

O IMPACTO DAS MUDANÇAS CLIMÁTICAS NA EFICIÊNCIA DA PRODUÇÃO AGRÍCOLA NAS MICRORREGIÕES PARANAENSES (2001/2021)

Rogério Ribeiro¹
Gabriela Daiana Christ²
Jefferson Andronio Ramundo Staduto³

<http://dx.doi.org/10.21527/2237-6453.2025.62.16965>

Submetido em: 11/2/2025

Aceito em: 1/8/2025

Publicado em: 25/11/2025

RESUMO

O artigo investiga a influência das mudanças climáticas na produção agrícola do Paraná entre 2001 e 2021, enfocando a eficiência das microrregiões. Utilizando dados climáticos e agrícolas, adota as metodologias DEA e Índice de Malmquist para as análises. Os resultados indicam impactos alternativos das variáveis climáticas na eficiência, com efeito positivo ou negativo nas regiões. Conclui-se que as mudanças climáticas influenciam o progresso técnico. O estudo aborda pesquisas similares em outras regiões e destaca a importância de adaptação e crescimento da produtividade em contextos climáticos adversos. São apresentadas as limitações, que incluem o horizonte de dados e fatores econômicos não considerados. A pesquisa contribui para entendimento teórico e prático da relação entre clima e produtividade agrícola, fornecendo recomendações para tomadas de decisão e sugerindo expansões futuras na análise.

Palavras-chave: mudanças climáticas; produção agrícola; eficiência produtiva.

THE IMPACT OF CLIMATE CHANGE ON THE EFFICIENCY OF AGRICULTURAL PRODUCTION IN PARANÁ'S MICROREGIONS (2001/2021)

ABSTRACT

The article investigates the influence of climate change on agricultural production in Paraná between 2001 and 2021, focusing on the efficiency of microregions. Using climatic and agricultural data, it adopts the DEA and Malmquist Index methodologies for the analyses. The results indicate alternative impacts of climate variables on efficiency, with a positive or negative effect on regions. It is concluded that climate change influences technical progress. The study addresses similar research in other regions and highlights the importance of adaptation and productivity growth in adverse climate contexts. Limitations are presented, which include the data horizon and economic factors not considered. The research contributes to the theoretical and practical understanding of the relationship between climate and agricultural productivity, providing recommendations for decision-making and suggesting future expansions in the analysis.

Keywords: climate change; agricultural productivity; productive efficiency.

¹ Universidade Estadual do Oeste do Paraná (Unioeste). Programa de Pós-Graduação em Desenvolvimento Regional e Agronegócio (PGDRA). Toledo/PR, Brasil. <https://orcid.org/0009-0006-1315-4473>

² Universidade Estadual do Oeste do Paraná (Unioeste). Programa de Pós-Graduação em Desenvolvimento Regional e Agronegócio (PGDRA). Toledo/PR, Brasil. <https://orcid.org/0000-0002-5457-5884>

³ Universidade Estadual do Oeste do Paraná (Unioeste). Programa de Pós-Graduação em Desenvolvimento Regional e Agronegócio (PGDRA). Toledo/PR, Brasil. <https://orcid.org/0000-0003-1855-1292>

INTRODUÇÃO

A agricultura é uma atividade fundamental para garantir a segurança alimentar. Assim sendo, as mudanças climáticas têm impacto significativo na produção agrícola (Fusco *et al.*, 2023). O impacto das mudanças climáticas na eficiência da produção agrícola nas principais regiões agrícolas do mundo tem sido abordado por diferentes pesquisadores em várias partes do planeta (Guo *et al.*, 2022), na Itália (Fusco *et al.*, 2023), na China (Sun *et al.*, 2022), no Brasil (Rattis *et al.*, 2021).

Há, portanto, uma lacuna no conhecimento científico sobre a questão com a qual este estudo pretende contribuir e, portanto, cumpre indagar: Qual foi o impacto das mudanças climáticas nas microrregiões do Paraná no período de 2001 a 2021 em relação à eficiência e produção agrícola, e como esses fatores estão interligados? Em outras palavras, este estudo tem como objetivo analisar a influência das mudanças climáticas na eficiência e na produção agrícola das microrregiões paranaenses durante o período de 2001 a 2021.

Este artigo utilizou dados de produção agrícola e climáticos do Estado do Paraná, inserido na região Sul do Brasil, considerando suas 39 microrregiões homogêneas (nas quais estão inseridos os 399 municípios paranaenses) de 2001 a 2021. O modelo de análise envoltória de dados (DEA) foi usado para calcular a eficiência da produção agrícola com e sem fatores climáticos, e a comparação e análise de dados foram realizadas entre diferentes períodos e regiões. Também foi utilizado o Índice de Malmquist para avaliar a variação da Produtividade Total dos Fatores (PTF) com e sem os fatores climáticos.

Além de comparar e analisar outras regiões com o propósito de garantir a segurança alimentar global (Guo *et al.*, 2022), este estudo encontra sua justificativa na significativa contribuição do Estado do Paraná como produtor de alimentos (Christ; Alves; Eberhardt, 2023). Essa atividade desempenha um papel crucial no dinamismo da economia brasileira. Ademais, há a necessidade premente de empregar informações científicas e institucionais para diagnosticar a interseção entre o desempenho ambiental e econômico da produção agrícola no Paraná, bem como suas implicações nas mudanças climáticas.

Este artigo está organizado em cinco seções. Além da introdução que contextualiza o leitor ao tema, a segunda seção apresenta um marco teórico sobre os ODS e as mudanças climáticas na produtividade agrícola. Na sequência tem-se o delineamento metodológico, indicando o *modus operandi* executado pelos autores para responder ao objetivo desta pesquisa. Na quarta seção consta a análise dos dados e resultados e, finalmente, na última seção são destacados os principais resultados obtidos e o que se conclui por meio deles.

AS MUDANÇAS CLIMÁTICAS NA PRODUTIVIDADE AGRÍCOLA

Considerando o impacto das mudanças climáticas na eficiência da produção agrícola nas principais regiões agrícolas do mundo, por meio do modelo de análise envoltória de dados-Malmquist foi possível estimar a produtividade agrícola com e sem a presença de fatores climáticos, e a partir de então, comparações e análises de dados foram realizadas entre anos (1992 a 2018) e regiões (43 países). Os resultados mostram que fatores climáticos podem superestimar a produtividade agrícola, e, em geral, os fatores climáticos têm um impacto positivo na produção agrícola na África Subsaariana e na América Latina e um impacto negativo em outras áreas (Guo *et al.*, 2022).

Além disso, o impacto das mudanças climáticas no progresso técnico é maior do que o impacto na eficiência técnica. De acordo com os resultados, os autores (Guo *et al.*, 2022) concluíram que os departamentos relevantes devem prestar atenção ao desenvolvimento da tecnologia agrícola sob as mudanças climáticas e devem realizar uma gestão adequada com base na localização geográfica e nas condições climáticas.

Na Itália, a avaliação do desempenho ambiental e econômico da agricultura em termos de ecoeficiência foi medida a partir da Análise Envoltória de Dados (DEA). Fusco *et al.* (2023) calcularam a ecoeficiência regional de empresas agrícolas italianas, com foco no uso excessivo de água e energia, bem como no uso de fertilizantes químicos. Os resultados mostraram que as regiões italianas com melhor ecoeficiência são Alto Adige, Trentino e Calábria quando todas as três pressões são analisadas juntas (pontuação de ecoeficiência igual a 1). Por outro lado, as piores regiões italianas com pontuação de ecoeficiência inferior a 0,46 são Umbria, Puglia, Molise, Marche e Lazio.

Na China pesquisadores aplicaram os métodos DEA e *Life Cycle Assessment* (LCA) com estatísticas da produção de suínos, comparando o impacto ambiental em cada estágio antes e depois da otimização, com o objetivo de calcular a entrada de recursos e o consumo de energia no sistema de produção de suínos e realizar menor investimento e obter maior eficiência (Sun *et al.*, 2022). Entre outras considerações, os autores concluíram que a redução do uso de fertilizantes químicos e de energia elétrica são formas mais eficazes de reduzir as emissões de gases de efeito estufa do que a otimização da entrada de recursos e do consumo de energia.

Na região do Mediterrâneo (Marrocos, Argélia, Tunísia, França, Itália e Espanha), com o objetivo de analisar o crescimento da produtividade agrícola usando os índices de Malmquist da Produtividade Total dos Fatores (PTF) e seus componentes, Jeder (2023) identificou um ganho de produtividade dos fatores da região e de alguns países como Tunísia, Marrocos e Espanha. Para o autor, grande parte desse ganho na produtividade total dos fatores é explicada por uma mudança na eficiência tecnológica, e não por uma mudança na eficiência técnica. De fato, a mudança na eficiência técnica foi um tanto modesta devido à pequena mudança na escala de eficiência e estagnação na eficiência pura.

