

Publicação da Secretaria de Política Agrícola
do Ministério da Agricultura e Pecuária,
editada pela Embrapa

e-ISSN 2317-224X
ISSN 1413-4969
Página da revista: www.embrapa.br/rpa

Artigo

Variabilidade climática na produção de milho, trigo e soja


Resumo – Este trabalho buscou analisar como os elementos climáticos afetam a produção de milho, trigo e soja na Mesorregião Noroeste do Rio Grande do Sul no período de 2010 a 2019. Para isso, estimaram-se três modelos econométricos com variáveis de temperatura e precipitação para verificar o impacto delas na produção das culturas analisadas. Os resultados mostraram que a precipitação pluviométrica impactou positivamente a produção das três culturas. A temperatura máxima impactou negativamente o cultivo de milho e soja e positivamente o cultivo de trigo, enquanto a temperatura mínima, a temperatura do orvalho e a velocidade do vento impactaram negativamente os três cultivos.

Palavras-chave: Cochrane-Orcutt, precipitação, produção agrícola, temperatura.

Climatic variability in the production of corn, wheat and soybeans

Abstract – This study aimed to analyze how climatic elements affect the production of corn, wheat, and soybeans in the Northwest Mesoregion of Rio Grande do Sul, Brazil. To achieve this, three econometric models were estimated using temperature and precipitation variables to verify their impact on the production of these crops during the period from 2010 to 2019. The results showed that rainfall positively affected the production of all three crops. Maximum temperature negatively impacted the cultivation of corn and soybeans and positively affected wheat, while minimum temperature, dew point temperature, and wind speed negatively impacted the cultivation of all three crops.

Keywords: Cochrane-Orcutt, precipitation, agricultural production, temperature.

Fernanda Cigainski Lisbinski ✉ 
Universidade de São Paulo, Escola Superior de Agricultura
Luiz de Queiroz, Departamento de Economia, Administração
e Sociologia, Piracicaba, SP, Brazil
Autor correspondente lisbinskif@gmail.com

Recebido
8/6/2024

Aceito
19/9/2024

Como citar
LIBINSKI, F.C. Variabilidade climática na produção de milho,
trigo e soja. **Revista de Política Agrícola**, v.33, e01974,
2024. DOI: <https://doi.org/10.35977/2317-224X.rpa2024.v33.01974>.

Introdução

O impacto do clima na produtividade e na qualidade final dos cultivos de soja, milho e trigo é amplamente reconhecido e corresponde à incerteza climática responsável por grande parte do risco que afeta a atividade agrícola (Ray et al., 2019; Zambrano-Medina et al., 2024). De modo geral, pode-se afirmar que todos os setores são vulneráveis às mudanças climáticas. No entanto, o setor agrícola tem sido objeto de muitos estudos em todo o mundo por causa da sua forte dependência do clima e da necessidade cada vez maior de se produzir alimentos. Muitos estudos mostraram que as condições climáticas futuras impactarão significativamente a produtividade das culturas agrícolas (Verón et al., 2015; Schaubberger et al., 2017; Santos et al., 2021; Ater Mais Digital, 2024).

O Brasil é o terceiro maior produtor mundial de alimentos (FAO, 2020). Em 2022, o País foi o terceiro maior produtor mundial de milho, atrás apenas dos Estados Unidos e da China; o maior produtor mundial de soja; e o décimo quinto maior produtor mundial de trigo (FAO, 2023). O Rio Grande do Sul é o segundo maior produtor de soja e de milho e o maior produtor de trigo do País (IBGE, 2022).

A Mesorregião Noroeste do Rio Grande do Sul se destaca na produção dessas três culturas. Em 2022, ela foi a maior produtora estadual de soja, com 42,9% da produção, milho (55,6%) e trigo (75,7%) (IBGE, 2022).

No início de 2024, o Rio Grande do Sul enfrentou uma enchente devastadora que afetou tanto áreas urbanas quanto rurais. Nas cidades, a enchente causou inundações que destruíram infraestruturas, danificaram residências e desalojaram famílias. O impacto na agricultura foi igualmente severo, com grandes áreas de cultivo totalmente submersas. A água estagnada arruinou as plantações, provocando atraso nas colheitas e comprometendo a produtividade. Com a logística de transporte severamente prejudicada, a dificuldade de escoamento dos produtos agrícolas fez subir os custos para os produtores. A recuperação das lavouras e a restauração das infraestruturas danificadas representam desafios significativos para a região, tanto do ponto de vista econômico quanto social (Ribas, 2024).

Este estudo buscou responder em que intensidade a produção de milho, soja e trigo, na Mesorregião Noroeste do estado, é afetada pelas variações dos elementos climáticos. Para isso, fez-se

uma revisão da literatura e estimaram-se três modelos econométricos utilizando variáveis de temperatura e precipitação. A escolha do período de 2010 a 2019 se deve à disponibilidade de dados.

Esta pesquisa se justifica pelo fato de a sociedade enfrentar fenômenos inesperados provocados por alterações climáticas, como enchentes na Europa, inundações no Sul e secas prolongadas e queimadas no Sudeste do Brasil e calor intenso nos Estados Unidos. Esses eventos afetam diretamente a produção agrícola em todo o mundo. Nesse contexto, considerando-se 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 garantir a segurança alimentar global, o País precisa manter sua capacidade produtiva para sustentar a demanda interna e o comércio internacional.

A pressão por aumentar a produção agrícola para exportação, ao mesmo tempo que se deve proteger os recursos naturais, impõe desafios crescentes ao agronegócio. A pesquisa se justifica, portanto, não apenas pela necessidade de entender como as variações climáticas impactam a produção, mas também pela urgência de desenvolver soluções que equilibrem a produção de alimentos com a preservação do meio ambiente.

O Rio Grande do Sul se destaca na produção de milho, soja e trigo, e a Mesorregião Noroeste rio-grandense, em particular, cuja economia é fortemente baseada na agricultura, possui expressiva representatividade nesses cultivos. O diferencial desta pesquisa está na análise da influência de variáveis climáticas sobre a produtividade dessas culturas na Mesorregião Noroeste, aspecto ainda pouco explorado na literatura, especialmente em estudos que integram economia agrícola e clima de forma regionalizada.

Diante dos crescentes desafios impostos pelas mudanças climáticas, a formulação de políticas públicas eficazes torna-se fundamental para o desenvolvimento sustentável da agricultura. Políticas voltadas para a mitigação dos impactos climáticos, como o fortalecimento de sistemas de alerta precoce, a promoção de práticas agrícolas resilientes e o investimento em infraestrutura adaptativa, são fundamentais. Essas políticas não apenas garantem a segurança alimentar, mas também protegem a economia agrícola, especialmente em regiões onde a dependência do clima é intensa.

Fundamentação teórica

Impacto dos fatores climáticos sobre a produção e a produtividade de grãos

O cultivo de milho, soja e trigo desempenha papel vital na sustentabilidade alimentar global e no panorama econômico agrícola. Para Ray et al. (2019), a produção dessas culturas está intimamente interligada às condições climáticas. Evidências indicam que variações na temperatura, padrões de precipitação e eventos climáticos extremos têm um impacto significativo na produtividade e no rendimento de todas elas. Zhang & Yang (2019) e Santos et al. (2022) destacam que o aumento das temperaturas pode levar a reduções da produtividade do milho e da soja; já Ray et al. (2019) observaram que mudanças na precipitação podem afetar negativamente o rendimento do trigo. Diante disso, compreender a interação entre fatores climáticos e a produção de grãos é essencial para a formulação de estratégias eficazes de adaptação e mitigação, e isso se torna ainda mais importante diante de eventos climáticos extremos, como secas e inundações, que aumentam a instabilidade na produção agrícola e intensificam os riscos associados ao setor (Konduri et al., 2020). A capacidade de se antecipar e responder a essas variações é fundamental para garantir a adaptabilidade e a resiliência da agricultura e, assim, minimizar os impactos negativos sobre a segurança alimentar e a economia.

Primeiramente, é importante diferenciar variabilidade climática de mudanças climáticas. A variabilidade climática, foco desta pesquisa, abrange flutuações naturais de curto prazo nas condições climáticas, incluindo variações de temperatura, precipitação e padrões de vento. Já as mudanças climáticas representam alterações de longo prazo nos padrões climáticos, resultado das atividades humanas, como a emissão de gases de efeito estufa. Rosenzweig et al. (2014) e Sahoo & Moharaj (2024) destacam que tanto a variabilidade climática quanto as mudanças climáticas exercem impactos significativos na agricultura. Isso se manifesta na alteração dos ciclos de crescimento das culturas, na disponibilidade de recursos hídricos e nutrientes e no aumento da incidência de pragas e doenças.

Diante disso, cada cultura responde de maneira própria às variações climáticas. O milho desempenha papel crucial na segurança alimentar global e é amplamente cultivado, mas sua produ-

tividade é altamente sensível ao calor. Lobell & Burke (2010) e Zhang et al. (2021) destacam a sensibilidade do milho às condições climáticas, especialmente à temperatura e à disponibilidade de água durante seu ciclo de crescimento. Em particular, temperaturas elevadas durante estágios críticos, 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 (Zhang et al., 2021).

Além disso, Zambrano-Medina et al. (2024) reforçam que as variações nos padrões de precipitação têm efeitos diretos sobre o crescimento do milho. Secas e inundações, resultantes dessas variações, comprometem etapas críticas como o estabelecimento inicial das plantas e seu desenvolvimento subsequente. Esses eventos climáticos extremos aumentam o risco de perda de produtividade, especialmente em regiões sem irrigação. Destaca-se que a capacidade do solo de reter umidade também desempenha papel importante na mitigação dos impactos dessas variações, mas quando a precipitação é insuficiente ou excessiva, o crescimento do milho é severamente prejudicado.

A soja, como o milho, é altamente sensível tanto à temperatura quanto à disponibilidade de água durante seu ciclo de crescimento. Tao et al. (2016) destacam a sensibilidade da soja às condições climáticas. Além disso, a duração da luz solar é essencial para o desenvolvimento da planta, e o aumento das temperaturas durante fases críticas, como o florescimento, pode reduzir tanto a produção quanto a qualidade dos grãos, por causa do estresse térmico. Precipitações inadequadas, por excesso ou escassez, também afetam o desenvolvimento das plantas, prejudicando sua produtividade. Kumari et al. (2024) destacam que temperaturas acima de 30 °C reduzem os rendimentos de soja, especialmente em condições de sequeiro. Secas prolongadas ou inundações agravam esses efeitos, comprometendo ainda mais o rendimento e a qualidade dos grãos. Eventos climáticos extremos, como ondas de calor e secas prolongadas, conforme Tao et al. (2016), podem aumentar o estresse hídrico nas plantas de soja e causar danos significativos às safras.

