



UNIVERSIDADE FEDERAL DO CEARÁ
CENTRO DE CIÊNCIAS AGRÁRIAS
PRÓ-REITORIA DE PESQUISA E PÓS-GRADUAÇÃO
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ECONOMIA RURAL

FRANCISCO IAN LIMA DA SILVA

**PRODUÇÃO AGROPECUÁRIA EM TRANSFORMAÇÃO: MUDANÇAS
CLIMÁTICAS E USO DA TERRA NO BRASIL**

FORTALEZA

2025

FRANCISCO IAN LIMA DA SILVA

PRODUÇÃO AGROPECUÁRIA EM TRANSFORMAÇÃO: MUDANÇAS CLIMÁTICAS
E USO DA TERRA NO BRASIL

Dissertação de Mestrado submetida ao Programa de Pós-Graduação em Economia Rural, da Universidade Federal do Ceará, como requisito parcial para obtenção do título de Mestre. Área de Concentração: Políticas Públicas e Desenvolvimento Rural Sustentável. Orientadora: Prof.^a. Dra. Filomena Nádia Rodrigues Bezerra.

FORTALEZA

2025

Dados Internacionais de Catalogação na Publicação
Universidade Federal do Ceará
Sistema de Bibliotecas

Gerada automaticamente pelo módulo Catalog, mediante os dados fornecidos pelo(a) autor(a)

- S58p Silva, Francisco Ian Lima da.
Produção agropecuária em transformação: mudanças climáticas e uso da terra no Brasil / Francisco Ian Lima da Silva. – 2026.
86 f. : il. color.
- Dissertação (mestrado) – Universidade Federal do Ceará, Centro de Ciências Agrárias, Programa de Pós-Graduação em Economia Rural, Fortaleza, 2026.
Orientação: Prof. Dr. Filomena Nádia Rodrigues Bezerra.
1. Mudanças Climáticas. 2. Uso da terra. 3. Agricultura brasileira. 4. Dados em painel. I. Título.
CDD 338.1
-

FRANCISCO IAN LIMA DA SILVA

PRODUÇÃO AGROPECUÁRIA EM TRANSFORMAÇÃO: MUDANÇAS CLIMÁTICAS
E USO DA TERRA NO BRASIL

Dissertação de Mestrado submetida ao Programa de Pós-Graduação em Economia Rural, da Universidade Federal do Ceará, como requisito parcial para a obtenção do título de Mestre. Área de concentração: Políticas Públicas e Desenvolvimento Rural Sustentável.

Aprovado em 31/10/2025

BANCA EXAMINADORA

Prof.^a. Dra. Filomena Nádia Rodrigues Bezerra (Orientadora)
Universidade Federal do Ceará (UFC)

Prof. Dr. José de Jesus Sousa Lemos
Universidade Federal do Ceará (UFC)

Prof. Dr. Kilmer Coelho Campos
Universidade Federal do Ceará (UFC)

Prof. Dr. Janaildo Soares de Sousa
Universidade Estadual do Ceará (UECE)

AGRADECIMENTOS

Sou grato a Deus por tudo o que me foi concedido e por todas as felicidades em minha vida.

Agradeço imensamente à Professora Doutora Filomena Nádia, minha orientadora, por toda a ajuda, compreensão, contribuição, paciência e dedicação no decurso desta jornada. Sua competência, inspiração profissional e excelência na orientação foram fundamentais para o desenvolvimento deste trabalho e meu crescimento acadêmico e pessoal. Sou profundamente grato pela confiança depositada em mim, pelas palavras de incentivo e ensinamentos que levarei para toda a vida. Seu exemplo de profissional, sensibilidade e compromisso com a educação permanecerá como referência na minha trajetória.

Agradeço, também, aos Professores Doutores José Lemos, Kilmer Campos e Janaildo Soares pelo aceite na composição da banca e valiosas sugestões e contribuições oferecidas para o aprimoramento desta dissertação. Sou grato pela disponibilidade, atenção dedicada à leitura e reflexões construtivas, que, certamente, contribuíram para o meu desenvolvimento acadêmico. Ademais, estendo agradecimentos aos demais professores e servidores do PPGER, amigos e colegas, pela dedicação, apoio, partilha de conhecimento e pelas boas risadas de sempre.

Agradeço, ainda, à Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior (Capes), pelo apoio financeiro.