Estudo conduzido por Ghaffari, Cook e Lee (2002) lança luz sobre as complexidades das alterações climáticas e seus impactos potenciais na produção agrícola das regiões temperadas da Europa Ocidental. Ao explorar as interações entre o clima e o rendimento das culturas, os pesquisadores destacam a relevância da localização geográfica no cultivo agrícola. De fato, suas descobertas indicam que as mudanças climáticas podem induzir efeitos tanto positivos quanto negativos, acarretando uma série de consequências variáveis para as atividades agrícolas. Trabalhos de outros autores, como Jones e Thorton (2003) e Parry *et al.* (2004) atestam a mesma narrativa.

No Brasil a expansão e intensificação agrícola na região conhecida por Matopiba (Estados de Mato Grosso, Tocantins, Piauí, Bahia) e a aproximação de um limite climático para a produção de sequeiro foi avaliada por Rattis *et al.* (2021). Os resultados mostraram que os rendimentos diminuem em anos com chuvas excepcionalmente baixas ou alta aridez durante os estágios iniciais de desenvolvimento da cultura – um padrão observado tanto em áreas irrigadas quanto em sequeiro. Embora a expansão e a intensificação agrícola tenham aumentado ao longo do tempo, o clima quente e seco durante os eventos de seca diminuiu sua taxa de crescimento.

Para os autores, o aquecimento e a seca regionais recentes já empurraram 28% das atuais terras agrícolas para fora de seu espaço climático ideal.

Conforme abordado por Silva e Vieira Filho (2019), pesquisas têm evidenciado que determinadas geografias globais têm potencial de serem favorecidas pelas transformações climáticas, ao passo que outras correm o risco de sofrer prejuízos. A capacidade de ajuste por parte dos agricultores às mudanças climáticas desempenha um papel fundamental na sustentabilidade e no avanço da produtividade agropecuária. Adicionalmente, é imperativo o desenvolvimento de políticas governamentais e a alocação de recursos privados em estratégias de adaptação, visando a mitigar as ramificações das alterações climáticas no âmbito agrícola.

A título de exemplo, análises indicam que as variações climáticas no Brasil têm o potencial de ocasionar quedas substanciais no rendimento agrícola, exacerbando disparidades regionais. Nesse contexto, a disseminação de medidas direcionadas à adaptação climática emerge como uma demanda fundamental, especialmente nas regiões menos privilegiadas do país. É essencial, para se promover o crescimento da produtividade agrícola, introduzir estratégias que capacitem os produtores rurais a enfrentar os desafios iminentes, levando em conta a complexa interação entre mudanças climáticas, práticas agrícolas e fatores socioeconômicos (Silva; Vieira Filho, 2019).

Nesse sentido, considerando a importância estratégica do setor agrícola brasileiro e notadamente paranaense (Christ; Alves; Eberhardt, 2023), bem como os impactos ambientais que suas atividades podem causar no território (Rattis *et al.*, 2021), há a necessidade de usar informações científicas e institucionais para diagnosticar a combinação do desempenho ambiental e econômico da produção agrícola do Paraná e suas implicações nas mudanças climáticas.

DELINEAMENTO METODOLÓGICO

A escolha do Estado do Paraná como objeto de estudo nesta pesquisa justifica-se pela sua significativa relevância no contexto agrícola e econômico do Brasil. Compreendendo 2,3% do território nacional e abrangendo uma extensão territorial de 199.298,982 km², o Estado desempenha um papel crucial na produção agrícola do país. De acordo com o Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística (IBGE, 2020), a rica diversidade geográfica e climática do Paraná contribui para a criação de ambientes produtivos variados, tornando-o uma região de grande interesse para investigações em desenvolvimento rural.

O Paraná destaca-se por sua complexa estrutura regional, composta por 399 municípios que estão organizados em 10 mesorregiões homogêneas. Adicionalmente, essa subdivisão regional abrange 39 microrregiões homogêneas, o que viabiliza a realização de estudos que capturam as particularidades e heterogeneidades inerentes ao Estado. Essas microrregiões permitem a análise em diferentes níveis de agregação, o que é fundamental para compreender as dinâmicas locais e as influências contextuais nos processos de desenvolvimento rural e agrícola.

Ao direcionar a atenção para as microrregiões do Paraná é possível desvendar padrões específicos de produtividade e eficiência agrícola, bem como compreender como fatores locais e ambientais, incluindo as variáveis climáticas, influenciam esses resultados. A análise detalhada

dessas microrregiões permite uma visão mais precisa das tendências e dos impactos das variáveis climáticas na produção agrícola, enriquecendo a compreensão dos desafios e oportunidades que envolvem o desenvolvimento rural sustentável nessa região (Monteiro, 2009).

Dessa forma, esta pesquisa concentra-se em explorar as microrregiões do Estado do Paraná para avaliar a influência das variáveis climáticas na produtividade e eficiência da produção agrícola. Ao considerar as particularidades locais, nossa análise visa a fornecer percepções valiosas para o planejamento e instituição de políticas agrícolas e de desenvolvimento rural, com o objetivo de promover um crescimento sustentável e resiliente nesse contexto geográfico e econômico singular.

Dados e variáveis

A produção agrícola desempenha um papel fundamental na compreensão da economia e da sustentabilidade de uma região. Entre os diversos aspectos que influenciam o setor, as lavouras permanentes e temporárias emergem como protagonistas, desempenhando um papel crucial na produção de alimentos, geração de renda e configuração do cenário agrícola (FAO, 2018). Nesse contexto, este estudo analisa a eficiência da produção agrícola e a evolução da produtividade total dos fatores nas microrregiões geográficas do Estado do Paraná, concentrando-se nas lavouras permanentes e temporárias, categorias definidas pelo Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística (IBGE) em sua Pesquisa Agrícola Municipal.

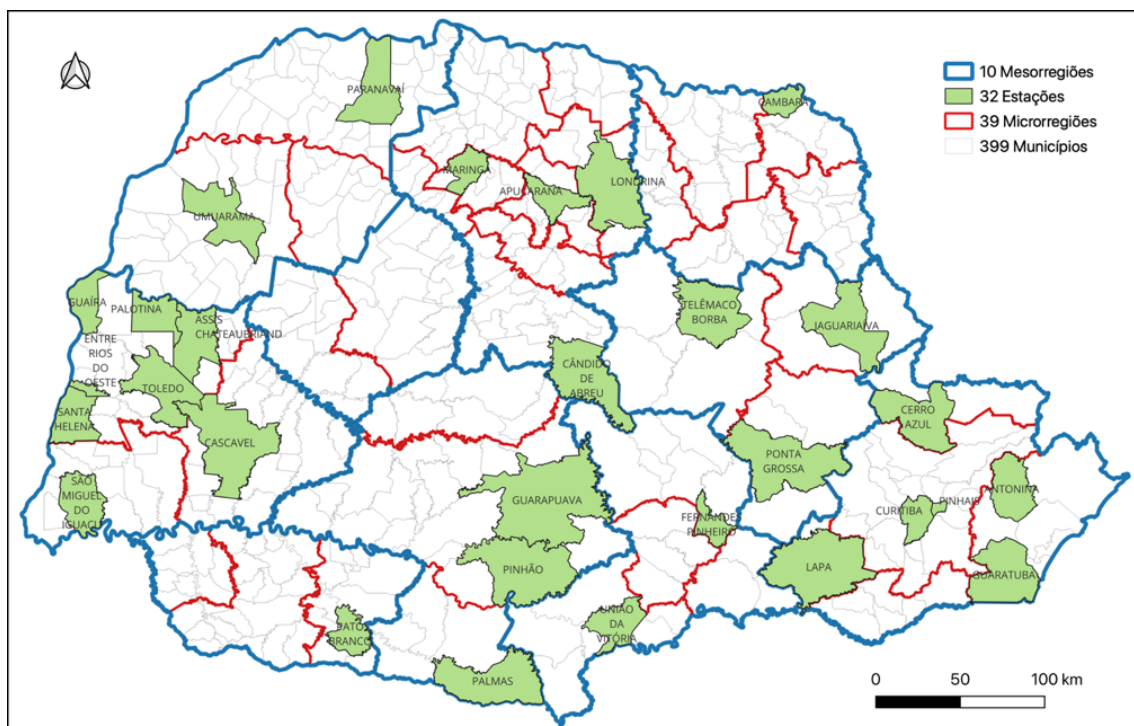
A decisão de focalizar a pesquisa nas lavouras permanentes e temporárias é embasada por diversas razões que sustentam a relevância deste estudo. Essas categorias representam pilares cruciais da atividade agrícola, desempenhando um papel de destaque na economia paranaense ao contribuírem significativamente para a geração de empregos, exportações e renda dos agricultores. A diversidade agrícola do Estado, abrangendo culturas desde café, frutas e plantações florestais até soja, milho e trigo, proporciona um contexto rico para analisar uma variedade de sistemas de produção e suas implicações.

