

CONSELHO REGIONAL DE ECONOMIA – CORECONPR

35º PRÊMIO PARANÁ DE MONOGRAFIA

**INFLUÊNCIA DOS EVENTOS CLIMÁTICOS ATÍPICOS DE PRECIPITAÇÃO E
TEMPERATURA SOBRE A PRODUÇÃO DE GRÃOS NO ESTADO DO PARANÁ NO
PERÍODO DE 1974 A 2022**

PSEUDÔNIMO DO AUTOR: AURATHA

CATEGORIA:

ECONOMIA PARANAENSE (x)

ECONOMIA PURA OU APLICADA ()

INFLUÊNCIA DOS EVENTOS CLIMÁTICOS ATÍPICOS DE PRECIPITAÇÃO E TEMPERATURA SOBRE A PRODUÇÃO DE GRÃOS NO ESTADO DO PARANÁ NO PERÍODO DE 1974 A 2022

RESUMO

Variáveis climáticas exercem um papel significativo na produção do setor agrícola, especialmente em relação a eventos adversos, como secas prolongadas e chuvas intensas, tornando este um dos setores mais vulneráveis à estas variações. Tais eventos refletem impactos significativos sobre a produção agrícola, a economia e sociedade, podendo impactar desde a quantidade produzida até a sustentabilidade dos sistemas produtivos. O estado do Paraná se destaca como um dos principais polos agrícolas do Brasil e sofre diretamente o impacto das oscilações climáticas. Diante desse contexto, este estudo analisou as influências de variáveis climáticas sobre a produção das culturas de soja, trigo, milho e feijão do estado do Paraná nos anos de 1974 a 2022, investigando a hipótese subjacente de que variações climáticas possuem influência significativa sobre essas culturas. Para tal, utilizou-se dados secundários, incluindo dados econômicos extraídos da Pesquisa Agrícola Municipal (PAM) e dados climáticos interpolados a partir de estações meteorológicas disponibilizados pela Universidade de *East Anglia*, por meio da base de dados *Climate Research Unit Time-Series* (CRU TS). A análise foi conduzida por meio de uma metodologia de dados em painel, abrangendo os modelos de *Pooled*, Efeitos Fixos e Efeitos Aleatórios, sendo a escolha do modelo baseada nos testes de *Hausman*, *Chow* e *Breusch-Pagan*. Os resultados indicaram melhor adequação do modelo de Efeitos Fixos e este, por sua vez, evidenciou que os níveis de temperatura e precipitação influenciam as culturas analisadas de maneira heterogênea: enquanto soja mostra-se negativamente relacionado com variáveis climáticas, o milho demonstrou ter relação positiva e as culturas de feijão e trigo apresentam relações diversas. As conclusões apontam para um padrão produtivo concentrado na região central do estado, além de que, pela análise estatística observou-se que os níveis de precipitação e temperatura já estão próximos das bandas de tolerância do desenvolvimento das culturas.

Palavras-chave: Eventos climáticos. Produção agrícola. Modelo de dados em painel.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 – Distribuição espacial média de precipitação para a cultura da soja considerando os municípios e mesorregiões paranaenses para os anos de 1974 a 2022.....	23
Figura 2 – Distribuição espacial média de precipitação para a cultura da soja considerando os municípios e mesorregiões paranaenses para os anos de 1974 a 2022.....	24
Figura 3 – Distribuição espacial média de quantidade produzida para a cultura da soja considerando os municípios e mesorregiões paranaenses para os anos de 1974 a 2022.....	24
Figura 4 – Distribuição espacial média de precipitação para a cultura do trigo considerando os municípios e mesorregiões paranaenses para os anos de 1974 a 2022.....	27
Figura 5 – Distribuição espacial média de temperatura para a cultura do trigo considerando os municípios e mesorregiões paranaenses para os anos de 1974 a 2022.....	27
Figura 6 – Distribuição espacial média de quantidade produzida para a cultura do trigo considerando os municípios e mesorregiões paranaenses para os anos de 1974 a 2022.....	28
Figura 7 – Distribuição espacial média de precipitação para a cultura do milho considerando os municípios e mesorregiões paranaenses para os anos de 1974 a 2022.....	30
Figura 8 – Distribuição espacial média de temperatura para a cultura do milho considerando os municípios e mesorregiões paranaenses para os anos de 1974 a 2022.....	31
Figura 9 – Distribuição espacial média de quantidade produzida para a cultura do milho considerando os municípios e mesorregiões paranaenses para os anos de 1974 a 2022.....	31
Figura 10 – Distribuição espacial média de precipitação para a cultura do feijão considerando os municípios e mesorregiões paranaenses para os anos de 1974 a 2022.....	33
Figura 11 – Distribuição espacial média de temperatura para a cultura do feijão considerando os municípios e mesorregiões paranaenses para os anos de 1974 a 2022.....	34
Figura 12 – Distribuição espacial média de quantidade produzida para a cultura do feijão considerando os municípios e mesorregiões paranaenses para os anos de 1974 a 2022.....	34

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 – Resultados da aplicação do teste Dickey Fuller aumentado (ADF) para estacionariedade das variáveis para as culturas de soja, trigo, milho e feijão.....	17
Tabela 2 – Resultados dos testes estatísticos para seleção de modelo econométrico para as culturas de trigo, milho, soja e feijão.....	18
Tabela 3 – Estatísticas descritivas para soja, trigo, milho e feijão no Paraná entre 1974 a 2022 e níveis ideais para o desenvolvimento das culturas.....	20
Tabela 4 – Estimativas do Modelo de Efeitos fixos para a produção de soja no Paraná de 1974 a 2022.....	21
Tabela 5 – Estimativas do Modelo de Efeitos fixos para a produção de trigo no Paraná de 1974 a 2022.....	25
Tabela 6 – Estimativas do Modelo de Efeitos fixos para a produção de milho no Paraná de 1974 a 2022.....	29
Tabela 7 – Estimativas do Modelo de Efeitos fixos para a produção de Feijão no Paraná de 1974 a 2022.....	32

SUMÁRIO

RESUMO.....	II
LISTA DE FIGURAS.....	III
LISTA DE TABELAS.....	IV
1 INTRODUÇÃO	1
1.1 OBJETIVO GERAL.....	2
1.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS	2
2 EVENTOS CLIMÁTICOS E SUA INFLUÊNCIA NA AGRICULTURA BRASILEIRA	3
2.1 CARACTERÍSTICAS PRODUTIVAS DAS CULTURAS DE SOJA, TRIGO, MILHO E FEIJÃO	8
3 METODOLOGIA.....	10
3.1 DADOS EM PAINEL	11
3.2 TESTE Dickey Fuller Aumentado	12
3.3 MODELO POOLED	13
3.4 MODELO DE EFEITOS FIXOS	13
3.5 MODELO DE EFEITOS ALEATÓRIOS.....	14
3.6 TESTE DE HAUSMAN.....	15
3.7 TESTE DE CHOW.....	15
3.8 TESTE DO MULTIPLICADOR DE LAGRANGE BREUSCH-PAGAN.....	16
4 RESULTADOS E DISCUSSÃO	17
5 CONSIDERAÇÕES FINAIS.....	37
REFERÊNCIAS	38

1 INTRODUÇÃO

A relação entre eventos climáticos e seus impactos sobre a economia tem se tornado uma preocupação crescente, especialmente quando se considera o seu efeito sobre as regiões agrícolas importantes. O estado do Paraná se configura como uma delas, sendo um dos principais produtores nacionais de milho, trigo, soja e feijão. Como evidência dessa importância, em 2022, o Paraná contribuiu com 14,86% da produção nacional de milho, 32,61% de trigo, 10,44% de soja e 26,97% de feijão (Departamento de Economia Rural, 2024).

No ano de 2023 o Produto Interno Bruto (PIB) paranaense registrou um crescimento de 5,80%, com destaque ao setor agropecuário, que apresentou um crescimento expressivo de 26,91%, impulsionado principalmente pelos cultivos da soja, milho e trigo conforme dados do Instituto Paranaense de Desenvolvimento Econômico e Social (IPARDES, 2023), destacando a relevância crucial da agricultura como componente essencial do PIB paranaense.

A agricultura compreende um dos setores mais vulneráveis às variações climáticas, que sofre com a ocorrência de eventos climáticos extremos, tais como incêndios florestais, secas prolongadas e chuvas intensas (Painel Intergovernamental sobre Mudança do Clima, 2023). Os efeitos extraordinários do clima afetam negativamente a produção das culturas rurais, economia e sociedade e estas mudanças podem incorrer em modificações significativas nos padrões de uso da terra e, por consequência, afetar a produção destas culturas, qualidade de vida da população e a sustentabilidade dos sistemas produtivos (Haddad *et al.*, 2010; Painel Intergovernamental sobre Mudança do Clima, 2023). Neste contexto, torna-se fundamental uma análise aprofundada da influência exercida pelas variáveis climáticas sobre a produção de grãos no contexto paranaense, haja vista suas características regionais de produção agrícola.

Considerando a importância deste setor para o estado do Paraná, o presente estudo se propôs a analisar os impactos que eventos climáticos¹ de precipitação e temperatura exercem sobre a produção de grãos no estado do Paraná, abrangendo o período de 1974 a 2022, com enfoque sobre as principais culturas em termos de produção no estado: soja, milho, trigo e feijão. Esta abordagem estabelece uma relação entre os eventos climáticos e suas repercussões na produção agrícola, investigando a hipótese fundamental de que existe uma relação significativa entre as condições climáticas e a produção do setor agrícola.

¹ Neste estudo, o termo “eventos climáticos” será utilizado para se referir, principalmente, a eventos atípicos de precipitação e temperatura. Esses eventos atípicos dizem respeito a níveis de precipitação e temperatura que excedem os limites considerados ideais para o desenvolvimento das culturas analisadas, podendo impactar negativamente a produção agrícola.

Compreender os impactos dos eventos climáticos sobre os produtos agrícolas é crucial para a formulação de políticas públicas de adaptação e mitigação, contribuindo com o planejamento agrícola e garantia de segurança alimentar a longo prazo. Ademais, esta pesquisa serve de base para futuras investigações acadêmicas, reforçando a importância do tema para a economia brasileira, especialmente do estado do Paraná.

Para a realização deste estudo, os dados foram organizados sob uma estrutura de painel e aplicados aos modelos econométricos *Pooled*, Efeitos Fixos e Efeitos Aleatórios. Para verificar a adequação dos dados e selecionar o modelo mais apropriado, foram aplicados os testes de Hausman, Chow e Breusch-Pagan, que confirmaram melhor adequação do modelo de efeitos fixos.

Além desta introdução, que fornece um panorama geral do estudo, este trabalho apresenta uma seção que discute os principais trabalhos sobre a temática e características cultiváveis das culturas analisadas. Em seguida, são descritos os métodos econométricos aplicados ao estudo, na sequência são apresentados e discutidos os principais resultados obtidos. E, por fim, a última seção sintetiza as conclusões do estudo, destacando suas implicações e contribuições.

1.1 OBJETIVO GERAL

Analisar o impacto de variáveis climáticas atípicas de precipitação e temperatura sobre as culturas agrícolas paranaenses de soja, milho, feijão e trigo no período de 1974 a 2022.

1.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS

- i. Coletar, organizar e analisar dados históricos de variáveis climáticas (precipitação e temperatura) e de produção agrícola (soja, milho, feijão e trigo) no estado do Paraná, referentes ao período de 1974 a 2022, para a construção de um painel de dados.
- ii. Aplicar modelos de dados em painel para analisar a relação entre as variáveis climáticas (precipitação e temperatura) e a produção das culturas agrícolas (soja, milho, feijão e trigo) no Paraná;
- iii. Avaliar a sensibilidade das culturas agrícolas às mudanças climáticas, comparando a magnitude dos efeitos da precipitação e da temperatura sobre cada cultura.

2 EVENTOS CLIMÁTICOS E SUA INFLUÊNCIA NA AGRICULTURA BRASILEIRA

Os impactos dos eventos climáticos sobre a agricultura emergem como uma preocupação central no século XXI. No contexto brasileiro, um país com vastas extensões de terras dedicadas à produção agrícola, a capacidade de prover alimentos para a população nacional e mundial é notável e as mudanças climáticas afetam de forma substancial a produtividade do setor e, por conseguinte, exercem influência na economia global (Santos *et al.*, 2011). A exemplo desta influência, Hoogenbom (2000) destaca que, em alguns casos, variações da produção podem ser explicadas em até 80% pela variabilidade climática.

Evidências científicas apresentadas no sexto relatório do Painel Intergovernamental sobre mudança do clima (2023) indicam que as emissões de Gases de Efeito Estufa (GEE) vêm crescendo substancialmente no último século, com um aumento ainda mais acelerado desde a década de 1970, principalmente devido ao uso da energia, à mudança no uso da terra e aos padrões de consumo e produção. A previsão é de que, até 2100, a temperatura média global mostre um aumento entre 1,5°C e 2°C, considerando reduções profundas nas emissões de GEE, aumentando os desafios para a segurança alimentar e hídrica (Painel Intergovernamental sobre Mudança do Clima, 2023).

Dentre os estudos que abordam essa temática, há um destaque importante quanto a emissão de GEE, apontados como principal causador dos eventos climáticos ocorridos e projetados (Margulis, Dubeux, Marcovitch 2010; de Moraes, Ferreira Filho, 2013; Santos *et al.*, 2011). Neste sentido, a ação humana é apontada como principal responsável pelas emissões e, consequentemente, grande responsável pelos eventos adversos observados. Silva (2019) corrobora com essa afirmação ao destacar, em seu estudo bibliográfico, a emissão de GEE como principal fator responsável pelas mudanças climáticas, enfatizando o desmatamento em massa, resultante do uso da terra, como um dos principais confirmadores no Brasil. Com isso o autor verifica que a agricultura brasileira é tanto uma das maiores fontes de emissão de GEE quanto um dos setores mais afetados pelas mudanças climáticas.

