IOC) foi considerado um período ‘chuvoso’ (‘seco’) aquele com IS abaixo (acima) da média e ano ‘quente’ (‘frio’) aquele com IOC acima (abaixo) da média.

Percebe-se que as maiores (menores) produtividades de ambas as culturas estão mais associadas aos períodos ‘chuvoso e frio’ (‘seco e quente’) baseados nas menores (maiores) ocorrências e duração de secas e de ondas de calor, do que nas habituais condições climáticas baseadas no acumulado de precipitação e na média da temperatura do ar. Isso foi mais evidente em Passo Fundo, São Luiz Gonzaga e Campos Novos. Em Cruz Alta, a melhor relação com as anomalias climáticas baseadas nos índices foi na condição ‘seco e quente’ onde enquadraram-se os anos de piores produtividades para ambas as culturas.

Esta tendência de condição climática atrelada as maiores/menores produtividades agrícolas, provavelmente pode-se estender a outras culturas, como o açaí. Moraes et al. (2023) ao realizarem estudo no município de Igarapé-Mirim, maior produtor nacional da frutífera, concluíram que o atual aumento da temperatura do ar e do déficit hídrico (secas), tendem a uma redução na produtividade. Dentre alguns índices agrometeorológicos avaliados, Alves et al. (2021) encontraram que os períodos mais secos (setembro a março) em Campos Novos, identificados pelo Índice de Estresse Hídrico da Cultura e o déficit hídrico, estiveram associados com as menores produtividades de milho no município, principalmente para semeaduras feitas na segunda quinzena de outubro, podendo assim, ser utilizados para estimar a produtividade da cultura.

Logicamente houve exceções com safras apresentando excelentes produtividades, mas inserido no que pode-se considerar a pior condição climática (seco e quente), como em Campos Novos (Figura 2b) e Passo Fundo (Figura 2e) em que a safra do milho e da soja foi nos respectivos municípios, como a 4^o e 1^o e a 3^o e 5^o de melhor produtividade. É plausível que exceções como estas possam ocorrer, tendo em vista que as anomalias representam um período de seis meses, mas não necessariamente que a condição climática desfavorável tenha sido observada durante todos os meses e, ou, tenha

ocorrido em meses que normalmente pelo calendário agrícola não coincidem com o estágio fenológico mais sensível ao forte calor e ao déficit hídrico das culturas.

Em fevereiro de 2022, CEMADEN (2024) indicava persistência de seca moderada a extrema em toda a região Sul do Brasil, que ocasionou na referida safra uma redução em relação a anterior no Rio Grande do Sul de 32% e 56,2% na produtividade do milho e da soja, respectivamente (CONAB, 2024). Dentro do período analisado no presente estudo, a safra 2022 de milho e de soja foi a de pior produtividade em Cruz Alta e Passo Fundo, apesar de que, neste último município, a condição climática no período outubro a março baseada na precipitação e temperatura do ar tenha se enquadrado como ‘seco e frio’. No entanto, baseada nas anomalias dos índices, a condição climática do período se enquadrou como ‘seco e quente’, atestando a sua maior fidelidade à realidade observada na referida safra. Junges et al. (2022) ratificam este cenário climático adverso na safra 2022, onde constataram que em janeiro do citado ano, a maioria das localidades analisadas no Rio Grande do Sul registraram no mínimo cinco dias seguidos com temperaturas máximas superior a 5°C em relação a média climática. Essas persistentes e intensas ondas de calor registradas, juntamente com a seca, causaram impactos negativos no potencial produtivo das culturas agrícolas e no desempenho animal. Percebe-se que os impactos se estendem à medida que as condições da seca e de uma onda de calor evoluem e, ou, ocorrem com maior frequência, ratificando a importância em analisar tais características desses eventos em conjunto como no presente estudo, principalmente, quando culminam com as fases fenológicas mais sensíveis das culturas ao déficit e, ou, ao estresse térmico, como o observado na safra 2022.

