

**UNIVERSIDADE FEDERAL DA GRANDE DOURADOS  
FACULDADE DE ADMINISTRAÇÃO, CIÊNCIAS CONTÁBEIS E ECONOMIA  
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM AGRONEGÓCIOS**

**PRODUTIVIDADE AGRÍCOLA NOS PAÍSES DO G20: ANÁLISE DAS  
VARIÁVEIS DETERMINANTES ENTRE 1996 E 2022**

**Transérgio Sampatti Santos Matos**

**DOURADOS-MS  
2025**

**UNIVERSIDADE FEDERAL DA GRANDE DOURADOS**  
**FACULDADE DE ADMINISTRAÇÃO, CIÊNCIAS CONTÁBEIS E ECONOMIA**  
**PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM AGRONEGÓCIOS**

**PRODUTIVIDADE AGRÍCOLA NOS PAÍSES DO G20: ANÁLISE DAS  
VARIÁVEIS DETERMINANTES ENTRE 1996 E 2022**

Qualificação de Tese de Doutorado apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Agronegócios da Universidade Federal da Grande Dourados – Faculdade de Administração, Ciências Contábeis e Economia, para obtenção do Título de Doutor em Agronegócios.

**Área de Concentração:** Agronegócios e Sustentabilidade.

**Linha de pesquisa:** Gestão do Agronegócio

**Doutorando:** Fransérgio Sampatti Santos

Matos

**Orientador:** Professor Dr. Rafael Martins

Noriller

**DOURADOS-MS**  
**2025**

## FICHA CATALOGRÁFICA

Dados Internacionais de Catalogação na Publicação (CIP).

M433p Matos, Fransergio Sampatti Santos  
PRODUTIVIDADE AGRÍCOLA NOS PAÍSES DO G20: ANÁLISE DAS VARIÁVEIS  
DETERMINANTES ENTRE 1996 E 2022 [recurso eletrônico] / Fransergio Sampatti Santos  
Matos. -- 2025.  
Arquivo em formato pdf.

Orientador: Rafael Martins Noriller.  
Tese (Doutorado em Agronegócios)-Universidade Federal da Grande Dourados, 2025.  
Disponível no Repositório Institucional da UFGD em:  
<https://portal.ufgd.edu.br/setor/biblioteca/repositorio>

1. Gestão do agronegócio. 2. Produtividade agrícola. 3. Pesquisa e desenvolvimento.  
4. Gasto com educação. I. Noriller, Rafael Martins. II. Título.

Ficha catalográfica elaborada automaticamente de acordo com os dados fornecidos pelo(a) autor(a).

©Direitos reservados. Permitido a reprodução parcial desde que citada a fonte.



ATA DA DEFESA DE TESE DE DOUTORADO APRESENTADA POR FRANSERGIO SAMPATTI SANTOS MATOS, ALUNO DO PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM AGRONEGÓCIOS, ÁREA DE CONCENTRAÇÃO "AGRONEGÓCIOS E SUSTENTABILIDADE".

Aos vinte e cinco dias do mês de novembro do ano de dois mil e vinte e cinco, às oito horas, em sessão pública, realizou-se na Universidade Federal da Grande Dourados, a Defesa de Tese de Doutorado intitulada **"PRODUTIVIDADE AGRÍCOLA NOS PAÍSES DO G20: ANÁLISE DAS VARIÁVEIS DETERMINANTES ENTRE 1996 E 2022"**, apresentada pelo doutorando Fransergio Sampatti Santos Matos, do Programa de Pós-graduação em Agronegócios, à Banca Examinadora constituída pelos membros: Prof. Dr. Rafael Martins Noriller/UFGD (presidente/orientador), Prof. Dr. Antonio Carlos Vaz Lopes/UFGD (membro titular interno), Prof. Dr. Josimar Pires da Silva/UFMT (membro titular externo), Prof.<sup>a</sup> Dr.<sup>a</sup> Mariana Pereira Bonfim/UFF (membro titular externo), Prof. Dr. Alexandre de Souza Correa/UFGD (membro titular externo). Iniciados os trabalhos, a presidência deu a conhecer ao candidato e aos integrantes da banca as normas a serem observadas na apresentação da Tese. Após o candidato ter apresentado a sua Tese, os componentes da Banca Examinadora fizeram suas arguições. Terminada a Defesa, a Banca Examinadora, em sessão secreta, passou aos trabalhos de julgamento, tendo sido o candidato considerado APROVADO. Nada mais havendo a tratar, lavrou-se a presente ata, que vai assinada pelos membros da Comissão Examinadora.

Dourados/MS, 25 de novembro de 2025.

Documento assinado digitalmente  
**gov.br** RAFAEL MARTINS NORILLER  
Data: 26/11/2025 14:02:02-0300  
Verifique em <https://validar.itd.gov.br>

Prof. Dr. Rafael Martins Noriller  
Presidente/orientador

Documento assinado digitalmente  
**gov.br** ANTONIO CARLOS VAZ LOPEZ  
Data: 26/11/2025 13:48:38-0300  
Verifique em <https://validar.itd.gov.br>

Prof. Dr. Antonio Carlos Vaz Lopes  
Membro Titular Interno

Documento assinado digitalmente  
**gov.br** JOSIMAR PIRES DA SILVA  
Data: 26/11/2025 13:32:43-0300  
Verifique em <https://validar.itd.gov.br>

Prof. Dr. Josimar Pires da Silva  
Membro Titular Externo

Documento assinado digitalmente  
**gov.br** MARIANA PEREIRA BONFIM  
Data: 25/11/2025 12:01:22-0300  
Verifique em <https://validar.itd.gov.br>

Documento assinado digitalmente  
**gov.br** ALEXANDRE DE SOUZA CORREA  
Data: 26/11/2025 14:08:20-0300  
Verifique em <https://validar.itd.gov.br>

Prof.<sup>a</sup> Dr.<sup>a</sup> Mariana Pereira Bonfim  
Membro Titular Externo

Prof. Dr. Alexandre de Souza Correa  
Membro Titular Externo

(PARA USO EXCLUSIVO DA PROPP)

## **EPÍGRAFE**

“O ponto de partida de todas as realizações é o desejo.”

*Napoleon Hill*

## DEDICATÓRIA

Dedico este trabalho à minha mãe, Aide Sampatti dos Santos, à minha avó, Elisia Sampatti, à minha esposa, Marcela Ribeiro Trindade, e ao meu filho, José Pedro Trindade Matos, que são o alicerce da minha vida e a razão da minha caminhada. Também dedico, de forma especial e com eterna saudade, ao meu tio Nildo Rodrigues de Oliveira (in memoriam), a quem tive como um pai e que, com seu exemplo de caráter, humildade e sabedoria, me ensinou o valor do trabalho, da honestidade e do caminho correto a seguir. A todos, minha profunda gratidão, amor e respeito.

## **AGRADECIMENTOS**

Agradeço, primeiramente, a Deus, por iluminar meu caminho e me conceder força, sabedoria e serenidade ao longo desta jornada.

À minha mãe, Aide Sampatti dos Santos, à minha avó, Elisia Sampatti, à minha esposa, Marcela Ribeiro Trindade, e ao meu filho, José Pedro Trindade Matos, minha base e maior motivação. A presença, o amor e o apoio incondicional de vocês foram essenciais para que eu chegasse até aqui.

Ao meu orientador, Professor Dr. Rafael Martins Noriller, pela forma exemplar com que conduziu esta orientação, compartilhando conhecimento, paciência e confiança, e proporcionando momentos valiosos de aprendizado e crescimento.

A todos os professores, coordenadores e colaboradores do Programa de Pós-Graduação em Agronegócios, pela dedicação, competência e constante disponibilidade em auxiliar no que fosse necessário.

À banca examinadora e aos professores que contribuíram nas etapas de projeto, qualificação e defesa final, pelas críticas construtivas e valiosas sugestões que enriqueceram este trabalho.

À UNIGRAN, instituição que me acolheu com excelência e proporcionou toda a estrutura e apoio necessários para a realização desta formação, da qual tenho imenso orgulho em fazer parte.

Por fim, agradeço a todos que, de forma direta ou indireta, contribuíram para a minha trajetória e para a concretização desta dissertação. A cada um, o meu mais sincero reconhecimento e gratidão.

## **SUMÁRIO**

<b>1. INTRODUÇÃO</b>	<b>12</b>
1.1 Objetivo geral	14
1.2 Objetivos específicos	14
1.3 Justificativa	15
<b>2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA</b>	<b>18</b>
2.1 Produtividade agrícola e P&D	22
2.2 Produtividade agrícola e gastos com educação	27
2.3 Produtividade agrícola e emissões de CO <sub>2</sub>	30
2.4 Produtividade agrícola e área florestal	35
2.5 Produtividade agrícola e emprego na agricultura	38
<b>3. MATERIAL E MÉTODOS</b>	<b>43</b>
<b>4. RESULTADOS E DISCUSSÃO</b>	<b>45</b>
4.1 Análise segregada	51
<b>5. CONSIDERAÇÕES FINAIS</b>	<b>65</b>
<b>6. REFERÊNCIAS</b>	<b>69</b>

## **PRODUTIVIDADE AGRÍCOLA NOS PAÍSES DO G20: ANÁLISE DAS VARIÁVEIS DETERMINANTES ENTRE 1996 E 2022**

**RESUMO** - O estudo analisa os fatores associados à produtividade agrícola nos países do G20. O objetivo é avaliar a influência de variáveis estruturais e institucionais, como educação, pesquisa e desenvolvimento agrícola, emissões de CO<sub>2</sub>, área florestal e emprego no setor, sobre a produtividade agrícola. Para isso, utiliza-se um modelo econométrico de dados em painel com estimadores Newey-West, aplicado a séries anuais dos países do grupo. Os resultados do modelo geral mostram que as emissões de CO<sub>2</sub> e o emprego agrícola apresentam significância estatística, enquanto educação, P&D e área florestal não demonstram relação consistente com a produtividade. No modelo segregado para países não desenvolvidos do G20, P&D torna-se significativo, indicando maior sensibilidade produtiva aos investimentos tecnológicos, enquanto a área florestal apresenta efeito negativo. O emprego agrícola permanece significativo em ambos os modelos, sugerindo associação entre maior participação da força de trabalho rural e menores níveis de produtividade. Os achados apontam para diferenças estruturais entre países desenvolvidos e não desenvolvidos e reforçam a necessidade de incluir fatores institucionais, financeiros e logísticos em análises futuras.

**Palavras-chave:** Gestão do agronegócio; Produtividade agrícola; Pesquisa e desenvolvimento; Gasto com educação.

## **AGRICULTURAL PRODUCTIVITY IN G20 COUNTRIES: ANALYSIS OF DETERMINANT VARIABLES BETWEEN 1996 AND 2022**

**ABSTRACT –** This study examines the factors associated with agricultural productivity in G20 countries. The objective is to assess the influence of structural and institutional variables, such as education, agricultural research and development, CO<sub>2</sub> emissions, forest area, and employment in the agricultural sector, on productivity levels. A panel data econometric model with Newey-West estimators is applied to annual data from the group of countries. The results of the general model indicate that CO<sub>2</sub> emissions and agricultural employment are statistically significant, whereas education, R&D, and forest area do not show a consistent relationship with productivity. In the model estimated for non-developed G20 countries, R&D becomes significant, suggesting greater sensitivity to technological investment, while forest area exhibits a negative effect. Agricultural employment remains significant in both models, indicating an association between higher rural labor participation and lower productivity levels. The findings highlight structural differences between developed and non-developed countries and reinforce the need to incorporate institutional, financial, and logistical factors in future analyses.

**Keywords:** Agribusiness management; Agricultural productivity; Research and Development; Spending on education.

## **LISTAS DE ABREVIATURAS**

CO <sub>2</sub>	Dióxido de carbono
FAO	Organização das Nações Unidas para Alimentação e Agricultura
FMI	Fundo Monetário Internacional
GEE	Gases de efeito estufa
G20	Grupo dos vinte
IED	Investimento estrangeiro direto
IPCC	Painel Intergovernamental sobre mudanças climáticas
ONU	Organização das Nações Unidas
P&D	Pesquisa e desenvolvimento
PIB	Produto interno bruto
SDA	Agenda de desenvolvimento sustentável
TIC	Tecnologias da informação e comunicação
UE	União Europeia

## LISTA DE TABELAS

<b>Tabela 1</b>	Descrição das Variáveis	44
<b>Tabela 2</b>	Estatística Descritiva das variáveis da pesquisa	46
<b>Tabela 3</b>	Análise da regressão das variáveis	49
<b>Tabela 4</b>	Estatística Descritiva das variáveis da pesquisa países não desenvolvidos	54
<b>Tabela 5</b>	Análise da regressão das variáveis países não desenvolvidos	55
<b>Tabela 6</b>	Hipóteses testadas	62

## **LISTA DE FIGURAS**

**Figura 1** Produtividade Agrícola nos países do G20

47

## 1 INTRODUÇÃO

O G20 é composto por sete dos países mais ricos e influentes do mundo, como Canadá, França, Alemanha, Itália, Japão, Reino Unido e Estados Unidos, além de doze economias emergentes, entre elas Argentina, Austrália, Brasil, China, Índia, Indonésia, México, Rússia, Arábia Saudita, África do Sul, Coreia do Sul e Turquia. Além disso, a União Europeia e, mais recentemente, a União Africana também fazem parte do grupo (G20, 2024).

O G20 foi criado em resposta a uma série de crises de dívida nos mercados emergentes no final da década de 1990, como a crise do peso mexicano e a crise financeira asiática. Desde então, o G20 se tornou um fórum central para discutir a estabilidade econômica e financeira internacional. A partir de 2008, o G20 passou a abordar uma gama mais ampla de questões econômicas globais, como agricultura e mudanças climáticas (Srivastava et al., 2023).

Os países do G20, que representam as maiores economias do mundo, têm uma participação significativa no comércio global, abrangendo mais de 75% das transações internacionais e quase 80% do comércio mundial de produtos agrícolas. A atuação dos Ministros da Agricultura do G20 destaca o papel crucial desses países no mercado agrícola global. Isso evidencia que os membros do G20 não são apenas grandes consumidores, mas também produtores e exportadores influentes, moldando as políticas agrícolas, cadeias de suprimento e a estabilidade dos mercados alimentares globais. Com essa posição dominante, o G20 exerce um efeito direto sobre a segurança alimentar, sustentabilidade e inovação no setor agrícola, influenciando a oferta e demanda de alimentos em escala mundial (Xu et al., 2023).

Além de seu próprio capital, os produtores rurais dependem consideravelmente de dívidas e financiamento externo para custear novos investimentos e operações em curso, como a aquisição de maquinaria de alta tecnologia ou a obtenção de sementes e fertilizantes a crédito. A busca por financiamento externo por parte de uma fazenda é influenciada por fatores-chave, como a disponibilidade de recursos internos, mudanças tecnológicas nos métodos de produção e os riscos associados à agricultura (Khafagy; Vigani, 2023).

O aprimoramento da produtividade agrícola em escala global desempenha um papel crucial não apenas na promoção do desenvolvimento sustentável na agricultura, mas também na garantia do fornecimento de produtos agrícolas e na segurança alimentar. Países e regiões de todo o planeta demonstram um compromisso sólido em melhorar a produtividade agrícola e fomentar o desenvolvimento sustentável na agricultura (Zhang et al., 2023). A produtividade agrícola nos países do G20 é influenciada por diversos fatores, como mudanças tecnológicas e investimentos em ciência, tecnologia e inovação agrícola, (ASTI, do inglês *Agricultural Science, Technology and Innovation*) (Guo et al., 2021).

Devido às variações nos níveis de desenvolvimento econômico e agrícola, existem diferenças significativas nos investimentos em ASTI entre os países desenvolvidos do G20 (Austrália, Canadá, França, Alemanha, Itália, Japão, República da Coreia, Reino Unido e Estados Unidos) e os países em desenvolvimento do G20 (Argentina, Brasil, China, Índia, Indonésia, México, Rússia, Arábia Saudita, África do Sul e Turquia) (Guo et al., 2021).

Dentre os membros do G20, um grupo significativo é classificado como não desenvolvido de acordo com critérios do Banco Mundial, incluindo Argentina, Brasil, China, Índia, Indonésia, México, África do Sul, Arábia Saudita e Turquia (Machado; Rover, 2023). Essas economias compartilham características como disparidades socioeconômicas, dependência de commodities agrícolas e maior exposição a choques externos, fatores que influenciam diretamente sua produtividade no setor agropecuário.

A heterogeneidade desse grupo é evidente: enquanto China e Índia destacam-se pelo volume de produção e desafios de escala, países como Brasil e Argentina têm na agricultura um pilar de suas exportações, porém com vulnerabilidades logísticas e tecnológicas. Já nações como África do Sul e México enfrentam pressões adicionais relacionadas a mudanças climáticas e gestão hídrica (Machado; Rover, 2023). Essa diversidade demanda abordagens analíticas diferenciadas, capazes de capturar tanto padrões comuns quanto particularidades estruturais.

A literatura recente tem avançado na avaliação da eficiência associada à ciência, tecnologia e inovação agrícola, com estudos que medem eficiência estática e dinâmica em diferentes grupos de países, sobretudo em economias

emergentes e regiões com forte dependência do setor agrícola (Guo et al., 2021). Apesar desses avanços, ainda existe uma lacuna relevante, não há análises consolidadas que investiguem de forma sistemática como os países do G20 convertem investimentos em educação, P&D e capacidade tecnológica em produtividade agrícola. Essa ausência reforça a necessidade de estudos que examinem de maneira integrada os determinantes da produtividade agrícola no grupo, ampliando a compreensão sobre os mecanismos que influenciam o desempenho agrícola nas maiores economias do mundo.

### 1.1 Objetivo geral

Avaliar a influência de variáveis estruturais e institucionais como educação, P&D agrícola, emissões de CO<sub>2</sub>, área florestal e emprego no setor sobre a produtividade agrícola nos países do G20, sustentando a tese de que essa produtividade é condicionada por decisões políticas e investimentos públicos, e não apenas por fatores naturais.

### 1.2 Objetivos específicos

Mapear, na literatura científica, os principais fatores estruturais e institucionais associados à produtividade agrícola.

Formular hipóteses que relacionem educação, P&D agrícola, emissões de CO<sub>2</sub>, área florestal e emprego no setor à produtividade agrícola nos países do G20.

Estimar modelos de dados em painel para identificar a influência dessas variáveis sobre a produtividade agrícola.

Comparar os resultados entre países desenvolvidos e não desenvolvidos do G20.

Verificar a significância estatística das variáveis e sua capacidade de potencializar a produtividade agrícola.

### 1.3 Justificativa

A produção de grãos está estreitamente ligada ao desenvolvimento econômico, sendo uma necessidade básica para a sobrevivência humana e a base material para o crescimento econômico regional. No entanto, o desenvolvimento econômico também oferece apoio material à produção de cereais (Xie et al., 2021). A melhoria da produtividade agrícola global é essencial não apenas para promover o desenvolvimento agrícola sustentável, mas também para assegurar o abastecimento de produtos agrícolas e a segurança alimentar (Zhang et al., 2023).

Em muitos contextos, a produção de cereais e o desenvolvimento econômico mostram-se incompatíveis com o processo de industrialização e urbanização, tanto em países desenvolvidos quanto em desenvolvimento. Alguns países, como o Japão, adotaram medidas ágeis, implementando políticas de reforma agrária e estratégias de conservação de terras para assegurar que a agricultura acompanhe o desenvolvimento econômico. Essas políticas visavam manter o equilíbrio entre a renda do setor agrícola e outras indústrias, assegurando o crescimento conjunto (Xie et al., 2021).

A discrepância na produtividade agrícola entre as nações deve-se a dois fatores principais: primeiro, as variações institucionais, regulamentações e políticas que influenciam as decisões econômicas na agricultura. Segundo, as condições naturais desfavoráveis, como terras de baixa qualidade ou regiões áridas, que limitam o potencial produtivo (Adamopoulos; Restuccia, 2022).