Para este estudo foram selecionadas as microrregiões do Paraná, o quinto Estado mais populoso do Brasil, com uma população de 11,4 milhões de habitantes em 2022, de acordo com IBGE (2022). Além disso, o Estado possui o quarto maior Produto Interno Bruto, com R\$ 487,9 bilhões a preços correntes em 2020, e é o quinto Estado em número de municípios, atrás apenas de Minas Gerais (853), São Paulo (645), Rio Grande do Sul (497) e Bahia (417). O Paraná possui um total de 399 municípios, de acordo com o IBGE (2023).

Este estudo tem como objetivo analisar a influência das mudanças climáticas na produção agrícola das microrregiões paranaenses durante o período de 2001 a 2021. A escolha desse período é justificada pela disponibilidade de dados climáticos, uma vez o Sistema de Tecnologia e Monitoramento Ambiental do Paraná (Simepar) possui uma série de dados desde junho de 1997, observando-se que para todas as estações climáticas os dados são presentes desde o ano de 2001.

Os dados de produção e insumos agrícolas foram diretamente acessados por meio do portal de Internet do IBGE e os dados de empregos formais por meio de acesso *on-line* às bases de dados do Programa de Disseminação de Estatísticas do Trabalho do Ministério do Trabalho. Foram definidas as variáveis envolvidas nos métodos escolhidos, que são a Análise Envoltória de Dados (DEA) e o Índice de Malmquist. Para isso, foi necessário definir as variáveis de insumos (*inputs*) e as de produtos (*outputs*).

Figura 1 – Estações meteorológicas do Simepar



Fonte: Elaborada pelos autores (2023).

As variáveis de produtos utilizadas foram o valor bruto da produção e a quantidade produzida das lavouras temporárias e permanentes. Já as variáveis de insumos de produção consideradas foram a área plantada, área colhida, número de empregos formais na agricultura, número de tratores e percentual de estabelecimentos que efetuam adubação. Como variáveis climáticas, aqui consideradas como insumos, foram consideradas a temperatura, a umidade relativa do ar, a precipitação acumulada e a radiação média. O Quadro 1 detalha todas estas variáveis.

Quadro 1 – Insumos e produtos considerados nas análises

Tipo	Descrição	Fonte
Produto (<i>Output</i>)	Valor da produção (Mil Reais) das lavouras temporárias e permanentes	IBGE – Produção Agrícola Municipal
Produto (<i>Output</i>)	Quantidade produzida (Toneladas) das lavouras temporárias e permanentes	IBGE – Produção Agrícola Municipal
Insumo (<i>Input</i>)	Área plantada ou destinada à colheita (Hectares) das lavouras temporárias e permanentes	IBGE – Produção Agrícola Municipal
Insumo (<i>Input</i>)	Área colhida (Hectares) das lavouras temporárias e permanentes	IBGE – Produção Agrícola Municipal
Insumo (<i>Input</i>)	Empregos formais no subsetor do IBGE da agricultura	RAIS/MTE
Insumo (<i>Input</i>)	Número de tratores existentes nos estabelecimentos agropecuários (Unidades)	IBGE – Censo Agropecuário
Insumo (<i>Input</i>)	Percentual de estabelecimentos agropecuários (Unidades) que fizeram adubação	IBGE – Censo Agropecuário
Insumo (<i>Input</i>) Variável climática	Temperatura média anual (°C)	Simepar
Insumo (<i>Input</i>) Variável climática	Umidade relativa média anual (%)	Simepar
Insumo (<i>Input</i>) Variável climática	Precipitação acumulada no ano (mm)	Simepar
Insumo (<i>Input</i>) Variável climática	Radiação média anual (W/m ²)	Simepar

Fonte: Elaborado pelos autores (2025).

No âmbito das variáveis climáticas, foram priorizados fatores essenciais que exercem influência nas condições ambientais. A precipitação (mm) foi escolhida para representar o acúmulo de água em uma superfície horizontal, deixando de lado processos de infiltração, evaporação e escoamento. A temperatura (°C) reflete o estado térmico do ar, desconsiderando o impacto direto da radiação solar. Adicionalmente, a inclusão da umidade relativa do ar oferece um aspecto crucial para a análise, considerando a proporção de vapor d'água presente no ar em relação à máxima capacidade de retenção a uma determinada temperatura, o que é essencial para a compreensão da umidade atmosférica.

Por fim, a radiação de ondas curtas (W/m²) foi adotada para expressar a quantidade de radiação solar recebida pela Terra, visto que a radiação solar atinge o planeta na forma de ondas curtas. Essa seleção metódica tem como objetivo proporcionar uma avaliação ampla e contextualizada das influências climáticas sobre a produção agrícola, contemplando tanto os aspectos relacionados à água quanto os aspectos térmicos. Além disso, a inclusão da umidade relativa do ar como variável significativa busca compreender a complexidade do ambiente atmosférico. O Quadro 2 detalha as estatísticas descritivas de todas as variáveis consideradas neste estudo.

Quadro 2 – Estatística descritiva das variáveis utilizadas

Variáveis	Unidade	Média	Desvio padrão	Mín.	Máx.
Valor da produção das lavouras temporárias e permanentes (atualizado pelo IPCA/IBGE)	Mil Reais	1.125.199	830.580,6	53.079	6.391.435
Quantidade produzida das lavouras temporárias e permanentes	Toneladas	2.035.727	2.311.238	98.652	12.209.993
Área plantada ou destinada à colheita das lavouras temporárias e permanentes	Hectares	256.471,6	186.933,9	7.770	982.354
Área colhida das lavouras temporárias e permanentes	Hectares	254.908,5	186.015,4	7.770	981.054
Empregos formais no subsetor do IBGE da agricultura	Pessoas	2.505,9	1.847,2	139	9.815
Número de tratores existentes nos estabelecimentos agropecuários	Unidades	3.237,4	2.166,0	113	15.463
Percentual de estabelecimentos agropecuários que fizeram adubação	%	64,58	15,22	13,53	92,51
Temperatura média anual	°C	20,31	2,01	16,02	23,94
Umidade relativa média anual	%	77,40	5,89	61,73	90,89
Precipitação acumulada no ano	Mm	1.547,01	386,47	814,2	3.463
Radiação média anual	W/m²	351,57	51,08	124,98	475,15

Fonte: Elaborado pelos autores (2025).

As metodologias selecionadas para a análise compreendem a Análise Envoltória de Dados (DEA, *Data Envelopment Analysis*) e o Índice de Malmquist, ambas empregando a modelagem de uma função de produção. No intuito de definir os elementos produtivos (*outputs*) desta função é fundamental empreender a identificação preliminar dos fatores de entrada (*inputs*).

Todas as variáveis consideradas como produtos mantêm uma relação intrínseca com os resultados provenientes das lavouras permanentes e temporárias. Antecipa-se que o aumento da eficiência no processo produtivo e a ampliação da intensidade dos insumos estejam associados ao incremento na produção dessas variáveis. Os insumos, por sua vez, compreendem tanto variáveis inerentes à produção agrícola, como área plantada, área colhida, empregos formais, quantidade de tratores e proporção de propriedades submetidas à adubação, quanto variáveis climáticas, englobando temperatura, umidade relativa do ar, precipitação e radiação solar. Estas últimas são incorporadas ao modelo na condição de insumos que se pressupõem exercerem influência direta sobre a eficiência técnica, podendo, quando desfavoráveis, provocar significativa redução nos níveis de produtividade observados.

Análise Envoltória de Dados (DEA)

Os conceitos intrínsecos de eficácia, eficiência e produtividade desempenham papéis distintos e de destaque na avaliação de desempenho. Enquanto uma ação pode ser realizada com eficácia sem, no entanto, otimizar os recursos envolvidos, o inverso também é válido: a eficiência pode ser alcançada, mas sem garantir que a ação efetivamente alcance seu propósito desejado. A convergência desses princípios define o conceito de efetividade, que representa a capacidade de não somente executar uma ação com sucesso, mas também de fazê-lo de forma economicamente prudente, maximizando os recursos disponíveis (Mariano, 2007).

A eficiência, em sua essência, reflete a capacidade de uma unidade produtiva de gerar bens ou serviços com alta produtividade e performance, utilizando uma quantidade mínima de recursos, como tempo, mão de obra e insumos, ou de produzir mais bens ou serviços utilizando a mesma quantidade de recursos. A eficácia, por sua vez, refere-se à habilidade de alcançar o efeito desejado por meio da realização de uma ação direcionada. A sinergia dessas dimensões culmina na efetividade, em que a produtividade é otimizada pela harmonização precisa entre eficiência e eficácia, assegurando não apenas uma apropriação eficaz de recursos, mas também a obtenção de resultados tangíveis alinhados com os objetivos estabelecidos.

Na análise em questão o enfoque recai sobre a eficiência técnica, que emerge quando as entidades produtoras engendram a combinação habilidosa dos insumos para atingir determinados níveis de produtos da maneira mais eficiente possível. Este conceito de eficiência não apenas propicia uma avaliação refinada da produtividade presente, mas também lança luz sobre a alocação ideal de recursos em meio a complexas variáveis, com o intuito de alcançar um desempenho mais acurado e eficaz (Mariano, 2007).