O Painel Intergovernamental sobre Mudança do Clima (2023) tem reiterado que a influência humana é a principal responsável pelo aquecimento da atmosfera, do oceano e da terra. Entre 2011 e 2020, a temperatura média global da superfície foi cerca de 1,1°C superior ao período de 1850–1900, com um aquecimento ainda mais acentuado sobre a terra do que sobre os oceanos. Esse aquecimento tem consequências diretas sobre a produção agrícola, uma vez que altera o regime hídrico, acelera processos de evapotranspiração e intensifica a

ocorrência de eventos climáticos extremos, como secas prolongadas e tempestades severas. O Painel Intergovernamental sobre Mudança do Clima (2023) destaca que a mudança do clima contribuiu para o aumento das secas agrícolas e ecológicas, especialmente em regiões onde a disponibilidade hídrica já era limitada. No Brasil, essas mudanças podem comprometer a estabilidade da produção agrícola em estados que têm grande relevância no agronegócio, como o Paraná, onde a soja, o milho, o trigo e o feijão desempenham um papel central na economia.

Além disso, o Painel Intergovernamental sobre Mudança do Clima (2023) alerta que os impactos das mudanças climáticas sobre os ecossistemas agrícolas estão se aproximando da irreversibilidade, especialmente em áreas onde a expansão agrícola insustentável tem agravado a manipulação do solo e a competição por recursos hídricos. Incrementos na temperatura global exacerbam os impactos e riscos das mudanças climáticas, tornando-os cada vez mais complexos e mais difíceis de gerenciar, fazendo com que, cada vez mais, sejam observados eventos adversos como ondas de calor, secas, enchentes e incêndios.

Para o Brasil a importância da agricultura é estratégica e, com as condições climáticas desfavoráveis, torna-se ainda mais urgente o desenvolvimento de estudos abrangentes sobre o tema. A escassez de conhecimento fundamentado sobre as tendências climáticas impede que os tomadores de decisões identifiquem riscos e oportunidades e implementem medidas de adaptação e prevenção eficazes, o que pode resultar em consequências importantes tanto para o setor agrícola como para a economia como um todo (Margulis, Dubeux, Marcovich, 2010). Do mesmo modo, a ausência, na literatura, de modelos que contemplem políticas de equilíbrio econômico e adequação ambiental contribuem para a postergação do desenvolvimento sustentável e propensão a eventos prejudiciais à economia nacional (de Moraes, Ferreira Filho, 2013).

Wadsted (1983) em seu estudo pioneiro sobre relações entre clima e economia, assunto até então pouco discutido no período, demonstra, através de um modelo econométrico de mínimos quadrados ordinários, o efeito significativo dos eventos climáticos sobre as culturas abordadas, ressaltando a importância de incluir variáveis meteorológicas nestes estudos pois elas são capazes de aumentar a precisão de previsão de produção agrícola.

Inserido nesse contexto, o estado do Paraná se configura como um dos principais polos produtores de agricultáveis no país, ocupando uma posição de destaque no cenário agrícola nacional. Essa posição é evidenciada quando analisados os dados históricos pertinentes ao período entre 2010 e 2024, nos quais a produção de soja paranaense manteve-se dentro da faixa de variação de 14% a 20% da produção total do país (Levantamento Sistemático da Produção Agrícola, 2024).

Os impactos dos eventos climáticos na agricultura brasileira são evidentes. No estado do Paraná eles se fazem sentir com eventos climáticos extremos, como estiagens e geadas, que afetam significativamente a produção de culturas essenciais. Como destacado pela Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária (2024), a safra de soja 2018/2019 no Paraná foi prejudicada em 30% em função da estiagem, resultando em uma perda representativa de aproximadamente 6 milhões de toneladas. Além destes, eventos de geada e granizo ocorridos nas regiões Sudeste e Sul impactam a produção de culturas como arroz, soja e trigo (de Carvalho *et al.*, 2020). Esses eventos adversos ressaltam a vulnerabilidade da agricultura brasileira e a necessidade de estratégias de adaptação e mitigação eficazes.

Haddad *et al.*, (2010) destacam, por meio de modelos de equilíbrio geral computável que, se mantidas as projeções futuras e, caso medidas eficazes não forem tomadas, os custos e oportunidades decorrentes das mudanças climáticas podem ser intensos. O Relatório *Stern* (2007) alerta que, sem ações efetivas, os custos totais e riscos associados à mudança climática poderiam equivaler a uma perda de pelo menos 5% do Produto Interno Bruto (PIB) global a cada ano até 2050. Essas projeções ressaltam a importância de políticas, estudos correlatos e estratégias de adaptação para minimizar os impactos econômicos adversos e promover desenvolvimento sustentável resiliente às mudanças climáticas.

Estes impactos transcendem os setores econômicos, exigindo uma abordagem integrada, uma vez que seus efeitos atípicos, predominantemente negativos, podem ser sentidos tanto a curto quanto a longo prazo (Catelan, Carvalho, Vale, 2022). O setor agrícola, em particular, merece notável atenção devido a sua sensibilidade às condições climáticas, em que estas se fazem sentir mais fortemente, considerando a necessidade crescente de produção de alimentos impactada neste setor (Santos *et al.*, 2011).

De Moraes e Ferreira Filho (2013) destacam, em sua abordagem descritiva analítica que, diante dos desafios impostos pelas mudanças climáticas, é evidente a necessidade de pesquisas futuras que abordem lacunas identificadas nos estudos existentes provenientes de discrepâncias de resultados quantitativos. A complexidade dos impactos econômicos, sociais e ambientais das mudanças climáticas requer uma abordagem multidisciplinar e integrada, que compreendam diferentes setores e dimensões de impacto destes eventos controversos. Acerca disso, estudos mais regionalizados, com foco na heterogeneidade das regiões brasileiras, são essenciais para compreender as especificidades dos impactos e desenvolver estratégias adaptativas eficazes.

A abordagem interdisciplinar para análise de impactos de mudanças climáticas no Brasil destaca a complexidade desses desafios. Ao se considerar aspectos sociais, econômicos e ambientais, é possível compreender melhor as interconexões entre as diferentes esferas e, desse

modo, desenvolver políticas mais abrangentes (Margulis, Dubeux, Marcovitch, 2010). A análise macroeconômica e as alternativas discutidas por Margulis, Dubeux e Marcovitch (2010) demonstram a importância da abordagem integrada para enfrentar as mudanças climáticas no Brasil. Estes autores destacam que, em regiões onde há uma tendência positiva dos impactos econômicos, também se revelam impactos negativos indiretos ao provocar concentração da população nestes espaços o que gera desigualdades importantes.

Em termos regionais, o principal impacto da mudança do clima é a ameaça maior às regiões mais pobres do país, intensificando as desigualdades regionais. Elas aumentam a concentração da atividade no espaço e reforçam também as desigualdades sociais, aumentando a pobreza. A redução do bem-estar nas áreas rurais pode gerar pressões sobre as aglomerações urbanas, embora haja setores e regiões que se beneficiem do processo (Margulis, Dubex, Marcovitch 2010, p. 75).

Santos, Oliveira e Ferreira Filho (2021) também enfatizam, em seu estudo, essa abordagem socioambiental dos impactos das mudanças climáticas projetadas para o ano de 2040 sobre diferentes regiões do Brasil. Através de um modelo de equilíbrio geral computável inter-regional eles destacam que tais mudanças causarão perdas mais intensas em famílias com recursos financeiros menores e em regiões mais dependentes da agricultura.

Integrar políticas econômicas de mitigação é fundamental para enfrentar desafios impostos pelas mudanças climáticas, como ressaltado por Haddad *et al.* (2010). Medidas de mitigação contribuem significativamente para reduzir os impactos negativos na agricultura e na economia, por consequência. De maneira análoga, estratégias que considerem as especificidades das realidades regionais, sociais e econômicas são essenciais para garantir sustentabilidade e segurança alimentar no país. A inserção destas políticas é crucial para promover desenvolvimento sustentável em cenário de mudanças climáticas (Haddad *et al.*, 2010; Margulis, Dubeux, Marcovitch, 2010).

Considerando a heterogeneidade de impactos climáticos sobre as diferentes localidades, a demanda por estudos regionalizados é evidente, compreendendo a diversidade de perfis econômicos e climáticos das diferentes regiões brasileiras (de Moraes, Ferreira Filho, 2013). Além disso, em regiões com baixas latitudes, como o estado do Paraná, as temperaturas já estão se aproximando dos limites toleráveis para o cultivo de algumas culturas agrícolas, o que se apresenta como um desafio adicional aos estudos desta área (Araújo *et al.*, 2014)

Os efeitos destes eventos na agricultura não são uniformes, apresentando discrepâncias importantes entre as regiões do país. Estudos como os de Araújo *et al.* (2014), Oliveira, Garcia e Pinto (2021), de Carvalho *et al.* (2020) e Haddad *et al.* (2010) destacam a disparidade destes

efeitos, especialmente evidenciada pela vulnerabilidade das culturas agrícolas do Norte e Nordeste brasileiro. Sob cenários mais severos de projeções do clima, há possibilidade de extinção de algumas culturas rurais do Nordeste devido às altas temperaturas que tornarão a longo prazo inviáveis algumas práticas agrícolas (Araújo *et al.*, 2014).

A literatura tem demonstrado que os eventos climáticos exercem efeitos significativos sobre a produtividade agrícola, variando conforme a cultura analisada e a região produtora. Oliveira, Garcia e Pinto (2021) investigaram a relação entre mudanças climáticas e produtividade agrícola no Brasil, por meio de regressões em painel de efeitos fixos, verificou-se que a variabilidade climática pode reduzir a produtividade agrícola em até 55,7%, dependendo da cultura analisada, destacando-se impactos negativos exercidos pela temperatura, enquanto precipitação apresentou influência positiva. Na Região Sul, foi identificada uma redução de até 50% para o milho da segunda safra, demonstrando a alta vulnerabilidade das culturas às variações climáticas. As projeções futuras até 2100 indicam uma tendência predominantemente negativa para a produtividade de soja, milho e cana-de-açúcar, com impactos diferenciados entre as regiões do Brasil (Oliveira, Garcia, Pinto, 2021).

Um estudo relevante para essa discussão foi conduzido por Pinto, Silva e Junior (2017), que analisaram o impacto das variações climáticas na produção de cana-de-açúcar nos municípios da Paraíba entre 1990 e 2015. Utilizando dados em painel e modelos econométricos de Pooled, Efeitos Fixos e Efeitos Aleatórios, os autores verificaram que a precipitação apresentou influência positiva sobre a produção de cana-de-açúcar, enquanto a temperatura mostrou influência negativa. Além disso, o estudo destacou a resposta heterogênea das variações climáticas sobre as diferentes regiões.

Essas descobertas foram corroboradas pelo estudo de Silva *et al.* (2019), que investigaram os impactos dos elementos climáticos na produção de cana-de-açúcar na Paraíba. Utilizando métodos semelhantes, Silva *et al.* (2019) também concordaram que a precipitação foi um fator positivo para a produtividade, enquanto a temperatura teve um impacto negativo. Além disso, o autor destacou a existência de diferenças regionais importantes, apontando que algumas mesorregiões possuem condições mais favoráveis para o cultivo da cana-de-açúcar do que outras.

Diante da preocupação crescente com os impactos climáticos sobre a agricultura, diversos estudos têm abordado a necessidade de políticas de mitigação e adaptação para minimizar os efeitos negativos das variações climáticas. Silva (2019) analisou as ações realizadas pelo Brasil no contexto dos acordos climáticos internacionais, destacando a participação do país no Protocolo de Kyoto e no Acordo de Paris. Seu estudo evidenciou a

importância da implementação de metas de redução das emissões de GEE, além do desenvolvimento de políticas voltadas para a sustentabilidade agrícola.

A discussão sobre políticas públicas e estratégias de mitigação é essencial para garantir a sustentabilidade do setor agrícola no longo prazo. Estudos como o de Silva (2019) evidenciam que, sem ações concretas para a redução das emissões e adaptação da agricultura às novas condições climáticas, o Brasil poderá enfrentar desafios cada vez mais complexos para garantir sua segurança alimentar e competitividade no mercado global.

Investir em políticas públicas de mitigação e adaptação é essencial. Medidas como o desmatamento evitado e o incentivo ao uso de biocombustíveis, como o etanol, podem contribuir significativamente para reduzir os impactos das mudanças climáticas na agricultura. Além disso, é crucial promover pesquisas agrícolas que possam fornecer soluções e estudos para os desafios enfrentados pela produção destes gêneros diante dos eventos climáticos adversos (Margulis, Dubeux, Marcovitch, 2010).

2.1 CARACTERÍSTICAS PRODUTIVAS DAS CULTURAS DE SOJA, TRIGO, MILHO E FEIJÃO

Dentre os fatores que influenciam a produção agrícola, o clima se destaca em função do impacto que exerce sobre a quantidade produzida. A imprevisibilidade climática configura o principal fator de risco à produção na atividade agrícola, em que estresses abióticos, como secas prolongadas, excesso de chuvas e temperaturas elevadas ou excessivamente amenas, podem reduzir potencialmente os rendimentos das lavouras (Neumaier, Nepomuceno, Farias, 2025). Diante disso, é essencial compreender as características produtivas das culturas analisadas, com ênfase na temperatura média ideal e precipitação adequada para o desenvolvimento das plantas.

O feijão, segundo Silva e Heinemann (2023) e Pereira *et al.* (2014), apresenta um nível de temperatura média ideal compreendido entre 17°C e 25°C, sendo que temperaturas superiores a 35°C ou inferiores a 12°C podem comprometer potencialmente o desenvolvimento da planta. Com relação à precipitação, o feijoeiro necessita, em média, de 300 mm em todo o seu ciclo, sendo a produção comprometida quando há ocorrência de estresse hídrico principalmente na fase de florescimento.

Já a cultura do trigo requer temperaturas médias variando entre 10°C e 25°C. Durante as fases de germinação, crescimento vegetativo e florescimento, as temperaturas médias ideais situam-se entre 15°C e 25°C, enquanto a fase da maturação exige temperaturas entre 10°C e 20°C para a produção ideal. Quanto à precipitação, o trigo requer um volume médio de chuvas

entre 300 mm a 500 mm ao longo do seu ciclo de desenvolvimento da planta (Silva, Pereira, 2023).