Este estudo visa contribuir para o avanço científico, fornecendo informações valiosas sobre as variáveis relacionadas à produtividade agrícola, como gastos com educação, gastos com P&D na agricultura, emissões de CO<sub>2</sub>, área florestal e emprego na agricultura. Essas variáveis serão analisadas para confirmar seu efeito na produtividade agrícola e para contribuir com a pesquisa científica.

Para garantir um desenvolvimento sustentável a longo prazo, é fundamental melhorar tanto a produtividade agrícola quanto a qualidade ambiental. O aumento na produção agrícola não apenas reduz a pobreza e melhora a distribuição de renda, mas também fortalece a segurança alimentar e impulsiona o desenvolvimento econômico. Estudos econômicos demonstram

que a melhoria da produtividade agrícola também traz benefícios ao meio ambiente. Além disso, o crescimento econômico associado à produção agrícola impulsiona a demanda por ambientes mais limpos, produtos e serviços sustentáveis, além de fortalecer a capacidade governamental de fazer cumprir a legislação ambiental (Raihan; Tuspekova, 2022).

Nos últimos anos, estudos recentes têm ampliado a discussão sobre a produtividade agrícola, incorporando variáveis ambientais, tecnológicas e sociais em análises mais integradas. Zhang et al. (2024) evidenciam que o avanço da agricultura inteligente, apoiado por tecnologias digitais e big data, contribui significativamente para a eficiência no uso de recursos e redução de perdas produtivas, especialmente em países emergentes. De forma complementar, Liu e Tang (2025) destacam que o uso de inteligência artificial e plataformas de gestão de dados agrícolas tem potencial para reduzir desigualdades produtivas entre regiões e aumentar a resiliência do setor frente às mudanças climáticas. Ademais, as transformações estruturais observadas nas cadeias globais de alimentos em 2024 e 2025 reforçam a importância da transição para sistemas agrícolas sustentáveis e de baixo carbono (FAO, 2025; OECD, 2024). Tais resultados contemporâneos indicam que a inovação tecnológica e a governança ambiental devem ser concebidas de forma integrada às políticas agrícolas e de desenvolvimento econômico.

Nesse contexto, esta pesquisa também se alinha diretamente aos Objetivos de Desenvolvimento Sustentável (ODS) propostos pela Agenda 2030 da Organização das Nações Unidas, em especial ao ODS 2 (Fome Zero e Agricultura Sustentável), que visa dobrar a produtividade agrícola e a renda dos pequenos produtores; ao ODS 12 (Consumo e Produção Responsáveis), voltado à gestão eficiente dos recursos naturais; e ao ODS 13 (Ação contra a Mudança Global do Clima), que incentiva práticas agrícolas resilientes e de baixo carbono. Ao analisar a interação entre variáveis como P&D, educação, emissões de CO<sub>2</sub>, área florestal e emprego na agricultura, este estudo contribui para a formulação de estratégias que conciliem o aumento da produtividade com a sustentabilidade ambiental e a inclusão social, pilares centrais da agenda global de desenvolvimento sustentável.

Diante desse cenário, a presente pesquisa justifica-se pela necessidade de compreender e avaliar os fatores que impactam a produtividade agrícola. O estudo tem como finalidade analisar os fatores que condicionam a produtividade agrícola nos países do G20, oferecendo subsídios empíricos que apoiem futuras formulações de políticas e decisões governamentais relacionadas ao setor. Esta pesquisa busca contribuir para o avanço do conhecimento científico e orientar ações políticas eficazes, oferecendo uma análise detalhada das variáveis que influenciam a produtividade agrícola e o desenvolvimento econômico no contexto do G20.

O trabalho é dividido em cinco capítulos. O primeiro contemplará uma análise teórico-conceitual através de uma revisão da literatura com o intuito de conhecer a variável dependente (produtividade agrícola) e determinar o objetivo geral, os objetivos específicos e a justificativa.

No segundo capítulo, realizou-se uma revisão da literatura com o objetivo de explorar os fatores que influenciam a produtividade agrícola. Foram consultadas diversas fontes, a fim de compreender as tendências e descobertas mais recentes nesse campo. Após a análise dos dados coletados, foram formuladas hipóteses que servirão como base para a investigação empírica posterior. Essas hipóteses foram desenvolvidas com base nas teorias existentes sobre o tema, bem como nas lacunas identificadas na literatura revisada.

No terceiro capítulo, foi desenvolvido um estudo com abordagem quantitativa, relacionando variáveis por meio de regressão de dados em painel. Para avaliar os efeitos da produtividade agrícola foram definidas as variáveis: dependente: Como proxy a Produtividade Agrícola (medida como produção agrícola por unidade de área). Independentes: Gastos com Educação, Gastos com Pesquisa e Desenvolvimento na Agricultura, Emissões de CO<sub>2</sub>, Área florestal e Emprego na agricultura. A tabela abaixo demonstra a descrição das variáveis.

No quarto capítulo, foram apresentados os resultados obtidos no modelo para mensurar a relação das variáveis independentes com a variável dependente. Este capítulo apresenta uma análise minuciosa dos resultados, destacando a significância estatística das relações identificadas e fornecendo insights sobre a natureza e a magnitude dessas relações. Além disso, são

discutidas as implicações dos resultados encontrados para a compreensão do fenômeno estudado, contribuindo para o avanço do conhecimento na área da produtividade agrícola.

O quinto capítulo deste trabalho foi dedicado à apresentação das considerações finais, consolidando as análises realizadas ao longo do estudo. Nele, são sintetizados os principais resultados e conclusões obtidos, com ênfase nas implicações dos achados para a compreensão do fenômeno investigado, particularmente no que diz respeito à influência de variáveis como investimentos em P&D, educação, emissões de CO<sub>2</sub>, área florestal e emprego na agricultura sobre a produtividade agrícola nos países do G20. Além disso, o capítulo discute os desdobramentos práticos dos resultados para o setor agrícola e propõe caminhos para futuras pesquisas, destacando as limitações metodológicas enfrentadas e sugerindo abordagens complementares que possam aprofundar a análise desse tema relevante para o desenvolvimento sustentável e a segurança alimentar global.

## 2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

De acordo com dados recentes da Organização das Nações Unidas para Alimentação e Agricultura (FAO), a produção global de cereais registrou um notável crescimento nos últimos anos. Entre o período de 2019/20 e 2020/21, a produção de cereais experimentou um aumento de 2,39%, refletindo uma resposta positiva ao desafio da demanda crescente por alimentos. Esse impulso se manteve consistente, com um incremento adicional de 1,32% entre 2020/21 e 2021/22, evidenciando a resiliência do setor agrícola. Até 6 de outubro de 2023, os números ainda indicam um aumento de 0,12% em relação ao ano anterior, sinalizando uma contínua tendência de crescimento na produção de cereais em nível global. Esse cenário, embora encorajador, destaca a importância de manter o foco na segurança alimentar e na sustentabilidade à medida que enfrentamos desafios crescentes no cenário agrícola (FAO, 2023).

As mudanças climáticas resultantes das emissões de gases de efeito estufa, impactam os ciclos de produtividade agrícola, seja de maneira direta ou indireta, influenciando a temperatura, a quantidade de precipitação e a duração da exposição solar. Essas alterações têm afetado o padrão de produtividade dos

produtos agrícolas e emergiram como uma das principais causas do agravamento da insegurança alimentar, especialmente em nações em desenvolvimento (Ozdemir, 2022).

A agricultura constitui um setor central para o desenvolvimento econômico e social, especialmente em países que dependem diretamente de atividades rurais para geração de renda. Nas últimas décadas, o cenário agrícola internacional passou por transformações relevantes, marcadas por mudanças tecnológicas, pressões ambientais e reorganização das cadeias produtivas. Apesar da ampliação de programas de extensão agrícola, persistem limitações relacionadas à adoção tecnológica, à disponibilidade de recursos e às desigualdades regionais (Subramanian, 2021).

Nos últimos setenta anos, a China alcançou notáveis avanços na produção de cereais, com a produção total de cereais aumentando de 113,18 milhões de toneladas em 1949 para 663,84 milhões de toneladas em 2019. Nesse mesmo período, a China testemunhou um desenvolvimento econômico sem precedentes, especialmente nos últimos quarenta anos desde a implementação das reformas e da abertura da economia nacional. Durante esse período, a economia chinesa experimentou um crescimento rápido e sustentável, com uma taxa média anual de crescimento econômico de 9,4% entre 1979 e 2018, superando significativamente a taxa de crescimento da economia mundial durante o mesmo período, que foi de cerca de 2,9% (Xie et al., 2021).

O acesso ao crédito e ao financiamento externo desempenha um papel fundamental na melhoria do desempenho e da produtividade das explorações agrícolas. Em geral, o financiamento externo pode aprimorar a produtividade das explorações agrícolas por meio de três canais principais. Em primeiro lugar, o financiamento a longo prazo pode possibilitar que as explorações agrícolas expandam suas capacidades de produção por meio de novos investimentos em equipamentos modernos, tecnologias ou outros ativos fixos. Em segundo lugar, o financiamento de curto prazo pode aliviar as restrições de liquidez das explorações agrícolas, permitindo o cumprimento de obrigações de curto prazo ou despesas operacionais correntes (como a compra de sementes e fertilizantes, pagamento de salários, aluguel, etc.), mantendo assim a produtividade e a competitividade das explorações agrícolas. Por último, o financiamento de curto prazo também pode fortalecer a capacidade de resiliência das explorações

agrícolas para lidar com perdas inesperadas devido a choques externos (Khafagy; Vigani, 2023).

A produção de cereais e o desenvolvimento econômico muitas vezes mostraram-se incompatíveis no contexto do processo de industrialização e urbanização, tanto em países desenvolvidos quanto em países em desenvolvimento. Alguns países responderam de maneira ágil, como o Japão, que implementou políticas de reforma agrária tanto em áreas urbanas como rurais e adotou uma estratégia de conservação de terras com cooperação total, investindo substancialmente em capital e tecnologia. Essas medidas visavam assegurar que a agricultura pudesse acompanhar o desenvolvimento econômico, mantendo uma relação equilibrada entre a renda proveniente do setor agrícola e a renda gerada por outras indústrias (Xie et al., 2021).

Os Países Baixos também envidaram consideráveis esforços para promover o desenvolvimento agrícola, fortalecendo diversos tipos de apoio, que abrangem políticas, tecnologia e indústria. De acordo com dados da Comissão Europeia, em 2017, o rendimento dos agricultores na Holanda atingiu 60 mil euros. No entanto, existem também nações onde se observam disparidades entre a produção agrícola e o desenvolvimento econômico. Por exemplo, na Argentina, embora a agricultura seja avançada, a pobreza nas áreas rurais é um problema sério, com 29,9% da população vivendo em situação de pobreza, o que resulta em um considerável desequilíbrio entre a produção agrícola e o desenvolvimento econômico (Xie et al., 2021).

A segurança alimentar é um pilar fundamental do desenvolvimento social na China. O país conseguiu alimentar uma quinta parte da população global com apenas 7% das terras aráveis do mundo, obtendo resultados notáveis na produção de cereais. Pesquisas revelaram que, desde o início das reformas e abertura em 1978, a produção de cereais na China duplicou, estabelecendo o país como o principal produtor mundial de alimentos. Nos últimos 30 anos, a produção total de cereais aumentou em 65%, erradicando por completo o problema social da fome (Li et al., 2022).

Nos países em desenvolvimento, a falta de disseminação adequada de informações é identificada como um fator significativo que obstaculiza aprimorar os métodos de produção agrícola. Por um longo período, as tecnologias da informação e comunicação (TIC) tiveram um desenvolvimento lento nas áreas

rurais, resultando em um acesso limitado dos agricultores a informações agrícolas (Bi; Wen; Zou, 2022).

Como parte da próxima fase do desenvolvimento agrícola, destinada a sustentar uma população em constante crescimento, a Agricultura 4.0 representa um ponto crucial na pesquisa acadêmica. Após as revoluções anteriores - a Agricultura 1.0 marcou a transição de caçadores-coletores para agricultura estabelecida, a Agricultura 2.0 testemunhou a inovação das máquinas agrícolas e a Agricultura 3.0 incorporou a Revolução Verde, que efetuou a produção em países em desenvolvimento - agora a quarta revolução está em andamento. A Agricultura 4.0, também conhecida como agricultura digital e agricultura inteligente, é definida simplesmente como a integração da agricultura de precisão com tecnologias de informação e comunicação (TIC) (Bi; Wen; Zou, 2022).

Alguns estudos investigaram o efeito das políticas de subsídios na produção de grãos, e os resultados indicam que os subsídios estimularam o interesse dos agricultores em cultivar grãos, resultando na expansão da área de cultivo de grãos. Por outro lado, a migração da mão de obra agrícola teve um efeito negativo na produção de alimentos. A saída dos jovens adultos do sexo masculino para as áreas urbanas contribuiu para o envelhecimento e a feminização da força de trabalho agrícola, enquanto a diminuição do capital humano afetou adversamente a produção de alimentos. No entanto, a mecanização agrícola pode compensar a diminuição na produção de grãos causada pela escassez de mão de obra (Li et al., 2022).

Promover a mecanização agrícola é uma maneira significativa de aprimorar a capacidade de produção de alimentos. A potência total das máquinas agrícolas é usada como medida para avaliar o grau de mecanização, sendo que um valor mais alto indica um nível maior de mecanização. Em geral, áreas com um nível elevado de mecanização agrícola tendem a apresentar efeitos de escala positivos na produção de alimentos (Li et al., 2022).

Nos últimos anos, as transformações digitais e as políticas de sustentabilidade têm redefinido a dinâmica da produtividade agrícola em escala global. Estudos contemporâneos destacam a convergência entre tecnologia, sustentabilidade e eficiência produtiva como fatores decisivos para o desenvolvimento do setor. Segundo Zhang et al. (2024), o uso de sistemas de

agricultura inteligente baseados em dados e sensoriamento remoto tem elevado a produtividade total dos fatores agrícolas (TFP), especialmente em países do G20, ao permitir o monitoramento em tempo real de variáveis climáticas e de manejo. De forma complementar, Liu e Tang (2025) apontam que a incorporação da inteligência artificial (IA) à gestão agrícola amplia a resiliência dos sistemas de produção frente às mudanças climáticas, reduzindo perdas e otimizando recursos.

A integração entre inovação tecnológica e políticas ambientais também se consolidou como eixo central das pesquisas recentes. O relatório da FAO (2025) evidencia que a inovação sustentável, aliada à expansão do financiamento verde, é determinante para elevar a eficiência da agricultura global e reduzir desigualdades produtivas entre países desenvolvidos e em desenvolvimento. Já a OECD (2024) ressalta que a transição verde no agronegócio requer uma abordagem sistêmica que combine pesquisa e desenvolvimento (P&D), digitalização do campo e políticas públicas voltadas à mitigação de emissões e à conservação dos recursos naturais.

A análise de dados provenientes de fontes internacionais, como FAO, World Bank e OECD, reforça que, no período recente (2024–2025), a produtividade agrícola tem apresentado variação positiva em economias que adotaram estratégias de inovação e digitalização rural. Essas evidências empíricas sustentam a hipótese de que o avanço tecnológico, quando alinhado à sustentabilidade e à educação rural, tende a reduzir a volatilidade produtiva e fortalecer a segurança alimentar. Nesse contexto, o presente estudo aprofunda a análise das variáveis determinantes da produtividade agrícola nos países do G20 à luz das novas abordagens empíricas e políticas adotadas após 2024, incorporando o debate sobre agricultura digital, descarbonização e sustentabilidade.

## 2.1 Produtividade agrícola e P&D

A aplicação de recurso em pesquisa e desenvolvimento (P&D) ambiental é mais suscetível a ser influenciado por regulamentações e políticas ambientais em comparação com o investimento total em P&D. Portanto, neste contexto, concentrarmo-nos no investimento em P&D ambiental, nas emissões de carbono e em seu efeito no desempenho financeiro da empresa. Além disso, algumas

empresas podem adotar diferentes níveis de comprometimento na redução de seus efeitos de carbono por meio do uso de P&D ambiental. Para alcançar a inovação e melhorar o desempenho ambiental por meio de pesquisa e desenvolvimento (P&D), é necessário um investimento adequado em P&D ambiental, o qual terá efeito no desempenho financeiro (Lee; Min; Yook, 2015).

A supressão financeira nos países em desenvolvimento pode ser mitigada por meio da geração de financiamento inclusivo. O desenvolvimento financeiro rural desempenha um papel importante na promoção da redução da pobreza em áreas rurais. O financiamento inclusivo tem o potencial de melhorar significativamente o nível de renda das áreas rurais, bem como atender às necessidades dos grupos de renda média, por meio de serviços financeiros expandidos, como crédito, poupança e outros mecanismos (Tong et al., 2022).

A literatura comprova que o uso adequado dos gastos públicos na agricultura possui um potencial significativo para impulsionar o progresso agronômico e aumentar a produtividade do setor (Dkhar e Kumar, 2018). Além disso, segundo Salim e Islam (2010) os investimentos em pesquisa e desenvolvimento agrícola têm um efeito duradouro na expansão da produção agrícola. Um exemplo concreto dessa relação pode ser observado nos Estados Unidos, onde os gastos do setor público e em pesquisa e desenvolvimento agrícola estão estreitamente relacionados. No período de 1990 a 2013, cerca de 50% dos gastos totais em pesquisa e desenvolvimento foram destinados à agricultura e alimentos. Esses investimentos impulsionaram a produtividade agrícola nos Estados Unidos em impressionantes 169%, resultando em um valor de mercado de aproximadamente US\$ 1,053 trilhão em 2017. Como resultado, os Estados Unidos se tornaram líderes mundiais em inovação agrícola, registrando cerca de 54.000 patentes em ciências agrícolas e 18.000 patentes específicas na área da agricultura no período de 2008 a 2011. Essas estatísticas destacam a importância dos investimentos em pesquisa e desenvolvimento agrícola para o setor (Chandio et al., 2022).

Nos últimos 20 anos, a China tem direcionado significativos investimentos em pesquisa e desenvolvimento (P&D) com o objetivo de se tornar líder mundial em inovação científica e tecnológica até 2050. De 1990 a 2018, os gastos com P&D aumentaram de 0,56% para 2,18% do Produto Interno Bruto (PIB) chinês. Em 2018, a China registrou um aumento de 16,9% no número de patentes em

comparação com o ano anterior, sendo que 5.760 patentes foram especificamente relacionadas a variedades de plantas no setor agrícola, representando um aumento de 29% em relação ao ano anterior. Esses avanços foram impulsionados por políticas governamentais, como a alocação direta de recursos, subsídios substanciais para a aquisição de insumos agrícolas e subsídios para sementes e equipamentos, com o objetivo de promover o aumento da produção de alimentos e a renda dos agricultores. Essas ações governamentais têm sido fundamentais para estimular a inovação na China e fornecer suporte ao setor agrícola. Os esforços dos inovadores chineses têm desempenhado um papel determinante no nível de inovação alcançado no país, impulsionando avanços tecnológicos que apoiam o desenvolvimento agrícola e alimentar (Chandio et al., 2022).

A adoção de tecnologia impulsionada pela pesquisa e desenvolvimento (P&D) desempenha um papel crucial na busca pelo crescimento sustentável na agricultura e na redução da pobreza. No entanto, para que essa tecnologia seja efetivamente adotada no setor agrícola, o crédito agrícola desempenha um papel fundamental. A estratégia de financiamento direcionada à agricultura desempenha um papel crucial ao fornecer recursos financeiros necessários para a adoção de tecnologia nas explorações agrícolas. Esses recursos possibilitam que os agricultores acessem inovações tecnológicas, como equipamentos avançados, sementes melhoradas, fertilizantes e outros insumos modernos. Ao viabilizar o acesso a essas tecnologias, o financiamento agrícola estimula a progressão sustentável no setor (Chandio et al., 2022).