RESUMO

Nas últimas décadas, as mudanças climáticas consolidaram-se como um dos principais desafios globais, influenciando diretamente a produtividade agrícola e a segurança alimentar. No Brasil, tal realidade é agravada pelas intensas transformações no uso da terra, que figuram entre os principais vetores de emissões de gases de efeito estufa (GEE), posicionando o setor agropecuário como um dos maiores emissores do País. Nessas circunstâncias, esta pesquisa tem como objetivo geral aferir os efeitos climáticos e das mudanças no uso da terra sobre o valor bruto da produção vegetal (VBV) e da pecuária (VBP) por CO₂ no Brasil, de 1985 a 2023. Especificamente, i) Verificar a evolução das emissões de gases do efeito estufa, do VBV e do VBP nos estados brasileiros; ii) Ranquear as unidades federativas quanto ao VBV e VBP; e iii) Mensurar os efeitos das variáveis climáticas e a influência das mudanças no uso da terra sobre o VBV/CO₂ e o VBP/CO₂ nos estados brasileiros, 1985 a 2023. Com expresse intento, os dados foram coletados junto ao Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística (IBGE), MapBiomass, Sistema de Estimativas de Emissões de Gases de Efeito Estufa (SEEG) e *Climate Change Knowledge Portal- ERA 5 (Copernicus Climate Change Service - C3S)*, aplicados aos modelos de dados em painel. Dentre os principais resultados, evidencia-se o fato de que os maiores valores do VBV foram dos estados das regiões Sudeste (SP, MG), Centro-Oeste (GO, MT, MS), Sul (PR, RS, SC), Nordeste (BA) e Norte (PA). Já os destaques do VBP foram para os estados do Sudeste (MG, SP), Sul (PR, RS, SC), Centro-Oeste (GO), Nordeste (BA, PE, CE) e Norte (RO). No modelo de efeitos fixos, o aumento de 1% na razão de pastagem está associado a uma elevação de aproximadamente 0,37% e 0,36%, no VBV/CO₂ e VBP/CO₂, respectivamente, sugerindo que a conversão dessas áreas, ou sua intensificação produtiva, é capaz de estar contribuindo positivamente. Esse resultado, no entanto, também indica uma intensificação do uso da terra, com possíveis implicações ambientais. Em termos quantitativos, um aumento de 1% na temperatura está associado, em média, a um acréscimo de 22,23% no VBV/CO₂ e 18,60% no VBP/CO₂. Importa considerar, contudo, que esse impacto é passível de não ser uniforme entre regiões e atividades agrícolas. Ainda foram encontradas evidências estatisticamente robustas para a área colhida, com o aumento de 0,17% no VBV/CO₂, bem como no efetivo bovino, em que o aumento de 1% em seu quantitativo tende a aumentar em 0,09% o VBP/CO₂.

Palavras-chave: mudanças climáticas; uso da terra; agricultura brasileira; dados em painel.

ABSTRACT

In recent decades, climate change has become one of the main global challenges, directly affecting agricultural productivity and food security. In Brazil, this scenario is aggravated by intense land-use transformations, which rank among the main drivers of greenhouse gas (GHG) emissions, positioning the agricultural sector as one of the country's largest emitters. In this context, the general objective of this research is to assess the effects of climate and land-use changes on the gross value of agricultural production (VBV) and livestock production (VBP) per unit of CO₂ in Brazil between 1985 and 2023. Specifically, the study aims to: (i) analyze the evolution of GHG emissions, VBV, and VBP across Brazilian states; (ii) rank the federative units according to their VBV and VBP; and (iii) measure the effects of climatic variables and the influence of land-use changes on VBV/CO₂ and VBP/CO₂ in the Brazilian states between 1985 and 2023. Data were collected from the Brazilian Institute of Geography and Statistics (IBGE), MapBiomass, the Greenhouse Gas Emission Estimates System (SEEG), and the Climate Change Knowledge Portal – ERA5 (Copernicus Climate Change Service – C3S), and applied to panel data models. Among the main results, it was found that the states with the highest VBV values were located in the Southeast (SP, MG), Center-West (GO, MT, MS), South (PR, RS, SC), Northeast (BA), and North (PA) regions. In turn, the states with the highest VBP values were in the Southeast (MG, SP), South (PR, RS, SC), Center-West (GO), Northeast (BA, PE, CE), and North (RO) regions. In the fixed-effects model, a 1% increase in the pasture ratio was associated with an approximate rise of 0.37% in VBV/CO₂ and 0.36% in VBP/CO₂, respectively, suggesting that either the conversion of these areas or their productive intensification may be contributing positively. However, this result also points to a possible intensification of land use, with potential environmental implications. Quantitatively, a 1% increase in temperature was associated, on average, with an increase of 22.23% in VBV/CO₂ and 18.60% in VBP/CO₂. Nonetheless, it is important to note that this impact may not be uniform across regions and agricultural activities. Finally, statistically robust evidence was also found for harvested area, with a 0.17% increase in VBV/CO₂, as well as for cattle herd size, where a 1% rise in livestock numbers tends to increase VBP/CO₂ by 0.09%.