A soja, por sua vez, para atingir seu potencial produtivo, necessita de temperaturas médias entre 20°C e 30°C, sendo essa uma cultura que apresenta preferência por temperaturas mais elevadas. O cultivo torna-se impróprio em regiões cuja temperatura média seja inferior a 10°C enquanto que temperaturas acima de 40°C são potencialmente danosas à sua produção. A necessidade total de precipitação para esta cultura varia entre 450 mm e 800 mm dependendo das condições climáticas, do manejo e duração do ciclo da planta (Oliveira, Santos, 2023; Farias, Neumaier, Nepomuceno, 2025).

Por fim, segundo Landau, Magalhães e Guimarães (2021), a temperatura ideal para o desenvolvimento do milho está compreendida entre 24°C e 30°C, sendo essa uma cultura que pode tolerar, em seus níveis extremos, temperaturas entre 10°C e 30°C com algum prejuízo nos resultados quando expostas a estes níveis de temperatura. Quanto à precipitação, o milho exige um volume médio de 600mm de chuva distribuídos ao longo de seu ciclo para um desenvolvimento adequado.

3 METODOLOGIA

O estado do Paraná está situado na região Sul do Brasil, possui uma área total de 199.298,981 km², uma população estimada em 11.444.380 habitantes e densidade demográfica de 57,42 hab/km². O estado apresenta um rendimento mensal domiciliar *per capita* de R\$2.115,00 e um Índice de Desenvolvimento Humano (IDH) de 0,769. Está distribuído em 10 mesorregiões, 39 microrregiões e 399 municípios (IBGE, 2024). No cenário agrícola nacional, o Paraná possui uma posição de destaque, sendo responsável, em 2023, por 13% da produção total nacional em termos de área colhida sobre lavouras temporárias, atrás apenas do estado de Mato Grosso que, no mesmo período, representou aproximadamente 24% da produção (IBGE/PAM, 2024).

Diante da relevância do Paraná no contexto agrícola brasileiro e das notáveis variações de produção ao longo do tempo, suscita-se a necessidade de compreender os fatores que influenciam essas oscilações, especialmente no que se refere à relação entre eventos climáticos e produção agrícola. Para tanto, este estudo adotou uma abordagem explicativa, a fim de identificar fatores determinantes ou condicionantes dos fenômenos analisados (Gil, 2002). O período de referência para a análise realizada compreende os anos de 1974 a 2022, em função da disponibilidade de dados, permitindo uma avaliação aprofundada das interações entre clima e produção agrícola.

Para atender aos objetivos desta pesquisa, foram utilizados dados secundários, classificados em dados econômicos e dados climáticos. A fonte de dados econômicos utilizada neste estudo compreende a Produção Agrícola Municipal (PAM), um levantamento realizado anualmente pelo IBGE com abrangência nacional. Esta pesquisa é integrada ao Levantamento Sistemático da Produção Agrícola (LSPA) e apresenta informações a respeito de lavouras temporárias – culturas de curta ou média duração com ciclo reprodutivo inferior a um ano – e lavouras permanentes, caracterizadas por longos ciclos de reprodução superiores a um ano (IBGE/PAM, 2024).

As variáveis climáticas Precipitação e Temperatura foram utilizadas para analisar os impactos climáticos sobre as culturas agrícolas no estado do Paraná, considerando os municípios e as estações específicas de cada cultivo. A Precipitação refere-se ao total de chuvas acumuladas durante a estação de cultivo de cada cultura (soja, milho, feijão e trigo) nos municípios paranaenses. Por sua vez, a Temperatura representa a média da temperatura registrada durante a estação de cultivo de cada cultura nos municípios do Paraná. Ambas as variáveis foram interpoladas a partir de observações de estações meteorológicas e

disponibilizadas pela Universidade de East Anglia, por meio da base de dados CRU TS (Climate Research Unit Time-Series).

A partir da base de dados econômicos do IBGE, foram extraídos os seguintes indicadores das lavouras temporárias: quantidade produzida (em toneladas), área colhida (em hectares) e rendimento médio (em Kg/ha). No que concerne aos dados climáticos, foram coletadas informações sobre temperatura média e precipitação média para o período analisado.

Dado o caráter quantitativo das informações analisadas, a pesquisa adotou uma abordagem essencialmente quantitativa, pautada na utilização de métodos econométricos aplicados a dados em painel (Gil, 2002). Para tanto, foram estimados três modelos econométricos distintos: Modelo *Pooled*, Modelo de Efeitos Fixos e Modelo de Efeitos Aleatórios. Além disso, foram realizados os testes de Hausman, Chow e Breusch-Pagan para verificar a significância e a adequação dos modelos aos dados coletados.

3.1 DADOS EM PAINEL

A técnica econométrica empregada para tratamento dos dados compreende a estrutura de dados em painel. Essa estrutura apresenta como principal característica a avaliação contínua das mesmas unidades em um período determinado (Wooldridge, 2016). Desse modo, foram analisadas as mesmas culturas, no intervalo de tempo referente aos anos de 1974 a 2022, e desta estrutura de dados foram verificadas as relações entre as variáveis climáticas e de produção no período estabelecido.

A metodologia de dados em painel apresenta vantagens significativas para a análise das relações entre variáveis climáticas e produção agrícola. Conforme destacado por Gujarati e Porter (2011), a metodologia de dados em painel ao considerar a heterogeneidade de cada elemento ao longo do tempo, possibilita informações mais precisas e se mostra mais adequada para examinar dinâmicas de mudança, como será o caso da relação clima e produção agrícola. Essa abordagem permitiu melhor avaliação de efeitos não observáveis e a minimização de viés, uma vez que milhares de unidades foram analisadas em detrimento da agregação de dados.

Assim como destacado por Mafra *et al.* (2023), a equação geral que define um modelo de dados em painel é dada por:

$$y_{it} = \alpha_i + \beta_1 x_{1,it} + \dots + \beta_k x_{k,it} + e_{it} \quad (1)$$

Em que:

y_{it} representa a variável dependente do modelo em resposta a unidade i no tempo t ;

α_i representa o intercepto do modelo;

$x_{k,it}$ refere-se a k -ésima variável independente associada a uma unidade i no tempo t ;
 β_k demonstra o impacto marginal que as variáveis independentes exercem sobre y_{it}
 e_{it} é o elemento que representa o termo de erro.

Desse modo a equação norteadora deste estudo que compreende as relações entre clima e produção sob a metodologia de dados em painel é expressa por:

$$\begin{aligned} \text{Quantidade produzida}_{it} = & a_i + \beta_1 \text{Precipitação}_{it} + \\ & + \beta_2 \text{Temperatura}_{it} + \beta_3 \text{Área colhida}_{it} + \beta_4 \text{Rendimento médio}_{it} + e_{it} \end{aligned} \quad (3.2)$$

3.2 TESTE DICKY FULLER AUMENTADO

O teste Dickey Fuller Aumentado (DFA) é amplamente utilizado em econometria para verificar a estacionariedade dos dados, caracterizando-se pela ausência de uma raiz unitária no conjunto de dados analisados. De maneira geral, uma série estacionária apresenta um comportamento estatístico constante ao longo do tempo, enquanto uma série não estacionária, caracterizada pela presença de raiz unitária, apresenta média e variâncias oscilantes ao longo do tempo. O teste ADF garante robustez na identificação de raiz unitária ao incluir termos adicionais de defasagem sobre as variáveis dependentes o que permite capturar correlações de ordem superior nos dados (Wooldridge, 2016; Gujarati, Porter, 2011)

A equação geral para o teste ADF é expressa por:

$$\Delta y_t = \alpha + \beta_t + \gamma y_{t-1} + \sum_{i=1}^P \delta_i \Delta y_{t-1} + \epsilon_i \quad (3)$$

Em que:

y_t representa os dados em análise;

Δy_t representa a primeira diferença de y_t ;

α é o intercepto da equação;

β_t representa o termo de tendência temporal;

γ é o coeficiente relacionado a raiz unitária;

$\sum_{i=1}^P \delta_i \Delta y_{t-1}$ representa o termo de defasagem de autocorrelação;

ϵ_i representa o termo de erro.

A hipótese nula (H_0) associada ao teste ADF pressupõe que γ seja igual a 0, indicando a presença de raiz unitária nos dados, ou seja, não estacionariedade.

As hipóteses do teste ADF são analisadas com base nos valores calculados da estatística t para γ e seus respectivos p -valores. Segundo Dickey e Fuller (1981), considerando o tamanho da amostra em questão, ao nível estatístico de significância de 1% os valores críticos calculados para γ devem ser menores ou iguais a -3,96.

3.3 MODELO POOLED

O modelo Pooled Ordinary Least Squares é uma abordagem que combina todas as observações de uma base de dados em uma única regressão, assumindo que não existam diferenças específicas entre as unidades e ao longo do tempo. Isso implica que os coeficientes da regressão sejam constantes às unidades e períodos, desconsiderando diferenças não observadas. Simplificadamente, este modelo é adequado para dados cuja característica principal seja homogeneidade (Mesquita, Fernandes, Figueiredo Filho, 2021; Gujarati, Porter, 2011).

A equação básica do modelo *pooled* é definida como:

$$Y_{it} = \alpha + \beta X_{it} + \epsilon_{it} \quad (4)$$

Em que:

Y_{it} é a variável dependente para a unidade i no tempo t ;

α representa o intercepto comum a todas as unidades da equação;

β é o impacto marginal da variável independente sobre a variável dependente;

X_{it} é o vetor das variáveis independentes;

ϵ_{it} representa o termo de erro, que captura fatores não observados;

Para obter resultados consistentes pelo modelo *Pooled* algumas suposições básicas devem ser respeitadas. O termo de erro deve apresentar variância constante ao longo dos períodos e unidades, ou seja, o termo de erro deve estar sob a condição de homocedasticidade. Além disso, os termos de erro devem ser não correlacionados ao longo do tempo para uma mesma unidade e devem ser não correlacionados com os regressores.

3.4 MODELO DE EFEITOS FIXOS

O modelo de efeitos fixos busca em sua abordagem lidar com a heterogeneidade de variáveis omitidas que variam entre as unidades i , mas permanecem constantes ao longo do

tempo t . Em linhas gerais, este modelo elimina os aspectos que são estáticos no tempo, possibilitando enfoque apenas sobre as variáveis independentes que apresentam variação entre os períodos. Esta abordagem permite a eliminação de viés, obtendo resultados mais precisos. (Gujarati, Porter, 2011; Wooldridge, 2016).

Wooldridge (2016) define o modelo geral de efeitos fixos da seguinte forma:

$$y_{it} = \beta_1 x_{it} + a_i + u_{it}, \quad t = 1, 2, \dots, T \quad (5)$$

Em que:

y_{it} representa a variável dependente em relação a unidade i no tempo t ;

x_{it} são as variáveis explicativas de y_{it} ;

a_i é o determinante do efeito fixo no modelo;

u_{it} apresenta o termo de erro.

O que caracteriza o modelo de efeitos fixos é o elemento a_i , que capta todos os fatores não observados que afetam a variável dependente e são invariantes no tempo. No modelo de efeitos fixos, a variável de intercepto da regressão pode diferir entre as unidades, refletindo características específicas de cada unidade de corte transversal (Gujarati, Porter, 2011).

3.5 MODELO DE EFEITOS ALEATÓRIOS

O modelo de efeitos aleatórios tem como premissa que diferenças entre as unidades podem ser representadas por um componente aleatório, isso implica que tais diferenças podem ser tratadas no termo de erro do modelo (Gujarati, Porter, 2011).

O modelo geral para efeitos aleatórios é descrito por:

$$y_{it} = \beta_0 + \beta_1 x_{it1} + \dots + \beta_k x_{itk} + \omega_{it} \quad (6)$$

Em que:

y_{it} representa a variável dependente para o indivíduo i no tempo t ;

β_0 é o intercepto comum do modelo;

β_k representa o vetor de coeficientes das variáveis independentes;

x_{itk} é o vetor das variáveis independentes que variam ao longo do tempo;

ω_{it} é o termo de erro composto.

O termo de erro composto do modelo é dividido em dois componentes, um componente aleatório e um componente idiossincrático:

$$\omega_{it} = a_i + u_{it} \quad (7)$$

Em que:

a_i é o componente aleatório que caracteriza tal modelo, este componente captura diferenças particulares de cada unidade e é independente das variáveis explicativas (x_{itk}) em qualquer período de tempo.

u_{it} é o termo idiossincrático que compreende as variações de unidade e de tempo e possui por característica a não correlação com as variáveis explicativas (x_{itk}) e o termo aleatório (a_i).

Ambos os termos possuem média zero e variância constante.

3.6 TESTE DE HAUSMAN

Este teste econométrico detecta a presença ou ausência de correlação entre os efeitos aleatórios (a_i) e variáveis independentes (x_{it}) de um modelo de dados em painel para definir entre o modelo de efeitos fixos ou modelo de efeitos aleatórios, entendendo qual desses melhor se adequa a análise em questão. (Gujarati, Porter, 2011).

O teste avalia se a hipótese nula, H_0 , de que os efeitos aleatórios não são correlacionados com os regressores, x_{it} , contra a hipótese alternativa, H_1 , de que a_i é correlacionado com x_{it} . Assim, ao rejeitar a hipótese nula, assume-se que o modelo de efeitos fixos é preferível ao de efeitos aleatórios.

3.7 TESTE DE CHOW

O teste de Chow é amplamente utilizado para decidir entre modelos *pooled* e de efeitos fixos, avaliando mudanças estruturais nos parâmetros de regressão ao identificar diferenças entre subperíodos ou ao longo do tempo. Esse teste verifica se o intercepto e os coeficientes do modelo permanecem estáveis ou se variam, pressupondo homocedasticidade dos erros (variância constante) e um ponto de mudança estrutural conhecido (Wooldridge, 2016; Pereda, Alves, 2018).