Por meio do crédito agrícola, os agricultores podem investir em práticas agrícolas mais eficientes e sustentáveis, o que pode aumentar a produtividade, reduzir custos e melhorar a qualidade dos produtos agrícolas. Além disso, a adoção de tecnologias avançadas pode impulsionar a resiliência dos agricultores diante de desafios climáticos e de mercado, ajudando a reduzir a pobreza e melhorar o bem-estar das comunidades rurais. Dessa forma, a combinação entre investimentos em P&D para impulsionar a tecnologia agrícola e estratégias de financiamento agrícola direcionadas desempenham um papel fundamental no alcance do crescimento sustentável na agricultura, além de contribuir para a redução da pobreza e o desenvolvimento socioeconômico das áreas rurais (Chandio et al., 2022).

Para Obansa & Maduekwe (2013) o crédito ao setor rural desempenha um papel fundamental ao catalisar a adoção de tecnologia no nível das fazendas. Essa adoção tecnológica impulsiona o avanço da fronteira de produção agrícola, permitindo que os agricultores aumentem sua produtividade e eficiência. Narayanan (2016) conduziu um estudo que explorou as relações entre o crédito ao crescimento do setor agrícola e o Produto Interno Bruto (PIB) da Índia. Utilizando dados de um painel abrangendo o período de 1995 a 2012, o autor identificou efeitos positivos do crédito no setor agrícola, relacionados ao aumento do consumo de fertilizantes e à mecanização das fazendas. O estudo realizado por Omoregie et al. (2018) analisou o papel encorajador do financiamento no setor de arroz na Nigéria. Utilizando dados abrangendo o período de 1981 a 2016, os pesquisadores investigaram os efeitos do financiamento agrícola específico para a cultura do arroz. Com base nas descobertas, os autores sugeriram a implementação de esquemas de empréstimos sem juros para os agricultores, bem como a apreciação deles fornecendo insumos agrícolas a taxas subsidiadas. Essas recomendações visam combater os choques trabalhistas e de investimento que podem reduzir a produção agrícola (Chandio et al., 2022).

Um estudo realizado por Agbodji e Johnson (2019) no Togo constatou um efeito positivo do crédito agrícola nas commodities de Sorgo, Arroz e Milho. No entanto, os resultados variaram de acordo com a categoria de crédito analisada. Em outro estudo, Akudugu (2016) investigou a relação entre os rendimentos agrícolas, a acessibilidade ao crédito e o tamanho da terra em Gana. Os resultados revelaram uma associação significativa e positiva entre o crédito (tanto de fontes formais quanto informais) e a produtividade. O crédito proveniente de fontes formais aumentou a produtividade em 0,10%, enquanto as fontes informais resultaram em um aumento de 0,45% na produtividade (Chandio et al., 2022).

O efeito da pesquisa e desenvolvimento (P&D) agrícola na produção e segurança alimentar pode ser observado em diferentes aspectos. A P&D agrícola desempenha um papel fundamental na formação de efeitos de escala nas empresas do setor de grãos. O avanço científico e tecnológico promove a qualidade e a competitividade da indústria de grãos, resultando em economias de escala. Isso ocorre ao aumentar a utilização dos resultados da P&D e reduzir

o custo médio dessas atividades, o que, por sua vez, impulsiona o crescimento das empresas do setor de grãos e contribui para a segurança alimentar (Bi et al., 2022).

A P&D agrícola auxilia na formação de um efeito de aglomeração na indústria de alimentos. Por meio do compartilhamento de patentes, informações e tecnologia, as diferentes entidades empresariais podem imitar as inovações umas das outras, reduzindo os custos de P&D e produção. Isso resulta na criação de um ambiente propício à aglomeração de atividades de P&D e no acúmulo circular de conhecimento e avanços tecnológicos. Esses aspectos destacam a importância da P&D agrícola para impulsionar o setor de grãos, fortalecer a competitividade da indústria de alimentos e garantir a segurança alimentar. Ao promover e compartilhar conhecimento científico e tecnológico, a P&D agrícola contribui para o desenvolvimento sustentável do setor agrícola e para o aumento da disponibilidade de alimentos de qualidade (Bi et al., 2022).

O estudo inicial realizado por Mullen e Cox (1995) foi expandido em uma pesquisa subsequente conduzida por Cox et al. (2002). Utilizando a técnica não paramétrica Afriat-Varian, esses autores calcularam os efeitos marginais dos gastos com pesquisa e extensão na produtividade total dos fatores e estimaram a taxa interna de retorno na faixa de 12% a 20% na agricultura de larga escala na Austrália durante o período de 1953 a 1994. Posteriormente, Mullen (2007) estendeu o conjunto de dados anterior desenvolvido por Mullen et al. (1996) até 2003. Nesse estudo, foi demonstrado que a tendência de longo prazo na produtividade da agricultura de larga escala na Austrália era de aproximadamente 2,5% ao ano, e as atividades nacionais de pesquisa e desenvolvimento (P&D) podem ter contribuído com cerca de 1,2% ao ano (Salim; Islam, 2010).

Mais recentemente, estudos contemporâneos reforçam a importância do investimento público em P&D agrícola. Van Dijk et al. (2025) encontraram taxas internas de retorno na faixa de 34–42 % para países de diferentes níveis de renda, o que sugere que os retornos à P&D podem ser mais elevados em contextos mais amplos (alta variabilidade internacional). Ortiz-Bobea et al. (2025) estimam que para compensar a queda de produtividade esperada por efeitos climáticos nos EUA seriam necessários aumentos sustentados de 5,2 a 7,8 % ao ano no gasto público em P&D. Além disso, Jin et al. (2024) mostram

que acelerar a transferência de resultados de pesquisa melhora significativamente o desempenho econômico global e a acessibilidade alimentar. Em nível local, Zhang et al. (2025) identificam efeitos positivos de programas públicos sobre o crescimento da produtividade agrícola em regiões específicas. Esses resultados recentes sustentam e ampliam o arcabouço teórico e empírico das estimativas históricas de Mullen & Cox, sugerindo que os retornos à P&D e extensão permanecem relevantes e talvez até subestimados em estudos mais antigos.

Considerando os trabalhos reportados, a hipótese de pesquisa 1: Existe relação positiva e significativa de P&D com a produtividade agrícola.

## 2.2 Produtividade agrícola e gastos com educação

A relação entre produtividade agrícola e gastos com educação tem sido amplamente discutida na literatura, destacando-se o trabalho seminal de Schultz (1962), que introduziu a noção de investimento em capital humano como fator essencial para o desenvolvimento econômico. Para o autor, a educação dos indivíduos, especialmente no meio rural, é um dos principais determinantes da capacidade de adoção de novas tecnologias e práticas agrícolas mais eficientes. Agricultores mais instruídos tendem a ser mais receptivos à inovação, resultando em maiores ganhos de produtividade. Assim, os investimentos em educação não apenas promovem o bem-estar individual, mas também têm efeitos significativos sobre a eficiência e a modernização do setor agrícola.

Em um estudo realizado por Dietrich et al. (2010), foi descoberto que o aumento da intensificação do uso da terra agrícola desempenha um papel fundamental nos aumentos de rendimento causados pelo homem. De acordo com suas conclusões, o desenvolvimento do capital humano pode melhorar a eficiência dos insumos e fatores comuns utilizados na agricultura, o que, por sua vez, resulta em um crescimento na produção agrícola por área de terra.

Por sua vez, Djomo & Sikod (2012) analisaram o efeito do capital humano na produtividade agrícola e na renda dos agricultores em Camarões, utilizando o modelo de função de produção estocástica. Seus resultados revelaram que cada ano adicional de educação e experiência dos agricultores contribui significativamente para o aumento da produtividade agrícola. Essas descobertas

sugerem que o investimento no desenvolvimento do capital humano pode ter um efeito positivo na agricultura, tornando-a mais eficiente e produtiva, beneficiando tanto os agricultores quanto a produção de alimentos em geral (Ntsama; Sougouma, 2022).

O desenvolvimento da educação é um fator crucial para aprimorar o conhecimento dos agricultores, possibilitando que se envolvam em atividades que gerem uma renda mais substancial e reduzindo diretamente as disparidades de renda. Além disso, ao investir na educação dos agricultores, estes têm a oportunidade de aprender a utilizar tecnologias avançadas de produção, o que resulta em um aumento geral da produtividade agrícola. Esse crescimento da Produtividade Total dos Fatores contribui para um incremento na produção e na renda, consequentemente reduzindo, de maneira indireta, a disparidade entre as rendas urbanas e rurais (Liu et al., 2022).

De forma complementar, a educação desempenha um papel fundamental no desenvolvimento socioeconômico dos agricultores e tem um efeito significativo na melhoria de sua renda não agrícola. Ao adquirirem conhecimentos e habilidades através da educação, os agricultores podem se engajar em atividades diversificadas fora do setor agrícola, o que pode gerar uma renda adicional para suas famílias (Liu et al., 2022).

Os investimentos públicos em educação têm sido associados a um crescimento mais rápido da produtividade agrícola, independentemente do tamanho da propriedade. Isso acontece porque a educação pode trazer diversos benefícios para os agricultores, independentemente do tamanho de suas propriedades ou do tipo de cultivo que realizam (Rada; Helfand; Magalhães, 2019).

Os investimentos públicos destinados a impulsionar o crescimento agrícola, como acesso a cuidados de saúde de qualidade, educação e melhorias nas estradas que facilitam o acesso às fazendas para aumentar a produtividade, que foram historicamente baixos na Nigéria ao longo dos anos, isso resultou em retornos limitados em termos de produtividade agrícola. Os gastos públicos de qualidade podem ser utilizados de maneira eficiente para impulsionar o crescimento agrícola e aprimorar a produtividade do setor. Investimentos adequados em áreas como infraestrutura, pesquisa, acesso a cuidados de saúde, educação agrícola e apoio técnico podem estimular o desenvolvimento

sustentável da agricultura, resultando em uma maior produção de alimentos, aumento da renda dos agricultores e melhoria das condições econômicas rurais. (Apata, 2021).

Segundo Dufrechou (2016), foi postulado que o ensino superior desempenha um papel crucial no estímulo ao crescimento econômico. No entanto, isso pode variar em termos de ênfase na "inclinação terciária", que se refere à predominância de investimentos em educação pública em níveis superiores. Através do desenvolvimento de competências científicas e tecnológicas, o sistema educacional contribui para o aumento da produtividade e aprimora a capacidade dos países de elevar suas receitas econômicas. Em contraste, os resultados do estudo realizado por Van Heerden et al. (2007) mostraram que o modelo de equilíbrio geral indica que os investimentos governamentais em educação superior resultam em um aumento da oferta de profissionais, o que, por sua vez, impulsiona a produtividade geral dos fatores e, consequentemente, contribui para o crescimento econômico (Tong, 2022).

Chakraborty e Krishnankutty (2012) constataram que os gastos com educação têm uma relação positiva com o crescimento econômico dos estados da Índia no período de 2004 a 2010. No entanto, observou-se uma implicação negativa nos estados que não são considerados especiais, com dados agregados, exceto nos estados do Nordeste. Grdinic (2014) chegou à conclusão de que os gastos públicos em educação, incluindo o investimento em educação superior e o número de pesquisadores, impactam positivamente o crescimento econômico em membros selecionados da UE e países da ex-União Soviética no período entre 2000 e 2011. Usando dados de painel de 22 países de alto rendimento e 19 países de renda média alta, no período de 1970 a 2010, Dufrechou (2016) postulou que o ensino superior promove o crescimento econômico, mas observou que a distribuição dos gastos com educação pública pode variar, sendo predominante a chamada "inclinação terciária" nos gastos (Tong, 2022).

A educação tem sido reconhecida como um componente essencial do capital humano, influenciando diretamente a produtividade e o crescimento econômico. De acordo com Tilak (2003), o ensino demonstrou uma contribuição positiva para o crescimento econômico em 49 nações da região da Ásia e do Pacífico. Ozsoy (2008) registrou que a educação é amplamente aceita como uma

ferramenta para estimular o desenvolvimento econômico e está intrinsecamente ligada à renda, gerando benefícios tanto para o público quanto para o setor privado (Tong, 2022).

À medida que a qualidade da educação se eleva, o capital humano se fortifica, ao passo que as indústrias reagem a esses processos ampliando seus investimentos em capital humano. Dessa maneira, setores da economia que dependem fortemente do capital humano apresentam níveis de produção relativamente mais elevados e preços mais competitivos. A participação do elemento de capital humano assume uma parcela cada vez mais significativa em cada nova indústria que surge (Chugunov et al., 2022).

À medida que a qualidade da educação se eleva, o capital humano se fortifica, ao passo que as indústrias reagem a esses processos ampliando seus investimentos em capital humano. Dessa maneira, setores da economia que dependem fortemente do capital humano apresentam níveis de produção relativamente mais elevados e preços mais competitivos. A participação do elemento de capital humano assume uma parcela cada vez mais significativa em cada nova indústria que surge (Chugunov et al., 2022). Estudos recentes reforçam essa lógica: CrisuUolo, Gal & Freund (2024) demonstram que as firmas que estão na fronteira de produtividade dependem mais de ocupações de alta qualificação; Li et al. (2024) mostram que a estrutura do capital humano está positivamente relacionada à eficiência inovativa das organizações; Dong et al. (2025) encontram correlações robustas entre acumulação de capital humano, progresso tecnológico e desempenho das empresas; e Chong (2025) evidencia que o capital humano contribui diretamente para a qualidade do emprego. Além disso, Hardy & Sever (2025) sustentam que indústrias intensivas em capital humano convergem mais rápido em produtividade, em comparação a indústrias mais voltadas ao capital físico.

Considerando os trabalhos reportados, a hipótese de pesquisa 2: Existe relação positiva e significativa de Gasto com Educação com a produtividade agrícola.

### 2.3 Produtividade agrícola e emissões de CO<sub>2</sub>

Ao considerar as mudanças climáticas como uma séria ameaça ambiental no século XXI, surge a perspectiva de potencialmente desencadear o declínio do

maior mercado do mundo. Os efeitos adversos dessas mudanças impõem custos adicionais aos países em desenvolvimento na busca de seus objetivos de desenvolvimento. Além disso, impactam negativamente a produção agrícola e o crescimento econômico sustentado, contribuindo para a escassez de água e alimentos, o aumento da perda de florestas e desafios significativos relacionados à migração. Estimativas recentes revelam uma instabilidade nas emissões globais de CO<sub>2</sub>, as quais têm aumentado significativamente ao longo do último século. Evidentemente, isso se apresenta como um dos fatores que comprometem o progresso no crescimento econômico (Rehman; Ozturk; Zhang, 2019).

A mudança climática global é um assunto de extrema importância devido às altas concentrações atmosféricas de gases de efeito estufa (GEE), principalmente o CO<sub>2</sub>, proveniente principalmente de atividades antropogênicas como a queima de combustíveis fósseis e o desmatamento. Prevê-se que o contínuo aumento das emissões de CO<sub>2</sub> tenha repercussões significativas no sistema climático global, com consequências catastróficas que impactam todos os setores da sociedade (Raihan; Tuspekova, 2022).

O setor agrícola é amplamente reconhecido como uma das principais fontes de emissões de gases de efeito estufa, devido às práticas agrícolas frequentemente insustentáveis. Essas práticas, muitas vezes, não apenas prejudicam o meio ambiente, mas também comprometem a produtividade e a segurança alimentar (Liu et al., 2016).

A análise das emissões de gases de efeito estufa é essencial para o planejamento econômico, a tomada de decisões e o desenvolvimento ambiental. Atualmente, o CO<sub>2</sub> é reconhecido como o principal contribuinte para as emissões antropogênicas de gases de efeito estufa. Conforme relatado pelo Painel Intergovernamental sobre Mudanças Climáticas (IPCC), o CO<sub>2</sub> é responsável por aproximadamente 76,7% das emissões totais de gases de efeito estufa. Destas, 56,6% provêm da queima de combustíveis fósseis, cerca de 17,3% estão associados ao desmatamento, e 2,8% são provenientes de outras fontes (Rehman; Ozturk; Zhang, 2019).

É amplamente reconhecido que a agricultura desempenha um papel crucial na busca pela redução das emissões de CO<sub>2</sub>. Por sua vez, o setor agrícola está intrinsecamente ligado às condições climáticas, incluindo

temperatura, precipitação e eventos como inundações. Esses fatores exercem um efeito significativo sobre a produção agrícola, o abastecimento de alimentos e os preços das commodities, influenciando diretamente o desempenho econômico. De acordo com o World Bank a nível global, a agricultura contribui com aproximadamente 20% das emissões totais de CO<sub>2</sub>, enquanto o metano representa cerca de 70% e o óxido nitroso contribui com aproximadamente 90%. Esses números destacam a importância crítica de abordar as emissões provenientes da agricultura para alcançar metas ambientais e econômicas sustentáveis (Ben Jebli; Ben Youssef, 2017).

O aumento das emissões de CO<sub>2</sub> representa uma ameaça significativa das mudanças climáticas, sendo uma preocupação central tanto para países em desenvolvimento quanto para os desenvolvidos. Nos países desenvolvidos, o crescimento econômico muitas vezes está associado a um consumo energético intensivo, resultando em degradação ambiental. Recentemente, as emissões de CO<sub>2</sub> têm sido identificadas como a principal causa do efeito estufa, recebendo uma atenção considerável (Saidi; Hammami, 2015).

A contribuição do setor agrícola para as emissões globais de gases de efeito estufa varia entre 14% e 30%, devido ao intenso uso de energia proveniente de combustíveis fósseis. O emprego de equipamentos agrícolas movidos a combustível, práticas de irrigação, criação de gado e o uso de fertilizantes nitrogenados são responsáveis por grandes emissões desses gases. A Organização das Nações Unidas para a Alimentação e Agricultura (FAO) destaca que o setor agrícola possui um considerável potencial para reduzir suas emissões, incluindo a possibilidade de eliminar entre 80% e 88% das emissões recentes de CO<sub>2</sub> (Rehman; Ozturk; Zhang, 2019).

Uma considerável quantidade de emissões de CO<sub>2</sub> pode ser retirada do solo e do manejo das culturas por meio do aumento da matéria orgânica do solo. Exemplos incluem a adoção de práticas de cultivo mínimo ou zero, a transição de terras cultivadas para culturas permanentes e a restauração de áreas degradadas (Paustian et al., 2016).

As emissões de CO<sub>2</sub> e as mudanças climáticas e seu efeito na produtividade agrícola. O setor agrícola não só é uma fonte significativa de emissões de CO<sub>2</sub>, mas também é considerado altamente vulnerável às mudanças climáticas. A nível global, as emissões de CO<sub>2</sub> provenientes do setor

agrícola são ligeiramente inferiores às da indústria termoenergética. Portanto, é crucial reduzir as emissões de CO<sub>2</sub> relacionadas à agricultura e promover a adoção de práticas agrícolas de baixo carbono. Isso não apenas contribuirá para o desenvolvimento econômico, mas também para a mitigação dos efeitos ambientais e a gestão eficiente da energia (Fais; Sabio; Strachan, 2016).

A exploração dos solos agrícolas, uma prática socioeconômica difundida, desempenha um papel significativo nas emissões de dióxido de carbono CO<sub>2</sub>. Estatísticas revelam que as emissões agrícolas de CO<sub>2</sub> correspondem a cerca de 30% do total das emissões da sociedade humana. É notável que a China, uma nação de relevância agrícola, contribui com aproximadamente 10-12% dessas emissões agrícolas de CO<sub>2</sub>. Esses números destacam a importância de abordar a gestão dos solos agrícolas para mitigar as emissões de gases de efeito estufa e promover práticas mais sustentáveis na agricultura. A intensidade de carbono, a estrutura agrícola e a força de trabalho na agricultura têm desempenhado papéis significativos na redução das emissões de CO<sub>2</sub> originadas pelo uso da terra agrícola na China. Em particular, destaca-se o nível econômico agrícola como fator determinante na promoção ou mitigação das emissões de CO<sub>2</sub> associadas ao uso dos solos agrícolas (Liu et al., 2023).