O trigo também apresenta sensibilidade às condições climáticas durante seu ciclo de crescimento (Asseng et al., 2015). Em particular, ele é altamente sensível à temperatura e à disponibilidade

de água durante a fase crítica de floração e enchimento dos grãos. Os autores observaram que o aumento das temperaturas pode reduzir significativamente o rendimento do trigo, além de afetar sua qualidade, o que resulta em menor teor de proteína e peso dos grãos. Além disso, períodos de chuva insuficiente comprometem o crescimento durante as fases críticas do desenvolvimento do trigo, enquanto precipitações excessivas podem levar ao encharcamento do solo e afetar a produtividade e a qualidade do grão. Essas variações aumentam os riscos associados à produção agrícola, especialmente em regiões sem irrigação adequada, exacerbando as dificuldades enfrentadas pelos agricultores na adaptação às mudanças climáticas (Ali et al., 2017).

Assim, os elementos climáticos, como precipitação, temperatura, orvalho e geada, são fundamentais na determinação da produtividade agrícola. A precipitação é vital para garantir o suprimento de água necessário para o crescimento das plantas e para a absorção de nutrientes do solo. No entanto, tanto o excesso quanto a falta de precipitação podem ser prejudiciais: enquanto a escassez leva à seca, o excesso pode causar encharcamento do solo, o que reduz a oxigenação das raízes e promove doenças que comprometem o desenvolvimento das culturas (Ali et al., 2017). Além disso, a precipitação excessiva pode levar à erosão do solo, lixiviação de nutrientes e saturação.

Temperaturas extremas, sejam elas altas ou baixas, podem causar estresse térmico nas plantas, o que afeta processos fisiológicos essenciais, como a fotossíntese e a respiração, que, por sua vez, reduz a produtividade das culturas (Nahar et al., 2015). Segundo Strimbeck et al. (2015), temperaturas extremas podem alterar a composição do solo, desidratando-o ou congelando sua superfície, enquanto o orvalho e a geada podem influenciar a disponibilidade de água no solo, afetando diretamente a germinação e o crescimento das plantas. Altas temperaturas podem acelerar a evapotranspiração, aumentando a necessidade de água e intensificando o estresse hídrico em condições de seca (Timilsina et al., 2023). Já as temperaturas baixas, como as associadas à geada, podem danificar tecidos vegetais, especialmente durante fases críticas de desenvolvimento, como a floração e o enchimento de grãos (Asseng et al., 2015).

Além disso, outros fenômenos climáticos, como o orvalho, embora geralmente benéfico, podem favorecer o surgimento de doenças fúngi-

cas em condições de alta umidade (Zingales et al., 2022; Zhou et al., 2024). As geadas podem causar danos severos às células das plantas, especialmente em culturas sensíveis, como o trigo e a soja, e comprometer tanto a qualidade quanto a quantidade da produção. As geadas expõem as plantas a temperaturas abaixo de zero, resultando em cristalização intracelular, o que pode levar à morte celular e à perda de tecido vegetal. No trigo, a exposição a geadas durante a fase de floração pode reduzir drasticamente o rendimento, enquanto na soja, as geadas podem causar abortamento de flores e vagens (Gogoi et al., 2018).

Portanto, a compreensão desses fatores climáticos e seus efeitos tanto no solo quanto diretamente nas plantas é essencial para a adoção de práticas agrícolas adequadas. Estratégias de manejo que incluam a conservação do solo, o uso eficiente da água e a seleção de cultivares mais resistentes podem ajudar a mitigar os efeitos negativos dessas variáveis climáticas.

Revisão de literatura

Stooksbury & Michaels (1994) foram pioneiros a analisar os efeitos das variações climáticas na produção de milho em grandes áreas do sudeste dos EUA. Usando dois modelos para avaliar o impacto do aquecimento das noites e das temperaturas máximas e mínimas diurnas ao longo de 50 anos, revelaram que o aumento das temperaturas diurnas durante o mês de polinização do milho estava associado a reduções significativas nos rendimentos. Barrios et al. (2008), com dados de painel cross-country, mostraram que as mudanças na precipitação e na temperatura foram cruciais na produção agrícola da África Subsaariana, diferentemente dos países em desenvolvimento da África não Subsaariana, que não sofreram os mesmos impactos. Simulações indicaram que as mudanças climáticas prejudiciais desde a década de 1960 poderiam explicar grande parte da lacuna na produção agrícola entre essas regiões e o restante do mundo em desenvolvimento.

No Brasil, Araújo et al. (2014) focaram na região Nordeste e avaliaram o impacto das mudanças climáticas sobre a produtividade de milho, cana-de-açúcar e mandioca. Usando modelos Tobit e dados em painel, os autores concluíram que, sem medidas de mitigação, os níveis de produtividade

poderiam cair significativamente no Rio Grande do Norte, Paraíba e Pernambuco.

Verón et al. (2015), numa abordagem semelhante na Argentina, usaram modelos de painel para estimar a contribuição da precipitação, temperatura média e faixa de temperatura diurna na produtividade do trigo, milho e soja nos Pampas. Os resultados mostraram que as tendências climáticas reduziram a produtividade dessas culturas em até 5,4%. Complementando essa análise, Schaubberger et al. (2017) simularam os efeitos das altas temperaturas na produtividade de milho, soja e trigo nos EUA e descobriram que cada dia com temperaturas acima de 30 °C poderia reduzir os rendimentos de milho e soja em até 6% em condições de sequeiro, destacando a importância do estresse hídrico induzido por altas temperaturas.

Na Nigéria, Amare et al. (2018) investigaram o impacto dos choques pluviométricos na produtividade agrícola e no consumo das famílias, com dados de painel e informações georreferenciadas de precipitação. Observaram que choques negativos de chuva reduzem a produtividade agrícola, com impactos particularmente acentuados em famílias de baixa renda no norte do país.

Tan et al. (2021) analisaram o impacto das mudanças climáticas sobre a produção de arroz na Malásia, com dados em painel de 1987 a 2017, abrangendo oito áreas de produção. O objetivo foi avaliar como variáveis climáticas, como temperaturas mínimas e máximas e precipitação, afetam a produtividade do arroz. Os resultados mostraram que a precipitação não teve significância estatística em nenhum dos modelos, mas a temperatura máxima impactou negativamente a produção na entressafra, enquanto a temperatura mínima teve efeito positivo em ambas as safras. As projeções realizadas pelos autores indicam que até 2040 os rendimentos podem variar entre uma ligeira queda e um aumento significativo, dependendo da área, destacando a importância de estratégias de adaptação no âmbito das fazendas, especialmente fora da safra.

Finalmente, Upadhyay et al. (2024) fizeram uma análise quantitativa da variabilidade climática e da produção agrícola entre 1990 e 2018, utilizando regressão de dados em painel. Os autores focaram na variabilidade de três culturas — arroz, milho e trigo — na bacia do Rio Rangit, no Himalaia de

Sikkim, Índia. Os dados meteorológicos foram obtidos do Departamento Meteorológico da Índia, e os dados agrícolas, do Departamento Estadual de Agricultura, complementados por uma pesquisa de campo com agricultores. A análise dos dados, com correlações e regressões lineares múltiplas, revelou que todas as três culturas dependem da precipitação, sendo o arroz o mais sensível à variabilidade climática. Observou-se que a produção total de grãos tem relação inversa com a temperatura, mas correlação positiva com a precipitação. Houve queda contínua na produção de arroz e trigo ao longo do tempo. Em anos de déficit hídrico, uma redução de 11,33% na precipitação resultou em queda de 1,52% na produção de arroz, enquanto uma variação de -13,48% levou a diminuição de 54,78% no trigo. O estudo sugere que intervenções políticas oportunas e estratégias adaptativas podem reduzir os impactos climáticos e melhorar a produtividade.

Metodologia

Fonte e base de dados

Os dados utilizados neste estudo foram extraídos das bases do Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística (IBGE, 2023a, 2023b) e do Instituto Nacional de Meteorologia (INMET, 2024).

A amostra compreende os 216 municípios que compõem a Mesorregião Noroeste do Rio Grande do Sul, conforme a classificação do IBGE (2017). Os dados referem-se ao período de safras de 2010 a 2019. Para a análise da safra de milho, foram utilizados dados de precipitação, temperatura máxima, temperatura mínima, temperatura do orvalho e velocidade do vento de setembro a janeiro, período da 1ª safra do milho (plantio até colheita). Para a soja, de outubro a março, período da safra de soja. Por fim, para o trigo, de maio a setembro, período da safra do trigo (Tabela 1).

Destaca-se que os dados referentes aos fenômenos meteorológicos utilizados nesta pesquisa estão disponíveis na base de dados do INMET (2024), por estação meteorológica, e foram atribuídos aos municípios de acordo com a estação mais próxima. As estações meteorológicas utilizadas foram estas: Cruz Alta, Erechim, Frederico Westphalen, Palmeira das Missões, Passo Fundo, Santa Rosa, Santo Augusto e Soledade.

Tabela 1. Nomenclatura e especificação das variáveis.

Variável	Descrição	Fonte	Sinal esperado	Base teórica
<i>milho_{it}</i>	Quantidade produzida de milho (1ª safra)	IBGE	Variável dependente	Bergamaschi et al. (2004); van der Velde et al. (2012); Lobell et al. (2013); Verón et al. (2015); Schauburger et al. (2017); Vogel et al. (2019)
<i>soja_{it}</i>	Quantidade produzida de soja	IBGE	Variável dependente	Teixeira et al. (2011); Verón et al. (2015); Schauburger et al. (2017); Cohen et al. (2021)
<i>trigo_{it}</i>	Quantidade produzida de trigo	IBGE	Variável dependente	van der Velde et al. (2012); Verón et al. (2015); Schauburger et al. (2017); Mäkinen et al. (2018)
<i>precipita_{it}</i>	Precipitação média (mm)	INMET	(+)	Bergamaschi et al. (2004); van der Velde et al. (2012); Lobell et al. (2013); Yuan-an et al. (2013); Nyirenda & Sachikumba (2019)
<i>torvalho_{it}</i>	Média da temperatura do ponto de orvalho no período (°C)	INMET	(-)	Michaels (1994); Teixeira et al. (2011); Stooksbury & Baghban et al. (2016); Qasem et al. (2019)
<i>tmax_{it}</i>	Maior temperatura máxima registrada no período (°C)	INMET	(+) para a produção de trigo (-) para a produção de soja e milho	van der Velde et al. (2012); Lobell et al. (2013); Yuan-an et al. (2013); Verón et al. (2015); Schauburger et al. (2017)
<i>tmin_{it}</i>	Menor temperatura mínima registrada no período (°C)	INMET	(-)	van der Velde et al. (2012); Lobell et al. (2013); Yuan-an et al. (2013); Matiu et al. (2017); Schauburger et al. (2017)
<i>vento_{it}</i>	Rajada máxima de vento registrada no período (m/s)	INMET	(-)	Resende & Resende Júnior (2011); Yuan-an et al. (2013); Vale et al. (2020)

Para analisar os impactos dos elementos climáticos na produção de milho, trigo e soja na Mesorregião Noroeste do Rio Grande do Sul, foram especificados os modelos

$$lnmilho_{it} = \alpha_0 + \beta_1 lnprecipita_{it} + \beta_2 lntorvalho_{it} + \beta_3 lntmax_{it} + \beta_4 tmin_{it} + \beta_5 lnvento_{it} + u_{it} \quad (1)$$

$$lnsoja_{it} = \alpha_0 + \beta_1 lnprecipita_{it} + \beta_2 lntorvalho_{it} + \beta_3 lntmax_{it} + \beta_4 tmin_{it} + \beta_5 lnvento_{it} + u_{it} \quad (2)$$

$$lntrigo_{it} = \alpha_0 + \beta_1 lnprecipita_{it} + \beta_2 lntorvalho_{it} + \beta_3 lntmax_{it} + \beta_4 tmin_{it} + \beta_5 lnvento_{it} + u_{it} \quad (3)$$

em que $lnmilho_{it}$ representa a quantidade produzida de milho (1ª safra) pelo município i no período t ; α_0 , a constante do modelo de regressão; $lnsoja_{it}$, a quantidade produzida de soja pelo município i no período t ; $lntrigo_{it}$, a quantidade produzida de trigo pelo município i no período t ; $lnprecipita_{it}$, a média da precipitação no município i no período t ; $lntorvalho_{it}$, a média da temperatura do ponto de orvalho no município i no período t ; $lntmax_{it}$, a maior temperatura máxima registrada no município i no período t ; $tmin_{it}$, a menor temperatura míni-

ma registrada no município i no período t ; $lnvento_{it}$, a rajada máxima de vento registrada no município i no período t ; e u_{it} , o termo de erro.