As hipóteses do teste são: H_0 , que assume a ausência de mudanças estruturais, indicando que o intercepto e os coeficientes são iguais para todos os subgrupos (modelo *pooled* mais adequado); e H_1 , que identifica mudanças estruturais, com interceptos e coeficientes variando entre subgrupos (modelo de efeitos fixos mais adequado). A decisão é tomada com base na

estatística F , calculada a partir da comparação entre as somas dos quadrados dos resíduos restritos e irrestritos, considerando o número de parâmetros estimados e o número de observações. Se o valor de F for maior que o valor crítico da tabela F , rejeita-se H_0 , indicando mudança estrutural e a preferência pelo modelo de efeitos fixos.

3.8 TESTE DO MULTIPLICADOR DE LAGRANGE BREUSCH-PAGAN

O teste de Breusch-Pagan é utilizado para auxiliar na escolha entre os modelos *pooled* e efeitos aleatórios, identificando qual deles fornece estimativas mais adequadas aos dados. Esse teste é amplamente empregado para detectar a presença de heterocedasticidade nos resíduos de um modelo de regressão, ou seja, verifica se a variância dos erros é constante ou não (Wooldridge, 2016; Pereda, Alves, 2018).

Para calcular a estatística do teste, Wooldridge (2016) sugere estimar o modelo principal por Mínimos Quadrados Ordinários (MQO) e obter os resíduos ao quadrado. Em seguida, esses resíduos são regredidos sobre as variáveis independentes do modelo. A partir dessa análise, é possível verificar a presença de heterocedasticidade nos coeficientes.

As hipóteses do teste são:

H_0 : A variância dos erros é constante (homocedasticidade), indicando que o modelo *pooled* é preferível.

H_1 : A variância dos erros não é constante (heterocedasticidade), sugerindo que o modelo de efeitos aleatórios é mais adequado.

Greene (2003) define a estatística do teste de Breusch-Pagan como uma função dos resíduos do modelo de MQO, do número de unidades de tempo (T), do número de subdivisões cruzadas (n) e da média dos resíduos para um grupo específico no modelo *pooled*. Sob a hipótese nula, a estatística LM segue uma distribuição qui-quadrado (χ^2) com k graus de liberdade. Se o valor da estatística LM for maior que o valor crítico da distribuição qui-quadrado, rejeita-se H_0 , indicando a presença de heterocedasticidade e a preferência pelo modelo de efeitos aleatórios. Caso contrário, não se rejeita H_0 , sugerindo que o modelo *pooled* é mais adequado.

4 RESULTADOS E DISCUSSÃO

Os resultados para as análises econométricas desenvolvidas neste estudo são apresentados a seguir, destacando os principais determinantes das culturas de soja, trigo, milho e feijão no Paraná entre municípios e mesorregiões. Desse modo, são descritas as análises a respeito da estacionariedade dos dados, testes de adequação dos métodos e resultados das regressões múltiplas levando em consideração as variações climáticas durante o período analisado.

A Tabela 1 que apresenta os resultados obtidos para o teste Dickey-Fuller Aumentado (ADF) indica que, para ambas as culturas e variáveis analisadas, a hipótese nula é rejeitada, indicando a estacionariedade dos dados, ou seja, as variáveis climáticas e produtivas não são afetadas por tendências de longo prazo, tornando os resultados das regressões mais confiáveis. Essa conclusão é corroborada a partir dos valores significativamente negativos observados para a estatística t e p -valores associados às variáveis, que apresentam significância estatística relevante ao nível de 99% de confiança.

Tabela 1 – Resultados da aplicação do teste Dickey Fuller aumentado (ADF) para estacionariedade das variáveis para as culturas de soja, trigo, milho e feijão.

	Feijão	Trigo	Milho	Soja
Área colhida (ha)	-16,29*** P-valor: 0.00	-13,71*** P-valor:0.00	-16,32*** P-valor:0.00	-13,27*** P-valor:0.00
Quantidade produzida (t)	-15,69*** P-valor: 0.00	-13,41*** P-valor:0.00	-14,38*** P-valor:0.00	-12,38*** P-valor:0.00
Rendimento médio (kg/ha)	-14,47*** P-valor:0.00	-17,36*** P-valor:0.00	-14,48*** P-valor:0.00	-17,33*** P-valor:0.00
Precipitação (mm)	-18,55*** P-valor:0.00	-20,52*** P-valor:0.00	-12,32*** P-valor:0.00	-12,32*** P-valor:0.00
Temperatura (°C)	-13,68*** P-valor:0.00	-16,06*** P-valor:0.00	-16,41*** P-valor:0.00	-16,41*** P-valor:0.00

Nota:

- *representa um nível de significância de 10% (p -valor < 0,10);
- ** representa um nível de significância de 5% (p - valor < 0,05);
- *** representa um nível de significância de 1% (p -valor < 0,01).

Fonte: Resultados da pesquisa, 2024.

A fim de compreender qual o modelo mais adequado aos objetivos desta pesquisa, a Tabela 2 apresenta os resultados dos testes estatísticos realizados em que são analisadas questões de confiabilidade e adequação dos dados.

Tabela 2 – Resultados dos testes estatísticos para seleção de modelo econométrico para as culturas de trigo, milho, soja e feijão.

	Feijão	Trigo	Milho	Soja
Chow	7092,36***	9048,33***	9615,01***	17864,44***
	P-valor:0.00	P-valor:0.00	P-valor:0.00	P-valor:0.00
Hausman	221.90***	221.90***	221.90***	221.90***
	P-valor:0.00	P-valor:0.00	P-valor:0.00	P-valor:0.00
Breusch-Pagan	29354,57***	26256,17***	27166,91***	8015,68***
	P-valor:0.00	P-valor:0.00	P-valor:0.00	P-valor:0.00

Fonte: Resultados da pesquisa, 2024.

Os resultados observados para os testes estatísticos de averiguação da adequação dos modelos econométricos descritos na Tabela 2, revelam uma melhor adequação do modelo de efeitos fixos para os dados da pesquisa, isso pode ser verificado através da análise dos testes de Hausman, Chow e Breusch-Pagan. O teste de Chow apresentou significâncias estatísticas robustas, com p -valores próximos a 0 para todas as culturas analisadas. Este resultado sugere a rejeição da hipótese nula, indicando que existem mudanças estruturais nos parâmetros dos modelos, o que favorece a escolha do modelo de efeitos fixos em relação ao modelo *pooled*.

Para o teste de Hausman, que verifica a ausência de correlação entre a variável de efeitos aleatórios e variáveis explicativas, também pode-se rejeitar a hipótese nula indicando que há correlação entre tais variáveis. A significância estatística observada no teste, com p -valores abaixo de 1%, reforça a preferência pelo modelo de efeitos fixos.

Por fim, o teste de Breusch-Pagan, utilizado para detectar a presença de heterocedasticidade nos erros do modelo, também indicou uma forte significância estatística, com p -valores abaixo de 1%, o que levou à rejeição da hipótese nula. Tais resultados confirmam a presença de heterocedasticidade nos erros, sugerindo que o modelo *pooled* não seria adequado. Portanto, a escolha pelo modelo de efeitos aleatórios é mais robusta para lidar com as particularidades dos dados analisados.

Com base nos resultados obtidos, confirma-se a escolha pelo modelo de efeitos fixos. O teste de Hausman indicou que esse modelo é mais adequado do que o de efeitos aleatórios. Além disso, o teste de Chow demonstrou que o modelo de efeitos fixos é preferível ao modelo *pooled*, enquanto o teste de Breusch-Pagan apontou a superioridade do modelo de efeitos aleatórios em relação ao modelo *pooled*. Assim, a robustez estatística dos testes confirma a adequação do modelo de efeitos fixos para esta análise.

Na Tabela 3 estão descritas as principais estatísticas descritivas observadas para as 4 culturas em análise neste estudo: soja, trigo, milho e feijão. Os resultados indicam que, com exceção da soja, as médias das variáveis de precipitação oscilam ligeiramente acima ou abaixo do volume ideal para o desenvolvimento dessas culturas, conforme previamente discutido. Esse comportamento também se estende à variável temperatura, cujos valores se mantêm próximos aos níveis toleráveis. Araújo *et al.* (2014) evidencia essa relação ao concluir que, em regiões como o estado do Paraná, as temperaturas já operam nos limites toleráveis para o cultivo de algumas culturas agrícolas.

Um aspecto relevante desta análise diz respeito aos valores máximos e mínimos observados para temperatura e precipitação, que ultrapassam os limites suportados para uma produção agrícola ideal. Esse fenômeno pode estar associado ao aumento da ocorrência de eventos climáticos extremos, que vêm impactando a produtividade agrícola de forma geral. O Painel Intergovernamental sobre Mudança do Clima (2023) destaca que há uma tendência de aumento em até 2°C da temperatura nos próximos 80 anos, mesmo em um cenário otimista de redução dos GEE. Isso impactará fortemente as culturas de soja, trigo, milho e feijão no estado do Paraná que já estão se desenvolvendo dentro dos limites toleráveis de exposição a essas variáveis climáticas.

Tabela 3 – Estatísticas descritivas para soja, trigo, milho e feijão no Paraná entre 1974 a 2022 e níveis ideais para o desenvolvimento das culturas.

Parâmetro	Média	Desvio Padrão	Mínimo	Máximo	Valores ideais
Soja					
Precipitação (mm)	513,75	118,31	229,1	1293,9	450 – 800
Temperatura (°C)	23,74	1,54	19,5	27,13	20 – 30
Rendimento Médio (kg/ha)	2503,99	719,86	146,0	6988,0	
Quantidade Produzida	28758,2	40334,83	3,0	438700,0	
Área Colhida (ha)	10577,26	13619,52	2,0	118297,0	
Trigo					
Precipitação (mm)	258,77	120,76	31,7	807,9	300 – 500
Temperatura (°C)	16,57	2,01	11,17	21,57	10 – 25
Rendimento Médio (kg/ha)	1834,21	768,72	104,0	5437,0	
Quantidade Produzida	7556,06	13093,27	1,0	208250,0	
Área Colhida (ha)	4024,25	6931,22	1,0	100215,0	
Milho					
Precipitação (mm)	513,77	117,37	229,1	1293,9	600
Temperatura (°C)	23,74	1,54	19,5	27,13	24 – 30
Rendimento Médio (kg/ha)	3770,48	1980,96	111,0	13350,0	
Quantidade Produzida	26532,6	37947,27	1,0	489330,0	
Área Colhida (ha)	6889,21	8885,48	3,0	115000,0	
Feijão					
Precipitação (mm)	440,2	133,43	156,7	948,4	300
Temperatura (°C)	20,9	2,07	15,53	25,83	17 – 25
Rendimento Médio (kg/ha)	908,51	480,05	45,0	3700,0	
Quantidade Produzida	1710,83	3579,6	1,0	56400,0	
Área Colhida (ha)	1770,42	3283,68	1,0	54302,0	

Fonte: Resultados da pesquisa, 2024.

Nas Tabelas 4, 5, 6 e 7 encontram-se descritas as estimativas para os modelos de efeitos fixos relacionadas as 4 culturas analisadas: soja, trigo, milho e feijão, respectivamente. Tais

resultados foram obtidos analisando-se 15.092 observações para a cultura da soja, 13.540 observações para a cultura do trigo, 17.201 observações para a variável milho e 16.339 observações para a variável feijão considerando os 399 municípios do Paraná.

A Tabela 4 apresenta os resultados das estimativas do modelo de efeitos fixos para a produção de soja no Paraná com base nos anos de 1974 a 2022. Os resultados observados revelam estatísticas robustas com coeficiente de determinação ajustado (R^2) indicando que 93% da quantidade produzida de soja é explicada pelas variáveis incluídas no modelo. A estatística F com valor de 16.330, apresenta um p -valor estatisticamente significativo comprovando a significância global deste modelo e indicando que os coeficientes são simultaneamente diferentes de zero.

Tabela 4 – Estimativas do Modelo de Efeitos fixos para a produção de soja no Paraná de 1974 a 2022.

Parâmetro	Coeficiente	P-valor	Estatística T
Área colhida (ha)	2,6957***	0,00	390,23
Rendimento médio (kg/ha)	10,529***	0,00	53,715
Precipitação	-2,5639	0,14	-1,4627
Temperatura	-982,67***	0,00	-8,0309
Sudoeste Paranaense	677,95*	0,08	1,7278
Sudeste Paranaense	2155,4***	0,00	3,7473
Centro Ocidental paranaense	1924,7***	0,00	5,1229
Centro-Sul paranaense	468,03	0,35	0,9309
Metropolitana de Curitiba	-192,49	0,75	-0,3160
Noroeste Paranaense	6101,2***	0,00	17,092
Norte Central Paranaense	2778,1***	0,00	9,4523
Norte Pioneiro Paranaense	2197,3***	0,00	6,4316
Centro Oriental Paranaense	6373,6***	0,00	11,374
R²: 0,93		F-statistic: 16330	
		P-valor: 0,000	

Fonte: Resultados da pesquisa, 2024.

Exceto para as regiões Centro-Sul paranaense e Metropolitana de Curitiba, além da variável de precipitação, os coeficientes de todas as variáveis analisadas neste modelo

apresentam significância estatística dos resultados apresentados. A área colhida possui um coeficiente de 2,6957 indicando que, para cada hectare adicional de área colhida, a produção de soja se eleva em média 2,7 toneladas. O rendimento médio, com comportamento semelhante a área colhida se mostra como um determinante positivo da quantidade produzida, seu coeficiente observado sugere um incremento de 10,58 toneladas produzidas quando do aumento de 1Kg/ha no rendimento médio da produção.

A variável climática de temperatura apresenta impacto negativo com significância estatística robusta sobre a quantidade produzida. O valor do coeficiente temperatura observado, -982,67, sugere que o aumento em 1°C reduz a quantidade produzida de soja em aproximadamente 982 toneladas, indicando forte impacto do estresse térmico sobre a produção. Conforme destacado pelo Painel Intergovernamental sobre Mudanças do Clima (2023), essas variações refletem as consequências das mudanças climáticas, intensificando a vulnerabilidade das culturas às condições ambientais adversas.