O incremento das emissões de gases de efeito estufa (GEE) tem contribuído para as mudanças climáticas, acarretando efeitos adversos tanto nas sociedades quanto no meio ambiente. Em decorrência disso, a contribuição dos diversos setores econômicos para essas emissões e para as medidas de mitigação das mudanças climáticas tem sido objeto de crescente escrutínio. O agravamento do aquecimento global culminou na formação de um acordo climático global, notavelmente o Acordo de Paris de 2015, o qual impõe aos estados-membros o compromisso de limitar o aquecimento global a menos de 2 °C. O consumo de energia ou eletricidade e a produção agrícola exercem um papel crucial no avanço do desenvolvimento econômico e, por conseguinte, têm sido destacados como importantes contribuintes para a degradação ambiental (Phiri et al., 2021).

A geração e o consumo de eletricidade representam cerca de 40% das emissões globais de CO<sub>2</sub>. A produção agrícola e a mineração estão entre os principais contribuintes para as emissões de gases de efeito estufa (GEE). Nos anos 2000 e 2010, as emissões anuais de GEE da produção agrícola e das

mudanças no uso da terra variaram de 5,0 a 5,8 GtCO<sub>2</sub> eq/ano e de 4,3 a 5,5 GtCO<sub>2</sub> eq/ano, respectivamente. Segundo a Organização para a Alimentação e Agricultura (FAO), as emissões globais de GEE provenientes da produção agrícola, especialmente da pecuária e da produção agrícola, aumentaram de 4,7 bilhões de toneladas de equivalentes de dióxido de carbono (CO<sub>2</sub> eq) para mais de 5,3 bilhões de toneladas entre 2001 e 2011. As emissões de CO<sub>2</sub> relacionadas à agricultura estão principalmente ligadas ao consumo de energia, como a operação de máquinas e a aplicação de fertilizantes, e às emissões de CO<sub>2</sub> associadas ao uso da terra, como a conversão de terras para fins agrícolas. A agricultura também é reconhecida como um dos setores econômicos com maiores efeitos ambientais (Phiri et al., 2021).

O rápido desenvolvimento agrícola e a mecanização da indústria agronômica têm levado a um aumento significativo no consumo de energia e nas emissões de CO<sub>2</sub>, conforme revelado pelos resultados de estudos. A longo prazo, observa-se uma relação positiva entre as emissões de CO<sub>2</sub> e áreas cultivadas, uso de energia, aplicação de fertilizantes, colheitas, produto interno bruto per capita e disponibilidade de água. No entanto, há uma relação negativa entre a melhoria da distribuição de sementes e o total de grãos alimentares. O setor agrícola representa uma fonte crucial de emissões de dióxido de carbono, tornando essencial reduzir essas emissões e promover a adoção de práticas agrícolas de baixo carbono. Essa transição é vital para o desenvolvimento econômico sustentável e para o controle ambiental e energético (Ahmad et al., 2020).

Recentemente, os estudos sobre o fluxo de gases no bioma Cerrado têm ganhado destaque, impulsionados pela urgência de quantificar as emissões de gases de efeito estufa (GEE) provenientes da decomposição dos resíduos culturais da soja e, especialmente, do fertilizante nitrogenado utilizado em culturas que não fixam N<sub>2</sub> atmosférico. Isso visa a elaboração de inventários mais precisos em escalas regional e nacional para o setor agrícola (Siqueira Neto et al., 2011).

Estudos recentes no Cerrado reforçam essa linha de investigação: Carvalho et al. (2024) evidenciam que as culturas de cobertura sob plantio direto afetam o nitrogênio mineral no solo e a eficiência do uso de N no milho, o que influencia diretamente as emissões de N<sub>2</sub>O. Barbosa et al. (2025) simulam

estoques de carbono e nitrogênio sob sistemas conservacionistas, oferecendo cenários de mitigação para fluxos de N e C. Além disso, Arruda et al. (2024) exploram as mudanças na dinâmica de fogo ao longo de quatro décadas, um fator que modula a emissão de gases de carbono no Cerrado. Da Veiga et al. (2025), em sua revisão, destacam como as emissões por fogo precisam ser integradas às estimativas de GEE no bioma, apontando lacunas metodológicas importantes. Por fim, Schwambach et al. (2025) analisam os efeitos da mudança no uso da terra e da variabilidade climática nos fluxos hídricos do Cerrado, contribuindo à compreensão integrada dos processos biogeoquímicos sob pressão agrícola.

Considerando os trabalhos reportados, a hipótese de pesquisa 3: Existe relação positiva e significativa de emissões de CO<sub>2</sub> com a produtividade agrícola.

#### 2.4 Produtividade agrícola e área florestal

É um desafio significativo conciliar a produção agrícola com a conservação das florestas em várias partes do mundo. Em muitos países tropicais, a expansão das terras agrícolas e pastagens está diretamente relacionada à desflorestação, impulsionada pela crescente demanda global por produtos agrícolas. No Brasil, especificamente na região amazônica, o desenvolvimento da agricultura tem sido historicamente vinculado ao desmatamento, uma tendência que remonta à colonização da área na década de 1960. Atualmente, aproximadamente 40% da população bovina total do país e grande parte das monoculturas de soja estão concentradas no bioma Amazônia (Pinillos et al., 2021).

A principal legislação de conservação de terras privadas no Brasil é a Reserva Legal (RL), estabelecida pelo Código Florestal, Lei nº 12.651/2012. Esta legislação determina que os proprietários devem manter uma porcentagem específica de área com vegetação nativa em suas propriedades para proteger a biodiversidade. Essas porcentagens variam de 80% na Amazônia, 35% em zonas de transição entre Amazônia e Cerrado, e 20% nos biomas Cerrado, Mata Atlântica, Caatinga, Pantanal e Pampa. O conceito legal das RLs é exclusivo do Brasil e é também uma das partes mais controversas da legislação ambiental,

pois impõe limitações às atividades agrícolas em propriedades rurais sem uma compensação direta aparente (PinilloS et al., 2021).

O aumento da demanda por terras agrícolas tem sido um dos principais impulsionadores da desflorestação, resultando na perda de biodiversidade e no agravamento das mudanças climáticas. Por muito tempo, diversos intervenientes têm argumentado que garantir os direitos de propriedade das populações locais e aprimorar a gestão dos recursos comuns podem contribuir significativamente para a proteção das florestas. Recentemente, um apelo global à ação, respaldado por mais de 300 organizações, enfatizou que a crise global da insegurança dos direitos fundiários compromete nossa habilidade de lidar com as mudanças climáticas. Tradicionalmente, os conservacionistas têm se concentrado em intervenções de posse focadas nas florestas, como a criação de áreas protegidas. No entanto, a eficácia das áreas protegidas na preservação das florestas é limitada, e pode surgir conflitos importantes entre a conservação dos ecossistemas dessa forma e o estímulo à atividade econômica. Embora muitos países de baixa renda tenham implementado programas para melhorar a governança das terras rurais, esses esforços frequentemente se concentraram na segurança das terras agrícolas, deixando incertezas quanto ao efeito dessa abordagem nas florestas (Wren-Lewis; Becerra-Valbuena; Houngbedji, 2020).

A adoção da Agenda de Desenvolvimento Sustentável (SDA) 2030 pela Organização das Nações Unidas (ONU) em setembro de 2015 trouxe maior atenção às questões de sustentabilidade. Uma variedade de entidades, incluindo governos, organizações estatísticas e pesquisadores, começaram a monitorar o progresso em direção à sustentabilidade e a propor soluções para conciliar o crescimento econômico com a preservação ambiental. Embora a cobertura florestal global continue a diminuir, a expansão das terras agrícolas tem sido observada nos últimos anos. Com menos de uma década para cumprir a agenda 2030, as preocupações com a degradação ambiental estão crescendo, e os esforços para combatê-la estão se intensificando. Parece que medidas recentes estão começando a dar frutos, já que as emissões per capita de dióxido de carbono (CO<sub>2</sub>) têm se mantido relativamente estáveis desde 2016 (Chopra et al., 2022).

A agricultura, um dos principais impulsionadores da degradação ambiental, tem sido associada às emissões de CO<sub>2</sub> e às mudanças climáticas

globais, sendo considerada altamente sensível a essas mudanças. As atividades agrícolas, florestais e outros usos da terra e mudanças no uso da terra, uso da terra e silvicultura respondem por cerca de um quinto das emissões globais anuais de CO<sub>2</sub>, tornando-se a segunda maior fonte de emissões de CO<sub>2</sub> e um contribuinte-chave para as mudanças climáticas globais (Chopra et al., 2022).

Os ecossistemas florestais desempenham um papel crucial no sistema climático global, atuando tanto como fontes quanto como sumidouros de carbono. Eles têm uma influência significativa na mitigação das mudanças climáticas, absorvendo o CO<sub>2</sub> atmosférico e armazenando-o na biomassa das árvores, processo conhecido como sequestro de carbono. Anualmente, aproximadamente 300 bilhões de toneladas de emissões de CO<sub>2</sub> da atmosfera são absorvidas pelos ecossistemas florestais globais. No entanto, estima-se que cerca de três bilhões de toneladas sejam liberadas anualmente para o ambiente devido à desflorestação. O desmatamento resulta em problemas ecológicos de longo prazo, ao intensificar os efeitos das mudanças climáticas, contribuindo para a desertificação, inundações, erosão do solo e perda de habitats naturais (Chopra et al., 2022).

Com base em abordagens experimentais de campo, diversos estudos ecológicos têm revelado que os habitats naturais têm o potencial de impactar positivamente os rendimentos agrícolas por meio do controle biológico de pragas. A proximidade, extensão e diversidade dos habitats naturais são considerados fatores essenciais para melhorar efetivamente o controle biológico. No entanto, em alguns casos, os habitats naturais podem não proporcionar melhorias significativas no controle de pragas em ambientes agrícolas reais. Foram identificadas algumas condições em que os habitats naturais não conseguem aumentar a produção agrícola. Por exemplo, quando as florestas servem como habitat para insetos prejudiciais em vez de seus predadores, os habitats naturais podem resultar em perdas nas colheitas. Portanto, os efeitos dos habitats naturais na agricultura prática ainda carecem de clareza e devem ser examinados mais detalhadamente (Yamamoto et al., 2019).

A demanda crescente por alimentos, moradia, agricultura, transporte em massa e outras infraestruturas está aumentando a pressão sobre as terras florestais. Urbanização, industrialização, assentamentos, mineração e agricultura têm contribuído para o esgotamento dessas áreas. Mudanças no uso

da terra, como urbanização rápida e desmatamento, podem resultar em grandes emissões de dióxido de carbono e mudanças climáticas.

No entanto, as florestas desempenham um papel crucial no sistema climático, agindo tanto como fontes quanto como sumidouros de carbono. Quando as árvores absorvem dióxido de carbono do ar e o armazenam em sua biomassa, ocorre o sequestro de carbono, o que ajuda a desacelerar as mudanças climáticas. Todos os anos, as áreas florestais retêm aproximadamente 300 bilhões de toneladas de CO<sub>2</sub>, enquanto é previsto que mais três bilhões de toneladas de CO<sub>2</sub> escapem para a atmosfera como resultado da desflorestação (Raihan, 2023).

Estudos recentes reforçam e ampliam essa perspectiva. Dutra et al. (2024) relatam que as emissões líquidas resultantes da mudança no uso da terra e do setor florestal mais do que duplicaram entre 2017 e 2022, impulsionadas principalmente pelo desmatamento em biomas tropicais, como o Cerrado e a Amazônia. Garrett et al. (2024) chamam atenção para a relevância do carbono profundo nos solos florestais, cuja persistência está ameaçada pela intensificação das mudanças climáticas. O relatório *Perspectives* (2025) destaca que, embora as florestas representem um dos mais importantes sumidouros de carbono do planeta, sua capacidade de armazenamento não é permanente, sendo afetada por distúrbios antrópicos e naturais. Em análise espacial, Ilgaz (2024) observa que as variações no estoque de carbono florestal decorrem de diferenças regionais no manejo e na regeneração das áreas. Finalmente, a revisão publicada em *Carbon Balance and Management* (2024) mostra que eventos climáticos extremos, incêndios e pragas têm potencial para converter florestas de sumidouros em fontes líquidas de carbono, especialmente em regiões de alta vulnerabilidade ecológica.

Considerando os trabalhos reportados, a hipótese de pesquisa 4: Existe relação positiva e significativa de área florestal com a produtividade agrícola.

## 2.5 Produtividade agrícola e emprego na agricultura

A agricultura representa a mais ancestral prática da humanidade, atendendo à urgente demanda de prover os nutrientes essenciais para a subsistência e perpetuação dos grupos humanos. Mediante a domesticação de

espécies e a cultivação da natureza, esta atividade, impulsionada pelo trabalho humano, estabelece uma relação fundamental entre as sociedades e seu ambiente natural. Portanto, debater sobre o porvir do trabalho agrícola não apenas permite vislumbrar o destino desse setor, mas também transcende para o horizonte futuro de nossas sociedades (Losch, 2022).

Os programas e políticas agrícolas devem ser cuidadosamente planejados para impulsionar os atuais registros de produtividade agrícola, os meios de subsistência rurais e a segurança alimentar. Reconheceu que a atenção ao gênero como uma dimensão transversal é uma estratégia promissora para alcançar os objetivos desejados. Os programas focados na melhoria da produtividade agrícola devem considerar atividades que promovam a participação de ambos os gêneros nas contribuições agrícolas em vários níveis. Alinhado com isso, enfatizou que a transformação estrutural da agricultura na África é fundamental para impulsionar a produtividade agrícola, a segurança alimentar e a redução da pobreza no continente. No entanto, destacou que um componente crucial dessa transformação é a igualdade de gênero, devido ao seu potencial efeito na inclusão social e na geração de empregos (Folarin et al., 2021).

A composição da mão de obra nas atividades agrícolas, incluindo tanto a quantidade quanto à qualidade, juntamente com sua proporção no total da força de trabalho, revela a trajetória de mudança estrutural de cada economia e sociedade. Esses dados também fornecem insights cruciais para identificar as possibilidades de resposta às demandas locais e globais: a maneira como a agricultura irá suprir alimentos, rações e serviços ambientais e sociais está intimamente ligada à configuração específica de trabalho e capital que define cada modelo de desenvolvimento agrícola, bem como ao contexto político envolvido (Losch, 2022).

As transformações estruturais em uma economia, à medida que avança em direção a um status de renda elevada, têm sido consistentes até agora nos Estados Unidos e nos países europeus. Com o aumento da produtividade agrícola, observa-se uma redução na proporção de pessoas empregadas na agricultura, ao passo que a urbanização e o emprego na indústria aumentam. Esse fenômeno é acompanhado por uma crescente demanda por mão de obra qualificada em setores tecnologicamente avançados, contribuindo para uma

mudança no perfil ocupacional e no padrão de consumo. Além disso, o progresso econômico muitas vezes impulsiona melhorias nos padrões de vida, acesso a serviços públicos e oportunidades educacionais, influenciando diretamente a dinâmica socioeconômica das nações em transição para uma economia de alta renda (Ramachandran, 2021).

Uma das principais lacunas na organização da produção agrícola e na eficiente alocação dos recursos de mão de obra disponíveis é a escassez de especialistas e gestores altamente qualificados no processo produtivo. Observa-se que o conhecimento dos atuais gestores e especialistas agrícolas frequentemente não atende plenamente às demandas do mercado contemporâneo (Berdimurodov et al., 2023).

Ao priorizar o aumento da produtividade agrícola, os sistemas alimentares têm a oportunidade de fortalecer sua resiliência e impulsionar o crescimento econômico de forma abrangente, enquanto também contribuem para a criação de empregos. Investimentos direcionados para melhorar a eficiência e o rendimento no setor agrícola não apenas aumentam a oferta de alimentos, mas também promovem a estabilidade econômica, reduzindo a dependência externa e estimulando o desenvolvimento local. Isso não apenas fortalece a segurança alimentar, mas também cria oportunidades de emprego em várias etapas da cadeia produtiva agrícola, desde a produção até a distribuição e comercialização (Zeigler; Steensland, 2022).

Na atualidade, os produtores agrícolas, incluindo as explorações agrícolas, enfrentam restrições na capacidade de oferecer incentivos materiais ao trabalho ou de obter as matérias-primas e ferramentas essenciais. Além disso, a formação de especialistas necessários para a agricultura não atende às exigências de uma economia de mercado. Uma das principais razões para isso é a escassez de especialistas altamente qualificados disponíveis para lecionar palestras e ministrar aulas práticas em instituições de ensino superior voltadas para a formação de profissionais necessários ao setor agrícola, devido às restrições salariais. A falta de equipamentos inovadores nas salas de aula e laboratórios para as aulas práticas também tem um efeito negativo (Berdimurodov et al., 2023).

Tradicionalmente, o setor agrícola tem desempenhado um papel crucial como fonte de emprego nas áreas rurais. No entanto, ao longo das últimas

décadas, o emprego agrícola tem declinado rapidamente, e há projeções de que o número de empregos no setor agrícola da União Europeia será reduzido pela metade nos próximos vinte anos. Esta redução do emprego agrícola acarreta consequências significativas para o cenário de empregos nas regiões rurais, especialmente quando a parcela da agricultura no emprego total é substancialmente alta. A menos que sejam fornecidas oportunidades de emprego alternativas em número suficiente, esta tendência pode afetar adversamente a estabilidade econômica e social dessas comunidades rurais (Schwarcz et al., 2012).

Quase metade da superfície terrestre sem gelo é dedicada à agricultura, e aproximadamente um terço da força de trabalho humana está empregada nesse setor. As diversas culturas apresentam variadas necessidades de recursos, estão ligadas a práticas agrícolas distintas e são cultivadas em épocas diversas ao longo do ano. Essa variedade de práticas agrícolas também está intimamente ligada à disponibilidade de recursos naturais, como água e solo fértil, bem como às técnicas e tecnologias disponíveis em cada contexto. Ademais, a sazonalidade das culturas influencia não apenas os padrões de produção, mas também os fluxos de trabalho e os ciclos econômicos em áreas rurais, evidenciando a interconexão entre a agricultura e a vida cotidiana das comunidades agrárias. (Garibaldi; Pérez-Méndez, 2019).

O avanço eficiente da agricultura demanda a utilização de recursos humanos nas empresas agrícolas, gerando empregos e oferecendo incentivos econômicos aos empregadores conforme a demanda de mercado. Além de manter pessoal qualificado na produção rural, é crucial fornecer estímulos financeiros e morais aos investidores privados que estejam ativamente engajados na criação de novas oportunidades de trabalho (Berdimurodov et al., 2023).

O emprego agrícola representa um desafio para os formuladores de políticas na Europa. Por um lado, a participação da agricultura no emprego de todas as economias da Europa Ocidental tem diminuído constantemente ao longo das décadas. Por outro lado, muitos cidadãos consideram a preservação dos empregos uma prioridade fundamental do governo. Nessa linha de raciocínio, políticos e representantes do setor agrícola frequentemente afirmam que uma política agrícola protetora é essencial para manter os empregos no

setor. Além disso, argumenta-se que a agricultura possui um grande potencial para fornecer serviços ambientais, contribuir para a qualidade de vida nas áreas rurais e ser uma fonte de matéria-prima para a produção de energia. (Petrick; Zier, 2012).

O emprego agrícola representa um desafio para os formuladores de políticas na Europa. Por um lado, a participação da agricultura no emprego de todas as economias da Europa Ocidental tem diminuído constantemente ao longo das décadas. Por outro lado, muitos cidadãos consideram a preservação dos empregos uma prioridade fundamental do governo. Nessa linha de raciocínio, políticos e representantes do setor agrícola frequentemente afirmam que uma política agrícola protetora é essencial para manter os empregos no setor. Além disso, argumenta-se que a agricultura possui um grande potencial para fornecer serviços ambientais, contribuir para a qualidade de vida nas áreas rurais e ser uma fonte de matéria-prima para a produção de energia (Petrick; Zier, 2012).