Procedimentos econométricos

O modelo econométrico estimado neste trabalho utilizou de dados em painel. Segundo Wooldridge (2019), os dados em painel apresentam uma série temporal para cada integrante do corte transversal do conjunto de dados. O uso de dados em painel oferece inúmeras vantagens, como a possibilidade de observar um maior número de pontos, aumentar os graus de liberdade, reduzir a multicolinearidade entre as variáveis explicativas, obter maior eficiência nas estimativas e maior flexibilidade ao modelar diferentes comportamentos entre os indivíduos (Hsiao, 2003; Greene, 2008).

De acordo com Greene (2008) e Wooldridge (2019), a análise de dados em painel pode ser feita por quatro modelos principais: o modelo *pooled*, o modelo de efeitos fixos, o modelo de efeitos aleatórios e o modelo de regressões aparentemente não relacionadas (SUR). Entre esses, destacam-se os

modelos de efeitos fixos e de efeitos aleatórios, que permitem o tratamento da heterogeneidade dos dados.

No modelo de efeitos fixos, controlam-se os efeitos das variáveis omitidas que variam de indivíduo para indivíduo, mas permanecem constantes ao longo do tempo. Nesse modelo, o intercepto exibe um valor diferente para cada indivíduo, mas é constante ao longo do tempo. Os coeficientes angulares são constantes para todos os indivíduos e em todos os períodos analisados (Hill et al., 2003). O modelo de efeitos fixos pode ser descrito por

$$y_{it} = \beta x_{it} + \alpha_i + \mu_{it} \quad t = 1, 2, \dots, T \quad (4)$$

em que α_i se refere aos interceptos a serem estimados para cada indivíduo, e é fixo ao longo do tempo. Assim, o efeito fixo na regressão visa captar todas as características dos indivíduos que não são observadas, as quais não variam ao longo do tempo. Portanto, pode ser interpretado como o efeito captado das variáveis omitidas no modelo.

Já no modelo de efeitos aleatórios, os interceptos são considerados variáveis aleatórias. Nesse modelo, além do intercepto do modelo de efeitos fixos, que captura as diferenças de comportamento entre os indivíduos, existe um componente adicional, que é o intercepto populacional. Essa componente captura as variações não observadas entre os indivíduos que são tratadas como aleatórias (Hill et al., 2003; Wooldridge, 2019). O modelo de efeitos aleatórios pode ser descrito por

$$y_{it} = \beta_0 + \beta_1 x_{it1} + \dots + \beta_k x_{itk} + v_{it} \quad (5)$$

em que $v_{it} = \mu_{it} + \alpha_i$, os novos termos de erro estocástico, são serialmente correlacionados ao longo do tempo, $corr(v_{it}, v_{is}) = \sigma_a^2 / (\sigma_a^2 + \sigma_u^2), \forall t \neq s$. Além disso, $E(v_{it}) = 0$; $cov(v_{it}, v_{is}) = 0, \forall i \neq j$; e $Var(v_{it}) = \sigma_a^2 + \sigma_u^2$, sendo $\sigma_a^2 = var(\alpha_i)$ e $\sigma_u^2 = var(\mu_{it})$.

Esse modelo é útil quando se admite que as diferenças entre as unidades de corte transversal são aleatórias e não estão correlacionadas com as variáveis independentes incluídas no modelo. A escolha entre o modelo de efeitos fixos e o modelo de efeitos aleatórios pode ser feita com base no teste de Hausman, que verifica se os coeficientes estimados por um modelo são significativamente diferentes dos estimados pelo outro.

Para obter o modelo mais apropriado para este estudo, foram aplicados os testes de Hausman (1978), Chow (Baltagi, 2008) e Breusch-Pagan (1980) (Tabela 2). O teste de Hausman, ao rejeitar a hipótese nula ($p < 0,05$), indica que o modelo de efeitos fixos é mais adequado do que o de efeitos aleatórios; caso contrário, o modelo de efeitos aleatórios é preferível. O teste Chow também rejeita a hipótese nula ($p < 0,05$) quando o modelo de efeitos fixos é mais apropriado do que o modelo *pooled*; caso contrário, o modelo *pooled* é preferível. Por fim, o teste LM de Breusch-Pagan rejeita a hipótese nula ($p < 0,05$) quando o modelo de efeitos aleatórios é mais adequado do que o modelo *pooled*; caso contrário, o modelo *pooled* é o preferido.

A presença de heterocedasticidade no modelo foi verificada pelo teste de Wald, em que a hipótese nula indica homoscedasticidade (variância constante), e a hipótese alternativa indica heterocedasticidade. Conforme Greenaway (2000), a possibilidade de heterocedasticidade pode ser controlada com o uso de erros padrão robustos, pois esse método aproxima os estimadores de seus resultados clássicos ao produzir estimadores que não são afetados por pequenas variações, o que poderia provocar resultados viesados e testes ineficientes. Outra forma de corrigir essas falhas no modelo é a utilização da estimação Cochrane-Orcutt, que corrige problemas de autocorrelação serial e, quando se estima com erros padrão e estatísticas de testes robustos, também a heterocedasticidade do modelo (Wooldridge, 2019).

Tabela 2. Testes realizados.

Teste	Hipótese
Teste de Hausman	H_0 : modelo de efeitos aleatório
	H_1 : modelo de efeitos fixos
Chow	H_0 : modelo <i>pooled</i>
	H_1 : modelo de efeitos fixos
LM de Breusch-Pagan	H_0 : modelo <i>pooled</i>
	H_1 : modelo efeito aleatório
Teste de heterocedasticidade (teste de Wald)	H_0 : não há heterocedasticidade
	H_1 : há heterocedasticidade
Teste de Wooldridge	H_0 : ausência de autocorrelação
	H_1 : presença de autocorrelação

Análise e discussão dos resultados

Milho

Os testes indicaram que o método de efeitos aleatórios é o mais adequado para representar o modelo (Tabela 3). No entanto, para esse modelo, o teste de Wald detectou a presença de heterocedasticidade, o que torna necessária a correção do problema. Além disso, o teste de Wooldridge apontou a existência de autocorrelação nos resíduos do modelo, o que também precisa ser corrigido.

Para a correção, optou-se por usar o estimador robusto de White e o modelo interativo de Cochrane-Orcutt em sua forma robusta. A Tabela 3 mostra, para eventuais comparações, os estimadores nos seguintes formatos: efeito aleatório, efeito aleatório corrigido (estimador robusto de White) e

Cochrane-Orcutt. Esta pesquisa se concentrará na interpretação do modelo de Cochrane-Orcutt, já que ele corrige tanto a heterocedasticidade quanto a autocorrelação serial encontradas.

A variável precipitação ($\ln precipita_{it}$), estatisticamente significativa a 1%, e com impacto positivo, indica que um aumento de 1% na precipitação pluviométrica provoca aumento de 11,4% na quantidade produzida de milho na mesorregião. Segundo Schillerberg & Tian (2022), grande parte do Rio Grande do Sul apresenta fortes restrições para o cultivo do milho por causa do déficit hídrico que ocorre na região Sul, especialmente se o déficit for no período de pré-floração ao início do enchimento dos grãos. Dessa forma, níveis elevados de precipitação aumentam a produtividade, pois garantem a umidade necessária durante a semeadura e, posteriormente, no período crítico de floração e

Tabela 3. Testes e resultados do modelo estimado para o milho.

Variável	Efeito aleatório (1)	Efeito aleatório corrigido (2)	Modelo Cochrane-Orcutt (3)
$\ln precipita_{it}$	8,308871*** (0,4904853)	8,308871*** (0,5332379)	11,40232*** (0,5469671)
$\ln torvalho_{it}$	-3,386159*** (0,3575563)	-3,386159*** (0,3784249)	-4,461552*** (0,3348318)
$\ln tmax_{it}$	-0,6352669* (0,3518201)	-0,6352669** (0,2868966)	-1,208485** (0,4573249)
$\ln tmin_{it}$	-0,0165694 (0,0200516)	-0,0165694 (0,0255272)	-0,00882978** (0,0272362)
$\ln vento_{it}$	-0,0233061 (0,0741777)	-0,0233061 (0,0722004)	-0,6679231*** (0,0988441)
Const	-14,98129*** (2,108116)	-14,98129*** (1,809148)	-34,04604*** (2,966792)
Nº Obs.		2.160	
Within	0,0074	0,0074	-
Between	0,0520	0,0520	-
Overall	0,0424	0,0424	-
(Rho)			0,7097418
R ²			0,2143
Teste		Estatística	Prob
Teste de Chow		21,45	0,0000
Breusch Pagan		4.377,65	0,0000
Hausman		357,18	0,4538
Wooldridge		28,294	0,0000
Wald Test		11.081,51	0,0000

Nota: valores entre parênteses são os resultados dos erros padrão; nível de significância a 10%: *; a 5%: **; e a 1%: ***.

início de enchimento dos grãos (Hatfield & Dold, 2018; Teng et al., 2023).

Baixos níveis de precipitação podem levar ao estresse térmico e hídrico, o que afeta a fotossíntese e a transpiração do milho (Mangani et al., 2018; Waqas et al., 2021), além de aumentar a incidência de pragas e doenças. Ressalta-se também que chuvas intensas em condições de umidade excessiva podem reduzir a produção por causa da inadequação dos fatores críticos que afetam o crescimento e o manejo das plantas (Jamieson et al., 2012; van der Velde et al., 2012).

Para a temperatura do ponto de orvalho ($Intorvalho_{it}$), estatisticamente significativa a 1%, com impacto negativo, um aumento de 1% resulta em redução de 4,46% na quantidade produzida de milho. Segundo Hamada et al. (2017), a ocorrência de dias nublados com alta umidade relativa, e a presença de orvalho e cerração, características climáticas típicas do Rio Grande do Sul, principalmente seguidas de aumento de temperatura, favorecem o surgimento de doenças foliares no milho. Isso debilita a planta e favorece a entrada de patógenos que causam podridão no colmo e na raiz, o que leva à umidificação e deterioração dos grãos. Além disso, conforme Araujo & Santos (2024), em regiões mais frias, como o Rio Grande do Sul, as baixas temperaturas podem causar geadas que congelam o orvalho, sendo esse um dos fatores mais limitantes ao desenvolvimento do milho em certas épocas do ano.