Esse resultado está alinhado com o estudo de de Carvalho *et al.* (2020), que identificaram que a seca foi responsável por elevadas perdas de produção, especialmente de soja e trigo nas regiões Sudeste e Sul, milho e feijão na Caatinga, além de eventos de granizo e geada que provocaram perdas de soja e arroz no Sudeste e Sul. Isso evidencia a heterogeneidade dos eventos climáticos e a incidência de eventos extremos, que contribuem para os efeitos negativos observados sobre a produção de soja no Paraná.

A precipitação apresentou um coeficiente de -2,5639 sugerindo que um aumento em 1 milímetro na precipitação reduz a quantidade produzida de soja próximo a 2,56 toneladas, contudo esta variável não apresentou significância estatística, sendo desconsiderada da análise em questão.

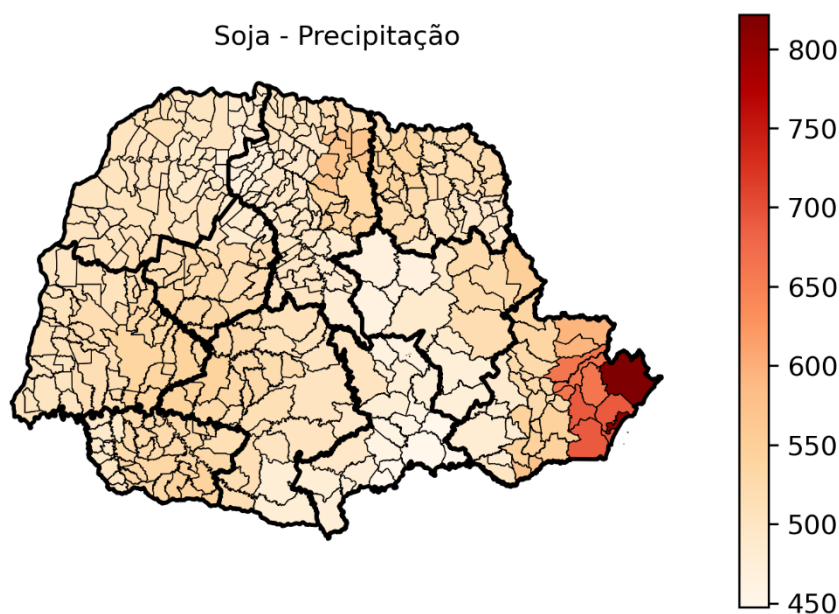
As variáveis *dummy* regionais apresentadas captam os efeitos específicos de cada região em relação a região de referência, a mesorregião Oeste paranaense. Essa mesorregião foi escolhida como referência por estar relacionada à atividade agrícola de forma robusta, servindo como base para a análise das demais mesorregiões em comparação com uma região de grande produção.

Em relação a região de referência, as mesorregiões Sudoeste, Sudeste, Centro Ocidental, Noroeste, Norte Central, Norte Pioneiro e Centro Oriental paranaense apresentaram coeficientes positivos, indicando que a produção nestas mesorregiões, para o período analisado, foram maiores que a produção da mesorregião de referência, Oeste paranaense, com destaque para a região Centro Oriental paranaense e Noroeste paranaense que apresentaram uma produção de 6373,6 e 6101,2 toneladas a mais que a referência, respectivamente. As demais

mesorregiões Centro-Sul e Metropolitana de Curitiba não apresentaram significância estatística em relação a referência.

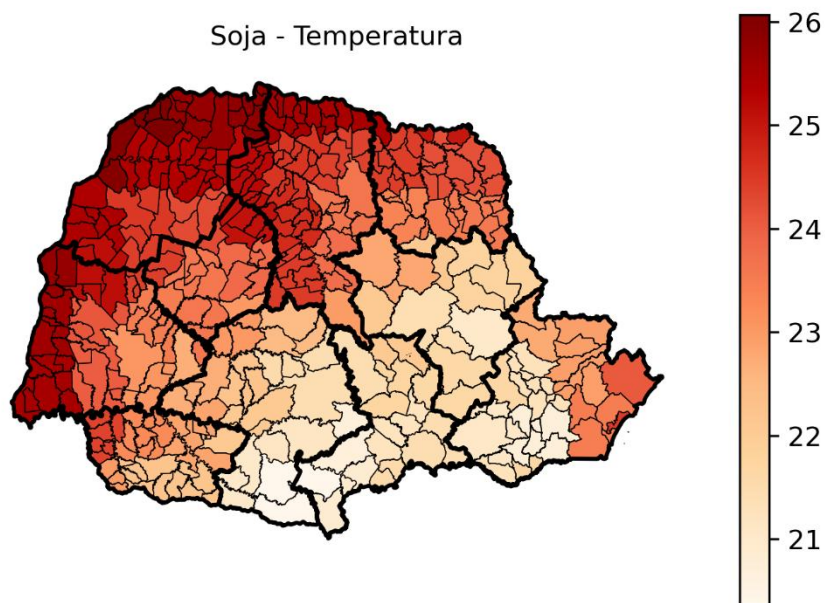
Conforme analisado nas respectivas Figuras 1, 2 e 3 que apresentam a distribuição espacial média de precipitação, temperatura e quantidade produzida da soja no período de 1974 a 2022 para os municípios e mesorregiões paranaenses, a soja apresenta maiores temperaturas nas regiões Norte e Oeste do estado, próximas da faixa ideal para o desenvolvimento dessa cultura, enquanto que maiores precipitações são verificadas na região Leste, mesorregião Metropolitana de Curitiba. Os municípios que apresentam maior produção da soja são justamente municípios em que foram verificadas distribuições medianas dessas variáveis climáticas. Desse modo, as influências negativas de tais variáveis sobre a produção, identificadas na Tabela 4, podem ser explicadas por essa distribuição irregular das variáveis climáticas.

Figura 1 – Distribuição espacial média de precipitação para a cultura da soja considerando os municípios e mesorregiões paranaenses para os anos de 1974 a 2022.



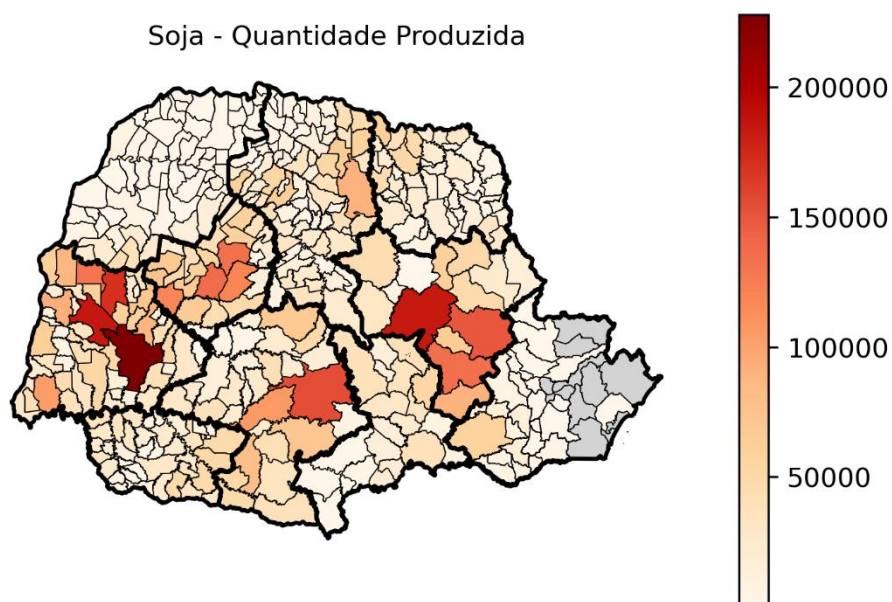
Fonte: Resultados da pesquisa, 2024.

Figura 2 – Distribuição espacial média de temperatura para cultura da soja considerando os municípios e mesorregiões paranaenses para os anos de 1974 a 2022.



Fonte: Resultados da pesquisa, 2024.

Figura 3 – Distribuição espacial média de quantidade produzida para a cultura da soja considerando os municípios e mesorregiões paranaenses para os anos de 1974 a 2022.



Fonte: Resultados da pesquisa, 2024.

A Tabela 5 apresenta os resultados das estimativas do modelo de efeitos fixos para a produção de trigo no Paraná com base nos anos de 1974 a 2022. Com exceção das mesorregiões Sudeste Paranaense e Metropolitana de Curitiba, todas as demais variáveis observadas no modelo apresentam algum nível de significância para os resultados encontrados. O modelo demonstra elevada qualidade ajustada, com coeficiente de determinação (R^2) de 0,8377, indicando que 83,77% da variância na produção de trigo é explicada pelas variáveis incluídas no modelo. A estatística F apresenta alta significância estatística reafirmando a significância geral do modelo.

Tabela 5 – Estimativas do Modelo de Efeitos fixos para a produção de trigo no Paraná de 1974 a 2022.

Parâmetro	Coeficiente	P-valor	Estatística T
Área colhida (ha)	1,6404***	0,00	234,97
Rendimento médio (kg/ha)	4,3328***	0,00	43,959
Precipitação	1,9176*	0,06	1,8376
Temperatura	-275,70***	0,00	-3,9617
Sudoeste Paranaense	973,94***	0,00	4,7151
Sudeste Paranaense	117,02	0,67	0,4171
Centro Ocidental paranaense	962,57***	0,00	4,8924
Centro-Sul paranaense	513,99**	0,03	2,1444
Metropolitana de Curitiba	-280,12	0,37	-0,8823
Noroeste Paranaense	2600,5***	0,00	10,843
Norte Central Paranaense	2019,2***	0,00	11,312
Norte Pioneiro Paranaense	1795,2***	0,00	8,9737
Centro Oriental Paranaense	5331,6***	0,00	19,037
R²: 0,8377	F-statistic: 5350,4		
	P-valor: 0,00		

Fonte: Resultados da pesquisa, 2024.

O coeficiente observado para área colhida mostra que cada hectare adicional colhido reflete um aumento na produção em 1,64 toneladas, aproximadamente. O rendimento médio, assim como a variável de área colhida, apresenta impacto positivo sobre a quantidade produzida

com coeficiente de 4,3328, sugerindo que o aumento de 1 kg/ha no rendimento médio eleva a produção próxima a 4,33 toneladas.

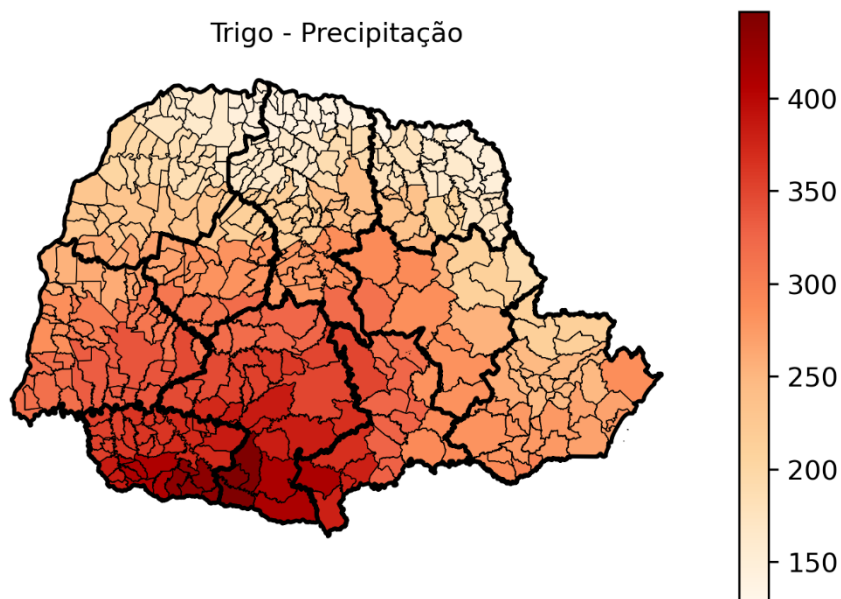
As variáveis climáticas apresentam impactos distintos entre si, de significância robusta acerca da quantidade produzida. A precipitação tem coeficiente positivo de 1,9176, sugerindo que maiores níveis de chuva podem impactar positivamente a produção. No entanto, esta variável apresenta um nível de significância estatística de 90% de confiança, apenas, abaixo das demais variáveis observadas. A variável de temperatura demonstrou-se como um fator de influência negativa na produção do trigo, indicando que incrementos adicionais de temperatura reduzem a produção em 275,70 toneladas

Conforme apresentado na Tabela 3, a precipitação média observada para o trigo foi de 258,77 mm, um volume inferior ao ideal para o desenvolvimento da cultura. Além disso, os valores de máximo e mínimo, 807,9 mm e 31,7 mm, respectivamente, indicam uma grande disparidade entre os municípios e anos analisados. O impacto positivo da precipitação sobre a produção de trigo se dá em função de que a média estadual é inferior ao ideal para a cultura, portanto, incrementos de níveis de precipitação contribuem de maneira positiva para a quantidade produzida de trigo no estado do Paraná.

Em relação aos efeitos regionais, observa-se que apenas as mesorregiões Sudeste e Metropolitana de Curitiba não apresentam significância estatística para análise. Para as demais mesorregiões, ambas apresentam robusta significância e demonstram índices positivos, indicando que, com relação a mesorregião de referência Oeste paranaense, todas apresentam quantidades de produção mais expressivas, com destaque a mesorregião Centro Oriental paranaense, que apresentou o maior índice de produção, 5331,6 toneladas, com relação a referência.