Para a avaliação da eficiência, será empregada uma abordagem de mensuração não paramétrica, desenvolvida com base nas contribuições fundamentais de Banker, Charnes e Cooper (1984). No primeiro modelo incorporam-se os princípios dos Retornos Constantes de Escala (RCE), o que significa que qualquer variação nos insumos resultará em uma variação proporcional correspondente nos produtos. Enquanto isso, o segundo modelo adota o conceito de Retornos Variáveis de Escala (RVE), considerando que a variação dos produtos não segue uma proporção fixa em relação aos volumes específicos de insumos.

A Análise Envoltória de Dados (DEA), uma metodologia não paramétrica, vale-se da programação matemática para definir os contornos de produção de unidades produtivas, também conhecidas como Unidades Tomadoras de Decisão (DMUs, do inglês *Decision Making Units*). A DEA tem como foco central avaliar a eficiência relativa de uma amostra de organizações produtivas, sem restringir-se exclusivamente ao aspecto financeiro, conforme exposto por Ferreira e Gomes (2009).

De acordo com Ferreira e Gomes (2009), a DEA foi concebida para avaliar a eficiência técnica das unidades produtivas, em contextos nos quais a consideração restrita ao aspecto financeiro não é pertinente ou desejada. Como resultado, a conversão dos insumos e produtos em termos monetários e sua subsequente transformação em valores presentes não se fazem necessárias. A DEA otimiza cada observação individual com o intuito de calcular um limite de eficiência, traçado pelas unidades que ostentam eficiência de Pareto.

As técnicas de programação linear e a teoria da dualidade desempenham um papel fundamental na delimitação da fronteira de referência de uma tecnologia específica na metodologia da Análise Envoltória de Dados (DEA). Esta abordagem não paramétrica compreende um conjunto de modelos que oferecem diversas perspectivas interpretativas, conforme destacado por Lins *et al.* (2007).

No âmbito desses modelos, o destaque recai sobre o Modelo de Retornos Constantes de Escala (RCE), que fundamenta a eficiência na otimização da relação entre a soma ponderada das saídas (*outputs* virtuais) e a soma ponderada das entradas (*inputs* virtuais). Cada Unidade Tomadora de Decisão (DMU) detém a prerrogativa de determinar os pesos correspondentes a cada variável de entrada e saída, com a restrição de que tais pesos não resultem em uma relação superior a 1.

De acordo com Meza *et al.* (2005), a formalização de modelos de Análise Envoltória de Dados (DEA) destinados a retornos constantes de escala e focados nos insumos é realizada por meio de um Problema de Programação Linear (PPL), como ilustrado nas equações subsequentes. Essa abordagem possibilita a avaliação da distância entre cada observação individual e a fronteira, com base em um conjunto de observações, conforme discutido na literatura.

$$\text{Max } Ef_0 = \sum_{j=1}^s u_j y_{j0}$$

Sujeito às seguintes restrições:

$$\sum_{i=1}^r v_i x_{i0} = 1$$

$$\sum_{j=1}^s u_j y_{jk} - \sum_{i=1}^r v_i x_{ik} \leq 0, \forall k$$

$$v_i, u_j \geq 0, \forall i, j$$

Em que:

Ef_0 = eficiência da DMU em análise;

v_i, u_j = pesos de inputs i , com $i = 1, \dots, r$, e outputs j , com $j = 1, \dots, s$;

x_{ik} e y_{jk} = inputs i e outputs j a DMU k , $k = 1, \dots, n$; e

x_{i0} e y_{j0} = inputs i e outputs j da DMU 0.

A Análise Envoltória de Dados (DEA) é uma ferramenta metodológica robusta e amplamente empregada para a avaliação da eficiência, com a finalidade de identificar as melhores práticas e estabelecer comparações entre distintas unidades produtivas. Nesse contexto, o modelo DEA com retornos constantes de escala e enfoque em insumos emerge como uma abordagem de grande relevância para mensurar a eficiência técnica de tais unidades. Essa abordagem revela-se particularmente vantajosa quando considerações financeiras tradicionais não conseguem abarcar de forma abrangente a complexidade subjacente ao desempenho efetivo. Ao direcionar sua atenção aos insumos empregados na geração de resultados desejados, esse modelo direciona o foco para as eficiências subjacentes nas operações, proporcionando discernimentos intrínsecos para a otimização desses processos.

A estrutura intrínseca da função objetivo e das restrições inerentes a esse modelo confere-lhe uma base matemática sólida que direciona a avaliação da eficiência das unidades produtivas. Compreender esses elementos essenciais proporciona a base necessária para investigar minuciosamente como o modelo DEA analisa, interpreta e compara as diferentes entidades produtivas. Por meio desse entendimento é possível se habilitar a capturar a essência subjacente à análise de eficiência no contexto do modelo DEA com retornos constantes de escala e ênfase nos insumos, permitindo uma avaliação profunda de sua utilidade no âmbito das tomadas de decisão organizacionais e estratégicas.

Na presente pesquisa a obtenção de dados ocorreu a partir de várias fontes, conforme referenciadas no Quadro 1, e posteriormente organizados em planilhas eletrônicas. O modelo escolhido para a Análise Envoltória de Dados (DEA) baseia-se em retornos constantes de escala

e orientação a insumos. A condução da análise foi viabilizada mediante a utilização do *software* R e seu pacote “*benchmarking*”. Para apresentação e avaliação dos resultados, esses foram exportados para planilhas eletrônicas, quando passaram por um processo de consolidação e análise minuciosa.

Índice de Malmquist

A avaliação da produtividade, como extensivamente discutido na pesquisa de Ferreira e Gomes (2009), desempenha um papel central nas análises econômicas e empresariais. Essa avaliação frequentemente baseia-se no conceito de Produtividade Total dos Fatores (PTF), uma métrica que captura o aumento da produção líquida em relação ao crescimento dos insumos utilizados nos processos produtivos. A medição da produtividade, essencial para avaliar e comparar o desempenho produtivo entre diferentes entidades ou setores econômicos, é tradicionalmente realizada por meio de números-índices.

No contexto da medição da produtividade, os números-índices assumem uma importância significativa como ferramentas quantitativas e sistemáticas para quantificar mudanças ao longo do tempo. Entre os índices mais notáveis, como os índices de Laspeyres, Paasche, Fisher e Törnqvist, cada um possui abordagens específicas de cálculo e características que os distinguem. Esses números-índices desempenham um papel fundamental na análise de tendências de produtividade, permitindo a detecção de padrões, variações e oportunidades de aprimoramento nos processos produtivos.

A escolha cuidadosa do índice mais apropriado para um determinado contexto é essencial para garantir análises precisas e representativas da dinâmica da produtividade, contribuindo assim para decisões informadas e estratégias fundamentadas no âmbito econômico e empresarial (Ferreira; Gomes, 2009). Compreender a importância dessas métricas e sua aplicabilidade em diferentes contextos possibilita uma avaliação mais aprofundada das tendências produtivas e, conseqüentemente, embasa decisões que visam a aprimorar a eficiência e a competitividade em diversos setores da economia.

O Índice de Malmquist (IM) representa uma metodologia adotada para a avaliação do desempenho de produtividade de Unidades de Decisão (DMUs) ao longo de múltiplos períodos. Essa abordagem foi desenvolvida por Färe *et al.* (1994). Ao contrário dos índices de Fisher e Törnqvist, o IM não requer informações sobre valores de preços. O principal objetivo dessa técnica é analisar dois efeitos específicos: o efeito de emparelhamento (*catch-up effect*), que investiga as variações na eficiência técnica de produção ao longo do tempo, e o efeito de deslocamento da fronteira eficiente (*frontier-shift effect*), que destaca os progressos na produtividade das DMUs originados por mudanças em inovações tecnológicas e de gestão.

Para calcular o IM executa-se o algoritmo de programação linear da Análise Envoltória de Dados (DEA) com o intuito de construir a fronteira de produção em um período específico. Em seguida, calcula-se a proporção das distâncias entre dois pontos de produção pertencentes a diferentes momentos temporais da mesma unidade, em relação à fronteira previamente estabelecida.

Färe *et al.* (1994) propõem uma estratégia de cálculo do Índice de Malmquist (IM) que se apoia na média geométrica de dois índices distintos. Essa abordagem elimina a necessidade de escolher um desses índices como referência. A interpretação do IM é a seguinte: quando seu

valor ultrapassa 1, indica um aumento na Produtividade Total dos Fatores (PTF) ao longo dos períodos; se fica abaixo de 1, aponta para uma diminuição na PTF. Esses são os reflexos do efeito de equiparação (*catch-up effect*). No cenário em que os progressos de produtividade derivam de inovações tecnológicas, além do efeito de equiparação, também ocorre um deslocamento da fronteira eficiente (*frontier-shift effect*). Sob essa perspectiva, a equiparação é quantificada com base nas distâncias das DMUs em relação às fronteiras de eficiência.