No caso da temperatura máxima ($Intmax_{it}$), estatisticamente significativa a 5%, com impacto negativo, um aumento de 1% resulta em redução de 1,21% na quantidade produzida de milho. Para Schauburger et al. (2017), tanto a geada quanto o calor excessivo são prejudiciais aos processos fisiológicos do milho, afetando negativamente os níveis de rendimento. Altas temperaturas, definidas como superiores a 30 °C, podem causar estresse hídrico ao esgotar a água do solo e aumentar a demanda hídrica atmosférica (Koolmeister et al., 2024), o que leva ao fechamento dos estômatos para evitar a dessecação, reduzindo assim a absorção de CO₂. Além disso, o calor excessivo pode danificar diretamente enzimas e tecidos (Lobell & Gourdjji, 2012; Hasanuzzaman et al., 2013; Baroni et al., 2024), prejudicar a floração (Boyer & Westgate, 2004; Barnabás et al., 2008; Zhao et al., 2020; Das et al., 2022), desencadear estresse oxidativo (Kadam et al., 2014) e acelerar a maturidade

precoce e senescência, resultando em menos tempo para acumular biomassa (Farooq et al., 2009; Folberth et al., 2014; Zhao et al., 2020; Das et al., 2022). Esses fatores contribuem para uma menor assimilação de carbono e taxas líquidas de fotossíntese mais baixas, por causa de taxas respiratórias mais altas (Xu et al., 2015; Werner et al., 2020).

A interpretação da variável temperatura mínima ($tmin_{it}$) – estatisticamente significativa a 5%, com impacto negativo – difere das demais, pois as temperaturas na Mesorregião Noroeste do Rio Grande do Sul costumam ser baixas, resultando em sinais negativos. Assim, a variável foi estimada em nível, de modo que um aumento de 1% na temperatura mínima resulta em redução de 0,88% na quantidade produzida de milho. Segundo Charrier et al. (2021), a geada provoca alterações no metabolismo das plantas, com grandes danos fisiológicos. O gelo se forma inicialmente nas folhas mais jovens, que possuem alto teor de água, poucos sais e menor reserva de calor. As partes da planta afetadas pela geada tornam-se mais claras ou amarronzadas por causa da ruptura da parede celular pelos cristais de gelo formados repentinamente, o que deteriora o conteúdo celular. Em temperaturas mais baixas, as gotas de orvalho resfriam-se a menos de 0 °C e acabam congelando, formando a geada, que "queima" as folhas e pode destruir plantações desprotegidas (Fiorin & Dal Ross, 2015).

Para a rajada máxima de vento registrada no período ($Invento_{it}$), estatisticamente significativa a 1%, com impacto negativo, um aumento de 1% resulta em redução de 0,67% na quantidade produzida de milho. Segundo Fiorin & Dal Ross (2015), ventos fortes, muito frios ou muito quentes, podem causar danos mecânicos, anatômicos e fisiológicos às plantas. Esses ventos podem derrubar flores e frutos, o que reduz a produtividade, e quebrar ramos e galhos, o que, além de diminuir a área produtiva da planta, facilita o ataque de patógenos e pragas através das lesões causadas. Podem causar também ressecamento do solo – especialmente ventos quentes e constantes –, acamamento de culturas, com perdas antes da colheita, e erosão eólica, que pode contribuir para a desertificação de áreas produtivas. Além disso, os ventos dificultam a aplicação de defensivos agrícolas, pois prejudicam a deposição do produto pulverizado e podem transportar partículas para áreas vizinhas, causando fitotoxicidade, contaminação de pessoas e animais e disseminação de patógenos e pragas.

Soja

A Tabela 4 mostra os testes realizados para a escolha do estimador para a soja. O método de efeitos aleatórios é o mais adequado, mas o teste de Wald detectou a presença de heterocedasticidade, e o teste de Wooldridge apontou a existência de autocorrelação nos resíduos do modelo.

Para corrigir o modelo, seguiu-se a mesma abordagem do modelo anterior, optando-se pelo uso do estimador robusto de White e do modelo iterativo de Cochrane-Orcutt em sua forma robusta. Para permitir comparações, os estimadores foram apresentados nos seguintes formatos: efeito aleatório, efeito aleatório corrigido (estimador robusto de White) e Cochrane-Orcutt. Esta pesquisa se concentrará no modelo do método iterativo de Cochrane-

Orcutt, pois ele corrige tanto a heterocedasticidade quanto a autocorrelação serial identificadas.

A precipitação, que se mostrou estatisticamente significativa a 1%, com impacto positivo, indica que um aumento de 1% na precipitação pluviométrica resulta em aumento de 0,83% na quantidade produzida de soja. Lawson et al. (2018) e Baroni et al. (2024) destacam que a água desempenha papel fundamental na transpiração e fotossíntese, controlando a abertura e fechamento dos estômatos, sendo crucial para o crescimento e expansão foliar das plantas. De acordo com Khan et al. (2024), a precipitação é uma variável climática que exerce grande influência sobre o rendimento das culturas, e, de forma geral, uma maior média de precipitação está associada a uma maior produtividade. No entanto, esse efeito é altamente depen-

Tabela 4. Testes e resultados do modelo estimado para a soja.

Variável	Efeito aleatório (1)	Efeito aleatório corrigido (2)	Modelo Cochrane-Orcutt (3)
$lnprecipita_{it}$	0,8741087*** (0,1112425)	0,8741087*** (0,0505675)	0,834703*** (0,0352488)
$Intorvalho_{it}$	-0,5116298*** (0,1624957)	-0,5116298*** (0,0450896)	-0,2706609*** (0,0522682)
$Intmax_{it}$	-0,8320408 *** (0,0525872)	-0,8320408*** (0,0444541)	-0,041974** (0,0186539)
$tmin_{it}$	-0,5183484*** (0,1635103)	-0,7135303*** (0,0540598)	-0,0033763*** (0,0533145)
$lnvento_{it}$	-0,0743695 (0,3830269)	-0,0743695 (0,0593807)	-0,9708344*** (0,1245234)
Const	56,68667 *** (4,389534)	56,68667*** (2,651698)	7,627535*** (1,475015)
Nº Obs.		2.160	
Within	0,0018	0,0018	-
Between	0,0023	0,0023	-
Overall	0,1177	0,1177	-
(Rho)			0,730764
R ²			0,1546
Teste	Estatística		Prob
Teste de Chow	1,26		0,0082
Breusch Pagan	6,29		0,0000
Hausman	2.487,25		0,8212
Wooldridge	20.055,310		0,0000
Wald Test	42.049,94		0,0000

Nota: valores entre parênteses são os resultados dos erros padrão; nível de significância a 10%: *, a 5%: **, e a 1%: ***.

dente da distribuição da precipitação em cada fase de crescimento da cultura.

O estresse hídrico durante o subperíodo que dá início ao enchimento de grãos até o estado de grãos verdes pode reduzir drasticamente o rendimento da soja, já que quase metade dos nutrientes necessários para a formação dos grãos provém do solo e da fixação biológica de nitrogênio (Hirakuri, 2010; Felisberto et al., 2023). Dessa forma, pode-se concluir que, durante o período analisado, a precipitação foi favorável ao plantio da soja, impactando positivamente a produção.

Para a temperatura do ponto de orvalho, estatisticamente significativa a 1%, com impacto negativo, um aumento de 1% provoca redução de 0,27% na quantidade produzida de soja. As condições de molhamento foliar, causadas pelo orvalho ou nevoeiro, e a temperatura noturna são fatores suficientes para que fungos se desenvolvam nas plantas de soja, inoculadas ou não, e mantidas em ambiente natural (Yang et al., 2023). Segundo Darben et al. (2020), a infecção por *Phakopsora pachyrhizi* (ferrugem asiática) na soja ocorre sob temperaturas de orvalho entre 15 °C e 28 °C e umidade relativa do ar entre 75% e 80%. Além disso, períodos prolongados de orvalho e alta umidade são favoráveis ao desenvolvimento da ferrugem. Destaca-se que a temperatura média do ponto de orvalho durante o período analisado esteve entre 15 °C e 16 °C, condição suscetível ao desenvolvimento da doença (Darben et al., 2020).

Com relação à variável temperatura máxima, estatisticamente significativa a 5%, com impacto negativo, um aumento de 1% provoca redução de 0,042% na quantidade produzida de soja. Segundo Hirakuri (2010), durante o período de enchimento de grãos, deficiências hídricas associadas a altas temperaturas podem levar ao enrugamento dos grãos. Além disso, Jagadish et al. (2016) afirmam que temperaturas elevadas durante o período de floração da cultura podem diminuir os efeitos positivos do CO₂ sobre o rendimento, reduzindo o número de grãos e seu tamanho e qualidade. Pinto & Assad (2008) e Pinto et al. (2013) destacam que, se nada for feito para mitigar os efeitos das mudanças climáticas e adaptar as culturas para essa nova realidade de aquecimento global, as perdas na produção de soja podem chegar a 40% até 2070, um prejuízo de até R\$ 7,6 bilhões.

A temperatura mínima se mostrou estatisticamente significativa a 1%, com impacto negativo.

A interpretação dessa variável difere das demais, pois as temperaturas na Mesorregião Noroeste do Rio Grande do Sul exibem sinais negativos. Dessa forma, a variável foi estimada em nível, indicando que um aumento de 1% na temperatura mínima provoca redução de 0,34% na quantidade produzida de soja na região. Segundo a Embrapa (2015), o crescimento vegetativo da soja é pequeno ou praticamente nulo na presença de temperaturas iguais ou inferiores a 10 °C. Já temperaturas acima de 40 °C têm efeitos adversos na taxa de crescimento, com distúrbios na floração e redução da capacidade de retenção de vagens. A floração da soja é estimulada por temperaturas superiores a 10 °C, mas floração precoce pode ocorrer em virtude de temperaturas mais altas, até 40°C, o que pode resultar em menor altura da planta. Em relação às baixas temperaturas durante a fase de colheita, associadas a períodos chuvosos ou de alta umidade, essas condições podem atrasar a colheita, além de provocar haste verde e retenção foliar na soja (Embrapa, 2015).

Para a rajada máxima de vento, estatisticamente significativa a 1%, com impacto negativo, um aumento de 1% provoca redução de 0,97% na quantidade produzida de soja. Segundo Kouhen et al. (2023), ventos fortes e contínuos causam prejuízos ao desenvolvimento fisiológico das plantas e danos mecânicos, como a quebra de galhos e queda e rasgamento de folhas. Os autores afirmam também que ventos excessivos e contínuos representam grande problema para o desenvolvimento das atividades agrícolas, sendo necessário o uso de quebra-ventos, por exemplo.

Trigo

A Tabela 5 mostra os testes para a escolha do melhor estimador para o trigo. O método de efeitos aleatórios é o mais adequado, mas o teste de Wald detectou a presença de heterocedasticidade, e o teste de Wooldridge apontou autocorrelação dos resíduos do modelo.