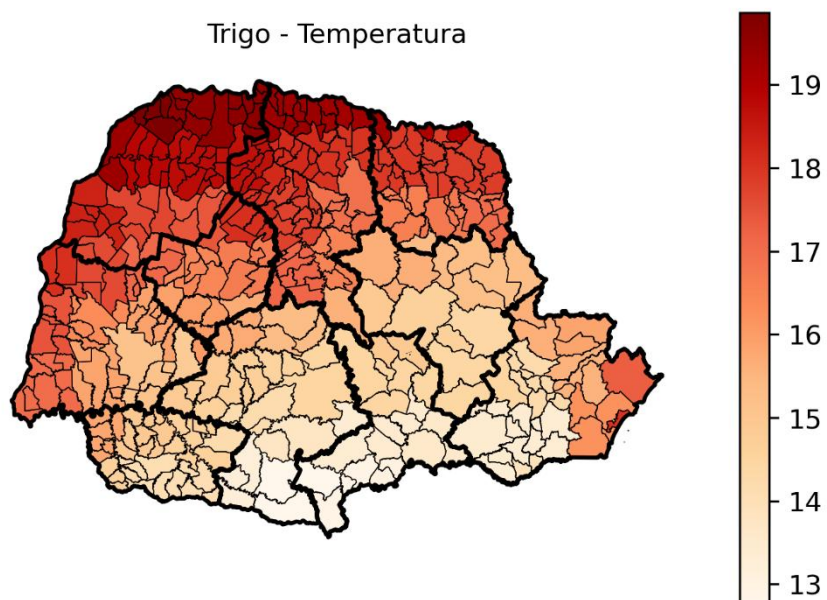
As Figuras 4, 5 e 6 que apresentam a distribuição espacial média de precipitação, temperatura e quantidade produzida do trigo no período de 1974 a 2022 para os municípios e mesorregiões paranaenses a precipitação está, quase em sua totalidade no estado, operando nos limites suportados por essa cultura, contudo ainda há uma margem para que incrementos adicionais de precipitação beneficiem a quantidade produzida do trigo, principalmente com relação às mesorregiões mais a norte do estado. De maneira oposta à distribuição da precipitação, a temperatura, conforme observado na Figura 5, está operando acima do limite suportado para o desenvolvimento desta cultura em grande parte do estado, principalmente com relação às mesorregiões do norte paranaense, justificando a influência negativa observada pela estatística apresentada na Tabela 5.

Figura 4 – Distribuição espacial média de precipitação para a cultura do trigo considerando os municípios e mesorregiões paranaenses para os anos de 1974 a 2022.



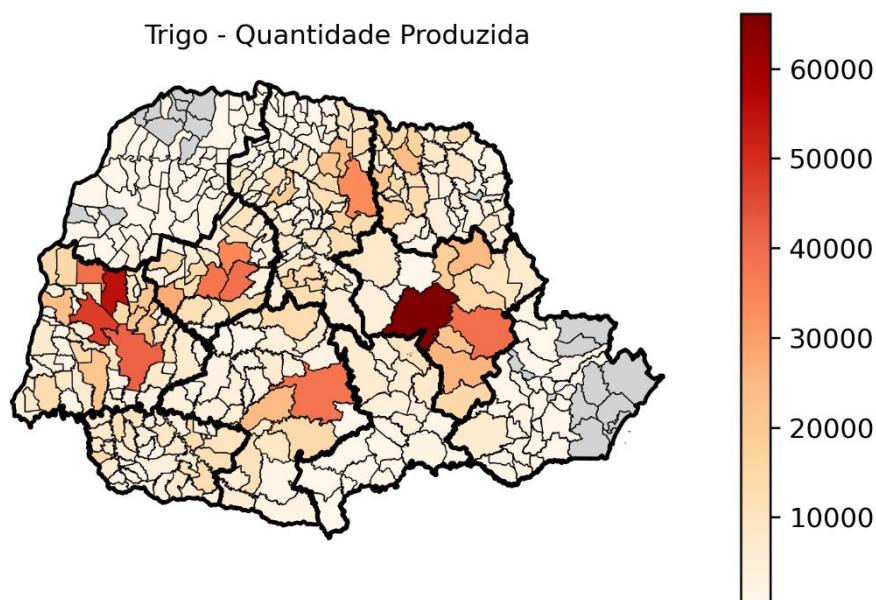
Fonte: Resultados da pesquisa, 2024.

Figura 5 – Distribuição espacial média de temperatura para a cultura do trigo considerando os municípios e mesorregiões paranaenses para os anos de 1974 a 2022.



Fonte: Resultados da pesquisa, 2024.

Figura 6 – Distribuição espacial média de quantidade produzida para a cultura do trigo considerando os municípios e mesorregiões paranaenses para os anos de 1974 a 2022.



Fonte: Resultados da pesquisa, 2024.

Pode-se observar, baseando-se nos dados da Figura 6 sobre distribuição espacial média da quantidade produzida de trigo no estado do Paraná, que os municípios que mais produzem trigo estão localizados em áreas com distribuição de precipitação e temperatura próximas dos níveis ideais para o desenvolvimento da referida cultura, destacando-se as mesorregiões centrais e Oeste paranaense.

A Tabela 6 reporta as estimativas do modelo de efeitos fixos para a produção de milho no Paraná com base nos anos de 1974 a 2022. O modelo apresentou robustez expressiva em significância estatística para as variáveis analisadas, com exceção das mesorregiões Centro Ocidental e Noroeste paranaense. O coeficiente de determinação (R^2) observado de 0,8143 indica que 81,43% da variação na produção de milho é explicada pelas variáveis do modelo. A estatística F evidencia a significância global do modelo ao apresentar um p -valor extremamente significativo.

O coeficiente verificado para a área colhida indica que a cada hectare adicional colhido, a produção de milho aumenta em 3,60 toneladas, aproximadamente. O rendimento médio também mostrou-se altamente significativo e seu coeficiente implica que aumentos de 1 kg/ha no rendimento médio elevam a produção em 6,75 toneladas.

Tabela 6 – Estimativas do Modelo de Efeitos fixos para a produção de milho no Paraná de 1974 a 2022.

Parâmetro	Coefficiente	P-valor	Estatística T
Área colhida (ha)	3,5910***	0,00	239,75
Rendimento médio (kg/ha)	6,7541***	0,00	65,63
Precipitação	14,744***	0,00	6,6998
Temperatura	1472,0***	0,00	8,5492
Sudoeste Paranaense	-7586,2***	0,00	-12,744
Sudeste Paranaense	-1896,8**	0,02	-2,2778
Centro Ocidental paranaense	255,37	0,67	0,4242
Centro-Sul paranaense	-9480,7***	0,00	-12,675
Metropolitana de Curitiba	-1432,9*	0,05	-1,9479
Noroeste Paranaense	172,73	0,74	0,3236
Norte Central Paranaense	-3800,9***	0,00	-8,2042
Norte Pioneiro Paranaense	-2231,0***	0,00	-4,2694
Centro Oriental Paranaense	4758,2***	0,00	5,6264
R²:0,8143	F-statistic: 5878,8		
	P-valor: 0,00		

Fonte: Resultados da pesquisa, 2024.

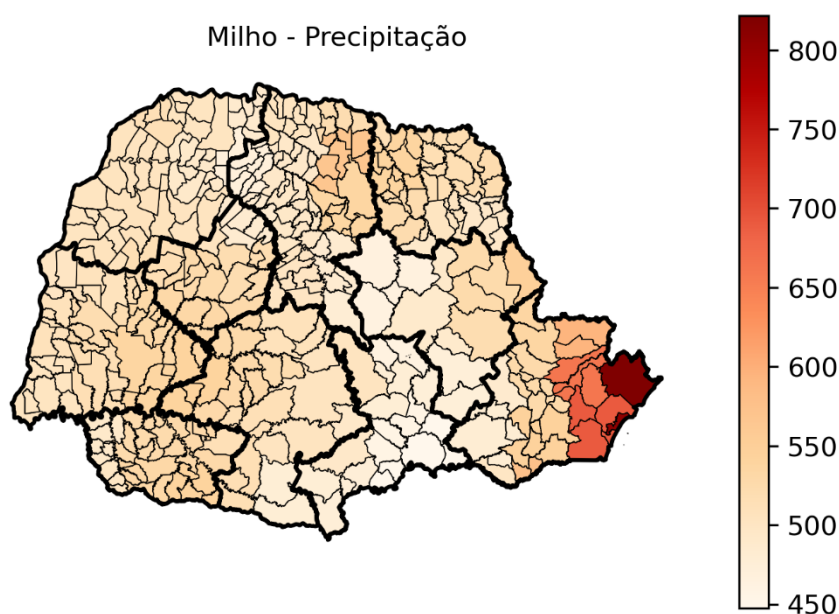
A precipitação, apresenta impacto positivo significativo, com coeficiente de 14,744, isso implica em um aumento de 14 toneladas aproximadamente quando há o aumento em 1mm na precipitação. Conforme observado na Tabela 3, a precipitação média para o milho é de 513,77mm, abaixo do nível médio ideal. Esse comportamento sugere que, dentro dessa faixa de precipitação, aumentos nos níveis de chuva podem contribuir para uma maior produtividade. A temperatura também apresentou efeito positivo significativo, indicando que um aumento em 1°C eleva a quantidade produzida em 1472 toneladas, indicativo de que o milho suporta temperaturas mais elevadas no seu cultivo.

Em relação aos efeitos regionais, destaca-se o impacto negativo da mesorregião Centro-Sul Paranaense com um coeficiente expressivo de -9480,7 e Sudoeste Paranaense com coeficiente correspondente à -7586,2, sendo essas as regiões mais desfavoráveis à produção de milho em relação a mesorregião de referência. Por outro lado, a região Centro Oriental

Paranaense apresentou o maior impacto positivo, seu coeficiente indica um aumento na quantidade produzida em 4758,2 toneladas em relação a mesorregião de referência.

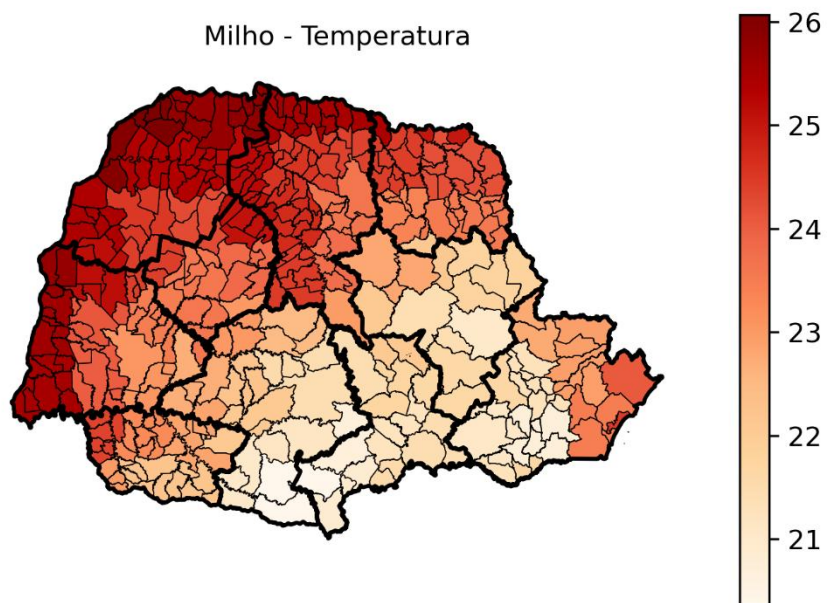
Através da análise das Figuras 7, 8 e 9 que apresentam a distribuição espacial média de precipitação, temperatura e quantidade produzida do milho no período de 1974 a 2022 para os municípios e mesorregiões paranaenses, observa-se que, em quase sua totalidade, o estado opera em limites de precipitação inferiores ao ideal para o desenvolvimento dessa cultura, com destaque para a mesorregião Metropolitana de Curitiba que, dentro da delimitação temporal observada, apresentou os maiores níveis de precipitação. A distribuição espacial da temperatura, de maneira semelhante a precipitação, tem margem para se elevar e anda assim, manter o desenvolvimento da cultura dentro do ideal.

Figura 7 – Distribuição espacial média de precipitação para a cultura do milho considerando os municípios e mesorregiões paranaenses para os anos de 1974 a 2022.



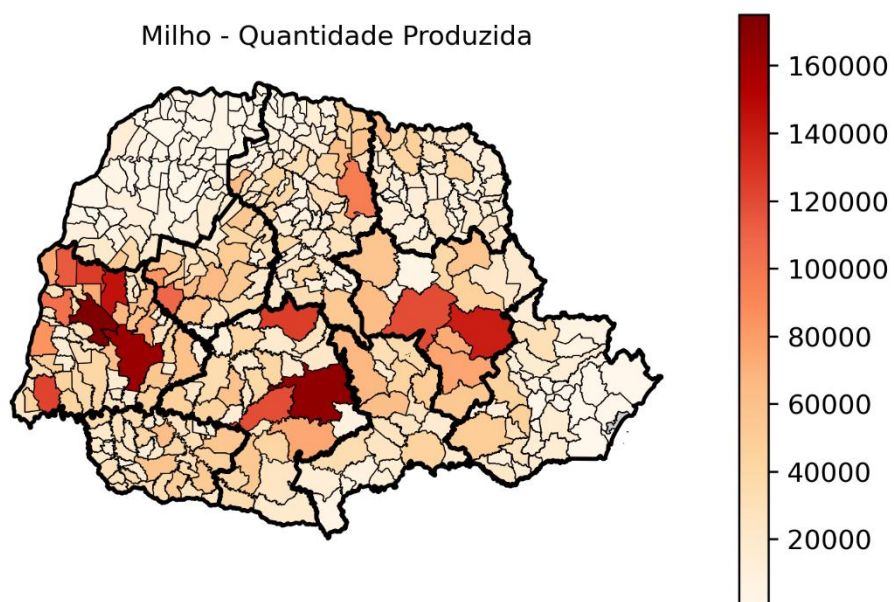
Fonte: Resultados da pesquisa, 2024.

Figura 8 – Distribuição espacial média de temperatura para a cultura do milho considerando os municípios e mesorregiões paranaenses para os anos de 1974 a 2022.



Fonte: Resultados da pesquisa, 2024.

Figura 9 – Distribuição espacial média de quantidade produzida para a cultura do milho considerando os municípios e mesorregiões paranaenses para os anos de 1974 a 2022.



Fonte: Resultados da pesquisa, 2024.