Demais pesquisas também mostram que os últimos anos têm sido marcados por frequentes secas e ondas de calor no Sul do Brasil, o suficiente para resultar em danos na agricultura como de Costa et al. (2023) que usaram dados oriundos de sensoriamento remoto para avaliar impactos de seca entre 2018 e 2020 na produção de soja no município de Santiago-RS. Encontraram três eventos de seca, sendo que o período mais intenso e severo ocorreu entre fevereiro e abril de 2020, identificando ainda, uma onda de calor em março do referido ano. Fernandes et al. (2021) constataram um grande evento de seca entre os anos de 2019 e 2020 que abrangeu os três estados do Sul do país. Ao detalharem por trimestres a intensidade e

abrangência da seca na referida região, os autores mostraram que o momento mais crítico do evento meteorológico foi no trimestre que antecedeu (junho a agosto de 2019) e que sucedeu (março a maio de 2020) ao período que está sendo analisado no presente estudo (outubro a março). Com relativa menor intensidade, o trimestre setembro a novembro de 2019 também foi marcado pela seca, ou seja, os meses que abrangem os estádios fenológicos de maior exigência hídrica do milho e da soja não culminaram com os períodos mais críticos da seca, exceto as semeaduras do milho feitas precocemente.

Em parte, essa maior frequência e duração dos eventos de seca observados no Sul do país desde o final dos anos 2010 pode ser atribuída as ocorrências da La Niña. De acordo com o Índice Niño Oceânico (NOAA, 2025) de 2017/2018 a 2023/2024, foram configurados quatro La Niñas, dois El Niños e apenas uma condição de neutralidade no Pacífico Equatorial. No Sul do Brasil, a fase fria do El Niño Oscilação Sul torna a ocorrência e abrangência das chuvas mais irregulares, isto é, aumenta as chances de eventos de seca, principalmente na primavera do ano de início do evento climático. Por isso, Colpo e Minuzzi (2020) sugeriram que na região de Chapecó, em anos de La Niña Canônico, recomenda-se realizar semeaduras tardias de variedades de ciclo precoce e normal da soja, justamente para não coincidir com o período mais influenciado pela forçante climática.

Considerando as consequências da seca no setor agrícola, Torres et al. (2024) averiguaram

Conclusões

Em termos de abrangência espacial, o déficit hídrico ocasionado pelas secas (37% a 57% para o milho e 48% a 54% para a soja), exerce maior influência na produtividade das culturas do que com o estresse térmico por temperaturas elevadas oriundas de ondas de calor, sendo de 41% a 61% para o milho e soja em Passo Fundo e Cruz Alta.

No período de 2002 a 2024, em média as secas foram responsáveis por reduzir à produtividade de ambas as culturas (2241,8 a 4935,4 kg.ha⁻¹ e de 1295,8 a 2584 kg.ha⁻¹ para o milho e a soja, respectivamente), cerca de duas a cinco vezes a mais do que as ondas de calor (994,3 a 1634,3 kg.ha⁻¹ e de 612,1 a 519,9 kg.ha⁻¹ para o milho e soja, respectivamente).

Período ‘chuvoso e frio’ (‘seco e quente’) baseado nas anomalias de seca e de ondas de calor é a condição climática que está mais atrelada as

que em anos de La Niña de forte intensidade, a probabilidade de um município no Sul do Brasil em receber indenizações das apólices de seguro para a soja é de aproximadamente seis pontos percentuais.

Em suma, percebe-se que praticamente metade da variação na produtividade de milho e da soja no Sul do país deve-se a temperaturas máximas elevadas (ondas de calor) e ao déficit hídrico (seca). Por isso a importância que os tomadores de decisão adotem o modelo de gestão de riscos, de modo a reduzir o impacto de um evento meteorológico adverso, ao invés de se limitar apenas ao modelo de gestão de crise. A estratégia para redução do risco de desastres deve se basear em algumas ações que envolvem: conhecimento dos riscos, com a coleta sistemática de dados e informações; desenvolvimento e acompanhamento de um sistema operacional de monitoramento e alerta; entendimento da capacidade de resposta em âmbito nacional, regional e local e, por fim, abordagens de difusão e comunicação da informação (Cumplido et al., 2023). Essas ações não apenas garante a segurança alimentar, mas também a estabilidade econômica e ajudam a preservar os recursos naturais, especialmente em regiões onde a dependência do clima é intensa (Lisbinski, 2024). Assim, o agricultor poderá agir com mais segurança e antecedência de forma a evitar ou minimizar os efeitos advindos destes eventos extremos, principalmente em cenários climáticos que indicam aumento dos referidos eventos meteorológicos.

maiores (menores) produtividades de milho e de soja, do que as condições climáticas baseadas nas anomalias de precipitação e temperatura média do ar, habitualmente usadas nos cenários climáticos.