O IM com orientação a insumo é composto pelos dois efeitos e representado pela equação:

$$IM_0 = \frac{\theta_0^t(x_0^t, y_0^t)}{\theta_0^{t+1}(x_0^{t+1}, y_0^{t+1})} \cdot \left[\frac{\theta_0^{t+1}(x_0^{t+1}, y_0^{t+1})}{\theta_0^t(x_0^{t+1}, y_0^{t+1})} \cdot \frac{\theta_0^{t+1}(x_0^t, y_0^t)}{\theta_0^t(x_0^t, y_0^t)} \right]^{\frac{1}{2}}$$

O primeiro termo da equação, $\left(\frac{\theta_0^t(x_0^t, y_0^t)}{\theta_0^{t+1}(x_0^{t+1}, y_0^{t+1})} \right)$, encapsula o fenômeno do emparelhamento. Uma relação numérica superior a 1 denota um aprimoramento na eficiência técnica da DMU em análise; um valor igual a 1 indica a manutenção da eficiência no período em avaliação, enquanto um valor inferior a 1 sinaliza uma diminuição na eficiência técnica. A transformação na eficiência técnica, denominada de mudança na eficiência, pode ser segmentada em dois componentes distintos: a mudança na eficiência intrínseca (pech) e a mudança de escala (sech).

No que concerne ao segundo termo, $\left(\left[\frac{\theta_0^{t+1}(x_0^{t+1}, y_0^{t+1})}{\theta_0^t(x_0^{t+1}, y_0^{t+1})} \cdot \frac{\theta_0^{t+1}(x_0^t, y_0^t)}{\theta_0^t(x_0^t, y_0^t)} \right]^{\frac{1}{2}} \right)$, ele aborda o conceito de deslocamento da fronteira eficiente, um fenômeno desencadeado por transformações tecnológicas que designamos como mudanças técnicas.

A compreensão do Índice de Malmquist quando consideramos Retornos Constantes de Escala (RCE) e orientação para insumos ao longo de distintos períodos temporais é delineada da seguinte maneira, após a instituição das transformações pertinentes:

- Quando o IM é maior do que 1, significa que houve uma melhoria na produtividade total dos fatores (PTF) entre os períodos analisados da DMU;
- Quando o IM é igual a 1, não houve alteração na PTF entre os períodos da DMU;
- Quando o IM é menor do que 1, indica que houve uma piora na PTF entre os períodos da DMU.

Os mesmos conjuntos de dados empregados no procedimento de Análise Envoltória de Dados (DEA) foram igualmente utilizados para o cálculo do Índice de Malmquist (IM) associado a cada agrupamento regional. A determinação do IM foi efetuada sob a premissa de manutenção dos retornos de escala e orientação para insumos, fazendo uso do *software* DEAP na sua versão 2.1, desenvolvido por Tim Coelli, vinculado ao Centro de Análise de Eficiência e Produtividade da *University of Queensland*, situada na Austrália.

ANÁLISE DOS DADOS E RESULTADOS

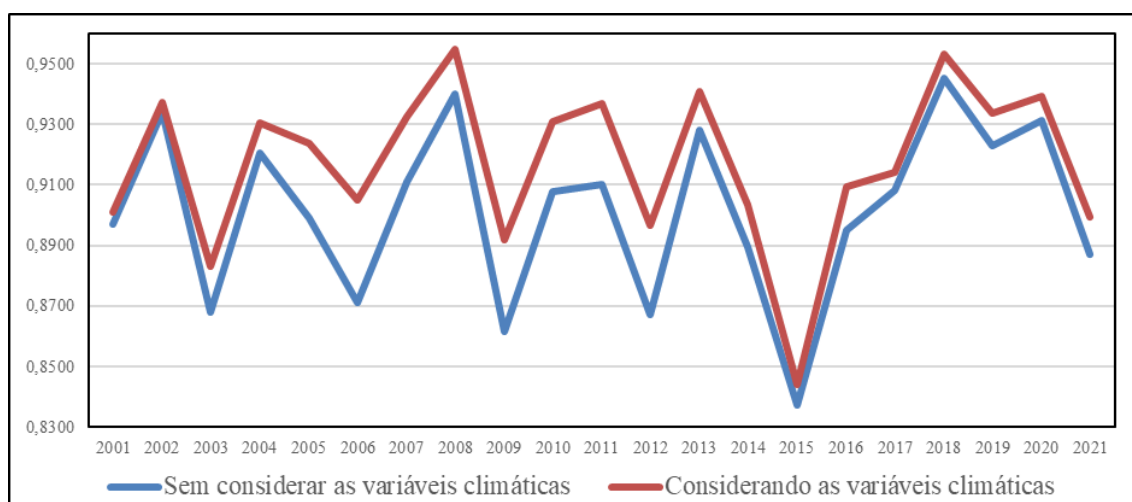
Escores de eficiência

Como delineado na seção anterior, a fase inicial deste estudo empreendeu o cálculo da eficiência técnica inerente a cada microrregião ao longo do amplo intervalo temporal de 2001 a 2021. Para dar início a esse processo, o primeiro passo consistiu na determinação do índice de eficiência correspondente a cada uma das microrregiões ao longo do período em questão, abordando tanto a abordagem com a inclusão das variáveis climáticas quanto a abordagem sem tal inclusão, visando a uma compreensão completa dos fatores influenciadores.

Ao analisarmos os resultados intrínsecos, conforme apresentados no Gráfico 1, no qual se encontram os índices médios de eficiência (DEA) das microrregiões do Estado do Paraná durante os anos compreendidos entre 2001 e 2021, destacam-se padrões distintos quando realizamos uma comparação entre os casos nos quais as variáveis climáticas são consideradas ou não ao longo do período de análise. Essa análise visual possibilita a identificação de tendências, flutuações e possíveis pontos de inflexão na eficiência das microrregiões, fornecendo uma base sólida para a discussão e interpretação dos resultados obtidos.

Quando não consideramos as variáveis climáticas, percebemos flutuações na eficiência das microrregiões ao longo dos anos. No início do período, em 2001, o índice de eficiência foi registrado em 0,8969, aumentando gradualmente até atingir seu pico em 2018, com um valor de 0,9454. Houve uma tendência de redução na eficiência até 2015. Nota-se um declínio notável em 2015, com um índice de 0,8371, seguido por uma recuperação gradual nos anos subsequentes até 2021, com um índice de 0,8869.

Gráfico 1 – Índice de eficiência da produção agrícola do estado do Paraná – média das microrregiões (2002/2021)



Fonte: Resultados da pesquisa (2025).

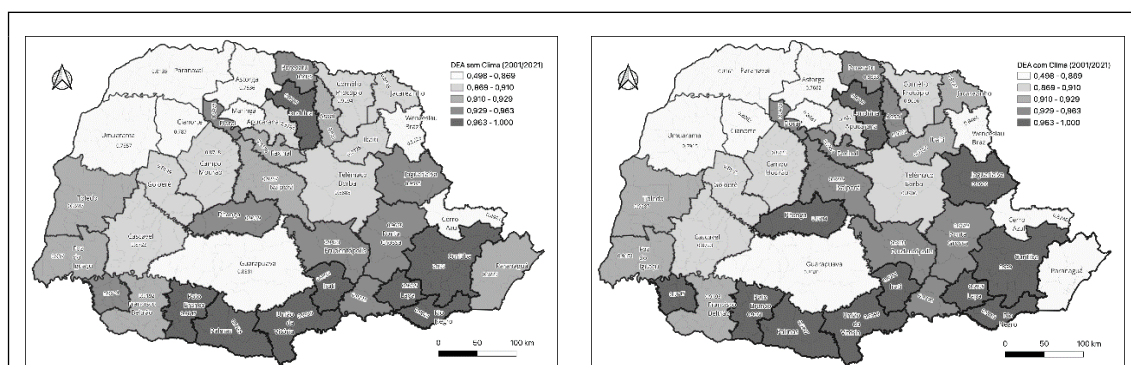
Ao considerarmos as variáveis climáticas, uma tendência ligeiramente diferente emerge. Os índices de eficiência são, em geral, mais altos em comparação com o cenário sem consideração das variáveis climáticas. O aumento na eficiência ao longo dos anos é mais consistente e menos sujeito a flutuações. Inicialmente, em 2001, o índice é de 0,9012, e há um crescimento

gradual até 2008, alcançando 0,9547. Observa-se uma pequena queda em 2009, seguida por um aumento constante até 2014, com índice de 0,9034. A partir de então, ocorre um declínio gradual até 2015, com um valor de 0,8439. Nos anos subsequentes, a eficiência apresenta uma trajetória ascendente até 2021, com um índice de 0,8995.