Para a temperatura há um destaque quanto as mesorregiões ao norte e Oeste paranaense, que apresentaram médias mais elevadas de temperatura no estado. Seguindo o mesmo padrão das culturas de soja e trigo analisadas, os municípios que apresentam maiores níveis de quantidade produzida de trigo estão localizados principalmente na região central do estado.

Na Tabela 7 são apresentados os resultados para a estimativa do modelo de efeitos fixos produção com relação a produção de feijão no Paraná com base nos anos de 1974 a 2022. O coeficiente de determinação (R^2) do modelo indica que 82,60% da variação na produção de feijão é explicada pelas variáveis incluídas na regressão. A estatística F , com valor de 5944,1, e o respectivo p -valor baixo, comprovam a significância global do modelo. Para a cultura de feijão as variáveis área colhida, com coeficiente de 0,9149 e rendimento médio, com coeficiente de 1,9456 apresentaram significância estatística robusta e seus resultados evidenciam que cada hectare adicional colhido aumenta a produção em 0,91 toneladas aproximadamente, enquanto cada incremento de 1 kg/ha no rendimento médio eleva a produção próxima a 1,94 toneladas.

Tabela 7 – Estimativas do Modelo de Efeitos fixos para a produção de Feijão no Paraná de 1974 a 2022.

Parâmetro	Coeficiente	P-valor	Estatística T
Área colhida (ha)	0,9149***	0,00	226,75
Rendimento médio (kg/ha)	1,9456***	0,00	50,258
Precipitação	-0,2774	0,23	-1,1813
Temperatura	42,129***	0,00	2,6768
Sudoeste Paranaense	330,10***	0,00	5,5649
Sudeste Paranaense	1044,5***	0,00	12,154
Centro Ocidental paranaense	179,04***	0,00	2,9613
Centro-Sul paranaense	92,587	0,20	1,2773
Metropolitana de Curitiba	540,03***	0,00	6,7909
Noroeste Paranaense	776,50***	0,00	13,603
Norte Central Paranaense	314,78***	0,00	5,5914
Norte Pioneiro Paranaense	525,50***	0,00	8,4211
Centro Oriental Paranaense	1864,1***	0,00	21,106
R²: 0,8260	F-statistic: 5944,1		
	P-valor: 0,00		

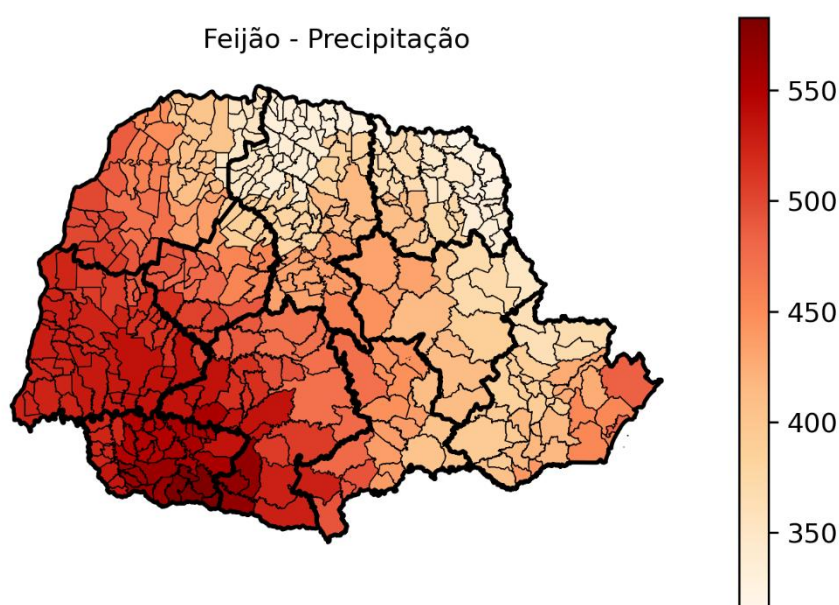
Fonte: Resultados da pesquisa, 2024.

A precipitação teve impacto negativo e não significativo para análise da cultura de feijão, enquanto a temperatura com coeficiente de 42,129, indica que um aumento em 1°C pode elevar a quantidade produzida de feijão em 42 toneladas, aproximadamente. Como enfatizado na Tabela 3 os níveis climáticos para esta cultura já se encontram acima da banda de tolerância para a precipitação. Contudo, para a temperatura observa-se que a média obtida para o período de referência da análise encontra-se dentro da banda de tolerância esperada para um desenvolvimento proveitoso da cultura, com uma média de 20,9°C.

Os efeitos regionais apresentaram significância estatística e destacam o impacto positivo de todas as regiões, com a mesorregião Centro Oriental Paranaense apresentando o maior nível de produção, em sendo seu coeficiente correspondente à 1864,1. Esse comportamento das variáveis *dummies* mesorregionais sugere que a região de referência, Oeste paranaense, é a que menos produz feijão no estado.

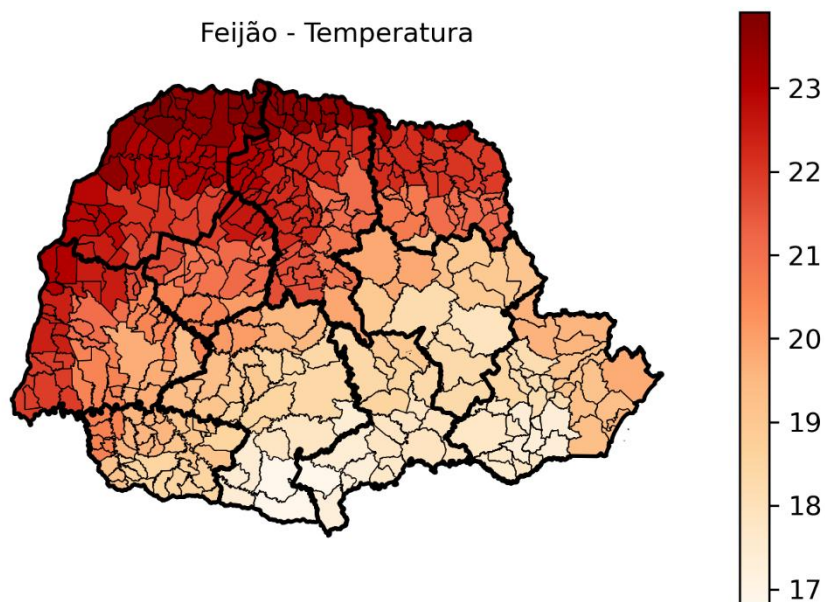
Através da análise das Figuras 10, 11 e 12, que apresentam a distribuição espacial média de precipitação, temperatura e quantidade produzida do feijão no período de 1974 a 2022 para os municípios e mesorregiões paranaenses observa-se que, em quase a totalidade do estado, o limite de precipitação ideal para esta cultura foi ultrapassado, com destaque às mesorregiões do Sul do estado, evidenciando a influência negativa decorrente de aumentos na precipitação.

Figura 10 – Distribuição espacial média de precipitação para a cultura do feijão considerando os municípios e mesorregiões paranaenses para os anos de 1974 a 2022.



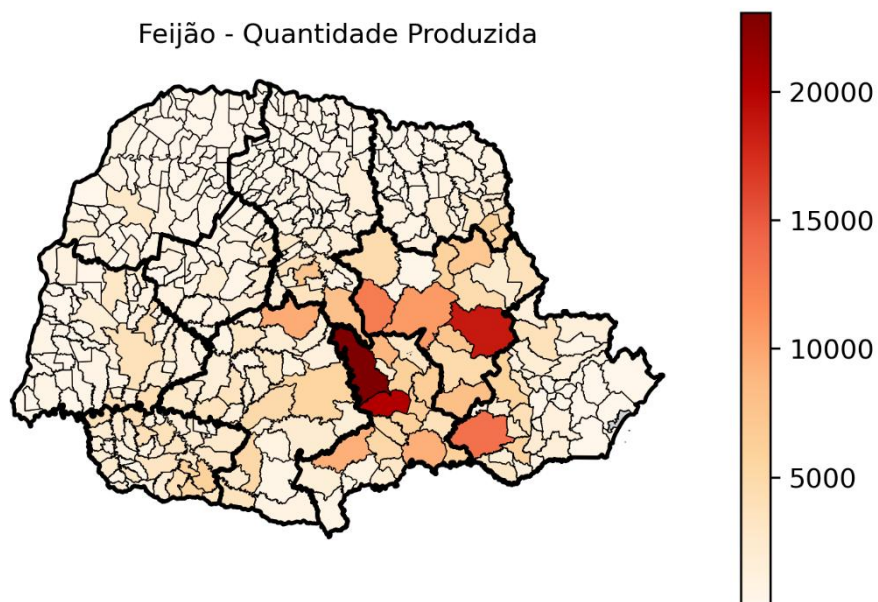
Fonte: Resultados da pesquisa, 2024.

Figura 11 – Distribuição espacial média de temperatura para a cultura do feijão considerando os municípios e mesorregiões paranaenses para os anos de 1974 a 2022.



Fonte: Resultados da pesquisa, 2024.

Figura 12 – Distribuição espacial média de quantidade produzida para a cultura do feijão considerando os municípios e mesorregiões paranaenses para os anos de 1974 a 2022.



Fonte: Resultados da pesquisa, 2024.

A temperatura, conforme verificado na Figura 11, já opera dentro dos limites tolerados para desenvolvimento proveitoso da cultura do feijão e, ao contrário da precipitação, as

mesorregiões que se destacam com os maiores níveis de temperatura são aquelas localizadas mais a norte do estado. A distribuição espacial da quantidade produzida do feijão para o período em referência, assim como as demais culturas analisadas, está localizada em maior quantidade nos municípios cujos níveis de precipitação e temperatura estejam operando dentro dos valores ideais esperados para esta cultura, localizados, principalmente nas mesorregiões Centro Oriental e Sudeste paranaense.

Os resultados encontrados corroboram as observações de Silva e Guetter (2003). Em seu estudo sobre alterações climáticas do estado do Paraná, os autores identificaram um aumento do ciclo hidrológico desde a década de 1970 para o estado, constatado pelo aumento na frequência de chuvas intensas que se estendem de forma heterogênea pelas regiões. Esse fenômeno pode estar diretamente associado aos impactos negativos da variação sobre a produção de agricultáveis no Paraná, uma vez que a irregularidade na distribuição hídrica contribui tanto para o excesso de água no solo quanto para períodos prolongados de déficit hídrico, prejudicando o desenvolvimento das culturas.

Diante dos resultados observados nas Tabelas 4, 5, 6 e 7, que evidenciam a influência heterogênea das variações climáticas sobre as diferentes culturas, em que a soja se mostra impactada negativamente pelas variáveis climáticas, o milho se mostra positivamente impactado e as culturas de trigo e feijão apresentam efeitos mistos, pode-se verificar resultados divergentes em relação aos estudos de Pinto, Silva e Junior (2017) que analisaram o impacto das variações climáticas na produção de cana-de-açúcar nos municípios da Paraíba entre 1990 e 2015, Oliveira, Garcia e Pinto (2021) que por meio de regressões em painel de efeitos fixos analisou os impactos dos eventos climáticos sobre a cultura de soja, milho e cana-de-açúcar sob abrangência nacional para o período de 1990 a 2015. Os autores verificaram uma influência negativa da temperatura sobre as culturas, enquanto a precipitação demonstrou ser um influenciador positivo para a produção. Tais resultados evidenciam a heterogeneidade dessas influências climáticas sobre as diferentes culturas e regiões analisadas.

A análise realizada permitiu observar uma distribuição inversa entre precipitação e temperatura no estado. Especificamente, enquanto a precipitação para a cultura do trigo é mais abundante no Sul, a temperatura é observada em maiores níveis no Norte. Essa relação inversa se manteve consistente para as quatro culturas analisadas. Como resultado, identificou-se um padrão de produção, onde as maiores quantidades produzidas para todas as culturas estão concentradas na região central do estado. Essa concentração pode ser atribuída ao fato de a região central apresentar condições climáticas mais favoráveis, com distribuições médias de

temperatura e precipitação dentro do ideal esperado para o desenvolvimento produtivo das culturas

5 CONSIDERAÇÕES FINAIS

Este estudo analisou os impactos dos eventos climáticos sobre a produção de grãos no estado do Paraná, abrangendo as culturas de soja, milho, trigo e feijão no período de 1974 a 2022. Utilizando uma estrutura de dados em painel, foram aplicados os modelos econométricos de Pooled, Efeitos Fixos e Efeitos Aleatórios, cuja adequação foi verificada através dos testes de Hausman, Chow e Breusch-Pagan.

Os resultados indicaram que as variáveis climáticas exercem influência significativa sobre as culturas analisadas. Observou-se que a soja é negativamente impactada por variações climáticas de temperatura e precipitação, enquanto o milho apresentou relação positiva com estas variáveis e as culturas de trigo e feijão mostram efeitos heterogêneos entre si e entre as variáveis climáticas analisadas.

Através da análise estatística realizada observou-se que, em sua grande maioria as culturas já operam dentro dos limites de precipitação e temperatura ideais para um desenvolvimento produtivo amplo. Pela análise espacial observou-se que as maiores produções, para ambas as culturas, estão concentradas na região central do estado em função de que esta região apresenta médias climáticas mais favoráveis aos cultivos.

Diante desses resultados, torna-se evidente a necessidade de políticas públicas voltadas para adaptação e mitigação dos impactos climáticos na agricultura, principalmente com relação à redução da emissão de GEE e ao manejo das terras agricultáveis, fatores diretamente relacionados ao aquecimento global. Além disso, estratégias regionais devem ser desenvolvidas considerando as especificidades de cada cultura e região, promovendo a sustentabilidade da produção agrícola a longo prazo no estado.

Investigações futuras poderão ampliar essa análise ao considerar outros fatores que influenciam a produção agrícola, como a distribuição das chuvas e da temperatura ao longo do ciclo reprodutivo. Isso permitiria uma avaliação mais precisa dos impactos climáticos, uma vez que cada fase do desenvolvimento das plantas demanda condições específicas de temperatura e disponibilidade hídrica.