Para corrigir o modelo, adotou-se a mesma abordagem para os modelos anteriores. Para permitir comparações, foram apresentados os estimadores nos formatos de efeito aleatório, efeito aleatório corrigido (estimador robusto de White) e Cochrane-Orcutt. A interpretação dos resultados se concentrará no modelo de Cochrane-Orcutt, visto que ele corrige tanto a heterocedasticidade quanto a autocorrelação serial identificadas.

Tabela 5. Testes e resultados do modelo estimado para o trigo.

Variável	Efeito aleatório (1)	Efeito aleatório corrigido (2)	Modelo Cochrane-Orcutt (3)
<i>Inprecipita_{it}</i>	12,43297*** (1,324876)	12,43297*** (1,230926)	16,3935*** (1,368669)
<i>Intorvalho_{it}</i>	-4,422591*** (0,6450495)	-4,422591*** (0,5964754)	-4,878354*** (0,6305765)
<i>Intmax_{it}</i>	0,753824 (1,840354)	0,753824 (1,314172)	3,103138* (1,955946)
<i>tmin_{it}</i>	-0,075229*** (0,0166762)	-0,075229*** (0,0218982)	-0,0518723*** (0,0186639)
<i>Invento_{it}</i>	0,068922 (0,1398836)	0,068922 (0,1488919)	0,2669661*** (0,1524179)
<i>Const</i>	-32,69915*** (11,91694)	-32,69915*** (10,06954)	-62,69086*** (12,95109)
Nº Obs.		2.160	
Within	0,0230	0,0230	-
Between	0,0019	0,0019	-
Overall	0,1279	0,1279	
(Rho)			0,7602244
R ²			0,1905
Teste	Estatística		Prob
Teste de Chow	33,39		0,0082
Breusch Pagan	5.669,09		0,0000
Hausman	356,12		0,0025
Wooldridge	0,453		0,0055
Wald Test	1,2e+05		0,0000

Nota: valores entre parênteses são os resultados dos erros padrão; nível de significância a 10%: *; a 5%: **; e a 1%: ***.

Para a variável precipitação, estatisticamente significativa a 1%, com impacto positivo, um aumento de 1% provoca aumento de 16% na quantidade produzida de trigo. Comparada às outras culturas, o trigo é mais eficiente no uso da água, sendo uma planta originária de regiões semiáridas (Bian et al., 2016). No entanto, a deficiência hídrica afeta diretamente processos cruciais como a fotossíntese, a formação e remobilização de metabólitos, e a formação do número de grãos por espiga (Luo et al., 2018).

Segundo Franceschi et al. (2009) e Alves (2019), práticas de manejo como a escolha adequada da cultivar, época e densidade de semeadura, manejo da água e dos resíduos na superfície, e fertilização são estratégias fundamentais para minimizar os impactos das flutuações climáticas sobre a cultura do trigo, que é altamente sensível à tem-

peratura e precipitação. Nuttall et al. (2017) complementam que chuvas durante o início da maturação do trigo afetam características quantitativas, como o peso de mil grãos, o peso do hectolitro e o rendimento de farinha, enquanto chuvas no fim da maturação reduzem a estabilidade, a elasticidade e a extensibilidade da massa, além da viscosidade. Portanto, observou-se que a precipitação durante o período de safra anual impactou positivamente a produção de trigo na região.

Com relação à temperatura do ponto de orvalho, que se mostrou estatisticamente significativa a 1%, com impacto negativo, um aumento de 1% provoca redução de 4,88% na quantidade produzida de trigo. É importante destacar que o cultivo do trigo no Rio Grande do Sul ocorre durante o inverno, período em que acontece a floração e o enchimento dos grãos. Durante essa estação, as temperaturas

baixas podem fazer o orvalho congelar, e isso causar a morte da planta (De Mori et al., 2016).

A temperatura máxima se mostrou estatisticamente significativa a 10% e com impacto positivo. Isso indica que um aumento de 1% na temperatura máxima provoca aumento de 3,10% na quantidade produzida de trigo. A temperatura desempenha papel crucial ao conduzir uma série de mudanças fisiológicas na acumulação de reservas no grão, interagindo de maneira complexa e modificando a qualidade tecnológica do produto final. A temperatura ótima para o período da antese até a maturação fisiológica, visando à obtenção de grãos de maior peso, deve ser em torno de 16 °C (Ferne et al., 2022), o que é consistente com a temperatura média durante o inverno no Rio Grande do Sul. A partir dessa temperatura, observa-se redução no rendimento dos grãos (Kumar et al., 2023). Isso ocorre principalmente pela diminuição da deposição de amido nos grãos. A acumulação de proteínas também é afetada, embora menos sensível às variações de temperatura do que no caso do amido (Ferne et al., 2022).

No caso da temperatura mínima, estatisticamente significativa a 1% e com impacto negativo, a interpretação dessa variável difere das demais, pois as temperaturas na Mesorregião Noroeste do Rio Grande do Sul exibem sinais negativos; assim, a variável foi estimada em nível. Um aumento de 1% na temperatura mínima provoca redução de 5,18% na quantidade produzida de trigo na região. Segundo a Sociedade Nacional de Agricultura (2017), na região temperada do Brasil, que compreende o Rio Grande do Sul, Santa Catarina e o sul do Paraná, os principais problemas enfrentados na produção de trigo incluem o excesso de umidade relativa do ar de setembro a outubro, altas temperaturas na fase de enchimento de grãos, chuvas durante a colheita, granizo e a presença de geadas no espigamento.

A geada, em particular, é um dos principais riscos climáticos para o trigo, conforme destacado por De Mori et al. (2016). Esse fenômeno meteorológico é imprevisível e ocorre de forma irregular, o que, juntamente com a falta de resistência ou tolerância genética das cultivares, torna-se um grande risco ao cultivo desse cereal no Brasil, especialmente no Sul. A sensibilidade do trigo à geada aumenta a partir do início do emborrachamento, atinge seu máximo durante a floração e diminui depois dos estádios de grão em massa mole e dura. Mesmo assim, a geada pode causar danos significativos ao tri-

go mesmo antes do emborrachamento, resultando em queima de folhas, estrangulamento de colmos e morte das plantas (De Mori et al., 2016).

Para a rajada máxima de vento, estatisticamente significativa a 1% e com impacto negativo, um aumento de 1% provoca redução de 0,27% na quantidade produzida de trigo. Segundo De Mori et al. (2016), o trigo é suscetível ao acamamento causado por ventos fortes – superiores a 40 km/h –, e os danos mais severos ocorrem a partir da fase de floração. O acamamento reduz o potencial de rendimento das lavouras e a qualidade do grão, por causa do maior contato com a umidade do solo. Além disso, Monteiro (2009) e Lal et al. (2022) afirmam que, para o cultivo ideal do trigo, são necessárias temperaturas em torno de 18 °C e chuvas que não excedam a 60 mm/mês.

Conclusão

Este trabalho analisou como os elementos climáticos afetam a produção de milho, trigo e soja na Mesorregião Noroeste do Rio Grande do Sul. Para isso, estimaram-se três modelos econométricos utilizando variáveis de temperatura e precipitação. Os resultados mostraram que a precipitação apresentou impacto positivo na análise das três culturas, enquanto a temperatura do ponto de orvalho impactou negativamente também a produção de todas elas. A temperatura máxima exerceu impacto negativo no cultivo de milho e soja, mas impacto positivo no cultivo de trigo. Por sua vez, a temperatura mínima e a velocidade do vento impactaram negativamente o cultivo das três culturas.

Este estudo destaca a urgente necessidade de reconhecer o impacto negativo da temperatura sobre as culturas de milho e soja, especialmente em face da crescente tendência de aquecimento global resultante do aumento do efeito estufa.

Para fortalecer a resiliência a longo prazo do setor agrícola na Mesorregião Noroeste do Rio Grande do Sul, é essencial integrar práticas agrícolas sustentáveis que possam mitigar os impactos negativos das mudanças climáticas. A rotação de culturas, o uso eficiente da água e a adoção de tecnologias agrícolas avançadas são práticas fundamentais que não só ajudam a preservar os recursos naturais, mas também garantem a estabilidade econômica e a segurança alimentar da região. A sustentabilidade deve ser um objetivo central, para

assegurar que as respostas imediatas às mudanças climáticas beneficiem também as gerações futuras.

Além disso, os resultados deste estudo têm implicações diretas para a formulação de políticas agrícolas em âmbito nacional – políticas que incentivem a adoção de novas tecnologias, como sistemas de previsão meteorológica mais precisos e inteligência artificial para monitoramento em tempo real.

As recentes enchentes no Rio Grande do Sul, que afetaram gravemente tanto as áreas urbanas quanto rurais, destacam ainda mais a urgência de políticas públicas voltadas para a prevenção e mitigação de desastres naturais. Esses eventos não apenas danificam a infraestrutura e ameaçam a segurança das populações, mas também causam perdas na agricultura. Portanto, é essencial que as políticas públicas incluam medidas robustas de adaptação a eventos climáticos extremos.

Diante das limitações encontradas no uso dos métodos nesta pesquisa – como a limitação de dados climáticos para compor o painel, o caráter estático do modelo e a falta de variáveis que possam captar aspectos dinâmicos que impactam a produtividade agrícola de milho, soja e trigo –, para trabalhos futuros e aprofundamento desta análise, sugere-se a ampliação do número de variáveis, incluindo, por exemplo, variáveis relacionadas à radiação solar e à duração do dia e da noite e outras que possam captar o impacto dos elementos climáticos.

Referências

ALI, S.A.; TEDONE, L.; DE MASTRO, G. Climate variability impact on wheat production in Europe: adaptation and mitigation strategies. In: AHMED, M.; STOCKLE, C. (Ed.). **Quantification of climate variability, adaptation and mitigation for agricultural sustainability**. Cham: Springer, 2017. p.251-321. DOI: https://doi.org/10.1007/978-3-319-32059-5_12.

ALVES, M. da S. **Produtividade e qualidade de cultivares de trigo em resposta a épocas de semeadura e manejo do solo em região de clima tropical de altitude**. 2019. 100p. Tese (Doutorado) – Universidade Estadual Paulista, Botucatu.

AMARE, M.; JENSEN, N.D.; SHIFERAW, B.; CISSÉ, J.D. Rainfall shocks and agricultural productivity: Implication for rural household consumption. **Agricultural Systems**, v.166, p.79-89, 2018. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.agsy.2018.07.014>.

ARAUJO, J.E.; SANTOS, L. da C. **Introdução ao estudo da meteorologia e sua influência na produção agrícola**. Diamantina: UFMJM, 2024. 106p. Disponível em: <<http://acervo.ufvjm.edu.br/jspui/handle/1/3303>>. Acesso em: 1 ago. 2024.

ARAUJO, P.H.C.; SILVA, F. de F.; GOMES, M.F.M.; FÉRES, J.G.; BRAGA, M.J. Uma análise do impacto das mudanças climáticas na produtividade agrícola da região nordeste do Brasil. **Revista Econômica do Nordeste**, v.45, p.46-57, 2014. DOI: <https://doi.org/10.61673/ren.2014.118>.