Nos estudos mais recentes, observa-se uma intensificação dessa preocupação diante das transformações tecnológicas e das metas de sustentabilidade da União Europeia. Herman et al. (2025) demonstram que as mudanças estruturais nas propriedades agrícolas europeias, marcadas pela concentração fundiária e pela automação, têm alterado o perfil do emprego rural, reduzindo o número de trabalhadores, mas aumentando a demanda por qualificação técnica. Em perspectiva semelhante, o Parlamento Europeu (2024) aponta que, embora o emprego agrícola continue em declínio, políticas de melhoria das condições de trabalho e de proteção social têm se tornado centrais para garantir a atratividade do setor. Máró et al. (2025) acrescentam que o envelhecimento da população rural e a baixa renovação geracional comprometem a sustentabilidade da força de trabalho agrícola, exigindo políticas inovadoras de integração entre educação rural, tecnologia e transição verde. Por fim, o relatório *Rural Areas and Rural Policy in Europe* (2024) reforça que o emprego agrícola permanece um pilar da coesão territorial, desempenhando papel essencial na manutenção dos serviços ecossistêmicos e na vitalidade econômica das áreas rurais.

Considerando os trabalhos reportados, a hipótese de pesquisa 5: Existe relação negativa e significativa de emprego na agricultura com a produtividade agrícola.

### **3. MATERIAL E MÉTODOS**

Neste trabalho, deu-se ênfase à abordagem quantitativa, com diretrizes definidas a partir da coleta, organização e análise de dados secundários obtidos no portal de informações do Banco Mundial (World Bank Data). O recorte temporal da pesquisa compreendeu o período de 1996 a 2022, considerando a indisponibilidade dos dados consolidados referentes aos anos de 2023 a 2025 no momento da análise. As variáveis consideradas referiam-se à produtividade agrícola e aos fatores que, potencialmente, a influenciam: investimentos em pesquisa e desenvolvimento (P&D), gastos com educação (GE), emissões de CO<sub>2</sub> (CO), área florestal (AF) e emprego na agricultura (EA).

A amostra principal foi composta por 19 países membros do G20 (Argentina, Austrália, Brasil, Canadá, China, França, Alemanha, Índia, Indonésia, Itália, Japão, México, República da Coreia, Rússia, Arábia Saudita, África do Sul, Turquia, Reino Unido, Estados Unidos da América) e a União Europeia, totalizando 20 unidades de análise ao longo de 26 anos consecutivos. A escolha por esses países justificou-se pelo fato de que, conforme o Fundo Monetário Internacional (FMI, 2023), o G20 representava cerca de 85% do Produto Interno Bruto (PIB) mundial, reunindo as maiores economias globais e países com papel estratégico na produção agrícola internacional.

A etapa de organização e análise dos dados foi conduzida com o suporte do software EViews (Econometric Views), amplamente utilizado em estudos econômétricos por sua robustez e precisão na modelagem de dados em painel. A ferramenta foi empregada para consolidar a base de dados, executar estatísticas descritivas, estimar modelos de regressão e realizar testes de diagnóstico relevantes à consistência dos resultados.

Foram realizadas duas análises estatísticas distintas: a primeira considerando o conjunto completo de países do G20, com o intuito de capturar as tendências gerais do grupo, e a segunda voltada exclusivamente para os países não desenvolvidos do G20, com base na classificação do Banco

Mundial. Essa última análise teve como objetivo compreender melhor as especificidades e vulnerabilidades desses países no que tange à produtividade agrícola.

A classificação adotada baseia-se na categorização da ONU e de organismos internacionais, que distinguem economias desenvolvidas das demais. Dessa forma, Alemanha, Austrália, Canadá, Coreia do Sul, Estados Unidos, França, Itália, Japão, Reino Unido e União Europeia foram considerados países desenvolvidos. África do Sul, Arábia Saudita, Argentina, Brasil, China, Índia, Indonésia, México, Rússia e Turquia compõem o grupo de países não desenvolvidos para fins analíticos. Essa estratégia possibilitou comparar grupos com estruturas produtivas e institucionais distintas, contribuindo para uma interpretação mais consistente dos resultados econôméticos à luz das características específicas de cada conjunto de países.

Essa estratégia possibilitou uma comparação mais precisa entre contextos diferenciados e reforçou a importância de políticas públicas adaptadas às realidades dos países em desenvolvimento, nos quais a agricultura ainda enfrentava desafios relacionados à infraestrutura, tecnologia e qualificação da mão de obra. A análise segregada contribuiu para identificar com maior clareza os efeitos das variáveis investigadas, favorecendo uma interpretação mais refinada dos resultados estatísticos à luz das características estruturais de cada grupo.

**Tabela 1 - Descrição das Variáveis**

Hipótese	Variável	Descrição
VD*	Produtividade agrícola (PA)	(Kg por hectare)
H1 (+)	Gasto com educação (GE)	(% do PIB)
H2 (+)	Gasto com pesquisa e desenvolvimento na agricultura (P&D)	(% do PIB)
H3 (+)	Emissões de CO <sub>2</sub> (CO)	(Ton. métricas per capita)
H4 (+)	Área florestal (AF)	(% da área terrestre)
H5 (-)	Emprego na agricultura (EA)	(% do emprego total)

\* Variável dependente

Fonte: Elaborada pelo autor com base nos dados da pesquisa

Foram calculadas estatísticas descritivas para cada variável, incluindo média, desvio padrão, mínimo, máximo e quartis, para obter uma visão geral dos dados. Ainda, foi realizada uma análise de correlação para verificar se existe

uma relação inicial entre as variáveis, através do coeficiente de correlação de Pearson. Para avaliar a relação entre as variáveis foi utilizada uma regressão linear múltipla, de acordo com o seguinte modelo:

$$PA_{it} = \beta_0 + \beta_1 GE_{it} + \beta_2 P\&D_{it} + \beta_3 CO_{it} + \beta_4 AF_{it} + \beta_5 EA_{it}$$

Foram avaliados testes de robustez com o objetivo de identificar o modelo mais adequado, considerando o painel contemporâneo. Para assegurar a consistência dos resultados, foram utilizadas variáveis de controle (e.g., variáveis climáticas ou de política agrícola).

#### **4. RESULTADOS E DISCUSSÃO**

Na análise das medidas de tendência central, constatamos que, de modo geral, a média e a mediana são bastante próximas para todas as variáveis, o que sugere uma distribuição de dados pouco assimétrica, com exceção da EA (Emprego na agricultura). A discrepância significativa entre a média e a mediana nessa variável sugere a presença de valores atípicos elevados, indicando uma possível influência desses pontos extremos nos resultados das análises estatísticas.

Ao examinar a assimetria (Skewness), notamos que a maioria das variáveis apresenta assimetria positiva, com exceção a PA (Produtividade Agrícola) e a variável GE (Gasto com educação), que exibem uma assimetria ligeiramente negativa. Destaca-se a assimetria mais pronunciada em EA (Emprego na agricultura), apontando para uma cauda longa à direita na distribuição dos dados.

A análise da curtose (Kurtosis) revela que a PA (Produtividade Agrícola) e EA (Emprego na agricultura) exibem uma curtose alta, caracterizando distribuições leptocúrticas, ou seja, mais pontiagudas e com caudas mais pesadas. Por outro lado, as outras variáveis demonstram uma curtose próxima de 3, sugerindo uma distribuição mais próxima da normal, ou seja, mesocúrtica.

Além disso, ao considerar o desvio padrão, observamos que ele é relativamente alto em relação à média para todas as variáveis, o que aponta para uma alta variabilidade nos dados. A variável CO (Emissões de CO<sub>2</sub>) se destaca

com o maior desvio padrão, indicando uma grande dispersão nos valores dessa variável. Esses achados são cruciais para compreender a distribuição e a dispersão dos dados, fornecendo insights fundamentais para a interpretação adequada dos resultados estatísticos e a validade das inferências realizadas.

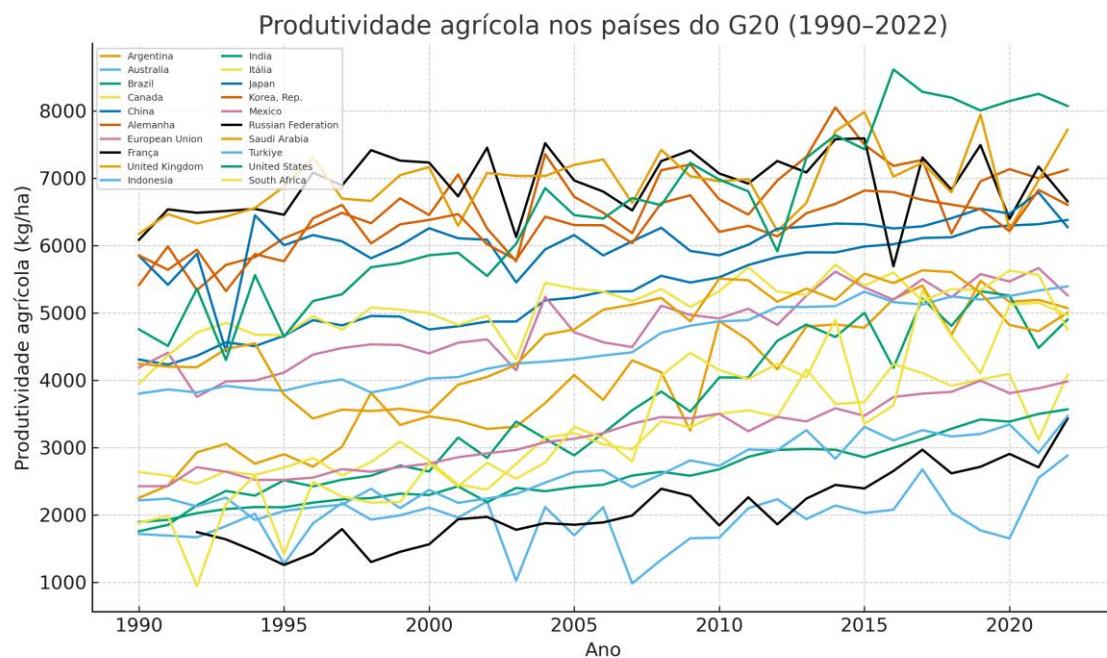
**Tabela 2 - Estatística Descritiva das variáveis da pesquisa**

Variáveis (anual)	Média	Mediana	Máximo	Mínimo	Desvio Padrão
PA (kg por hectare)	4512,32	4622,88	8614,20	944,70	1757,75
P&D (% do PIB)	1,53	1,46	5,21	0,04	1,03
GE (% do PIB)	4,60	4,65	8,83	0,86	1,21
CO (ton. per capita)	669,78	490,26	2223,83	12,60	552,07
AF (% da área terrestre)	33,25	32,37	70,45	0,45	18,74
EA (% do emprego total)	13,38	6,02	63,35	0,57	15,57

Fonte: Elaborada pelo autor com base nos dados da pesquisa

A Figura 01 apresenta a evolução da produtividade agrícola nos países do G20 ao longo do período analisado, permitindo uma visualização clara das diferenças estruturais entre as economias do grupo. O gráfico evidencia trajetórias contrastantes, com alguns países exibindo crescimento consistente, enquanto outros apresentam oscilações que refletem limitações tecnológicas, institucionais ou ambientais. Essa representação visual complementa os dados tabulados, oferecendo um panorama comparativo que auxilia na interpretação das disparidades produtivas e na identificação de tendências relevantes para a análise.

**Figura 1 – Produtividade Agrícola nos países do G20**



Fonte: Elaborada pelo autor com base nos dados da pesquisa

A produtividade agrícola média dos países do G20 em 2022 foi de aproximadamente 5171,6 kg/ha, valor que evidencia uma significativa heterogeneidade entre os membros do grupo. Países como os Estados Unidos (8071,7 kg/ha), Reino Unido (7720,1 kg/ha) e Alemanha (7126,1 kg/ha) figuraram entre os mais produtivos, apresentando desempenhos bem acima da média do grupo. Esse alto rendimento pode ser associado à forte presença de tecnologias de ponta no setor agropecuário, à elevada mecanização, ao uso intensivo de insumos modernos e a políticas públicas de incentivo à pesquisa e desenvolvimento (P&D) voltadas ao setor rural. Esses resultados corroboram as evidências da literatura (ex: Salim & Islam, 2010; Alene, 2010) que apontam a inovação tecnológica como fator crucial para ganhos de produtividade agrícola.

Na outra extremidade, países como África do Sul (4964 kg/ha), México (3981,3 kg/ha), Turquia (3464,7 kg/ha) e Rússia (3428,7 kg/ha) apresentaram índices de produtividade abaixo da média do grupo. Embora esses países tenham registrado avanços ao longo das últimas décadas, os dados históricos apontam oscilações relevantes e, em alguns casos, estagnação. A Rússia, por exemplo, demonstrou baixa produtividade ao longo da série histórica, o que pode refletir limitações estruturais, menor investimento em P&D agrícola e desafios

relacionados à adaptação climática e à gestão eficiente dos recursos naturais. Esse cenário pode indicar fragilidades institucionais e tecnológicas que comprometem o pleno aproveitamento da capacidade produtiva de suas terras agrícolas.

Ao se observar a trajetória de crescimento no período de 1996 a 2022, verifica-se que países como Brasil, China e Índia tiveram aumentos consistentes na produtividade, embora ainda estejam aquém dos níveis das economias mais desenvolvidas. O Brasil, por exemplo, passou de aproximadamente 2422 kg/ha em 1996 para 4901,1 kg/ha em 2022, praticamente dobrando sua produtividade. Esse crescimento pode ser atribuído à difusão de práticas agrícolas modernas, ao uso de sementes geneticamente modificadas e à expansão de sistemas de produção integrados como o ILPF (Integração Lavoura-Pecuária-Floresta). Entretanto, desafios como a degradação do solo, mudanças climáticas e limitações de acesso a crédito e assistência técnica ainda precisam ser enfrentados para que esses ganhos se consolidem e se ampliem de forma sustentável.

No conjunto do G20, a produtividade agrícola variou entre 944,7 kg/ha (mínimo) e 8614,2 kg/ha (máximo), refletindo uma forte heterogeneidade entre os países. Essa dispersão é acompanhada também nas variáveis explicativas: os gastos com P&D oscilaram de 0,04% a 5,21% do PIB, e os gastos com educação de 0,86% a 8,83% do PIB; já as emissões de CO<sub>2</sub> per capita variaram de 12,6 a 2223,8 toneladas, e o emprego na agricultura de 0,57% a 63,35% da força de trabalho. Quanto à área florestal (AF), verificou-se amplitude de 0,45% a 70,45% da área terrestre, indicador decisivo para se entender os desafios entre expansão agrícola e conservação ambiental. Essa variabilidade mostra como o crescimento produtivo não se dá de forma homogênea, mas condicionado a fatores institucionais, tecnológicos e ambientais próprios de cada país.

A variável área florestal (AF) merece destaque, pois apresenta grande amplitude entre os países do G20, variando de apenas 0,45% até 70,45% da área terrestre. Essa disparidade evidencia realidades contrastantes: enquanto algumas economias convivem com baixa cobertura florestal e maior vulnerabilidade a processos de degradação ambiental, outras ainda mantêm extensas áreas de vegetação nativa, enfrentando o dilema entre conservar os recursos naturais ou expandir a fronteira agrícola. No Brasil, por exemplo, a

relação entre produtividade e área florestal é marcada por tensões históricas, já que o aumento da produção muitas vezes ocorreu às custas do desmatamento, sobretudo na Amazônia. Nesse contexto, a AF não apenas representa um indicador ambiental, mas também um elemento crucial para políticas de sustentabilidade, já que a manutenção das florestas pode atuar como sumidouro de carbono, contribuir para a regulação climática e, em contrapartida, impor restrições à expansão da produção agrícola.

Foram realizados os testes de estacionariedade, normalidade e multicolinearidade para todas as variáveis da pesquisa e posterior estimativa por Newey-West (*i.e.* ajustamento para heterocedasticidade e autocorrelação). Para estacionariedade foram realizados os testes de raiz unitária PP-Fisher, ADF-Fisher e LmPS significativos a 1% em primeira diferença para todas as variáveis da pesquisa. Normalidade de acordo com o Teorema do Limite Central. Multicolinearidade com teste VIF menor que 5. Em tempo, a análise por meio de regressão múltipla com dados em painel conforme a Tabela 3:

**Tabela 3 - Análise da regressão das variáveis**

Variável	Coeficiente	Erro Padrão	t-estatística	p-valor	Significância
P&D	-0,0303	0,0343	-0,8830	0,515	não significativo a 10%
GE	0,0029	0,0045	0,6505	0,377	não significativo a 10%
CO	3,97e-0,5	2,36e-05	1,6807	0,652	positivo e significativo 10%
AF	0,0062	0,01390	0,4500	0,093	não significativo 10%
EA	-0,0085	0,0024	-3,5582	0,00038	negativo e significativo a 1%
		$R^2$		0,0359	
		Estimação por <i>Newey-West Fixed</i> (todas as variáveis em primeira diferença)			

Fonte: Elaborada pelo autor com base nos dados da pesquisa

Ao analisar o coeficiente da variável P&D (Pesquisa e Desenvolvimento), identificou-se um valor negativo (-0,0303), mas estatisticamente não significativo ao nível de 10%, refutando a Hipótese 1 da pesquisa. Apesar de estudos anteriores, como os de Chandio et al. (2022), Salim e Islam (2010) e Alene

(2010), apontarem o papel decisivo dos investimentos em P&D na produtividade agrícola, os resultados deste modelo não corroboram essa relação. A ausência de significância estatística a 10% pode estar relacionada a limitações nos dados disponíveis, heterogeneidade entre os países da amostra ou à forma como os investimentos em P&D se refletem ao longo do tempo.

A variável GE (Gastos com Educação), representando a primeira diferença dos investimentos educacionais, apresentou coeficiente positivo (0,0029), porém também não significativo a 10%. Esse resultado refuta a Hipótese 2 da pesquisa, indicando que, dentro do modelo estimado, as variações nos gastos com educação não explicam de forma estatisticamente relevante a produtividade agrícola. Embora estudos como os de Ntsama e Sougouma (2022) e Dietrich et al. (2010) ressaltem a importância da educação na adoção de tecnologias agrícolas, a ausência de significância estatística observada neste modelo pode ser atribuída à presença de efeitos de longo prazo não capturados, à baixa qualidade dos dados disponíveis ou ao uso de medidas agregadas que não refletem com precisão o efeito real da educação sobre o setor agrícola.

Por outro lado, a variável CO (Emissões de CO<sub>2</sub>) apresentou coeficiente positivo (3,97e-05) e estatisticamente significativo ao nível de 10%, confirmando a Hipótese 3 da pesquisa. Isso sugere que mudanças nas emissões de CO<sub>2</sub> estão associadas positivamente à produtividade agrícola, o que pode refletir efeitos indiretos, como o aumento de temperatura e concentração de CO<sub>2</sub> que, em alguns contextos, podem estimular o crescimento vegetal, conforme observado por Rehman et al. (2019) e Liu et al. (2016). No entanto, essa relação deve ser interpretada com cautela, já que os efeitos das mudanças climáticas são complexos e podem variar significativamente por região e cultura agrícola.

A variável AF (Área Florestal) apresentou coeficiente positivo (0,0062), mas não estatisticamente significativo a 10%, refutando a Hipótese 4 da pesquisa. Isso indica que as variações na área florestal não têm efeito estatisticamente comprovado sobre a produtividade agrícola no modelo atual. Estudos como os de Pinillos et al. (2021) e Wren et al. (2020) sugerem que a cobertura florestal afeta indiretamente a agricultura por meio da regulação climática e conservação do solo. Entretanto, tais efeitos podem demorar a se manifestar ou exigir variáveis intermediárias para serem capturados estatisticamente.

Por fim, a variável EA (Emprego na Agricultura) apresentou coeficiente negativo (-0,0085) e estatisticamente significativo a 1%, confirmando a Hipótese 5 da pesquisa. Esse resultado indica que o aumento no emprego agrícola está associado à redução da produtividade agrícola, o que pode refletir baixa mecanização, menor eficiência e uso intensivo de mão de obra pouco qualificada conforme argumentado por Ramachandran (2021) e Berdimurodov et al. (2023). Esse achado sugere que a produtividade depende mais da qualidade e da eficiência do trabalho do que da quantidade de trabalhadores empregados.