Este estudo pode contribuir para a literatura ao evidenciar a relevância das variáveis climáticas na produção agrícola do Paraná e reforça a necessidade de ações concretas para enfrentar os desafios impostos pelas mudanças climáticas. Espera-se que os resultados apresentados sirvam de base para futuras investigações e para a implementação de políticas públicas que garantam a segurança alimentar e a sustentabilidade do setor agrícola.

REFERÊNCIAS

- ARAÚJO, Paulo Henrique Cirino *et al.* Uma análise do impacto das mudanças climáticas na produtividade agrícola da região nordeste do Brasil. **Revista Econômica do Nordeste**, v. 45, n. 3, p. 46-57, 2014. Disponível em: <https://www.bnb.gov.br/revista/ren/article/view/118>. Acesso em: 10 fev. 2025.
- CATELAN, Davi Winder; CARVALHO, Terciane Sabadini; VALE, Vinícius Almeida. **Eventos climáticos extremos no Brasil e impactos econômicos provenientes de mudanças na produtividade agrícola**. Curitiba: Núcleo de Estudos em Desenvolvimento Urbano e Regional (NEDUR), Universidade Federal do Paraná, 2022. Disponível em: https://www.anpec.org.br/encontro/2022/submissao/files_I/i11-b8b64b36f50a400020993817fb71cf88.pdf. Acesso em: 26 jan. 2025.
- DE CARVALHO, André Luiz *et al.* Impactos da ocorrência de eventos climáticos extremos na produção agrícola brasileira. **Sustainability in Debate**, v. 11, n. 3, p. 211-224, 2020. Disponível em: https://openurl.ebsco.com/EPDB%3Agcd%3A2%3A15367218/detailv2?sid=ebsco%3Aplink%3Ascholar&id=ebsco%3Agcd%3A147977421&crl=c&link_origin=scholar.google.com.br. Acesso em: 15 jan. 2025.
- DE MORAES, Gustavo Inácio; FERREIRA FILHO, Joaquim Bento de Souza. Brasil, mudanças climáticas e economia: o que há estabelecido? **Planejamento e Políticas Públicas**, n. 41, p. 183-207, jul./dez 2013. Disponível em: https://meriva.pucrs.br/dspace/bitstream/10923/10586/2/Brasil_Mudancas_Climaticas_e_Economia_o_que_ha_estabelecido.pdf. Acesso em: 27 jan. 2025.
- DICKEY, David; FULLER, Wayne. Likelihood ratio statistics for autoregressive time series with a unit root. **Econometrica: journal of the Econometric Society**, v. 49 p. 1057-1072, 1981. Disponível em: <https://www.jstor.org/stable/1912517>. Acesso em: 10 fev. 2025.
- EMPRESA BRASILEIRA DE PESQUISA AGROPECUÁRIA. **Soja em números (safra 2018/19)**. Brasília: Embrapa, 2024. Disponível em: <https://www.embrapa.br/soja>. Acesso em: 21 dez. 2024.
- FARIAS, José Renato Bouças; NEUMAIER, Norman; NEPOMUCENO, Alexandre Lima. **Água**. EMBRAPA. Disponível em: <https://www.embrapa.br/agencia-de-informacao-tecnologica/cultivos/soja/pre-producao/caracteristicas-da-especie-e-relacoes-com-o-ambiente/exigencias-climaticas/agua>. Acesso em: 09 fev. 2025.
- GIL, Antônio Carlos. **Como elaborar projetos de pesquisa**. 4. ed. São Paulo: Atlas, 2002.
- GREENE, William H. **Econometric Analysis**. 5. ed. Upper Saddle River, New Jersey: Pearson Education, Inc., 2003.
- GUJARATI, Damodar N.; PORTER, Dawn C. **Econometria básica**. 5. ed. Porto Alegre: AMGH, 2011.

HADDAD, Eduardo A. et al. Impactos Econômicos das Mudanças Climáticas no Brasil. **Anais do XIV Seminário sobre a Economia Mineira**. Salvador, 2010. Disponível em: https://d1wqtxts1xzle7.cloudfront.net/31069600/D10A047-libre.pdf?1392133124=&response-content-disposition=inline%3B+filename%3DIMPACTOS_ECONOMICOS_DAS_MUDANCAS_C_LIMATI.pdf&Expires=1739207281&Signature=fZ0m5nnAySpFt2mUax0qo9fAJAk8tFLpyIh66o9tQFkBiSQwImHg06Lj-UvpVP9eW5IjLRefEV79ovf6GidmfiRwQQX4bH2QfyOJ4c95NtaIrsMgDuL1pllhyOb9iC7EJJyRGbfXk4kmRWavmA6vyeRo79ZG4pwLzqo-2ZW7Um1ZmHm9BJpGAM5kw9iBkvwF2KZaOcQMibFOuAqQemIKibdnPdnx5sCXNTLlVzL1KCUB8EdbedD1rhNDTEDW8DEWMcan-3K40AeHrBn2KciOblibT~nlPPxBAfKZHocHLe9wcpn9emXsQ8uIN0oxuVXbAfmT-uy4Byeg5~EF34CwQ_&Key-Pair-Id=APKAJLOHF5GGSLRBV4ZA. Acesso em: 02 fev. 2025.

HOOGENBOOM, Gerrit. Contribution of agrometeorology to the simulation of crop production and its application. **Agricultural and Forest Meteorology**, v. 103, n. 1-2, p. 137-157, 2000. Disponível em: https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0168192300001088?casa_token=2fff958189gAAAAA:6r-eORT9lZp8og8cjS94SZZiC8_WdbfyXDrAN1RnyRWKs3FroU1mchVTvH1W89koEsiJN2Qamco. Acesso em: 02 fev. 2025.

INSTITUTO BRASILEIRO DE GEOGRAFIA E ESTATÍSTICA. **Cidades e Estados**. Rio de Janeiro: IBGE, 2024. Disponível em: <https://www.ibge.gov.br/cidades-e-estados>. Acesso em: 21 dez. 2024.

INSTITUTO BRASILEIRO DE GEOGRAFIA E ESTATÍSTICA. **Levantamento Sistemático da Produção Agrícola (LSPA)**. Rio de Janeiro: IBGE/LSPA, 2024. Disponível em: <https://www.ibge.gov.br/estatisticas/economicas/agricultura-e-pecuaria/9201-levantamento-sistematico-da-producao-agricola.html>. Acesso em: 14 dez. 2024.

INSTITUTO BRASILEIRO DE GEOGRAFIA E ESTATÍSTICA. **Produção Agrícola Municipal (PAM)**. Rio de Janeiro: IBGE/PAM, 2024. Disponível em: <https://www.ibge.gov.br/estatisticas/economicas/agricultura-e-pecuaria/9117-producao-agricola-municipal-culturas-temporarias-e-permanentes.html?=&t=o-que-e>. Acesso em 14 dez. 2024.

INSTITUTO PARANAENSE DE DESENVOLVIMENTO ECONÔMICO E SOCIAL. **PIB do Paraná – Resultados do 4º trimestre de 2023**. Paraná: IPARDES, 2023. Disponível em: <https://www.ipardes.pr.gov.br/Pagina/PIB-Trimestral-do-Parana>. Acesso em: 21 dez. 2024.

LANDAU, Elena Charlotte; MAGALHÃES, Paulo César; GUIMARÃES, Daniel Pereira. **Relações com o clima**. Embrapa Milho e Sorgo, 2021. Disponível em: <https://www.embrapa.br/agencia-de-informacao-tecnologica/cultivos/milho/pre-producao/caracteristicas-da-especie-e-relacoes-com-o-ambiente/relacoes-com-o-clima>. Acesso em: 23 jan. 2025.

MAFRA, Vitória Maria de Souza *et al.* **Análise de determinantes socioeconômicos da criminalidade no Brasil**. 2023. Disponível em: <https://riu.ufam.edu.br/handle/prefix/6696>. Acesso em: 07 fev. 2025.

MARGULIS, Sergio; DUBEUX, Carolina Burle Schmidt; MARCOVITCH, Jacques. **Economia da Mudança do Clima no Brasil: Custos e Oportunidades**. São Paulo: IBEP Gráfica, 2010. Disponível em: <http://www.economiadoclima.org.br>. Acesso em: 17 jan. 2025.

MESQUITA, Rafael; FERNANDES, Antônio Alves Tôrres; FIGUEIREDO FILHO, Dalson Britto. Uma introdução à regressão com dados de painel. **Revista Política Hoje**, v. 30, n. 1, p. 434-507, 2021.

NEUMAIER, Norman; NEPOMUCENO, Alexandre Lima; FARIAS, José Renato Bouças. Exigências Climáticas. EMBRAPA. Disponível em: <https://www.embrapa.br/agencia-de-informacao-tecnologica/cultivos/soja/pre-producao/caracteristicas-da-especie-e-relacoes-com-o-ambiente/exigencias-climaticas>. Acesso em: 09 fev. 2025.

OLIVEIRA, Gabriela El-Jaick Rapozo Leoni Lopes de; GARCIA, Márcio; PINTO, Gustavo. **Impactos das Mudanças Climáticas sobre a Produtividade Agrícola do Brasil**. 2021. Pontifícia Universidade Católica, Rio de Janeiro, 2021. Disponível em: https://www.econ.puc-rio.br/uploads/adm/trabalhos/files/Gabriela_El-Jaick_R_L_L_de_O_Mono_21.2.pdf. Acesso em: 05 fev. 2025.

OLIVEIRA, Ricardo; SANTOS, Ana Paula. Temperatura. Embrapa, 2023. Disponível em: <https://clima.cpao.embrapa.br/>. Acesso em: 19 jan. 2025.

PAINEL INTERGOVERNAMENTAL SOBRE MUDANÇA DO CLIMA. **Mudança do clima 2023: relatório síntese**. Genebra: IPCC, 2023. Disponível em: https://antigo.mctic.gov.br/mctic/opencms/ciencia/SEPED/clima/ciencia_do_clima/painel_intergovernamental_sobre_mudanca_do_clima.html. Acesso em: 02 fev. 2024.

PARANÁ, DEPARTAMENTO DE ECONOMIA RURAL. **Produção anual – agricultura: comparativo Paraná/Brasil**. Curitiba: SAEB/DERAL, 2024. Disponível em: <https://www.agricultura.pr.gov.br/deral/ProducaoAnual>. Acesso em: 16 dez. 2024.

PEREDA, Paula Carvalho; ALVES, Denisard. **Econometria aplicada**. São Paulo: Cengage Learning, 2018.

PEREIRA, Vinícios Gabriel Caneppele *et al.* Exigências agroclimáticas para a cultura do feijão (*Phaseolus vulgaris* L.). **Revista Brasileira de Energias Renováveis**, v. 3, n. 1, 2014. Disponível em: <https://revistas.ufpr.br/rber/article/view/36917>. Acesso em: 09 fev. 2025.

PINTO, Pablo Aurélio Lacerda de almeida; SILVA, Wallysson Klebson de Medeiros; JUNIOR, Luiz Moreira Coelho. **Mudanças climáticas e impactos na produção da cana-de-açúcar na paraíba**. 2017. Disponível em: <https://engemausp.submissao.com.br/19/anais/arquivos/423.pdf>. Acesso em: 02 fev. 2025.

SANTOS, Cárliton Vieira dos; OLIVEIRA, Aryeverton Fortes de; FERREIRA FILHO, Joaquim Bento de Souza. Potenciais impactos das mudanças climáticas sobre a agricultura e a

economia nas diferentes regiões do Brasil. **Revista de Economia e Sociologia Rural**, v. 60, n. 1, 2021. Disponível em: <https://doi.org/10.1590/1806-9479.2021.220611>. Acesso em: 15 jan. 2025.

SANTOS, Roziane Sobreira dos *et al.* Avaliação da relação seca/produtividade agrícola em cenário de mudanças climáticas. **Revista Brasileira de Meteorologia**, v. 26, p. 313-321, 2011. Disponível em: <https://www.scielo.br/j/rbmet/a/sf7HQ8bbB6BbVJbGMr4QPBk/?lang=pt>. Acesso em: 07 fev. 2025.

SILVA, Daniele Paloma da. **Mudanças climáticas, políticas de adaptação, agricultura e o cenário para o Brasil**. 2019. Trabalho de Conclusão de Curso. Disponível em: <https://repositorio.ufpe.br/handle/123456789/42658>. Acesso em: 06 de fevereiro de 2025.

SILVA, João Carlos da; PEREIRA, Maria Fernanda. **Trigo**. EMBRAPA, 2023. Disponível em: <https://www.embrapa.br/trigo>. Acesso em: 09 fev. 2025.

SILVA, Maria Elisa Siqueira; GUETTER, Alexandre K. Mudanças climáticas regionais observadas no estado do Paraná. **Terra livre**, n. 20, p. 111-126, 2003. Disponível em: <https://publicacoes.agb.org.br/terralivre/article/view/178>. Acesso em: 13 fev. 2025.

SILVA, Silvando Carlos da; HEINEMANN, Alexandre Bryan. Clima. **Embrapa Arroz e Feijão**, 2023. Disponível em: <https://www.embrapa.br/agencia-de-informacao-tecnologica/cultivos/feijao/pre-producao/clima>. Acesso em: 15 jan. 2025.

SILVA, Wallysson Klebson de Medeiros *et al.* **Influência das mudanças climáticas no cultivo da cana-de-açúcar no Estado da Paraíba**. 2019. Disponível em: <https://repositorio.ufpb.br/jspui/handle/123456789/16600>. Acesso em: 02 fev. 2025.

STERN, Nicholas. A economia das mudanças climáticas. **American Economic Review**, v. 98, n. 2, p. 1-37, 2007. Disponível em: <https://www.aeaweb.org/articles?id=10.1257/aer.98.2.1>. Acesso em: 06 fev. 2025.

WADSTED, Otto. O clima e a economia: análise de algumas culturas no estado de São Paulo. **Revista Brasileira de Economia**, v. 37, n. 2, p. 226-232, 1983.

WOOLDRIDGE, Jeffrey M. **Introdução à econometria: uma abordagem moderna**. 6. ed. São Paulo: Cengage Learning, 2016.