ASSENG, S.; EWERT, F.; MARTRE, P.; RÖTTER, R.P.; LOBELL, D.B.; CAMMARANO, D.; KIMBALL, B.A.; OTTMAN, M.J.; WALL, G.W.; WHITE, J.W.; REYNOLDS, M.P.; ALDERMAN, P.D.; PRASAD, P.V.V.; AGGARWAL, P.K.; ANOTHAI, J.; BASSO, B.; BIERNATH, C.; CHALLINOR, A.J.; DE SANCTIS, G.; DOLTRA, J.; FERERES, E.; GARCIA-VILA, M.; GAYLER, S.; HOOGENBOOM, G.; HUNT, L.A.; IZAURRALDE, R.C.; JABLOUN, M.; JONES, C.D.; KERSEBAUM, K.C.; KOEHLER, A.K.; MÜLLER, C.; NARESH KUMAR, S.; NENDEL, C.; O'LEARY, G.; OLESEN, J.E.; PALOSUO, T.; PRIESACK, E.; EYSHI REZAEI, E.; RUANE, A.C.; SEMENOV, M.A.; SHCHERBAK, I.; STÖCKLE, C.; STRATONOVITCH, P.; STRECK, T.; SUPIT, I.; TAO, F.; THORBURN, P.J.; WAHA, K.; WANG, E.; WALLACH, D.; WOLF, J.; ZHAO, Z.; ZHU, Y. Rising temperatures reduce global wheat production. **Nature Climate Change**, v.5, p.143-147, 2015.

ATER MAIS DIGITAL. **Mudanças climáticas: impactos na agropecuária**. 2024. Disponível em: <<https://www.atermaisdigital.cnptia.embrapa.br/web/mudancas-climaticas/impactos-na-agropecuaria>>. Acesso em: 1 set. 2024.

BAGHBAN, A.; BAHADORI, M.; ROZYN, J.; LEE, M.; ABBAS, A.; BAHADORI, A.; RAHIMALI, A. Estimation of air dew point temperature using computational intelligence schemes. **Applied Thermal Engineering**, v.93, p.1043-1052, 2016. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.applthermaleng.2015.10.056>.

BALTAGI, B.H. **Econometric analysis of panel data**. 4th ed. Chichester: Wiley, 2008.

BARNABÁS, B.; JÄGER, K.; FEHÉR, A. The effect of drought and heat stress on reproductive processes in cereals. **Plant, Cell & Environment**, v.31, p.11-38, 2008. DOI: <https://doi.org/10.1111/j.1365-3040.2007.01727.x>.

BARONI, D.F.; SOUZA, G.A.R. de; BERNADO, W. de P.; SANTOS, A.R.; BARCELLOS, L.C. de S.; BARCELOS, L.F.T.; CORREIA, L.Z.; ALMEIDA, C.M. de; VERDIN FILHO, A.C.; RODRIGUES, W.P.; RAMALHO, J.C.; RAKOCEVIC, M.; CAMPOSTRINI, E. Stomatal and non-stomatal leaf responses during two sequential water stress cycles in young *Coffea canephora* plants. **Stresses**, v.4, p.575-597, 2024. DOI: <https://doi.org/10.3390/stresses4030037>.

BARRIOS, S.; OUATTARA, B.; STROBL, E. The impact of climatic change on agricultural production: Is it different for Africa? **Food Policy**, v.33, p.287-298, 2008. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.foodpol.2008.01.003>.

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**, v.39, p.831-839, 2004. DOI: <https://doi.org/10.1590/S0100-204X2004000900001>.

BIAN, C.; MA, C.; LIU, X.; GAO, C.; LIU, Q.; YAN, Z.; REN, Y.; LI, Q. Responses of winter wheat yield and water use efficiency to irrigation frequency and planting pattern. **PLoS ONE**, v.11, e0154673, 2016. DOI: <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0154673>.

BOYER, J.S.; WESTGATE, M.E. Grain yields with limited water. **Journal of Experimental Botany**, v.55, p.2385-2394, 2004. DOI: <https://doi.org/10.1093/jxb/erh219>.

- BREUSCH, T.S.; PAGAN, A.R. The Lagrange Multiplier Test and its Applications to Model Specification in Econometrics. **Review of Economic Studies**, v.47, p.239-253, 1980. DOI: <https://doi.org/10.2307/2297111>.
- CHARRIER, G.; MARTIN-STPAUL, N.; DAMESIN, C.; DELPIERRE, N.; HÄNNINEN, H.; TORRES-RUIZ, J.M.; DAVI, H. Interaction of drought and frost in tree ecophysiology: rethinking the timing of risks. **Annals of Forest Science**, v.78, art.40, 2021. DOI: <https://doi.org/10.1007/s13595-021-01052-5>.
- COHEN, I.; ZANDALINAS, S.I.; FRITSCHI, F.B.; SENGUPTA, S.; FICHMAN, Y.; AZAD, R.K.; MITTLER, R. The impact of water deficit and heat stress combination on the molecular response, physiology, and seed production of soybean. **Physiologia Plantarum**, v.172, p.41-52, 2021. DOI: <https://doi.org/10.1111/ppl.13269>.
- DARBEN, L. M.; YOKOYAMA, A.; CASTANHO, F.M.; LOPES-CAITAR, V.S.; CARVALHO, M.C. da C.G. de; GODOY, C.V.; CARVALHO, S. de; GONELA, A.; MARCELINO-GUIMARÃES, F.C. Characterization of genetic diversity and pathogenicity of *Phakopsora pachyrhizi* mono-uredinal isolates collected in Brazil. **European Journal of Plant Pathology**, v.156, p.355-372, 2020. DOI: <https://doi.org/10.1007/s10658-019-01872-2>.
- DAS, R.; DEVI, S.H.; DAS, S.; MOLLIER, M.; PACHONI, S. Understanding the mechanism of high-temperature stress effect and tolerance in wheat. In: KUMAR, R.R.; PRAVEEN, S., RAI, G.K. (Ed.). **Thermotolerance in Crop Plants**. Singapore: Springer Nature Singapore, 2022. p.105-127. DOI: https://doi.org/10.1007/978-981-19-3800-9_5.
- DE MORI, C.; ANTUNES, J.M.; FAÉ, G.S.; ACOSTA, A. da S. (Ed.). **Trigo: o produtor pergunta, a Embrapa responde**. 2016. Disponível em: <<https://ainfo.cnptia.embrapa.br/digital/bitstream/item/144769/1/ID43609-2016LVTTrigo.pdf>>. Acesso em: 1 set. 2024.
- EMBRAPA. Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária. **Sistemas de Produção Embrapa**. 2015. Disponível em: <<https://sistemasdeproducao.cnptia.embrapa.br/>>. Acesso em: 1 set. 2024.
- FAO. Food and Agriculture Organization of the United Nations. **Faostat: Food and agriculture data**. 2023. Disponível em: <<https://www.fao.org/faostat/en/>>. Acesso em: 1 set. 2023.
- FAO. Food and Agriculture Organization of the United Nations. **Statistical Yearbook 2020**. Rome, 2020. Disponível em: <<https://openknowledge.fao.org/server/api/core/bitstreams/fe3b44ad-553a-4d2f-b8d9-d0ef1dc509ed/content>>. Acesso em: 2 out. 2023.
- FAROOQ, M.; AZIZ, T.; WAHID, A.; LEE, D.-J.; SIDDIQUE, K.H.M. Chilling tolerance in maize: agronomic and physiological approaches. **Crop and Pasture Science**, v.60, p.501-516, 2009. DOI: <https://doi.org/10.1071/CP08427>.
- FELISBERTO, G.; SCHWERZ, F.; UMBURANAS, R.C.; DOURADO-NETO, D.; REICHARDT, K. Physiological and yield responses of soybean under water deficit. **Journal of Crop Science and Biotechnology**, v.26, p.27-37, 2023. DOI: <https://doi.org/10.1007/s12892-022-00157-1>.
- FERNIE, E.; TAN, D.K.Y.; LIU, S.Y.; ULLAH, N.; KHODDAMI, A. Post-anthesis heat influences grain yield, physical and nutritional quality in wheat: a review. **Agriculture**, v.12, art.886, 2022. DOI: <https://doi.org/10.3390/agriculture12060886>.
- FIORIN, T.T.; DAL ROSS, M. **Climatologia agrícola**. Santa Maria: Universidade Federal de Santa Maria, Colégio Politécnico: Rede e-Tec Brasil, 2015.
- FOLBERTH, C.; YANG, H.; GAISER, T.; LIU, J.; WANG, X.; WILLIAMS, J.; SCHULIN, R. Effects of ecological and conventional agricultural intensification practices on maize yields in sub-Saharan Africa under potential climate change. **Environmental Research Letters**, v.9, art.044004, 2014. DOI: <https://doi.org/10.1088/1748-9326/9/4/044004>.
- FRANCESCHI, L.; BENIN, G.; GUARIENTI, E.; MARCHIORO, V.S.; MARTIN, T.N. Fatores pré-colheita que afetam a qualidade tecnológica de trigo. **Ciência Rural**, v.39, p.1624-1631, 2009. DOI: <https://doi.org/10.1590/S0103-84782009005000060>.
- GOGOI, N.; FAROOQ, M.; BARTHAKUR, S.; BAROOWA, B.; PAUL, S.; BHARADWAJ, N.; RAMANJULU, S. Thermal stress impacts on reproductive development and grain yield in grain legumes. **Journal of Plant Biology**, v.61, p.265-291, 2018. DOI: <https://doi.org/10.1007/s12374-018-0130-7>.
- GREENAWAY, D. Multilateralism, minilateralism and trade expansion. In: DAS, D.K. (Ed.). **Asian Exports**. Oxford: Oxford University Press, 2000. p.115-159.
- GREENE, W. H. **Econometric analysis**. 6th ed. New Jersey: Prentice Hall, 2008.
- HAMADA, E.; OLIVEIRA, E. de; LANDAU, E.C.; NOGUEIRA, S.M.C.; GHINI, R. Impacto das mudanças climáticas sobre a distribuição geográfica das ferrugens do milho. In: BETTIOL, W.; HAMADA, E.; ANGELOTTI, F.; AUAD, A.M.; GHINI, R. (Ed.). **Aquecimento Global e Problemas Fitossanitários**. Brasília: Embrapa, 2017. p.221-242.
- HASANUZZAMAN, M.; NAHAR, K.; ALAM, M.; ROYCHOWDHURY, R.; FUJITA, M. Physiological, biochemical, and molecular mechanisms of heat stress tolerance in plants. **International Journal of Molecular Sciences**, v.14, p.9643-9684, 2013. DOI: <https://doi.org/10.3390/ijms14059643>.
- HATFIELD, J.L.; DOLD, C. Agroclimatology and wheat production: coping with climate change. **Frontiers in Plant Science**, v.9, art.224, 2018. DOI: <https://doi.org/10.3389/fpls.2018.00224>.
- HAUSMAN, J.A. Specification tests in econometrics. **Econometrica**, v.46, p.1251-1271, 1978. DOI: <https://doi.org/10.2307/1913827>.
- HILL, R.C.; GRIFFITHS, W.E.; JUDGE, G.G. **Econometria**. 2.ed. São Paulo: Saraiva, 2003.
- HIRAKURI, M.H. Efeito da estiagem na viabilidade econômica da produção de soja no Oeste do Paraná: um estudo de caso da safra 2008/2009. **Pesquisa Agropecuária Tropical**, v.40, p.230-237, 2010. DOI: <https://doi.org/10.5216/pat.v40i2.8142>.
- HSIAO, C. **Analysis of panel data**. 2nd ed. Cambridge: Cambridge University Press, 2003. DOI: <https://doi.org/10.1017/CBO9780511754203>.
- IBGE. Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística. **DTB - Divisão Territorial Brasileira**. 2017. Disponível em: <<https://www.ibge.gov.br/geociencias/organizacao-do-territorio/estrutura-territorial/23701-divisao-territorial-brasileira.html>>. Acesso em: 3 out. 2023.
- IBGE. Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística. **Levantamento Sistemático da Produção Agrícola**. Disponível em: <<https://sidra.ibge.gov.br/home/lspa/brasil>>. Acesso em: 1 set. 2023a.
- IBGE. Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística. **Produção Agrícola Municipal: Tabela 5457 - Área plantada ou destinada à colheita, área colhida, quantidade produzida, rendimento médio e valor da produção das lavouras temporárias e permanentes**. 2022.