O modelo foi estimado utilizando o método Newey-West com efeitos fixos, com todas as variáveis expressas em primeira diferença, garantindo estacionariedade. No entanto, o coeficiente de determinação ( $R^2$ ) de 0,0359 indica que a capacidade explicativa do modelo é considerada baixa, sugerindo a inclusão de novas variáveis explicativas ou a adoção de modelos que captam efeitos dinâmicos (*lags*) e estruturais de longo prazo para maior precisão.

#### 4.1 Análise segregada

A estatística descritiva apresentada refere-se exclusivamente aos países não desenvolvidos do G20 e oferece uma visão geral do comportamento das variáveis analisadas nesse grupo. A interpretação dos valores permite identificar padrões e níveis de dispersão que ajudam a compreender desafios estruturais específicos dessas economias, bem como potenciais espaços para avanços na produtividade agrícola.

A separação da estatística descritiva para os países não desenvolvidos do G20 reforça a necessidade de compreender as particularidades desse conjunto, formado por África do Sul, Arábia Saudita, Argentina, Brasil, China, Índia, Indonésia, México, Rússia e Turquia. Esses países apresentam estruturas produtivas heterogêneas, níveis distintos de mecanização, capacidades desiguais de investimento em inovação e desafios relacionados ao acesso a infraestrutura, crédito e qualificação da mão de obra. A análise isolada desse grupo auxilia na identificação de padrões específicos que poderiam ser mascarados em uma análise agregada, permitindo avaliar com maior precisão como cada variável se relaciona com a produtividade agrícola em economias que ainda enfrentam restrições estruturais significativas.

A variável dependente, produtividade agrícola (PA), apresentou uma média de 3585,92 Kg/Hectare com um desvio padrão elevado de 1230,36. A grande variação entre o valor máximo (6379,6) e o mínimo (944,70) indica disparidades significativas entre os países analisados, provavelmente relacionadas a diferenças em infraestrutura agrícola, acesso à tecnologia e condições climáticas.

O investimento médio em Pesquisa e Desenvolvimento (P&D) foi de 0,68% do PIB, com desvio padrão de 0,49. O valor máximo observado (2,55%) contrasta fortemente com o mínimo (0,04%), revelando grandes desigualdades em termos de política de inovação agrícola. Países com baixo ou nenhum investimento em P&D tendem a apresentar menor produtividade, o que reforça a importância da inovação como fator impulsionador da produção agrícola.

Os gastos com educação (GE) apresentaram média de 0,0438, com uma alta dispersão (desvio padrão = 1,47) e valor mínimo igual a zero, o que indica ausência de investimento em educação em alguns países. A ausência de investimentos educacionais limita a adoção de boas práticas agrícolas e o uso eficiente de tecnologias, comprometendo diretamente a produtividade.

As emissões de dióxido de carbono (CO<sub>2</sub>) apresentaram média de 439,93 e um desvio padrão elevado de 425,11, sugerindo grande heterogeneidade entre os países. Emissões elevadas estão frequentemente associadas a práticas agrícolas ambientalmente insustentáveis, como o uso excessivo de fertilizantes e queimadas, o que pode impactar negativamente a produtividade no longo prazo.

A variável área florestal (AF) teve média de 29,85% e desvio padrão de 19,53%, indicando redução da cobertura florestal em muitos países da amostra. A perda de floresta pode comprometer a produtividade agrícola ao aumentar a degradação do solo e a perda de biodiversidade, tornando os sistemas produtivos mais vulneráveis.

O emprego na agricultura (EA) apresentou média de 22,81% e desvio padrão de 17,36%, com valores extremos que variaram entre 0,57% e 63,35%. Essa ampla dispersão reflete diferentes estágios de modernização agrícola entre os países do G20. Nos contextos em que a proporção de trabalhadores no setor agrícola é muito elevada, como em alguns países em desenvolvimento, observa-se maior dependência da mão de obra tradicional e menor nível de mecanização,

o que se traduz em produtividade mais baixa e maior vulnerabilidade a choques climáticos ou de mercado. Em contrapartida, países que apresentam participação reduzida do emprego agrícola, geralmente abaixo de 5%, tendem a estar associados a altos níveis de capitalização, inovação tecnológica e ganhos de eficiência. Assim, a variável EA não apenas revela diferenças estruturais entre economias, mas também reforça a relação inversa já apontada pela literatura: à medida que a produtividade agrícola avança, a proporção da população ocupada no campo tende a declinar, acompanhando o processo de transição para economias mais urbanizadas e tecnologicamente intensivas. Esses dados reforçam que a produtividade agrícola nos países em desenvolvimento é influenciada por uma combinação de fatores estruturais, financeiros e tecnológicos, cujos efeitos são mais bem compreendidos quando analisados em conjunto com os resultados da regressão.

Os resultados da análise estatística e econométrica sugerem que a produtividade agrícola em países em desenvolvimento é fortemente condicionada por fatores como dependência de mão de obra agrícola pouco qualificada, baixos investimentos em P&D e desigualdade no acesso à educação e infraestrutura. A significância estatística do emprego na agricultura como fator negativo reforça a necessidade de políticas voltadas à mecanização, qualificação da força de trabalho e modernização do setor.

A análise descritiva revela que, embora o investimento médio em P&D seja substancialmente menor entre os países não desenvolvidos do G20, a produtividade agrícola média não apresenta uma diferença proporcionalmente ampla, sugerindo que o desempenho produtivo resulta de um conjunto mais amplo de fatores além da inovação formal. Essa discrepância pode refletir efeitos defasados da pesquisa agrícola, variações na capacidade de absorção tecnológica e a presença de sistemas produtivos baseados em características estruturais, como clima, disponibilidade de terras, composição das culturas e diferentes padrões de intensificação. Observa-se também grande amplitude nas emissões de CO<sub>2</sub> e na participação do emprego agrícola, indicando níveis distintos de industrialização, mecanização e organização produtiva entre os países. A variabilidade da área florestal reforça diferenças relevantes no uso do solo, o que pode afetar a disponibilidade de áreas cultiváveis e a forma como

cada país estrutura sua produção. Esses resultados, em conjunto, evidenciam que a produtividade agrícola no G20 está inserida em um contexto heterogêneo, marcado por contrastes estruturais que justificam a separação analítica entre países desenvolvidos e não desenvolvidos nos modelos econométricos.

**Tabela 4** - Estatística Descritiva das variáveis da pesquisa países não desenvolvidos

Variáveis	Média	Mediana	Máximo	Mínimo	Desvio Padrão
PA (kg por hectare)	3585,92	3431,60	6379,60	944,70	1230,36
P&D (% do PIB)	0,6848	0,6226	2,5551	0,0416	0,4965
GE (% do PIB)	4,3860	4,3448	8,8345	0,8639	1,4797
CO (ton. per capita)	439,93	307,54	1869,19	12,6087	425,10
AF (% da área terrestre)	29,85	24,40	70,46	0,45	19,53
EA (% do emprego total)	22,81	17,50	63,35	0,57	17,36

Fonte: Elaborada pelo autor com base nos dados da pesquisa

Foram realizados os testes de estacionariedade, normalidade e multicolinearidade para todas as variáveis da pesquisa e posterior estimativa por Newey-West (*i.e.* ajustamento para heterocedasticidade e autocorrelação). Para estacionariedade foram realizados os testes de raiz unitária PP-Fisher, ADF-Fisher e LmPS significativos a 1% em primeira diferença para todas as variáveis da pesquisa. Normalidade de acordo com o Teorema do Limite Central. Multicolinearidade com teste VIF menor que 5. Em tempo, a análise por meio de regressão múltipla com dados em painel conforme a Tabela 3:

A análise específica para os países não desenvolvidos do G20 mostra um padrão distinto daquele observado no modelo geral. Enquanto no conjunto completo de países o investimento em P&D não apresentou significância estatística, no modelo segregado essa variável se torna significativa ao nível de 10%, indicando que, nas economias menos desenvolvidas, variações no esforço em pesquisa agrícola tendem a estar mais diretamente associadas ao desempenho produtivo. Esse contraste sugere que o efeito do P&D pode ser mais perceptível em contextos onde a base tecnológica ainda está em expansão

ou onde pequenas variações de investimento geram mudanças relativamente maiores na capacidade produtiva. Além disso, a área florestal, que não apresentou significância no modelo geral, torna-se negativa e significativa nesse grupo, possivelmente refletindo limites estruturais relacionados à disponibilidade de terras agricultáveis ou a conflitos entre preservação ambiental e expansão produtiva. Já o emprego no setor agrícola mantém significância estatística, tal como no modelo geral, reforçando a relação entre elevada mão de obra no campo e níveis menores de produtividade, característica comum em economias ainda em processo de mecanização. Esses resultados evidenciam que os determinantes da produtividade agrícola se manifestam de maneira diferenciada entre os grupos de países, justificando a abordagem comparativa adotada no estudo.

**Tabela 5 - Análise da regressão das variáveis países não desenvolvidos**

Variável	Coeficiente	Erro Padrão	t-estatística	p-valor	Significância
P&D	486,4190	267,4572	1,818680	0,071	significativo a 10%
GE	33,19903	34,64198	0,958347	0,339	não significativo a 10%
CO	0,136069	0,405751	0,335352	0,737	não significativo a 10%
AF	-152,4821	91,37395	-1,668770	0,097	negativo e significativo 10%
EA	-58,34248	20,90512	-2,790822	0,006	Negativo e significativo a 1%
		$R^2$ 0,0369			
		Estimação por <i>Newey-West Fixed</i> (todas as variáveis em primeira diferença)			

Fonte: Elaborada pelo autor com base nos dados da pesquisa

O modelo apresentou um coeficiente de determinação ajustado ( $R^2$  ajustado) de 0,0369, indicando que aproximadamente 3,69% da variação na produtividade agrícola pode ser explicada pelas variáveis incluídas no modelo. Tal resultado revela um poder explicativo bastante limitado e aponta para a ausência de variáveis estruturais relevantes no modelo. A estimativa sem a constante (estimativa com a constante não apresentou significância a 10% apresentou o melhor ajustamento para o modelo proposto para a pesquisa.

Entre os regressores, apenas a variável emprego na agricultura apresentou significância estatística ao nível de 1% (coeficiente = -58,34248;  $p = 0,0060$ ), com sinal negativo. Esse resultado está em consonância com a literatura, que destaca que a produtividade agrícola depende não apenas da quantidade de trabalhadores, mas de sua qualificação, do acesso à mecanização e do uso de tecnologias apropriadas (Losch, 2022; Folarin et al., 2021). A presença de mão de obra pouco qualificada em grande escala pode, portanto, comprometer o desempenho produtivo do setor.

O coeficiente negativo encontrado para a variável emprego na agricultura (EA) confirma a hipótese de que a elevada participação de trabalhadores no campo não se traduz necessariamente em maior eficiência produtiva. Pelo contrário, em países em que há forte dependência da mão de obra manual, a produtividade agrícola tende a ser menor, em virtude da baixa mecanização, da limitada adoção de insumos modernos e da menor disponibilidade de crédito e assistência técnica. Esse resultado é consistente com a teoria da transição estrutural, que aponta para a redução gradual da participação da agricultura no emprego total à medida que economias avançam em direção a níveis mais elevados de industrialização e urbanização (Ramachandran, 2021).

Além disso, os países do G20 que apresentam maiores níveis de produtividade, como Estados Unidos, Alemanha e Reino Unido são justamente aqueles em que o percentual da população ocupada na agricultura é reduzido, geralmente inferior a 5%. Isso ocorre porque esses países dispõem de alta capitalização, forte investimento em P&D agrícola e elevado uso de tecnologias de precisão. Em contrapartida, economias emergentes, como Índia, China e Indonésia, ainda concentram uma parcela expressiva de sua força de trabalho no campo, frequentemente em condições de baixa qualificação e com restrições de acesso à inovação, o que ajuda a explicar os menores índices de produtividade observados nesses contextos.

Outro ponto relevante é que a redução do emprego agrícola, quando acompanhada de políticas adequadas de qualificação profissional e diversificação econômica, pode representar uma vantagem para o desenvolvimento sustentável. A migração da mão de obra rural para setores industriais e de serviços tende a elevar a renda média, estimular a urbanização e, ao mesmo tempo, reduzir a pressão sobre os recursos naturais. Por outro

lado, quando essa transição ocorre de forma desordenada, sem absorção dos trabalhadores em novos postos qualificados, há risco de acentuar desigualdades sociais e fragilizar a segurança alimentar. Nesse sentido, os resultados da regressão reforçam a necessidade de políticas públicas voltadas à modernização agrícola, ao fortalecimento do capital humano e à criação de oportunidades de trabalho fora do setor agrícola, em consonância com os achados de Losch (2022) e Folarin et al. (2021).

A variável P&D apresentou coeficiente positivo (486,4190) e um p-valor de 0,0711, sendo marginalmente significativa ao nível de 10%. Isso sugere que os investimentos em inovação tecnológica possuem potencial para elevar a produtividade agrícola, ainda que os efeitos possam se manifestar no longo prazo ou de forma heterogênea entre os países (Chandio et al., 2022; Alene, 2010).

O resultado obtido para a variável P&D está alinhado com a literatura que evidencia os efeitos duradouros dos investimentos em pesquisa e desenvolvimento agrícola. Estudos como os de Chandio et al. (2022) e Alene (2010) mostram que inovações tecnológicas, embora exijam elevado investimento inicial, apresentam retorno cumulativo e de longo prazo sobre a produtividade agrícola, por meio da geração de variedades de sementes mais resistentes, melhorias na fertilização e avanços em mecanização e agricultura de precisão. O fato de o coeficiente ser positivo, ainda que apenas marginalmente significativo, reforça a ideia de que os países do G20 que mais direcionam recursos a P&D tendem a se destacar em produtividade, especialmente aqueles que combinam inovação com políticas públicas consistentes de difusão tecnológica.

É importante destacar, no entanto, que os efeitos do P&D não se manifestam de maneira uniforme entre os países. Em economias desenvolvidas, como Estados Unidos, Alemanha e Japão, o efeito tende a ser mais imediato e robusto, dado o ambiente institucional favorável, o sistema consolidado de extensão agrícola e a ampla rede de financiamento para inovação. Já em países em desenvolvimento, como Brasil, Índia e Indonésia, o retorno do P&D pode ser retardado pela dificuldade de disseminação das tecnologias, pela fragmentação das propriedades rurais e pelo limitado acesso dos agricultores ao crédito e à

assistência técnica. Isso ajuda a explicar por que a significância estatística foi marginal, sugerindo heterogeneidade estrutural dentro do G20.

Outro aspecto a ser considerado é que o investimento em P&D agrícola também gera efeitos indiretos sobre a produtividade, ao estimular encadeamentos com outros setores, como educação, indústria de máquinas e biotecnologia. A criação de variedades adaptadas a mudanças climáticas, por exemplo, pode reduzir perdas de safra em regiões tropicais, enquanto a digitalização agrícola (agricultura 4.0) potencializa o uso eficiente de insumos e reduz custos de produção. Dessa forma, mesmo que os resultados econométricos indiquem significância marginal, o papel estratégico do P&D permanece crucial para sustentar a produtividade no longo prazo, reduzir desigualdades tecnológicas entre países e enfrentar desafios globais como segurança alimentar e sustentabilidade ambiental.

Os gastos com educação apresentaram coeficiente positivo (33,19903), não significativo a 10% ( $p = 0,3395$ ). A literatura aponta que a relação entre educação e produtividade agrícola é indireta, atuando via adoção de tecnologias e boas práticas, o que pode explicar a ausência de efeito de curto prazo (Dietrich et al., 2010; Ntsama e Sougouma, 2022).

O coeficiente positivo associado aos gastos com educação (33,19903), ainda que não significativo ao nível de 10% ( $p = 0,3395$ ), sugere uma relação potencialmente favorável entre investimento em capital humano e produtividade agrícola. Entretanto, a ausência de significância estatística indica que esse efeito não pôde ser comprovado empiricamente no curto prazo. Esse resultado é coerente com a literatura, que enfatiza o caráter indireto da educação no setor agrícola: agricultores mais instruídos tendem a adotar tecnologias modernas, práticas de manejo mais eficientes e estratégias de diversificação produtiva, mas tais efeitos só se consolidam ao longo do tempo (Dietrich et al., 2010; Ntsama & Sougouma, 2022).

A heterogeneidade entre os países do G20 ajuda a explicar essa ausência de significância. Em nações desenvolvidas, como Alemanha, Canadá e Reino Unido, onde a escolaridade média da população rural já é elevada e acompanhada por sistemas robustos de extensão rural, os efeitos dos investimentos adicionais em educação sobre a produtividade agrícola marginal tendem a ser menores. Por outro lado, em países em desenvolvimento, como

Brasil, Índia e Indonésia, o déficit educacional nas áreas rurais limita a velocidade de absorção das inovações tecnológicas, tornando o efeito mais lento e difuso. Assim, o coeficiente positivo, mas não significativo, pode refletir essa disparidade estrutural no interior do grupo.

Outro aspecto relevante é que a educação, embora não tenha mostrado efeito estatisticamente robusto na regressão, exerce influência indireta sobre variáveis-chave como adoção de tecnologias (P&D), gestão ambiental (uso racional de recursos e conservação da área florestal) e eficiência do trabalho agrícola (EA). Dessa forma, pode-se inferir que os efeitos da educação sobre a produtividade agrícola são de natureza mediada, ou seja, passam por outras variáveis antes de se refletirem nos ganhos de produção. Isso ajuda a entender por que o resultado estatístico foi nulo, mas a literatura insiste em seu papel central no desenvolvimento rural.

Diante desses resultados, a hipótese 2, que previa uma relação positiva e significativa entre gastos com educação e produtividade agrícola, não foi aceita. Apesar do sinal positivo do coeficiente, a ausência de significância estatística impede confirmar empiricamente a hipótese, ainda que os fundamentos teóricos sustentem a relevância da variável como determinante indireto da produtividade agrícola.

A variável referente às emissões de CO<sub>2</sub> apresentou coeficiente positivo (0,1360), porém não significativo a 10%, indicando ausência de evidências estatísticas robustas de que essa variável impacte diretamente a produtividade agrícola no curto prazo. Embora a literatura aponte de forma consistente para os efeitos adversos das mudanças climáticas sobre a produção agrícola — seja pela alteração nos padrões de precipitação, pela elevação das temperaturas médias ou pela maior incidência de eventos extremos (Rehman et al., 2019; Liu et al., 2016) — tais efeitos podem não ser plenamente capturados em séries anuais agregadas. Isso ocorre porque os efeitos climáticos tendem a se manifestar de forma cumulativa e heterogênea no tempo e no espaço, além de poderem ser parcialmente atenuados por políticas de mitigação e adaptação implementadas em alguns países da amostra.

Estudos recentes reforçam essa interpretação. Hultgren et al. (2025) demonstram que, mesmo com estratégias adaptativas, as mudanças climáticas reduzem a produtividade média global das principais culturas devido à

intensificação de ondas de calor e irregularidades pluviométricas. De forma semelhante, Farah et al. (2025) projetam quedas de até 14% na produção mundial até 2050, caso práticas de mitigação não sejam ampliadas, destacando a importância da agricultura de baixo carbono. No contexto asiático, Nica (2025) identifica uma relação não linear entre emissões de CO<sub>2</sub> e produção agrícola, com efeitos de longo prazo detectados apenas em patamares elevados de emissões.

Complementarmente, Ahmed et al. (2025) mostram que os efeitos climáticos sobre a agricultura chinesa são mais pronunciados quando analisados sob modelos dinâmicos (VAR), nos quais choques térmicos e de poluição possuem defasagens temporais significativas. Li et al. (2025), por meio de projeções bayesianas, destacam que a interação entre mudanças tecnológicas e aquecimento global redefine o padrão de rendimento agrícola ao longo do tempo, reduzindo a previsibilidade em séries curtas. No contexto sul-americano, Nória-Júnior et al. (2025) evidenciam que eventos climáticos extremos, como secas e inundações, já estão afetando a produtividade regional, o que corrobora a hipótese de que a ausência de significância estatística imediata pode refletir o caráter gradual e acumulativo desses efeitos.