Agradecimentos

Ao Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico (CNPq) pela concessão de bolsa de Iniciação Científica ao primeiro autor.

Referências

- Alves, M.P., Minuzzi, R.B., Caron, M.L., 2021. Identificação de estiagens e estimativas de produtividade de milho para o município de Campos Novos, Santa Catarina. *Revista Brasileira de Climatologia* 28, 101-117.
- Ambrosio, L.L., Johnsson, R.M.F., Ribeiro, N.B., Puga, B.P., Nauditt, A., 2024. Capacidade adaptativa às secas visando segurança hídrica: uma revisão sistemática. *Revista*

- Brasileira de Geografia Física [online] 17. Disponível: <https://doi.org/10.26848/rbgf.v17.6.p4554-4574>. Acesso: 10 set. 2025.
- Bal, S.K., Sandeep, V.M., Kumar, P.V., Rao, A.V.M.S., Pramod, V.P., Manikandan, N., Rao, C.S., 2022. Assessing impact of dry spells on the principal rainfed crops in major dryland regions of India. *Agricultural and Forest Meteorology* 313, 108768.
- Carlos, D.Á.I., Martorno, L.G. dos, Gaspar, A.B.S., Franco, I.M., Silva, R. da., 2021. Uma aplicação na geociência da termografia infravermelho para diagnosticar padrões térmico-hídricos em solos com culturas irrigadas por potes de argila no oeste do Pará, Amazônia. *Anuário do Instituto de Geociências* [online] 44. Disponível: https://doi.org/10.11137/1982-3908_2021_44_39655. Acesso: 16 jun. 2025.
- CEMADEN. Centro Nacional de Monitoramento e Alertas de Desastres Naturais, 2024. Monitoramento de Seca para o Brasil. Disponível: <https://www.gov.br/ceaden/ptbr/assuntos/monitoramento/monitoramento-de-seca-para-o-brasil>. Acesso: 17 mai. 2024.
- Colpo, A.L., Minuzzi, R.B., 2020. Indicações de datas de semeadura para a soja e o milho safrinha em anos de El Niño e La Niña Canônicos no município de Chapecó, estado de Santa Catarina. *Revista Brasileira de Agropecuária Sustentável* 10, 219-227.
- CONAB. Companhia Nacional de Abastecimento, 2024. Acompanhamento da Safra Brasileira. Disponível: <https://www.conab.gov.br/info-agro/safras>. Acesso: 17 mai. 2024.
- Costa, L.C.O., Fisher, S.R., Cunha, A.P.M.A., 2023. 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. *Revista Brasileira de Climatologia* 33, 208-231.
- Cui, Y., Ning, S., Jin, J., Jiang, S., Zhou, Y., Wu, C., 2021. Quantitative lasting effects of drought stress at a growth stage on soybean evapotranspiration and above ground BIOMASS. *Water* [online] 13. Disponível: <https://doi.org/10.3390/w13010018>. Acesso: 10 set. 2025.
- Cumplido, M.A., Inocente, M.C., Medeiros, T.P., de Oliveira, G.S., Marengo, J.A., 2023. Secas e crises hídricas no Sudeste do Brasil: um histórico comparativo entre os eventos de 2001, 2014 e 2021 com enfoque na bacia do rio Paraná. *Revista Brasileira de Climatologia*, 32, 129-153.
- Douville, H., Raghavan, K., Renwick, J., Allan, R.P., Arias, P.A., Barlow, M., Cerezo-Mota, R., Cherchi, A., Gan, T.Y., Gergis, J., Jiang, D., Khan, A., Pokam, W.P., Rosenfeld, D., Tierney, J., Zolina, O.: *Water Cycle Changes*, In: *Climate Change 2021: The Physical Science Basis, Contribution of Working Group I to the Sixth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change*. Cambridge University Press, Cambridge, United Kingdom and New York, NY, USA, 1055–1210.
- Farias, A.A., Sousa, F.A.S., 2020. Caracterização e análise das secas na sub-bacia hidrográfica do Rio Taperoá. *Revista Brasileira de Geografia Física* [online] 13. Disponível: <https://doi.org/10.26848/rbgf.v13.4.p1483-1501>. Acesso: 10 set. 2025.
- Fernandes, V.R., Amaral Cunha, A.P.M., Pineda, L.A.C., Leal, K.R.D., Costa, L.C.O., Broedel, E., 2021. Seca e os impactos na região Sul do Brasil. *Revista Brasileira de Climatologia* 18, 561-584.
- Geirinhas, J.L., Russo, A., Libonati, R., Sousa, P.M., Miralles, D.G., Trigo, R.M., 2021. Recent increasing frequency of compound summer drought and heatwaves in Southeast Brazil. *Environmental Research Letters* 16, 034036.
- Gonçalves, S.T.N., Vasconcelos Júnior, F.C., Sakamoto, M.S., Silveira, C.S., Martins, E.S.P.R., 2021. Índices e Metodologias de Monitoramento de Secas: Uma Revisão. *Revista Brasileira de Meteorologia* [online] 36. Disponível: <https://doi.org/10.1590/0102-77863630007>. Acesso: 10 set. 2025.
- IBGE. Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística, 2025. Sistema IBGE de Recuperação Automática – SIDRA. Disponível: <https://sidra.ibge.gov.br/pesquisa/pam/tabela>. Acesso: 3 out. 2025.
- Jesus, E.T., Amorim, J.S., Junqueira, R., Viola, M.R., Mello, C.R., 2020. Meteorological and hydrological drought from 1987 to 2017 in Doce River Basin, Southeastern Brazil. *Revista Brasileira de Recursos Hídricos* 25, 1- 10.
- Junges, A.H., Tazzo, I.F., Cardoso, L.S., Cera, J.C., 2022. Avaliação da onda de calor ocorrida em janeiro de 2022 no Rio Grande do Sul. *Agrometeoros* [online] 30. Disponível:

- <https://doi.org/10.31062/agrom.v30.e027078>
. Acesso: 3 out. 2025.
- Lemos, M.C., Puga, B.P., Formiga-Johnsson, R.M., Seigerman, C.K., 2020. Building on adaptive capacity to extreme events in Brazil: Water reform, participation, and climate information across four river basins. *Regional Environmental Change* [online] 20. Disponível: <https://doi.org/10.1007/s10113-020-01636-3>. Acesso: 14 set. 2025.
- Lisinski, F.C., 2024. Variabilidade climática na produção de milho, trigo e soja. *Revista de Política Agrícola* [online] 33. Disponível: <https://doi.org/10.35977/2317-224X.rpa2024.v33.01974>. Acesso: 16 jun. 2025.
- Minuzzi, R.B., Medeiros, S.R.R., 2025. Influência de secas agrícolas e ondas de calor na produtividade de milho e da soja em Chapecó, estado de Santa Catarina. *Revista DELOS* [online] 18. Disponível: <https://ojs.revistadelos.com/ojs/index.php/de-los/article/view/4528>. Acesso: 1º jul. 2025.
- Moraes, B.C., Sodré, G.R., Souza, E.B., Pinheiro, H.A., 2024. Variação Temporal da Seca na Região Produtora de Soja de Matopiba, Brasil. *Revista Brasileira de Geografia Física* [online] 17. Disponível: <https://doi.org/10.26848/rbgf.v17.4.p2671-2683>
- Moraes, B.C., Sodré, G.R., Lima, A.M., Júnior, J.A.S., Ribeiro, J.B.M., 2023. Risco agroclimático: Impacto da variabilidade dos episódios de seca sobre a produção do açaí (*euterpe oleracea mart.*) na Amazônia oriental. *Revista Brasileira de Geografia Física* [online] 16. Disponível: <https://doi.org/10.26848/rbgf.v16.4.p1685-1696>
- NOAA. National Oceanic and Atmospheric Administration, 2025. Cold & warm episodes by season. Disponível: https://www.cpc.ncep.noaa.gov/products/analysis_monitoring/ensostuff/ONI_v5.php. Acesso: 25 set. 2025.
- Salton, F.G., Morais, H., Lohmann, M., 2021. Períodos secos no estado do Paraná. *Revista Brasileira de Meteorologia* [online] 36. Disponível: <http://dx.doi.org/10.1590/0102-77863620163>. Acesso: 2 out.2025.
- Schmoeller, A.M.P., Limberger, L., 2023. Detecção de padrões de mudanças climáticas no Oeste e Sudoeste do Paraná no período de 1977-2018. *Revista Brasileira de Geografia Física* [online] 16. Disponível: <https://doi.org/10.26848/rbgf.v16.4.p1697-1713>