Considerando, portanto, a análise dos resultados, podemos inferir que a inclusão das variáveis climáticas tende a suavizar as flutuações e a proporcionar uma visão mais consistente da eficiência das microrregiões do Paraná ao longo dos anos. Tal resultado converge com pesquisas que utilizaram a mesma metodologia ao redor do globo (Fusco *et al.*, 2023; Guo *et al.*, 2022; Jeder, 2023; Rattis *et al.*, 2021).

A Figura 2 apresenta os índices médios de eficiência (DEA) para as microrregiões do Estado do Paraná no período de 2001 a 2021. Os resultados foram divididos em duas perspectivas: aquela em que as variáveis climáticas são desconsideradas e outra que as incorpora. Analisando esses resultados, observam-se padrões notáveis de eficiência, bem como mudanças quando levamos em conta ou não as variáveis climáticas.

Figura 2 – Índice de eficiência (DEA) médio para as microrregiões paranaenses com e sem considerar as variáveis climáticas – 2001/2021



Fonte: Resultados da pesquisa (2025).

Na análise que não considera as variáveis climáticas podemos notar uma série de flutuações nos índices de eficiência das microrregiões ao longo dos anos. Algumas microrregiões mais eficientes na maioria anos incluem as microrregiões da Lapa, Curitiba, União da Vitória, Rio Negro, Irati e Londrina, com um índice de eficiência muito próximo de 1,00, indicando uma alta eficiência. Microrregiões como Cerro Azul, Astorga, Umuarama e Cianorte demonstraram índices mais baixos, abaixo de 0,80, o que pode indicar desafios na alocação dos insumos agrícolas e até mesmo ausência de políticas públicas para a área.

Ao levar em conta as variáveis climáticas, percebemos uma tendência geral de aumento nos índices de eficiência, sugerindo que as variáveis climáticas podem estar influenciando positivamente a eficiência das microrregiões. Além disso, as discrepâncias entre as microrregiões parecem ser reduzidas, indicando que as variáveis climáticas podem estar nivelando o espaço produtivo.

Observa-se também que algumas microrregiões, como Paranaguá, Lapa e Curitiba, atingem um índice de eficiência de quase 1 quando as variáveis climáticas são consideradas. Isso pode ser atribuído a fatores geográficos e climáticos que influenciam a alocação de recursos e a

prestação de serviços públicos nessas áreas. Nesta análise somente as microrregiões de Astorga e Umuarama apresentaram índices de eficiência médios inferiores a 0,80.

As variáveis climáticas parecem desempenhar um papel significativo na eficiência das microrregiões do Paraná. A inclusão dessas variáveis parece nivelar a eficiência entre as microrregiões e, em alguns casos, elevar significativamente os índices de eficiência. Isso sugere a importância de considerar esses fatores ao avaliar a eficiência e a alocação de recursos públicos nas diferentes áreas.

Análise dinâmica

Os cálculos referentes ao crescimento da Produtividade Total dos Fatores (PTF) foram efetuados com base no Índice de Malmquist, cuja formulação foi proposta por Färe *et al.* (1994), juntamente com suas respectivas decomposições. Para a execução dessas análises, foi utilizado o *software* DEAP (Coelli, 1996), que permitiu a avaliação da dinâmica de eficiência ano após ano para todas as microrregiões, bem como a determinação da média de desempenho ao longo do período examinado. O Índice de Malmquist, em sua composição, engloba tanto a mudança na eficiência (*effch*), a qual é subdividida em eficiência pura (*pech*) e eficiência de escala (*sech*), quanto à mudança técnica (*techch*). A Tabela 1 apresenta os resultados por período – de 2001 a 2010, de 2011 a 2021 e no conjunto de 2001 a 2021 – para o Estado do Paraná.

Tabela 1 – Comparação da produtividade agrícola por período de tempo
– média das microrregiões paranaenses

Período	Sem fatores climáticos			Com fatores climáticos		
	<i>tfpch</i>	<i>techch</i>	<i>effch</i>	<i>tfpch</i>	<i>techch</i>	<i>effch</i>
2001-2010	1,088	1,075	1,012	1,096	1,097	0,999
2011-2021	1,098	1,093	1,004	1,105	1,106	0,999
2001-2021	1,097	1,084	1,012	1,104	1,102	1,002

Fonte: Resultados da pesquisa (2025).

A pesquisa realizada promoveu uma análise abrangente da eficiência na produção agrícola do Estado do Paraná ao longo de diferentes períodos temporais: 2001-2010, 2011-2021 e o conjunto mais amplo de 2001-2021. Os cálculos dos índices de eficiência foram conduzidos por meio do *software* DEAP, com foco na determinação do Índice de Malmquist, que oferece a compreensão acerca da Produtividade Total dos Fatores (*tfpch*). Esta última é um indicador essencial, composto por duas dimensões cruciais: a mudança técnica (*techch*) e a mudança de eficiência (*effch*).

Ao analisar os resultados sem considerar os fatores climáticos, é possível identificar um padrão de crescimento na Produtividade Total dos Fatores ao longo dos períodos. No intervalo de 2001-2010, observou-se um incremento de 8,8%, o que reflete um aumento de 7,5% atribuído à mudança técnica e um acréscimo de 1,2% oriundo da mudança de eficiência. Similarmente, no período de 2011-2021, verificou-se uma elevação de 9,8% na *tfpch*, observando-se que 9,3% dessa variação provém da mudança técnica, enquanto 0,4% advém da mudança de eficiência. A análise do período completo de 2001-2021 exibiu um aumento de 9,7% na Produtividade Total dos Fatores, com uma contribuição de 8,4% da mudança técnica e 1,2% da mudança de eficiência.

Ao incorporar os fatores climáticos nas análises, os resultados indicam uma dinâmica ligeiramente diferente. No intervalo de 2001-2010, a *tfpch* cresceu em 9,6%, com 9,7% desse aumento sendo associado à mudança técnica, enquanto a mudança de eficiência registrou uma variação próxima à estabilidade, com apenas -0,1%. Entre 2011-2021, a *tfpch* aumentou em 10,5%, com 10,6% dessa variação atribuída à mudança técnica e novamente uma variação mínima, -0,1%, referente à mudança de eficiência. A avaliação do período completo de 2001-2021 indicou um crescimento de 10,4% na Produtividade Total dos Fatores, com 10,2% decorrentes da mudança técnica e um leve acréscimo de 0,2% proveniente da mudança de eficiência.

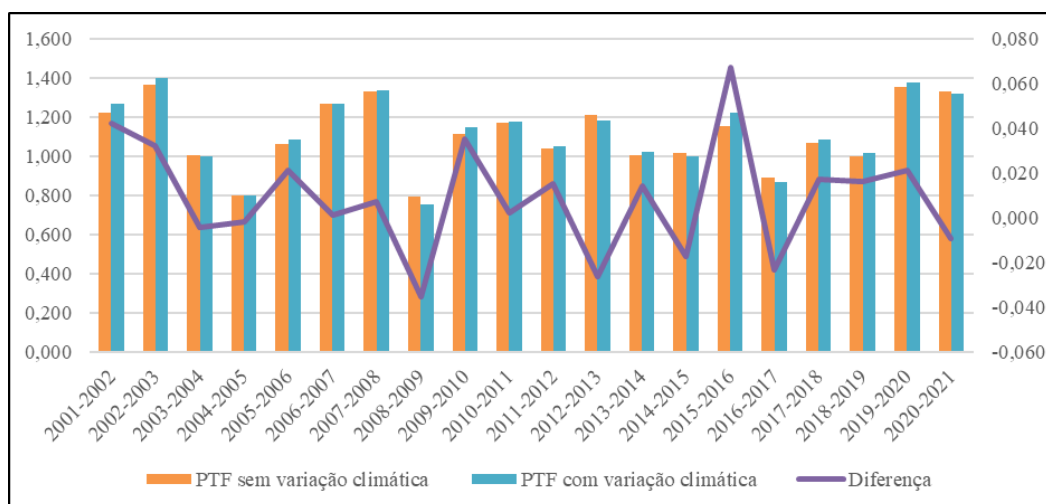
As análises evidenciam um aumento consistente na Produtividade Total dos Fatores ao longo dos diferentes períodos. A incorporação dos fatores climáticos influencia de maneira sutil a composição da mudança técnica e da mudança de eficiência, destacando-se que o impacto na mudança de eficiência é mais notável. Os resultados ressaltam a importância de considerar tanto fatores climáticos quanto aspectos técnicos e de eficiência ao avaliar o desenvolvimento da produção agrícola ao longo do tempo, reforçando as conclusões encontradas por Guo *et al.* (2022), em que os autores enfatizam que o impacto das alterações climáticas no progresso técnico é maior do que o impacto na eficiência técnica.

O Gráfico 2 apresenta a análise da diferença entre a Produtividade Total dos Fatores (PTF) da produção agrícola no Estado do Paraná, quando consideramos as variáveis climáticas e quando as desconsideramos. Essa diferença reflete o impacto específico dos fatores climáticos sobre a PTF e é um aspecto fundamental para compreender como o clima influencia a produtividade e o desenvolvimento rural.