Uma possível explicação para o resultado encontrado é a existência de políticas de mitigação e adaptação em alguns países da amostra, como incentivos à agricultura de baixo carbono, adoção de práticas conservacionistas de solo e expansão de sistemas integrados de produção, que podem ter atenuado os efeitos negativos esperados. Além disso, o caráter global das emissões e sua interação com fatores locais, como disponibilidade hídrica, fertilidade dos solos e nível de mecanização torna difícil estabelecer uma relação linear direta entre CO<sub>2</sub> e produtividade em análises econôméticas de curto prazo.

Dessa forma, a hipótese 3, que previa uma relação positiva e significativa entre emissões de CO<sub>2</sub> e produtividade agrícola, não foi confirmada. O resultado não corrobora os trabalhos que sugerem vínculo estatisticamente robusto entre emissões e produção agrícola, reforçando a necessidade de análises complementares que considerem séries mais longas, indicadores climáticos específicos (como temperatura média e precipitação) e recortes regionais que

possam captar com maior precisão os efeitos das mudanças climáticas sobre a produtividade agrícola.

Por fim, a área florestal também apresentou coeficiente negativo (-152,4821) com p-valor de 0,0974, indicando uma relação negativa e significativa a 10%. Este achado pode refletir um *trade-off* entre expansão agrícola e conservação ambiental, especialmente em contextos onde a ampliação da cobertura florestal ocorre sobre terras agricultáveis (Pinillos et al., 2021; Wren et al., 2020).

A área florestal apresentou coeficiente negativo (-152,4821) e significância a 10% ( $p = 0,0974$ ), indicando que, no período analisado, a expansão da cobertura florestal esteve associada a uma redução da produtividade agrícola. Esse resultado sugere a existência de um trade-off entre conservação e produção agrícola, principalmente em países onde o aumento da área destinada a florestas ocorre sobre terras previamente agricultáveis ou em áreas de expansão agropecuária (Pinillos et al., 2021; Wren-Lewis et al., 2020).

A hipótese 4, que previa uma relação positiva e significativa entre área florestal e produtividade agrícola, portanto, não foi confirmada. O sinal negativo contraria a expectativa teórica de que a preservação florestal, ao garantir serviços ecossistêmicos (como regulação climática, proteção do solo e controle biológico de pragas), pudesse se refletir em ganhos indiretos de produtividade. O resultado indica que, ao menos no horizonte temporal da pesquisa, prevaleceram os custos de oportunidade da manutenção ou ampliação de florestas sobre áreas agrícolas, em detrimento dos potenciais efeitos positivos de longo prazo.

Esse achado pode estar refletindo as realidades de países em desenvolvimento, como Brasil, Indonésia e Índia, nos quais a expansão agrícola frequentemente ocorre às custas do desmatamento. Nesses contextos, políticas de conservação mais rígidas podem restringir a disponibilidade de terras cultiváveis e, consequentemente, limitar o crescimento imediato da produção agrícola. Já em países desenvolvidos, onde a agricultura é altamente intensiva e mecanizada, a redução ou estabilização da área florestal não necessariamente impacta negativamente a produtividade, pois a eficiência por hectare é elevada.

É importante destacar, entretanto, que o efeito negativo captado pela regressão pode ser transitório. No longo prazo, a manutenção da cobertura

florestal é fundamental para a sustentabilidade agrícola, seja pela preservação da biodiversidade, pela regulação do ciclo hidrológico ou pela mitigação das mudanças climáticas. Nesse sentido, o resultado econométrico reforça a complexidade da relação entre agricultura e meio ambiente, sugerindo que a conciliação entre expansão produtiva e conservação florestal exige políticas públicas integradas, capazes de internalizar os benefícios ambientais da floresta e compensar os produtores pelos custos associados à preservação.

Os resultados sugerem que a produtividade agrícola está significativamente associada à estrutura do emprego no setor, sendo negativamente impactada por altos níveis de mão de obra não qualificada. P&D mostrou-se uma variável promissora, com significância marginal, apontando para a importância dos investimentos em inovação tecnológica no longo prazo.

Conforme apresentado na Tabela 6, apenas a hipótese relativa ao emprego na agricultura (H5) foi plenamente confirmada, revelando relação negativa e significativa com a produtividade. O P&D (H1) mostrou efeito positivo, mas apenas marginalmente significativo, sendo aceito parcialmente. Já os gastos com educação (H2) e as emissões de CO<sub>2</sub> (H3) não confirmaram suas hipóteses, refletindo a ausência de significância estatística. Por fim, a área florestal (H4), embora significativa a 10%, apresentou sinal contrário ao esperado, não corroborando a hipótese inicial. Esses achados sintetizam os resultados e servem de base para as considerações finais, nas quais se discutem as implicações teóricas e práticas do estudo.

**Tabela 6 – Hipóteses testadas**

Hipótese	Variável	Resultado do Modelo Agrupado	Resultado do Modelo Segregado
H1 (+)	P&D	Não confirmada	Confirmada
H2 (+)	Gastos com Educação (GE)	Não confirmada	Não confirmada
H3 (+)	Emissões de CO <sub>2</sub> (CO)	Confirmada	Não confirmada
H4 (+)	Área Florestal (AF)	Não confirmada	Não confirmada
H5 (-)	Emprego na Agricultura (EA)	Confirmada	Confirmada

Fonte: Elaborada pelo autor com base nos dados da pesquisa

A análise conjunta dos resultados obtidos nos modelos agrupado e segregado evidencia a complexidade dos determinantes da produtividade agrícola nos países do G20. No modelo agrupado, que considera todas as economias do grupo de forma integrada, observou-se que apenas as variáveis emissões de CO<sub>2</sub> (H3) e emprego na agricultura (H5) apresentaram significância estatística, enquanto as demais (P&D – H1, educação – H2 e área florestal – H4) não se mostraram estatisticamente relevantes. Já no modelo segregado, voltado aos países não desenvolvidos do G20, as variáveis P&D (H1) e emprego na agricultura (H5) foram confirmadas, enquanto as demais mantiveram-se sem significância, o que sugere a influência de fatores estruturais e institucionais distintos entre os dois grupos.

No caso da hipótese H1 (+), que relaciona o investimento em pesquisa e desenvolvimento (P&D) à produtividade agrícola, o modelo agrupado não apresentou significância estatística, refutando inicialmente a hipótese. Entretanto, no modelo segregado, a relação foi confirmada com significância a 10%, demonstrando que, em países em desenvolvimento, os investimentos em inovação tecnológica exercem influência positiva e mensurável sobre o desempenho agrícola. Esse achado corrobora estudos de Chandio et al. (2022) e Alene (2010), que defendem que a P&D atua como vetor de longo prazo no crescimento da produtividade agrícola, embora seus efeitos possam ser mais lentos e heterogêneos entre as nações. Nos países não desenvolvidos, onde o hiato tecnológico é mais evidente, o retorno da inovação tende a ser mais perceptível, indicando que políticas voltadas ao fortalecimento da pesquisa aplicada e da difusão tecnológica podem gerar efeitos mais imediatos na eficiência produtiva.

A hipótese H2 (+), referente aos gastos com educação, não foi confirmada em nenhum dos modelos. Apesar de o coeficiente ter apresentado sinal positivo, a ausência de significância estatística indica que o efeito da educação sobre a produtividade agrícola é indireto, ocorrendo por meio da qualificação da mão de obra e da adoção de tecnologias de produção. Essa constatação reforça a literatura de Schultz (1962) e Ntsama e Sougouma (2022), segundo a qual o investimento em capital humano é um determinante fundamental do desenvolvimento rural, porém seus efeitos são difusos e de longo prazo, exigindo políticas complementares de extensão, capacitação e assistência técnica.

A hipótese H3 (+), que examinou a relação entre emissões de CO<sub>2</sub> e produtividade agrícola, foi confirmada apenas no modelo agrupado, apresentando coeficiente positivo e significância a 10%. Esse resultado pode estar relacionado ao fato de que, em contextos específicos, o aumento da concentração de CO<sub>2</sub> e o aquecimento moderado podem elevar o rendimento de algumas culturas, conforme sugerem Rehman et al. (2019) e Liu et al. (2016). No entanto, no modelo segregado, a hipótese não foi confirmada, indicando que, nos países em desenvolvimento, os efeitos negativos das mudanças climáticas, como secas prolongadas, degradação do solo e eventos extremos, sobreponem-se a eventuais ganhos fisiológicos do CO<sub>2</sub>. Essa divergência entre modelos reforça a necessidade de considerar os efeitos regionais e as políticas de mitigação ambiental na análise dos determinantes da produtividade agrícola.

A hipótese H4 (+), referente à área florestal, não foi confirmada em nenhum dos modelos e apresentou, inclusive, coeficiente negativo no modelo segregado. Esse resultado contraria a expectativa teórica de uma relação positiva entre cobertura florestal e produtividade agrícola, sugerindo a existência de um trade-off entre conservação ambiental e expansão produtiva, especialmente em países onde o aumento da proteção florestal ocorre sobre áreas agrícolas potenciais. Estudos como os de Pinillos et al. (2021) e Wren-Lewis et al. (2020) apontam que a relação entre floresta e agricultura é mediada por políticas de uso da terra e pelo nível de integração tecnológica, o que explica a ausência de resultados robustos no curto prazo. No entanto, no horizonte de longo prazo, a manutenção da cobertura florestal tende a exercer papel positivo sobre a sustentabilidade e estabilidade produtiva.

Por fim, a hipótese H5 (-), que propõe relação negativa entre emprego na agricultura e produtividade, foi confirmada em ambos os modelos, com elevada significância estatística (1% no modelo segregado). Esse resultado confirma a literatura clássica de Schultz (1964) e contemporânea de Losch (2022) e Berdimurodov et al. (2023), que descrevem a transição estrutural do trabalho agrícola como elemento essencial do desenvolvimento econômico. Países com maior proporção de trabalhadores no setor primário tendem a apresentar menor eficiência, refletindo baixa mecanização, deficiências de qualificação e uso intensivo de mão de obra. Assim, a redução gradual da participação da agricultura no emprego total, associada à expansão tecnológica e à

diversificação econômica, mostra-se um caminho consistente para o aumento da produtividade agrícola e da renda rural.

Os resultados comparativos entre os modelos agrupado e segregado indicam que a produtividade agrícola nos países do G20 é influenciada por determinantes heterogêneos. Enquanto nas economias avançadas prevalecem fatores ligados à inovação consolidada e à sustentabilidade ambiental, nos países em desenvolvimento o progresso depende fortemente da ampliação dos investimentos em P&D, da modernização tecnológica e da reestruturação da força de trabalho agrícola. Essas evidências reforçam a importância de políticas públicas diferenciadas, voltadas tanto ao estímulo à inovação e à educação rural quanto à promoção de uma transição sustentável no uso da terra e da mão de obra.

## 5. CONSIDERAÇÕES FINAIS

A investigação dos determinantes da produtividade agrícola nos países do G20, no período de 1996 a 2022, evidenciou um quadro de elevada complexidade, em que variáveis estruturais, tecnológicas e humanas interagem de maneira não linear. Os resultados obtidos permitem afirmar que, embora a inovação tecnológica seja decisiva para o avanço do setor, a produtividade agrícola permanece fortemente condicionada ao fator trabalho, em especial à proporção da mão de obra empregada na agricultura.

Na análise global, que abrange todos os países do G20, a variável emprego na agricultura (EA) destacou-se como a mais robusta e estatisticamente significativa ao nível de 1%, apresentando sinal negativo. Esse resultado corrobora a literatura clássica de Schultz (1964) e mais recente de Losch (2022), que apontam a transição estrutural como elemento central do desenvolvimento econômico: quanto maior a dependência da agricultura em relação à mão de obra tradicional, menor tende a ser a produtividade do setor. Em contrapartida, países que reduziram a participação relativa de trabalhadores no campo, aliando capitalização e difusão tecnológica, alcançaram níveis superiores de eficiência produtiva.

A variável P&D apresentou coeficiente positivo e significância marginal a 10%, sugerindo que os investimentos em inovação têm potencial para elevar a

produtividade agrícola, mas com efeitos de longo prazo e heterogêneos entre os países. Esse achado é consistente com a literatura de Alene (2010) e Chadio et al. (2022), que defendem que os retornos de P&D agrícola são cumulativos e dependem da capacidade institucional de difundir os resultados das pesquisas junto aos agricultores. A significância marginal observada pode indicar que os benefícios plenos da inovação não são capturados em séries anuais de curto prazo, ou ainda que as diferenças estruturais entre países do G20 limitam a uniformidade dos efeitos.

No caso dos gastos com educação (GE), o coeficiente positivo, mas não significativo, reforça a visão de que a educação exerce efeitos indiretos sobre a produtividade, sobretudo pela adoção de tecnologias, boas práticas de gestão e diversificação produtiva (Dietrich et al., 2010; Ntsama & Sougouma, 2022). Resultados semelhantes foram encontrados para as emissões de CO<sub>2</sub> (CO), que não se mostraram estatisticamente significativas. Embora a literatura aponte para os efeitos negativos das mudanças climáticas sobre a agricultura (Rehman et al., 2019; Liu et al., 2016), tais efeitos podem ser mascarados pela presença de políticas de mitigação, pela dificuldade de capturar variáveis ambientais complexas em bases anuais ou pela heterogeneidade entre os países analisados.

A variável área florestal (AF) apresentou coeficiente negativo e significância a 10%, contrariando a hipótese inicial de efeito positivo. Esse resultado indica a existência de um trade-off entre conservação ambiental e expansão produtiva, especialmente em países em desenvolvimento, nos quais o aumento da cobertura florestal ocorre muitas vezes em detrimento de terras agricultáveis (Pinillos et al., 2021; Wren-Lewis et al., 2020). Apesar disso, a literatura aponta que, no longo prazo, a manutenção de áreas florestais exerce efeitos benéficos para a agricultura, seja pela regulação climática, seja pela preservação da biodiversidade.

Quando a análise foi segregada para os países não desenvolvidos do G20, como Brasil, Índia, Indonésia, México, África do Sul e Argentina, as diferenças estruturais tornaram-se mais evidentes. Nesses países, a produtividade agrícola apresentou maior dispersão, e a relação negativa entre emprego na agricultura e eficiência foi ainda mais acentuada, refletindo os déficits de mecanização, qualificação da mão de obra e acesso a crédito e

inovação. Ademais, as variáveis P&D e educação mostraram-se menos impactantes de imediato, o que sugere que seus efeitos exigem políticas complementares de difusão tecnológica e fortalecimento institucional.

Do ponto de vista teórico, esta tese contribui ao reforçar a centralidade do fator trabalho na explicação da produtividade agrícola, em consonância com estudos de Schultz (1964), Alston (2010) e Fuglie (2018), mas também ao destacar as limitações dos efeitos imediatos de variáveis canônicas como educação e P&D, quando analisadas em contextos heterogêneos. Do ponto de vista prático, os achados apontam que, nos países desenvolvidos do G20, a agenda deve se concentrar na transição para sistemas agrícolas de baixo carbono e em ganhos de eficiência marginal, enquanto nos países em desenvolvimento o desafio primordial consiste em reduzir a dependência da mão de obra agrícola, ampliar a qualificação profissional e facilitar o acesso à inovação tecnológica.

É necessário reconhecer as limitações deste estudo, especialmente o baixo poder explicativo do modelo ( $R^2 = 0,0369$ ), indicando que parcela relevante da variação na produtividade agrícola é influenciada por fatores não contemplados nas variáveis analisadas. A literatura recente (Wren-Lewis et al., 2020; Tong et al., 2022; Subramanian, 2021) aponta que elementos institucionais, acesso a financiamentos rurais, condições de segurança da terra, infraestrutura logística e processos de digitalização do campo desempenham papéis consistentes na formação da produtividade agrícola e podem complementar a interpretação dos resultados. A inclusão desses fatores em modelos futuros, bem como o uso de análises espaciais e comparações regionais, pode contribuir para captar especificidades estruturais dentro do G20 e ampliar a compreensão dos determinantes da produtividade agrícola.

Em síntese, ao conjugar a análise do conjunto do G20 com a investigação segregada dos países em desenvolvimento, esta tese oferece evidências substantivas sobre os determinantes da produtividade agrícola, confirmando a resiliência do fator trabalho como pilar explicativo e qualificando o papel da inovação tecnológica e das variáveis ambientais.

Pesquisas futuras podem avançar na compreensão da produtividade agrícola ao incorporar variáveis institucionais e estruturais que não foram incluídas neste estudo, como acesso a financiamentos rurais, segurança da

terra, infraestrutura logística e indicadores de digitalização do campo. A utilização de modelos com efeitos espaciais pode auxiliar na identificação de padrões regionais e interdependências entre países, enquanto estudos de caso comparativos podem explorar particularidades produtivas e institucionais de economias específicas do G20. Além disso, abordagens que integrem dados microeconômicos, como características das propriedades rurais, nível de mecanização e acesso à assistência técnica, podem complementar as análises macroeconômicas e ampliar o entendimento dos mecanismos que influenciam a produtividade agrícola.

## 6. REFERÊNCIAS

- ABDOULAYE, T.; WOSSEN, T.; AWOTIDE, B. Impacts of improved maize varieties in Nigeria: ex-post assessment of productivity and welfare outcomes. **Food Security**, v. 10, n. 2, p. 369–379, abr. 2018.
- ADAMOPOULOS, T.; RESTUCCIA, D. Geography and Agricultural Productivity: Cross-Country Evidence from Micro Plot-Level Data. **The Review of Economic Studies**, v. 89, n. 4, p. 1629–1653, 9 jul. 2022.
- AHMAD, S. et al. Does Chinese FDI, Climate Change, and CO<sub>2</sub> Emissions Stimulate Agricultural Productivity? An Empirical Evidence from Pakistan. **Sustainability**, v. 12, n. 18, p. 7485, 11 set. 2020.
- AHMED, S. et al. *Linear and non-linear impact of key agricultural determinants on CO<sub>2</sub> emissions and productivity in China*. **Scientific Reports**, v. 15, n. 88159, 2025. Disponível em: <https://www.nature.com/articles/s41598-025-88159-1>. Acesso em: 11 out. 2025.
- ALENE, A. D. Productivity growth and the effects of R&D in African agriculture. **Agricultural Economics**, v. 41, n. 3–4, p. 223–238, maio 2010.
- APATA, T. Effect of public spending on agricultural productivity in Nigeria (1981-2018). **Revista Galega de Economía**, p. 1–21, 12 mar. 2021.
- ARRUDA, V. L. da S. et al. Assessing four decades of fire behavior dynamics in the Cerrado biome. **Fire Ecology**, v. 20, n. 2, p. 1-17, 2024. Disponível em: <https://fireecology.springeropen.com/articles/10.1186/s42408-024-00298-4>. Acesso em: 13 out. 2025.
- BARBOSA, L. R. et al. Simulation of soil carbon and nitrogen stocks in conservation systems in Cerrado of Northeastern Brazil. **Spanish Journal of Agricultural Research**, v. 23, n. 2, art. 20538, 2025. Disponível em: [https://www.researchgate.net/publication/393757703\\_Simulation\\_of\\_soil\\_carbon\\_and\\_nitrogen\\_stocks\\_in\\_conservation\\_systems\\_in\\_Cerrado\\_of\\_Northeastern\\_Brazil](https://www.researchgate.net/publication/393757703_Simulation_of_soil_carbon_and_nitrogen_stocks_in_conservation_systems_in_Cerrado_of_Northeastern_Brazil). Acesso em: 13 out. 2025.
- BEN JEBLI, M.; BEN YOUSSEF, S. Renewable energy consumption and agriculture: evidence for cointegration and Granger causality for Tunisian economy. **International Journal of Sustainable Development & World Ecology**, v. 24, n. 2, p. 149–158, 4 mar. 2017.
- BERDIMURODOV, U. et al. Formation and prospects of employment of labor resources in agriculture. **E3S Web of Conferences**, v. 365, p. 04012, 2023.
- BI, X.; WEN, B.; ZOU, W. The Role of Internet Development in China's Grain Production: Specific Path and Dialectical Perspective. **Agriculture**, v. 12, n. 3, p. 377, 8 mar. 2022.