Disponível em: <<https://sidra.ibge.gov.br/tabela/5457>>. Acesso em: 10 jun. 2023.

IBGE. Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística. **Produção Agrícola Municipal – PAM**. Disponível em: <<https://sidra.ibge.gov.br/pesquisa/pam/tabelas>>. Acesso em: 1 set. 2023b.

INMET. Instituto Nacional de Meteorologia. **Dados históricos anuais**. Disponível em: <<https://portal.inmet.gov.br/dadoshistoricos>>. Acesso em: 1 set. 2024.

JAGADISH, S.K.; BAHUGUNA, R.N.; DJANAGUIRAMAN, M.; GAMUYAO, R.; VARA PRASAD, P.V.; CRAUFURD, P.Q. Implications of high temperature and elevated CO₂ on flowering time in plants. **Frontiers in Plant Science**, v.7, art.913, 2016. DOI: <https://doi.org/10.3389/fpls.2016.00913>.

JAMIESON, M.A.; TROWBRIDGE, A.M.; RAFFA, K.F.; LINDROTH, R.L. Consequences of Climate Warming and Altered Precipitation Patterns for Plant-Insect and Multitrophic Interactions. **Plant Physiology**, v.160, p.1719-1727, 2012. DOI: <https://doi.org/10.1104/pp.112.206524>.

KADAM, N.N.; XIAO, G.; MELGAR, R.J.; BAHUGUNA, R.N.; QUINONES, C.; TAMILSELVAN, A.; PRASAD, P.V.V.; JAGADISH, K.S.V. Agronomic and physiological responses to high temperature, drought, and elevated CO₂ interactions in cereals. **Advances in Agronomy**, v.127, p.111-156, 2014. DOI: <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-800131-8.00003-0>.

KHAN, F.; SPÖCK, G.; LIOU, Y.; ALI, S. Association of precipitation extremes and crops production and projecting future extremes using machine learning approaches with CMIP6 data. **Environmental Science and Pollution Research**, v.31, p.54979-54999, 2024. DOI: <https://doi.org/10.1007/s11356-024-34652-5>.

KONDURI, V.S.; VANDAL, T.J.; GANGULY, S.; GANGULY, A.R. Data science for weather impacts on crop yield. **Frontiers in Sustainable Food Systems**, v.4, art.52, 2020. DOI: <https://doi.org/10.3389/fsufs.2020.00052>.

KOOLMEISTER, K.; MERILO, E.; HÖRAK, H.; KOLLIST, H. Stomatal CO₂ responses at sub-and above-ambient CO₂ levels employ different pathways in Arabidopsis. **Plant Physiology**, v.196, p.608-620, 2024. DOI: <https://doi.org/10.1093/plphys/kiac320>.

KOUHEN, M.; DIMITROVA, A.; SCIPPA, G.S.; TRUPIANO, D. The course of mechanical stress: types, perception, and plant response. **Biology**, v.12, art.217, 2023. DOI: <https://doi.org/10.3390/biology12020217>.

KUMAR, H.; CHUGH, V.; KUMAR, M.; GUPTA, V.; PRASAD, S.; KUMAR, S.; SINGH, C.M.; KUMAR, R.; SINGH, B.K.; PANWAR, G.; KUMAR, M. Investigating the impact of terminal heat stress on contrasting wheat cultivars: a comprehensive analysis of phenological, physiological, and biochemical traits. **Frontiers in Plant Science**, v.14, art.1189005, 2023. DOI: <https://doi.org/10.3389/fpls.2023.1189005>.

KUMARI, M.; CHAKRABORTY, A.; CHAKRAVARTHI, V.; PANDEY, V.; ROY, P.S. Impact of climate and weather extremes on soybean and wheat yield using machine learning approach. **Stochastic Environmental Research and Risk Assessment**, v.38, p.3461-3479, 2024.

LAL, M.K.; TIWARI, R.K.; GAHLAUT, V.; MANGAL, V.; KUMAR, A.; SINGH, M.P.; PAUL, V.; KUMAR, S.; SINGH, B.; ZINTA, G. Physiological and molecular insights on wheat responses to heat stress. **Plant**

Cell Reports, v.41, p.501-518, 2022. DOI: <https://doi.org/10.1007/s00299-021-02784-4>.

LAWSON, T.; TERASHIMA, I.; FUJITA, T.; WANG, Y. Coordination between photosynthesis and stomatal behavior. In: ADAMS III, W.W.; TERASHIMA, I. (Ed.). **The leaf: a platform for performing photosynthesis**. Cham: Springer, 2018. p.141-161. (Advances in Photosynthesis and Respiration Including Bioenergy and Related Processes, 44). DOI: https://doi.org/10.1007/978-3-319-93594-2_6.

LOBELL, D.B.; BURKE, M.B. On the use of statistical models to predict crop yield responses to climate change. **Agricultural and forest meteorology**, v.150, p.1443-1452, 2010. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.agrformet.2010.07.008>.

LOBELL, D.B.; GOURDJI, S.M. The influence of climate change on global crop productivity. **Plant Physiology**, v.160, p.1686-1697, 2012. DOI: <https://doi.org/10.1104/pp.112.208298>.

LOBELL, D.B.; HAMMER, G.L.; MCLEAN, G.; MESSINA, C.; ROBERTS, M.J.; SCHLENKER, W. The critical role of extreme heat for maize production in the United States. **Nature Climate Change**, v.3, p.497-501, 2013. DOI: <https://doi.org/10.1038/nclimate1832>.

LUO, F.; DENG, X.; LIU, Y.; YAN, Y. Identification of phosphorylation proteins in response to water deficit during wheat flag leaf and grain development. **Botanical Studies**, v.59, art.28, 2018. DOI: <https://doi.org/10.1186/s40529-018-0245-7>.

MÄKINEN, H.; KASEVA, J.; TRNKA, M.; BALEK, J.; KERSEBAUM, K.C.; NENDEL, C.; GOBIN, A.; OLESEN, J.E.; BINDI, M.; FERRISE, R.; MORIONDO, M.; RODRÍGUEZ, A.; RUIZ-RAMOS, M.; TAKÁČ, J.; BEZÁK, P.; VENTRELLA, D.; RUGETN, F.; CAPELLADESO, G.; KAHILUOTO, H. Sensitivity of European wheat to extreme weather. **Field Crops Research**, v.222, p.209-217, 2018. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.fcr.2017.11.008>.

MANGANI, R.; TESTAFAMARIAM, E.; BELLOCCHI, G.; HASSEN, A. Modelled impacts of extreme heat and drought on maize yield in South Africa. **Crop and Pasture Science**, v.69, p.703-716, 2018. DOI: <https://doi.org/10.1071/CP18117>.

MATIU, M.; ANKERST, D.P.; MENZEL, A. Interactions between temperature and drought in global and regional crop yield variability during 1961-2014. **PLoS ONE**, v.12, e0178339, 2017. DOI: <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0178339>.

MONTEIRO, J.E.B.A. (Org.). **Agrometeorologia dos cultivos: o fator meteorológico na produção agrícola**. Brasília: Inmet, 2009.

NAHAR, K.; NAHAR, K.; HASANUZZAMAN, M.; AHAMED, K.U.; HAKEEM, K.R.; OZTURK, M.; FUJITA, M. Plant responses and tolerance to high temperature stress: role of exogenous phytoprotectants. In: HAKEEM, K.R. (Ed.). **Crop production and global environmental issues**. Cham: Springer, 2015. p.385-435. DOI: https://doi.org/10.1007/978-3-319-23162-4_17.

NUTTALL, J.G.; O'LEARY, G.J.; PANOZZO, J.F.; WALKER, C.K.; BARLOW, K.M.; FITZGERALD, G.J. Models of grain quality in wheat: a review. **Field Crops Research**, v.202, p.136-145, 2017. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.fcr.2015.12.011>.

NYIRENDA, K.; SACHIKUMBA, E. Trend analysis of extreme rainfall in Zambia and its potential implication on water resources availability and agricultural productivity. **American Journal of Geophysics, Geochemistry and Geosystems**, v.5, p.10-15, 2019.

PINTO, H.S.; ASSAD, E.D. **Aquecimento global e a nova geografia da produção agrícola no Brasil**. São Paulo: Campinas, 2008.