Ao examinar a variação da PTF ao longo dos anos, é evidente que os fatores climáticos têm uma influência significativa na produtividade agrícola. Em 13 anos, dos 20 analisados, a inclusão da variação climática resulta em uma PTF mais alta, enquanto em 7 anos essa inclusão leva a uma PTF mais baixa.

As maiores diferenças positivas são registradas nos anos de 2015-2016 (0,067), 2001-2002 (0,042), 2009-2010 (0,035) e 2002-2003 (0,032), em que as variações entre as duas abordagens de análise ultrapassam 0,030.

Gráfico 2 – Produtividade agrícola com e sem fatores climáticos – média das microrregiões do Paraná (2001/2021)



Fonte: Resultados da pesquisa (2025).

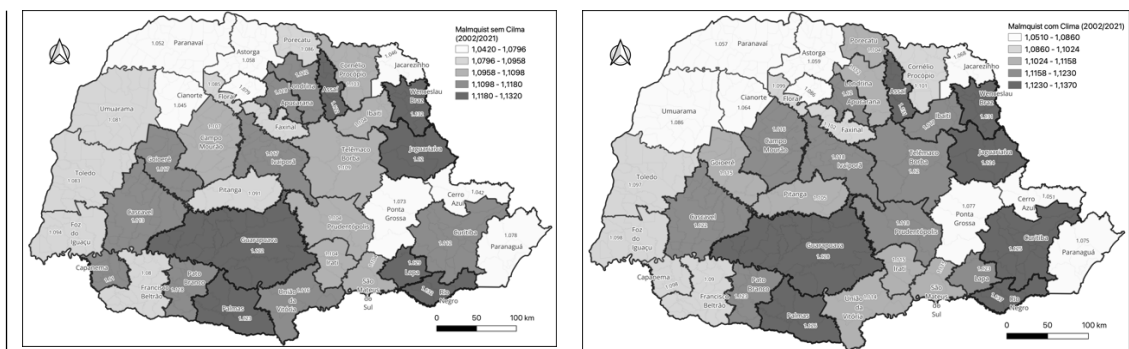
Em outros anos, no entanto, a PTF com variação climática é inferior à PTF sem variação climática, sugerindo um efeito adverso do clima na produtividade. As maiores diferenças negativas são observadas nos anos de 2008-2009 (-0,035), 2012-2013 (-0,026) e 2016-2017 (-0,023), quando as variações são notáveis, mostrando-se inferiores a -0,02.

Essas diferenças destacam a complexidade da relação entre os fatores climáticos e a produtividade agrícola. Enquanto em alguns anos o clima pode impulsionar positivamente a produtividade, em outros anos ele pode ter um efeito adverso. Isso ressalta a importância de considerar a variabilidade climática ao desenvolver estratégias de desenvolvimento rural e ao tomar decisões relacionadas à agricultura.

A análise das diferenças entre os resultados da PTF com e sem variação climática demonstra claramente que o clima exerce uma influência substancial sobre a produtividade da produção agrícola no Estado do Paraná. Essa compreensão é fundamental para promover um desenvolvimento rural resiliente e sustentável, levando em conta os desafios e oportunidades associados à variabilidade climática.

A análise da PTF das microrregiões tem seus resultados apresentados na Figura 3, na qual a variação da Produtividade Total dos Fatores (PTF) revela informações cruciais sobre os impactos climáticos na eficiência da produção. É essencial destacar as maiores e menores variações em ambos os cenários para compreender de forma mais completa como os fatores climáticos influenciam o desenvolvimento rural.

Figura 3 – Variação na Produtividade Total dos Fatores (PTF) médios para as microrregiões paranaenses com e sem considerar as variáveis climáticas – 2001/2021



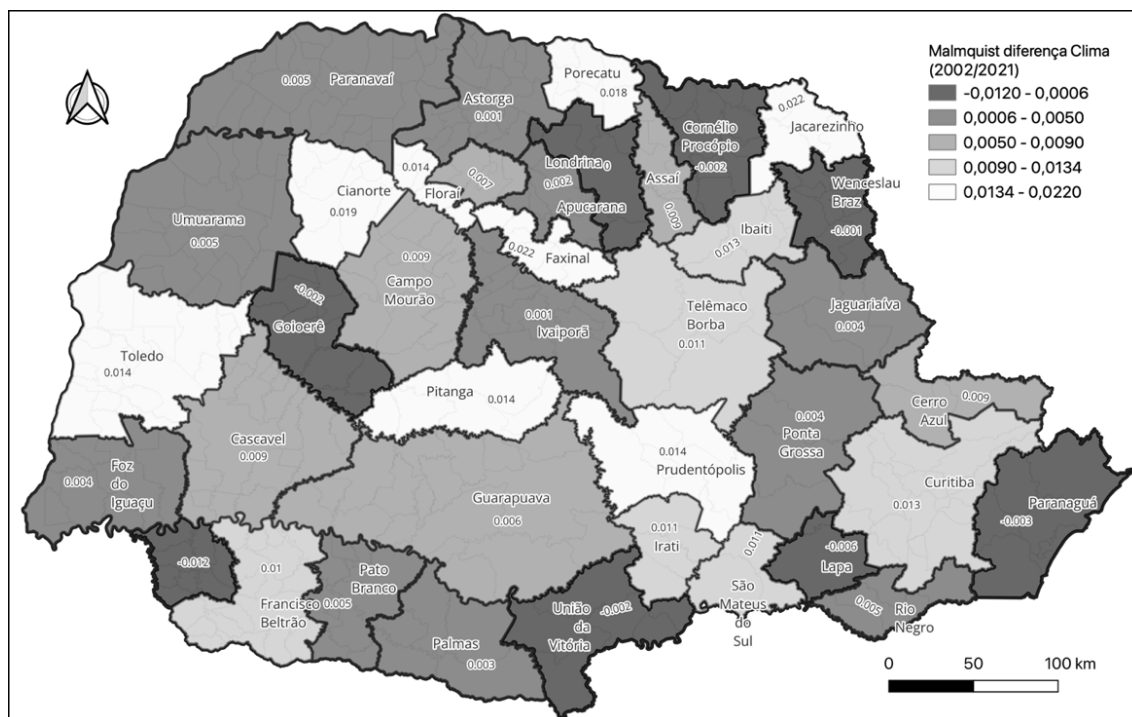
Fonte: Resultados da pesquisa (2025).

Ao examinar os resultados é perceptível que algumas microrregiões apresentam variações mais notáveis entre os cenários. As maiores diferenças positivas ocorrem nas microrregiões de Faxinal, Jacarezinho, Cianorte e Porecatu. Em Faxinal, a PTF aumenta de 1,080 para 1,102 quando as variáveis climáticas são consideradas, representando uma diferença positiva de 0,022. Em Jacarezinho a PTF vai de 1,046 para 1,068, uma diferença positiva de 0,022. Em Cianorte, a PTF sobe de 1,045 para 1,064, resultando em uma diferença positiva de 0,019. Para Porecatu a PTF sobe de 1,086 para 1,104, resultando em uma diferença positiva de 0,018. Esses exemplos indicam que as variáveis climáticas têm um efeito favorável nessas microrregiões, aumentando sua produtividade.

Por outro lado, somente 7 das 39 microrregiões tiveram redução da PTF quando consideradas as variáveis climáticas e apresentaram diferenças negativas entre os cenários. A microrre-

gião de Capanema apresenta uma das maiores variações negativas, indo de 1,110 para 1,098, uma diferença de -0,012. Na microrregião da Lapa, a PTF cai de 1,129 para 1,123, resultando em uma diferença de -0,006. Já na de Paranaguá, a PTF diminui de 1,078 para 1,075, gerando uma diferença de -0,003. Essas diferenças negativas apontam para um possível impacto adverso das variáveis climáticas nas produtividades dessas microrregiões. As diferenças são apresentadas na Figura 4.

Figura 4 – Diferença na variação na Produtividade Total dos Fatores (PTF) médios para as microrregiões paranaenses com e sem considerar as variáveis climáticas – 2001/2021



Fonte: Resultados da pesquisa (2025).

Observa-se que as microrregiões respondem de maneira distinta à inclusão das variáveis climáticas na análise da PTF. Algumas microrregiões são favorecidas, enquanto outras sofrem uma redução na eficiência produtiva. Isso revela a importância de considerar as particularidades regionais ao formular estratégias de desenvolvimento rural e sustentabilidade agrícola. A análise das maiores e menores variações proporciona uma visão mais detalhada da relação complexa entre clima e produtividade, oferecendo intuições valiosas para as decisões de políticas agrícolas e desenvolvimento rural.