- Seneviratne, S. I., Zhang, X., Adnan, M., Badi, W., Dereczynski, C., Di Luca, A., Ghosh, S., Iskandar, I., Kossin, J., Lewis, S., Otto, F., Pinto, I., Satoh, M., Vicente-Serrano, S. M., Wehner, M., and Zhou, B.: Weather and Climate Extreme Events in a Changing Climate In: *Climate Change 2021: The Physical Science Basis, Contribution of Working Group I to the Sixth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change*. Cambridge University Press, Cambridge, United Kingdom and New York, NY, USA, 1513–1766.
- Silva, C.V.F. de O., Minuzzi, R.B., 2024. Tendências e variabilidades climáticas em regiões com diferentes classes de uso e cobertura do solo no Rio Grande do Sul. *Interespaço: Revista de Geografia e Interdisciplinaridade* [online] 10. Disponível: <http://dx.doi.org/10.18764/2446-6549.e20360>. Acesso: 16 ago. 2025.
- Silva, R.M., Auriglietti, L.M.M., Bastos, L.A., Paula Júnior, A., 2022. Evolução espaço temporal da produção de milho e soja na região Sul do Brasileira no período de 2005 a 2018. *Revista FACEP Pesquisa: Desenvolvimento e Gestão* 25, 57-73.
- Torres, R., Dal Pozzo, B.S., Ozaki, V.A., 2024. Efeitos do El Niño e La Niña no clima e seguro agrícola na Região Sul do Brasil. In: *CONGRESSO DA SOBER, 62, Palmas, TO: Escola Superior de Agricultura Luiz de Queiroz, Universidade de São Paulo*. 2024. Disponível: <https://even3.blob.core.windows.net/anais/814534.pdf>. Acesso: 23 set. 2025.
- Turcato, T., Minuzzi, R.B., 2024. Avaliação na Estimativa da Evapotranspiração de Referência Diária e Decendial nas Condições Climáticas do Rio Grande do Sul. *Revista Brasileira de Meteorologia* [online] 39. Disponível: <https://doi.org/10.1590/0102-77863910046>. Acesso: 2 out. 2025.
- Turcato, T., Minuzzi, R.B., 2025. Avaliação de métodos para estimativa da evapotranspiração de referência em regiões climáticas de Santa Catarina, Brasil. *Revista de Geografia* [online] 42. Disponível: <https://doi.org/10.51359/2238-6211.2025.262523>. Acesso: 23 set. 2025.
- Zhang, Q., Han, J., Yang, X., 2021. Effects of direct heat stress on summer maize and risk assessment. *Theoretical and Applied*

Climatology [online] 146. Disponível: <https://doi.org/10.1007/s00704-021-03769-9>. Acesso: 23 set. 2025.

Zhara, N., Hafeez, M.B., Kausar, A., Al Zeide, M.; Asekova, S.; Siddique, K.H., Farooq, M., 2023. Plant photosynthetic responses under drought stress: Effects and management. Journal of Agronomy and

Crop Science [online] 209. Disponível: <https://doi.org/10.1111/jac.12652>. Acesso: 23 set. 2025.

WMO. World Meteorological Organization, 2025. Heatwaves. [online] Disponível: <https://wmo.int/topics/heatwave>. Acesso: 03 out. 2025.