- PINTO, H.S.; AVILA, A.M.H. de; CARDOSO, A.O. Challenges to increased soybean production in Brazil. In: BOARD, J. (Ed.). **A comprehensive survey of international soybean research-genetics, physiology, agronomy and nitrogen relationships**. London: IntechOpen, 2013. DOI: <https://doi.org/10.5772/52647>.
- QASEM, S.N.; SAMADIANFARD, S.; SADRI NAHAND, H.; MOSAVI, A.; SHAMSHIRBAND, S.; CHAU, K.-W. Estimating daily dew point temperature using machine learning algorithms. **Water**, v.11, art.582, 2019. DOI: <https://doi.org/10.3390/w11030582>.
- RAY, D.K.; WEST, P.C.; CLARK, M.; GERBER, J.S.; PRISHCHEPOV, A.V.; CHATTERJEE, S. Climate change has likely already affected global food production. **PLoS ONE**, v.14, e0217148, 2019. DOI: <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0217148>.
- RESENDE, S.A.A.; RESENDE JÚNIOR, J.C. de. Interferência dos ventos no cultivo de plantas: efeitos prejudiciais e práticas preventivas. **Enciclopédia Biosfera**, v.7, p.1-6, 2011.
- RIBAS, J.V. **Mais de 206 mil propriedades rurais foram afetadas pelas enchentes no RS**. Porto Alegre: Secretaria da Agricultura, Pecuária, Produção Sustentável e Irrigação, 2024. Disponível em: <<https://www.agricultura.rs.gov.br/mais-de-206-mil-propriedades-rurais-foram-afetadas-pelas-enchentes-no-rs>>. Acesso em: 1 set. 2024.
- ROSENZWEIG, C.; ELLIOT, J.; DERYNG, D.; RUANE, A.C.; MÜLLER, C.; ARNETH, A.; BOOTE, K.J.; FOLBERTH, C.; GLOTTER, M.; KHABAROV, N.; NEUMANN, K.; PIONTEK, F.; PUGH, T.A.M.; SCHMID, E.; STEHFEST, E.; YANG, H.; JONES, J.W. Assessing agricultural risks of climate change in the 21st century in a global gridded crop model intercomparison. **Proceedings of the National Academy of Sciences**, v.111, p.3268-3273, 2014. DOI: <https://doi.org/10.1073/pnas.1222463110>.
- SAHOO, D.; MOHARAJ, P. Assessing agricultural vulnerability to climate change through dynamic indexing approach. **Environmental Science and Pollution Research**, v.31, p.55000-55021, 2024. DOI: <https://doi.org/10.21203/rs.3.rs-3951898/v1>.
- SANTOS, C.A.C. dos; NEALE, C.M.U.; MEKONNEN, M.M.; GONÇALVES, I.Z.; OLIVEIRA, G. de; RUIZ-ALVAREZ, O.; SAFA, B.; ROWE, C.M. Trends of extreme air temperature and precipitation and their impact on corn and soybean yields in Nebraska, USA. **Theoretical and Applied Climatology**, v.147, p.1379-1399, 2022. DOI: <https://doi.org/10.1007/s00704-021-03903-7>.
- SANTOS, C.V. dos; OLIVEIRA, A.F. de; FERREIRA FILHO, J.B. de S. Potential impacts of climate change on agriculture and the economy in different regions of Brazil. **Revista de Economia e Sociologia Rural**, v.60, e220611, 2021. DOI: <https://doi.org/10.1590/1806-9479.2021.220611>.
- SCHAUBERGER, B.; ARCHONTOULIS, S.; ARNETH, A.; BALKOVIC, J.; CIAIS, P.; DERYNG, D.; ELLIOTT, J.; FOLBERTH, C.; KHABAROV, N.; MÜLLER, C.; PUGH, T.A.M.; ROLINSKI, S.; SCHAPHOFF, S.; SCHMID, E.; WANG, X.; SCHLENKER, W.; FRIELER, K. Consistent negative response of US crops to high temperatures in observations and crop models. **Nature Communications**, v.8, art.13931, 2017. DOI: <https://doi.org/10.1038/ncomms13931>.
- SCHILLERBERG, T.A.; TIAN, D. Climate impacts on crop productions. In: ZHANG, Q. (Ed.). **Encyclopedia of Smart Agriculture Technologies**. Cham: Springer International Publishing, 2022. p.1-12. DOI: https://doi.org/10.1007/978-3-030-89123-7_268-1.
- SOCIEDADE NACIONAL DE AGRICULTURA. **Trigo**: fatores climáticos são os principais desafios para a produção brasileira. 2017. Disponível em: <<https://sna.agr.br/trigo-fatores-climaticos-sao-os-principais-desafios-para-a-producao-brasileira/>>. Acesso em: 1 set. 2024.
- STOOKSBURY, D.E.; MICHAELS, P.J. Climate change and large-area corn yield in the southeastern United States. **Agronomy Journal**, v.86, p.564-569, 1994. DOI: <https://doi.org/10.2134/agronj1994.00021962008600030020x>.
- STRIMBECK, G.R.; SCHABERG, P.G.; FOSSDAL, C.G.; SCHRÖDER, W.P.; KJELLEN, T.D. Extreme low temperature tolerance in woody plants. **Frontiers in Plant Science**, v.6, art.884, 2015. DOI: <https://doi.org/10.3389/fpls.2015.00884>.
- TAN, B.T.; FAM, P.S.; RADIM FIRDAUS, R.B.; TAN, M.L.; GUNARATNE, M.S. Impact of climate change on rice yield in Malaysia: a panel data analysis. **Agriculture**, v.11, art.569, 2021. DOI: <https://doi.org/10.3390/agriculture11060569>.
- TAO, F.; ZHANG, Z.; ZHANG, S.; RÖTTER, R.P. Variability in crop yields associated with climate anomalies in China over the past three decades. **Regional Environmental Change**, v.16, p.1715-1723, 2016. DOI: <https://doi.org/10.1007/s10113-015-0920-0>.
- TEIXEIRA, L.M.; MELO JÚNIOR, H.B. de; FERNANDES, J.J. Efeito das condições climáticas na ocorrência da ferrugem asiática da soja na entressafra de 2009, em Uberlândia-MG. **Enciclopédia Biosfera**, v.7, p.6-17, 2011.
- TENG, Z.; CHEN, Y.; MENG, S.; DUAN, M.; ZHANG, J.; YE, N. Environmental stimuli: a major challenge during grain filling in cereals. **International Journal of Molecular Sciences**, v.24, art.2255, 2023. DOI: <https://doi.org/10.3390/ijms24032255>.
- TIMILSINA, A.P.; BAIGORRIA, G.A.; WILHITE, D.; SHULSKI, M.; HEEREN, D.; ROMERO, C.; FENSTERSEIFER, C.A. Soybean response under climatic scenarios with changed mean and variability under rainfed and irrigated conditions in major soybean-growing states of the USA. **The Journal of Agricultural Science**, v.161, p.157-174, 2023. DOI: <https://doi.org/10.1017/S0021859623000011>.
- UPADHYAY, A.; NIGAM, N.K.; MISHRA, P.K.; RAI, S.C. Climatic variability and its impact on the indigenous agricultural system using panel data analysis in the Sikkim Himalaya, India. **Environmental Monitoring and Assessment**, v.196, art.33, 2024. DOI: <https://doi.org/10.1007/s10661-023-12193-7>.
- VALE, T.M.C. do; SPYRIDES, M.H.C.; ANDRADE, L. de M.B.; BEZERRA, B.G.; SILVA, P.E. da. Subsistence agriculture productivity and climate extreme events. **Atmosphere**, v.11, art.1287, 2020. DOI: <https://doi.org/10.3390/atmos11121287>.
- van der VELDE, M.; TUBIELLO, F.N.; VRIELING, A.; BOURAOUNI, F. Impacts of extreme weather on wheat and maize in France: evaluating regional crop simulations against observed data. **Climatic Change**, v.113, p.751-765, 2012. DOI: <https://doi.org/10.1007/s10584-011-0368-2>.
- VERÓN, S.R.; ABELLEIRA, D.; LOBELL, D.B. Impacts of precipitation and temperature on crop yields in the Pampas. **Climatic Change**, v.130, p.235-245, 2015. DOI: <https://doi.org/10.1007/s10584-015-1350-1>.
- VOGEL, E.; DONAT, M.G.; ALEXANDER, L.V.; MEINSHAUSEN, M.; RAY, D.K.; KAROLY, D.; MEINSHAUSEN, N.; FRIELER, K. THE effects of climate extremes on global agricultural yields. **Environmental Research Letters**, v.14, art.054010, 2019. DOI: <https://doi.org/10.1088/1748-9326/ab154b>.

WAQAS, M.A.; WANG, X.; ZAFAR, S.; NOOR, M.A.; HUSSAIN, H.A.; NAWAZ, M.A.; FAROOQ, M. Thermal stresses in maize: effects and management strategies. **Plants**, v.10, art.293, 2021. DOI: <https://doi.org/10.3390/plants10020293>.

WERNER, C.; FASBENDER, L.; ROMEK, K.M.; YÁÑEZ-SERRANO, A.M.; KREUZWIESER, J. Heat waves change plant carbon allocation among primary and secondary metabolism altering CO₂ assimilation, respiration, and VOC emissions. **Frontiers in Plant Science**, v.11, art.1242, 2020. DOI: <https://doi.org/10.3389/fpls.2020.01242>.

WOOLDRIDGE, J.M. **Introdução a Econometria: uma abordagem moderna**. 6.ed. São Paulo: Cengage Learning, 2019.

XU, Z.; JIANG, Y.; ZHOU, G. Response and adaptation of photosynthesis, respiration, and antioxidant systems to elevated CO₂ with environmental stress in plants. **Frontiers in Plant Science**, v.6, art.701, 2015. DOI: <https://doi.org/10.3389/fpls.2015.00701>.

YANG, L.; SONG, W.; XU, C.; SAPEY, E.; JIANG, D.; WU, C. Effects of high night temperature on soybean yield and compositions. **Frontiers in Plant Science**, v.14, art.1065604, 2023. DOI: <https://doi.org/10.3389/fpls.2023.1065604>.

YUAN-AN, J.; YING, C.; YI-ZHOU, Z.; XIANG-PENG, C.; XING-JIE, Y.; JING, D.; SU-QIN, B. Analysis on changes of basic climatic elements and extreme events in Xinjiang, China during 1961–2010. **Advances in Climate Change Research**, v.4, p.20-29, 2013. DOI: <https://doi.org/10.3724/SP.J.1248.2013.020>.

ZAMBRANO-MEDINA, Y.G.; AVILA-ACEVES, E.; PEREZ-AGUILAR, L.Y.; MONJARDIN-ARMENTA, A.; PLATA-ROCHA, W.; FRANCO-

OCHOA, C.; CHÁVEZ-MARTÍNEZ, O. The impact of climate change on crop productivity and adaptation and mitigation strategies in agriculture. In: KANGA, S.; SINGH, S.K.; SHEVKANI, K.; PATHAK, V.; SAJAN, B. (Ed.). **Transforming agricultural management for a sustainable future: climate change and machine learning perspectives**. Cham: Springer, 2024. p.1-20. DOI: https://doi.org/10.1007/978-3-031-63430-7_1.

ZHANG, Q.; HAN, J.; YANG, X. Effects of direct heat stress on summer maize and risk assessment. **Theoretical and Applied Climatology**, v.146, p.755-765, 2021. DOI: <https://doi.org/10.1007/s00704-021-03769-9>.

ZHANG, Q.; YANG, Z. Impact of extreme heat on corn yield in main summer corn cultivating area of China at present and under future climate change. **International Journal of Plant Production**, v.13, p.267-274, 2019. DOI: <https://doi.org/10.1007/s42106-019-00052-w>.

ZHAO, J.; LU, Z.; WANG, L.; JIN, B. Plant responses to heat stress: physiology, transcription, noncoding RNAs, and epigenetics. **International Journal of Molecular Sciences**, v.22, art.117, 2020. DOI: <https://doi.org/10.3390/ijms22010117>.

ZHOU, J.; ZHANG, X.; QU, Z.; ZHANG, C.; WANG, F.; GAO, T.; YAO, Y.; LIANG, J. Progress in research on prevention and control of crop fungal diseases in the context of climate change. **Agriculture**, v.14, art.1108, 2024. DOI: <https://doi.org/10.3390/agriculture14071108>.

ZINGALES, V.; TARONCHER, M.; MARTINO, P.A.; RUIZ, M.-J.; CALONI, F. Climate change and effects on molds and mycotoxins. **Toxins**, v.14, art.445, 2022. DOI: <https://doi.org/10.3390/toxins14070445>.