CONSIDERAÇÕES FINAIS

Este estudo teve como objetivo analisar a influência das mudanças climáticas na eficiência e na produção agrícola das microrregiões paranaenses durante o período de 2001 a 2021. Esta questão de pesquisa foi respondida utilizando-se de dados de produção agrícola e climáticos do Estado do Paraná, considerando suas 39 microrregiões homogêneas (nas quais estão inseridos os 399 municípios paranaenses) de 2001 a 2021. O modelo de Análise Envolvória de Dados (DEA-Malmquist) foi usado para estimar a produtividade agrícola com e sem fatores climáticos, e a comparação e análise de dados foram realizadas entre diferentes períodos e regiões.

Ao longo deste estudo a análise do impacto das mudanças climáticas na eficiência da produção agrícola nas microrregiões paranaenses durante o período de 2001 a 2021 revelou algumas conclusões substanciais. A partir da avaliação dos escores de eficiência, pôde-se observar que a inclusão das variáveis climáticas suavizou as flutuações nos índices de eficiência, proporcionando uma perspectiva mais coerente da eficiência ao longo dos anos. Ao incorporar essas variáveis, os índices de eficiência foram, de modo geral, mais altos, indicando a influência positiva das condições climáticas na eficiência das microrregiões paranaenses. As discrepâncias entre as microrregiões também foram reduzidas, sinalizando uma possível equalização do espaço produtivo proporcionada pelas variáveis climáticas.

A análise dinâmica, conduzida por meio do Índice de Malmquist, permitiu uma compreensão abrangente da evolução da Produtividade Total dos Fatores ao longo dos diferentes períodos. A consideração das variáveis climáticas demonstrou que estas desempenham um papel fundamental na dinâmica da eficiência da produção agrícola. A mudança técnica e a mudança de eficiência foram influenciadas de maneira distinta pela inclusão das variáveis climáticas, evidenciando que esses fatores são cruciais para a interpretação precisa das variações de eficiência ao longo do tempo.

Em termos de contribuições, este estudo oferece avanços significativos para a teoria e prática. No âmbito teórico, as conclusões proporcionam percepções fundamentais sobre a relação complexa entre fatores climáticos e eficiência agrícola, destacando a necessidade de considerar esses fatores nas análises de produtividade. Além disso, ao demonstrar que as variáveis climáticas podem tanto impulsionar quanto prejudicar a eficiência, o estudo enriquece a compreensão das nuances envolvidas na produção agrícola.

No contexto gerencial, as recomendações derivadas deste estudo podem ser consideradas para as tomadas de decisão nas microrregiões do Paraná. A consideração das variáveis climáticas nas estratégias de alocação de recursos e desenvolvimento rural pode resultar em ações mais eficazes e bem informadas, levando a uma produção mais resiliente e sustentável. Apesar das limitações de dados, como a utilização de *proxies* para dados censitários e a imputação de dados climáticos, os resultados ainda permitem tirar conclusões sobre o efeito do paradigma das variáveis climáticas na eficiência da produção agrícola na região do Paraná.

Para pesquisas futuras, é recomendado expandir a análise para considerar outras variáveis contextualmente relevantes, além de estender o período de análise para capturar possíveis mudanças em longo prazo. Adicionalmente, investigações mais detalhadas podem ser conduzidas para compreender como as variáveis climáticas interagem com outras variáveis e como essas interações podem moldar o desempenho agrícola.

AGRADECIMENTOS

O presente trabalho foi realizado com apoio da Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior – Brasil (Capes) – Código de Financiamento 001.

REFERÊNCIAS

- BANKER, R. D.; CHARNES, A.; COOPER, W. W. Some models for estimating technical and scale inefficiencies in Data Envelopment Analysis, *Management Science*, v. 30, p. 1.078-1.092, 1984.
- CHRIST, G. D.; ALVES, L. R.; EBERHARDT, P. H. C. Análise da base de exportação das mesorregiões paranaenses entre 2001 e 2021. *Economia & Região*, [S. l.], v. 11, n. 2, p. 173-194, 2023. DOI: 10.5433/2317-627X.2023.v11.n2.47225. Disponível em: <https://ojs.uel.br/revistas/uel/index.php/ecoreg/article/view/47225>. Acesso em: 19 ago. 2023.
- COELLI, T. A guide to DEAP version 2.1: a data envelopment analysis (computer) program. *Centre for Efficiency and Productivity Analysis*, Australia: University of New England, v. 96, n. 8, p. 1-49, 1996.
- FAO. Food and Agriculture Organization. *The future of food and agriculture – Alternative pathways to 2050*. Rome, 2018. 224 p.
- FÄRE, R. et al. Productivity growth, technical progress, and efficiency change in industrialized countries. *American Economic Review*, v. 84, p. 66-83, 1994.
- FERREIRA, C. M. C.; GOMES, A. P. *Introdução à análise envoltória de dados: teoria, modelos e aplicações*. Viçosa, MG: Editora UFV, 2009.
- FUSCO, G. et al. The environmental impact of agriculture: An instrument to support public policy. *Ecological Indicators*, v. 147, 1º mar. 2023.
- GHAFFARI, A.; COOK, H. F.; LEE, H. C. Climate change and winter wheat management: a modelling scenario for south eastern England. *Climatic Change*, n. 55, p. 509-533, 2002.
- GUO, H. et al. The impact of climate change on the efficiency of agricultural production in the world's main agricultural regions. *Environmental Impact Assessment Review*, v. 97, 1º nov. 2022.
- IBGE. Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística. *Censo Demográfico 2022*. Disponível em: <https://censo2022.ibge.gov.br/panorama>. Acesso em: 22 ago. 2023.
- IBGE. Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística. *Cidades e Estados*. Disponível em: <https://www.ibge.gov.br/cidades-e-estados/pr/>. Acesso em: 19 ago. 2023.
- IBGE. Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística. *Produto Interno Bruto dos Municípios*, 2020. Disponível em: <https://www.ibge.gov.br/estatisticas/economicas/contas-nacionais/9088-produto-interno-bruto-dos-municipios.html?=&t=sobre>. Acesso em: 22 ago. 2023.
- IPEA. *Instituto de Pesquisa Econômica Aplicada. Objetivos do Desenvolvimento Sustentável*. Disponível em: <https://www.ipea.gov.br/ods/index.html>. Acesso em: 11 ago. 2023.
- JEDER, H. Total agricultural productivity in the Mediterranean region using the Malmquist index approach. *New Medit*, v. 22, n. 2, p. 51-61, 23 jun. 2023.
- JONES, P. G.; THORTON, P. K. The potential impacts of climate change on maize production in Africa and Latin America in 2055. *Global Environmental Change*, n. 13, p. 51-59, 2003.
- LINS, M. P. E.; LOBO, M. S. C.; SILVA, A. C. M.; FISZMAN, R. O uso da análise envoltória de dados (DEA) para avaliação de hospitais universitários brasileiros. *Ciência & Saúde Coletiva*, v. 12, n. 4, p. 985-998, 2007.
- MARIANO, E. B. Conceitos básicos de análise de eficiência produtiva. SIMPÓSIO DE ENGENHARIA DE PRODUÇÃO – SIMPEP, 12., 2007.
- MEZA, L. A.; BIONDI NETO, L.; MELLO, J. C. C. B. S.; GOMES, E. G. ISYDS – Integrated System for Decision Support (SIAD – Sistema Integrado de Apoio a Decisão): a software package for data envelopment analysis model. *Pesquisa Operacional*, Rio de Janeiro, v. 25, n. 3, p. 493-503, dez. 2005. DOI: <https://doi.org/10.1590/S0101-74382005000300011>.
- MONTEIRO, J. E. B. A. *Agrometeorologia dos cultivos: o fator meteorológico na produção agrícola*. 1. ed. Brasília, DF: Instituto Nacional de Meteorologia, 2009. 530 p. V. 1.
- PARRY, M. L. et al. Effects of climate change on global food production under SRES emissions and socio-economic scenarios. *Global Environmental Change*, n. 14, p. 53-67, 2004.
- RATTIS, L. et al. Climatic limit for agriculture in Brazil. *Nature Climate Change*, v. 11, n. 12, p. 1.098-1.104, 1 dez. 2021.
- SILVA, F. P.; VIEIRA FILHO, J. E. R. *Crescimento agrícola, eficiência técnica e sustentabilidade ambiental*. Brasília: Ipea, 2019. (Texto para Discussão, n. 2445).
- SIMEPAR. Sistema Meteorológico do Paraná. *Dados meteorológicos*. 2023.

SUN, R. *et al.* Optimization of China's pig production system to reduce environmental impacts based on a data envelopment and life cycle analysis model. *Resources, Conservation and Recycling*, v. 185, 1 out. 2022.

Autor Correspondente

Gabriela Daiana Christ

Universidade Estadual do Oeste do Paraná (Unioeste) – Programa de Pós-Graduação em Desenvolvimento Regional e Agronegócio (PGDRA)

R. Guaíra – Jardim La Salle, Toledo/PR, Brasil. CEP 85903-220

gabrielachrist@gmail.com

Este é um artigo de acesso aberto distribuído
sob os termos da licença Creative Commons.