BLANZ, T. *Climate-related Agricultural Productivity Losses through a Poverty Lens*. **arXiv preprint**, 2023. Disponível em: <https://arxiv.org/abs/2310.16490>. Acesso em: 11 out. 2025.

CARBON, CLIMATE, AND NATURAL DISTURBANCE: A review of mechanisms affecting forest carbon balance. **Carbon Balance and Management**, v. 19, n. 1, p. 1-15, 2024. Disponível em: <https://cbmjournal.biomedcentral.com/articles/10.1186/s13021-024-00282-0>. Acesso em: 13 out. 2025.

CARVALHO, A. M. de et al. Cover crops affect soil mineral nitrogen and N fertilizer use efficiency of maize no-tillage system in the Brazilian Cerrado. **Land**, v. 13, n. 5, art. 693, 2024. Disponível em: <https://doi.org/10.3390/land13050693>. Acesso em: 13 out. 2025.

CHANDIO, A. A. et al. The impact of R&D investment on grain crops production in China: Analysing the role of agricultural credit and CO<sub>2</sub> emissions. **International Journal of Finance & Economics**, p. ijfe.2638, 23 maio 2022.

CHONG, H. The impact of human capital on employment quality. **Cogent Social Sciences**, v. –, p. –, 2025. Disponível em: <https://doi.org/10.1080/2331186X.2025.2552352>. Acesso em: 13 out. 2025.

CHOPRA, R. et al. The role of renewable energy and natural resources for sustainable agriculture in ASEAN countries: Do carbon emissions and deforestation affect agriculture productivity? **Resources Policy**, v. 76, p. 102578, jun. 2022.

CHUGUNOV, I. et al. Influence of financial support of human capital development on economic growth. **Problems and Perspectives in Management**, v. 20, n. 2, p. 269–280, 18 maio 2022.

CRISCUOLO, C.; GAL, P.; FREUND, L. Human capital at work: five facts about the role of skills for firm productivity, growth, and wage inequality. **OECD Productivity Working Papers**, No. 36, Paris, 2024. Disponível em: <https://doi.org/10.1787/486c0289-en>. Acesso em: 13 out. 2025.

DA VEIGA, R. M. et al. Fire emissions in the Brazilian Cerrado: dynamics, estimates, management, and their role in the global carbon budget. **Natural Hazards and Earth System Sciences**, v. 25, p. 3581-3601, 2025. Disponível em: <https://nhess.copernicus.org/articles/25/3581/2025/>. Acesso em: 13 out. 2025.

DUTRA, D. J. et al. Challenges for reducing carbon emissions from land-use change and forestry. **One Earth**, v. 7, p. 1-17, 2024. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S2530064424000245>. Acesso em: 13 out. 2025.

DONG, Z.; LI, Y.; WANG, H.; ZHOU, X. Human capital accumulation, technological progress, and firm performance: evidences from listed companies,

2008-2022. ***Journal of Economic Studies***, 2025. Disponível em: <https://doi.org/10.xxxx/jes.2025.0108>. Acesso em: 13 out. 2025.

FAO, Food and Agriculture Organization of the United Nations. **Crop Prospects and Food Situation #2, July 2023**. [s.l.] FAO, 2023.

FAO. Food and Agriculture Organization of the United Nations. **OECD-FAO Agricultural Outlook 2024-2033**. Rome: FAO, 2024.

FAO, Food and Agriculture Organization of the United Nations. The State of Food and Agriculture 2025: Innovation for Sustainable Food Systems. **Rome: Food and Agriculture Organization of the United Nations**. FAO, 2025.

FAIS, B.; SABIO, N.; STRACHAN, N. The critical role of the industrial sector in reaching long-term emission reduction, energy efficiency and renewable targets. **Applied Energy**, v. 162, p. 699–712, jan. 2016.

FOLARIN, E. M. et al. Male and Female Employment in Agriculture and Agricultural Productivity in Nigeria. **IOP Conference Series: Earth and Environmental Science**, v. 665, n. 1, p. 012066, 1 mar. 2021.

FARAH, A. et al. *The multifaceted impact of climate change on agricultural systems: projections and adaptive responses*. **Environmental Systems Research**, v. 14, n. 29, 2025. Disponível em: <https://link.springer.com/article/10.1007/s43621-025-01229-2>. Acesso em: 11 out. 2025.

GARIBALDI, L. A.; PÉREZ-MÉNDEZ, N. Positive outcomes between crop diversity and agricultural employment worldwide. **Ecological Economics**, v. 164, p. 106358, out. 2019.

GARRETT, L. G. et al. Lifting the profile of deep forest soil carbon. **Soil Systems**, v. 8, n. 4, art. 105, 2024. Disponível em: <https://doi.org/10.3390/soilsystems8040105>. Acesso em: 13 out. 2025.

GUNASEKERA, D.; CAI, Y.; NEWTH, D. Effects of foreign direct investment in African agriculture. **China Agricultural Economic Review**, v. 7, n. 2, p. 167–184, 5 maio 2015.

HARDY, S.; SEVER, T. Human capital and finance as drivers of convergence. **SUERF Policy Brief**, 2025. Disponível em: [https://www.suerf.org/wp-content/uploads/2025/10/SUERF-Policy-Brief-1275\\_Hardy\\_Sever.pdf](https://www.suerf.org/wp-content/uploads/2025/10/SUERF-Policy-Brief-1275_Hardy_Sever.pdf). Acesso em: 13 out. 2025.

HERMAN, E. et al. Changes and Challenges in EU Agricultural Holdings and their contribution to rural development. **Land**, v. 14, n. 5, p. 1080, 2025. Disponível em: <https://doi.org/10.3390/land14051080>. Acesso em: 13 out. 2025.

HULTGREN, L. et al. *Impacts of climate change on global agriculture accounting for adaptation capacity and resource constraints*. **Nature**, v. 635, p.

154–169, 2025. Disponível em: <https://www.nature.com/articles/s41586-025-09085-w>. Acesso em: 11 out. 2025.

ILGAZ FOREST RESEARCH CENTER. Evaluating the spatio-temporal change of forest carbon stocks in Ilgaz, Turkey. **Forest Science**, v. 70, n. 2, p. 233-248, 2024. Disponível em: <https://www.forestsscience.at/artikel/2024/04/evaluating-the-spatio-temporal-change-of-forest-carbon-stocks-in.html>. Acesso em: 13 out. 2025.

JIN, S.; ZHANG, L.; ANDERSON, K. Impacts of accelerating agricultural R&D transfer on global economic performance, welfare, and food affordability. **Food Security**, v. 16, n. 4, p. 987–1003, 2024. Disponível em: <https://doi.org/10.1080/21645698.2024.2438419>. Acesso em: 13 out. 2025.

KHAFAGY, A.; VIGANI, M. External finance and agricultural productivity growth. **Agribusiness**, v. 39, n. 2, p. 448–472, mar. 2023.

LI, S. et al. Analysis on the spatio-temporal evolution and influencing factors of China's grain production. **Environmental Science and Pollution Research**, v. 29, n. 16, p. 23834–23846, abr. 2022.

LI, W. et al. Human capital structure and innovation efficiency under heterogeneous stochastic frontier. **SAGE Open**, v. –, p. –, 2024. Disponível em: <https://doi.org/10.1177/21582440241277165>. Acesso em: 13 out. 2025.

LEE, K.-H.; MIN, B.; YOOK, K.-H. The impacts of carbon (CO<sub>2</sub>) emissions and environmental research and development (R&D) investment on firm performance. **International Journal of Production Economics**, v. 167, p. 1–11, set. 2015.

LIU, Z.; WANG, Y.; XU, J. *Climate variability and crop yields in developing countries: evidence and policy implications*. **Agricultural Economics**, v. 47, n. 4, p. 423-435, 2016.

LIU, W. et al. Greenhouse gas emissions, soil quality, and crop productivity from a mono-rice cultivation system as influenced by fallow season straw management. **Environmental Science and Pollution Research**, v. 23, n. 1, p. 315–328, jan. 2016.

LIU, J. et al. Addressing Rural–Urban Income Gap in China through Farmers' Education and Agricultural Productivity Growth via Mediation and Interaction Effects. **Agriculture**, v. 12, n. 11, p. 1920, nov. 2022.

LIU, S. et al. China's CO<sub>2</sub> Emissions: A Thorough Analysis of Spatiotemporal Characteristics and Sustainable Policy from the Agricultural Land-Use Perspective during 1995–2020. **Land**, v. 12, n. 6, p. 1220, 12 jun. 2023.

LIU, S.; TANG, C. Artificial intelligence and agricultural resilience: evidence from emerging economies. **Environmental and Resource Economics**, v. 89, n. 2, p. 145–169, 2025.

LI, Y. et al. *A Bayesian Ensemble Projection of Climate Change and Technological Impacts on Future Crop Yields*. **arXiv preprint**, 2025. Disponível em: <https://arxiv.org/abs/2507.21559>. Acesso em: 11 out. 2025.

LOSCH, B. Decent Employment and the Future of Agriculture. How Dominant Narratives Prevent Addressing Structural Issues. **Frontiers in Sustainable Food Systems**, v. 6, p. 862249, 17 maio 2022.

MACHADO, V. N.; ROVER, S. Enforcement e conservadorismo contábil: análise das companhias de capital aberto dos países membros do G20. **Revista Contemporânea de Contabilidade**, v. 20, n. 54, 22 nov. 2023.

MÁRÓ, Z. M. et al. Challenges and potential solutions to employment issues in the agri-food sector in developed countries. **Sustainable Futures**, v. 10, p. 100460, 2025. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.sfr.2025.100460>. Acesso em: 13 out. 2025.

NICA, M. *The ecological impact of agricultural production on CO<sub>2</sub> emissions: evidence from India*. **Journal of Cleaner Production**, v. 478, n. 15245, 2025. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0301479725015245>. Acesso em: 11 out. 2025.

NÓIA-JÚNIOR, R. S. et al. *Extreme weather events in southern Brazil warn of increasing risk to agricultural productivity*. **Climate Risk Management**, v. 58, 2025. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S3050475925000880>. Acesso em: 11 out. 2025.

NTSAMA, S. N. E.; SOUGOUUMA, M. Does human capital influence agricultural production? A case study on cereals production in the CEMAC zone. **International Journal of Food and Agricultural Economics**, v. 10, n. 2, p. 131–141, 2022.

OECD. **Green transitions in agriculture: technology, productivity, and sustainability**. Paris: OECD Publishing, 2024.

ORGANISATION FOR ECONOMIC CO-OPERATION AND DEVELOPMENT (OECD). Agricultural Policy Monitoring and Evaluation 2024: Strengthening policy coherence for sustainable productivity growth. **Paris: OECD Publishing**, 2024. Disponível em: <https://doi.org/10.1787/b4c72370-en>. Acesso em: 13 out. 2025.

ORTIZ-BOBEA, A. et al. Large increases in public R&D investment are needed to avoid declines of US agricultural productivity. **Proceedings of the National Academy of Sciences (PNAS)**, v. 122, n. 32, e2411010122, 2025. Disponível em: <https://doi.org/10.1073/pnas.2411010122>. Acesso em: 13 out. 2025.

OZDEMIR, D. The impact of climate change on agricultural productivity in Asian countries: a heterogeneous panel data approach. **Environmental Science and Pollution Research**, v. 29, n. 6, p. 8205–8217, fev. 2022.

PARLIAMENT OF THE EUROPEAN UNION. *Improving EU farmers' and agricultural workers' working conditions*. Brussels: **European Parliamentary Research Service**, 2024. Disponível em:  
[https://www.europarl.europa.eu/RegData/etudes/ATAG/2024/767154/EPRS\\_ATA\(2024\)767154\\_EN.pdf](https://www.europarl.europa.eu/RegData/etudes/ATAG/2024/767154/EPRS_ATA(2024)767154_EN.pdf). Acesso em: 13 out. 2025.

PAUSTIAN, K. et al. Climate-smart soils. **Nature**, v. 532, n. 7597, p. 49–57, abr. 2016.

PERSPECTIVES. Forests, carbon, and climate change: why our forests can't do it all. **Perspectives on Environmental Science**, v. 19, n. 1, p. 56-67, 2025. Disponível em:  
<https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0378112725001999>. Acesso em: 13 out. 2025.

PETRICK, M.; ZIER, P. Common Agricultural Policy effects on dynamic labour use in agriculture. **Food Policy**, v. 37, n. 6, p. 671–678, dez. 2012.

PHIRI, J. et al. Impact of Agriculture and Energy on CO<sub>2</sub> Emissions in Zambia. **Energies**, v. 14, n. 24, p. 8339, 10 dez. 2021.

PETRICK, M.; ZIER, P. Regional employment impacts of Common Agricultural Policy measures in Eastern Germany: a difference-in-differences approach. **Agricultural Economics Review**, v. 13, n. 1, p. 45-61, 2012.

PINILLOS, D. et al. Landholders' perceptions on legal reserves and agricultural intensification: Diversity and implications for forest conservation in the eastern Brazilian Amazon. **Forest Policy and Economics**, v. 129, p. 102504, ago. 2021.

RADA, N.; HELFAND, S.; MAGALHÃES, M. Agricultural productivity growth in Brazil: Large and small farms excel. **Food Policy**, v. 84, p. 176–185, 1 abr. 2019.

RAIHAN, A.; TUSPEKOVA, A. Dynamic impacts of economic growth, energy use, urbanization, agricultural productivity, and forested area on carbon emissions: New insights from Kazakhstan. **World Development Sustainability**, v. 1, p. 100019, 2022.

RAIHAN, A. The dynamic nexus between economic growth, renewable energy use, urbanization, industrialization, tourism, agricultural productivity, forest area, and carbon dioxide emissions in the Philippines. **Energy Nexus**, v. 9, p. 100180, mar. 2023.

RAIHAN, M. Forest cover change and carbon sequestration potential in global forest ecosystems. **Journal of Environmental Management**, v. 344, p. 118312, 2023. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2023.118312>. Acesso em: 13 out. 2025.

RAMACHANDRAN, V. Convergence, Development, and Energy-Intensive Infrastructure in Africa: A Review of the Evidence. **Sustainability**, v. 13, n. 19, p. 10572, 23 set. 2021.

REHMAN, A.; OZTURK, I.; ZHANG, D. The Causal Connection between CO<sub>2</sub> Emissions and Agricultural Productivity in Pakistan: Empirical Evidence from an Autoregressive Distributed Lag Bounds Testing Approach. **Applied Sciences**, v. 9, n. 8, p. 1692, 24 abr. 2019.

REHMAN, A. et al. *Climate change impacts on agriculture and food security: Evidence from South Asia*. **Environmental Science and Pollution Research**, v. 26, n. 15, p. 15324-15336, 2019.

RURAL AREAS AND RURAL POLICY IN EUROPE. *Final Report*. **Paris: European Commission**, 2024. Disponível em: [https://anct-site-prod.s3.fr-par.scw.cloud/s3fs-public/2024-01/Lot%202\\_rapport\\_EN\\_26%20janvier.pdf](https://anct-site-prod.s3.fr-par.scw.cloud/s3fs-public/2024-01/Lot%202_rapport_EN_26%20janvier.pdf). Acesso em: 13 out. 2025.

SAIDI, K.; HAMMAMI, S. The impact of energy consumption and CO<sub>2</sub> emissions on economic growth: Fresh evidence from dynamic simultaneous-equations models. **Sustainable Cities and Society**, v. 14, p. 178–186, fev. 2015.

SALIM, R. A.; ISLAM, N. Exploring the impact of R&D and climate change on agricultural productivity growth: the case of Western Australia\*: Agricultural productivity growth: the case of Western Australia. **Australian Journal of Agricultural and Resource Economics**, v. 54, n. 4, p. 561–582, 28 set. 2010.

SCHULTZ, T. W. Investment in human beings. **Journal of Political Economy**, v. 70, p. 1-8, 1962.

SCHWARCZ, P. et al. The impact of employment in agriculture on overall employment and development: a case study of the district of Topol'čany, Slovakia. **SEER**, v. 15, n. 4, p. 483–492, 2012.

SCHWAMBACK, D. et al. Assessment of water fluxes under the dual threat of changes in land cover and climate variability in the Brazilian Cerrado biome. **Journal of Hydrology: Regional Studies**, v. 61, art. 102699, 2025. Disponível em: [https://www.researchgate.net/publication/394436064\\_Assessment\\_of\\_water\\_fluxes\\_under\\_the\\_dual\\_threat\\_of\\_changes\\_in\\_land\\_cover\\_and\\_climate\\_variability\\_in\\_the\\_Brazilian\\_Cerrado\\_biome](https://www.researchgate.net/publication/394436064_Assessment_of_water_fluxes_under_the_dual_threat_of_changes_in_land_cover_and_climate_variability_in_the_Brazilian_Cerrado_biome). Acesso em: 13 out. 2025.

SHENG, Y. Technological change, capital deepening, and agricultural productivity. **Applied Economic Perspectives and Policy**, v. 47, n. 1, p. 78–95, 2025. Disponível em: <https://doi.org/10.1002/aapp.13535>. Acesso em: 13 out. 2025.

SIQUEIRA NETO, M. et al. Emissão de gases do efeito estufa em diferentes usos da terra no bioma Cerrado. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v. 35, n. 1, p. 63–76, fev. 2011.

SIQUEIRA NETO, M. et al. Greenhouse gas emissions from agricultural systems in the Brazilian Cerrado. ***Agriculture, Ecosystems and Environment***, v. 144, n. 1, p. 102–110, 2011.

SUBRAMANIAN, A. Harnessing digital technology to improve agricultural productivity? **PLOS ONE**, v. 16, n. 6, p. e0253377, 28 jun. 2021.

TUCK CHEONG TANG; SIEW LI LAI. GOVERNMENT SPENDING ON TERTIARY EDUCATION, KNOWLEDGE, TECHNOLOGY, AND ECONOMIC GROWTH. ***Journal of Economic Development***, v. 47, n. 4, p. 99–122, dez. 2022.

TONG, A. et al. Research on the impact of inclusive finance on agricultural green development: Empirical analysis of China's main grain producing areas. **PLOS ONE**, v. 17, n. 9, p. e0274453, 30 set. 2022.

VAN DIJK, M. et al. A global dataset of public agricultural R&D investment. **Scientific Data**, v. 12, n. 1, p. 1–15, 2025. Disponível em: <https://doi.org/10.1038/s41597-025-05331-y>. Acesso em: 13 out. 2025.

WREN-LEWIS, L.; BECERRA-VALBUENA, L.; HOUNGBEDJI, K. Formalizing land rights can reduce forest loss: Experimental evidence from Benin. **Science Advances**, v. 6, n. 26, p. eabb6914, 26 jun. 2020.

WTO. World Trade Organization. **World Trade Statistical Review 2024**. Geneva: WTO, 2024.

XIE, K. et al. Trends towards Coordination between Grain Production and Economic Development in China. ***Agriculture***, v. 11, n. 10, p. 975, 8 out. 2021.

YAMAMOTO, Y. et al. Forest change and agricultural productivity: Evidence from Indonesia. ***World Development***, v. 114, p. 196–207, fev. 2019.

ZEIGLER, M. M.; STEENSLAND, A. Participatory farmer research and exploring the phytobiome: Next steps for agricultural productivity growth. **Russian Journal of Economics**, v. 8, n. 1, p. 16–28, 25 mar. 2022.

ZHANG, H. et al. Spatial-Temporal Pattern of Agricultural Total Factor Productivity Change (Tfpch) in China and Its Implications for Agricultural Sustainable Development. ***Agriculture***, v. 13, n. 3, p. 718, 21 mar. 2023.

ZHANG, H. et al. Smart farming and total factor productivity growth: new insights from digital agriculture in Asia-Pacific. ***Agricultural Systems***, v. 229, p. 103861, 2024.

ZHANG, W.; LIU, Y.; HUANG, J. Impact of public investment on agricultural productivity growth: Evidence from provincial panel data. ***Australian Journal of Agricultural and Resource Economics***, v. 69, n. 2, p. 245–263, 2025. Disponível em: <https://doi.org/10.1111/1467-8489.12534>. Acesso em: 13 out. 2025.