Keywords: climate change; land use; brazilian agriculture; panel data.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 - Médias de emissões de CO ₂ por estado brasileiro (1985-2023)	56
Figura 2 - Médias de cicatrizes de fogo por estado brasileiro (1985-2023)	57
Figura 3 - Médias da razão de pastagem por estado brasileiro (1985-2023)	59

LISTA DE GRÁFICOS

Gráfico 1 – Evolução da emissão de CO ₂ no Brasil (1985-2023)	56
Gráfico 2 – Evolução da temperatura média no Brasil (1985-2023)	59
Gráfico 3 – Evolução do volume de precipitação média no Brasil (1985-2023)	60

LISTA DE QUADROS

Quadro 1 – Descrição das variáveis, fontes de dados e embasamento teórico.....	40
Quadro 2 – Classificação do CV, de acordo com sua amplitude.....	46

LISTA DE TABELAS

Tabela 1	– Resultados dos testes realizados e suas respectivas hipóteses avaliadas....	52
Tabela 2	– Estados brasileiros com maiores e menores VBVs e VBPs.	54
Tabela 3	– Estatística descritiva, por Estado, das variáveis dependentes utilizadas na análise.....	62
Tabela 4	– Estatística descritiva, por Estado, das variáveis explicativas utilizadas nos modelos.....	63
Tabela 5	– Estimativas robustas aplicadas aos dados em painel das unidades federativas (UF) do Brasil, considerando a abordagem de efeitos fixos (EF)	68

.

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

APSM	Simulador de Sistema de Produção Agrícola
BIP	Plano de Transformação Ecológica, a Plataforma Brasil de Investimentos Climáticos
CBDR	Common but Differentiated Responsibilities
CCKP	Climate Change Knowledge Portal - World Bank
CNDs	Contribuições Nacionalmente Determinadas
COP	Conferência das Nações Unidas sobre Mudanças Climáticas
DSSAT	Sistema de Apoio à Decisão para Transferência de Tecnologia
EA	Efeitos aleatórios
EF	Efeitos fixos
Embrapa	Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária
ETP	Evapotranspiração potencial
FGV	Fundação Getúlio Vargas
GEE	Gases de Emissão de Efeito Estufa
IBGE	Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística
IGP-DI	Índice Geral de Preços - Disponibilidade Interna
Imazon	Instituto do Homem e Meio Ambiente da Amazônia
INPE	Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais
IPCC	Intergovernmental Panel on Climate Change
Mapa	Ministério da Agricultura, Pecuária e Abastecimento
MMA	Ministério do Meio Ambiente
OMM	Organização Meteorológica Mundial
Plano ABC	Plano Setorial de Mitigação e de Adaptação às Mudanças Climáticas para a Consolidação de uma Economia de Baixa Emissão de Carbono na Agricultura
Plano ABC+	Plano Setorial para Adaptação à Mudança do Clima e Baixa Emissão de Carbono na Agropecuária
PNMC	Política Nacional sobre Mudança do Clima
PNUMA	Programa das Nações Unidas para o Meio Ambiente
PPCDAm	Plano de Ação para Prevenção e Controle do Desmatamento na Amazônia Legal

PPCerrado	Plano de Ação para Prevenção e Controle do Desmatamento e das Queimadas no Cerrado
PPIs	Perímetros Públicos Irrigados
Prodes	Projeto de Monitoramento do Desmatamento na Amazônia Legal por Satélite
SBCE	Sistema Brasileiro de Comércio de Emissões
SEEG	Sistema de Estimativa de Emissões de Gases de Efeito Estufa
TFFF	Fundo Florestas Tropicais para Sempre
UF	Unidades Federativas
UNFCCC	United Nations Framework Conference on Climate Change
VBV	Valor bruto da produção vegetal
VBP	Valor bruto da produção pecuária

LISTA DE SÍMBOLOS

R\$	Reais
CH ₄	Metano
CO ₂	Dióxido de Carbono
GtCO ₂ e	Dióxido de carbono equivalente
N ₂ O	Oxido nitroso
%	Porcentagem
°C	Graus Celsius
n°	Número

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO	15
1.1	O problema e sua importância.....	15
1.2	Objetivos.....	18
<i>1.1.1</i>	<i>Objetivo geral.....</i>	<i>18</i>
<i>1.1.2</i>	<i>Objetivos específicos.....</i>	<i>18</i>
1.3	Estrutura do texto.....	18
2	MUDANÇAS CLIMÁTICAS, AGRICULTURA E GOVERNANÇA: DINÂMICAS, IMPACTOS E ESTRATÉGIAS DE RESPOSTA.....	20
2.1	<i>Background</i> político-institucional da evolução da governança climática global	20
2.2	Estratégias de mitigação e adaptação climática no Brasil	24
2.3	Mudanças no uso e cobertura da terra: dinâmica agropecuária e efeitos climáticos.....	28
2.4	Impactos climáticos na agricultura e na economia: desafios globais e perspetivas.....	32
2.5	Perspectivas divergentes sobre as mudanças climáticas e seus efeitos sociais	38
3	PROCEDIMENTOS METODOLÓGICOS.....	40
3.1	Área de estudo, descrição e fonte de dados.....	40
3.2	Estratégia 1: Análise da evolução das variáveis relacionadas ao VBV e ao VBP, com ênfase para o ranqueamento dos estados brasileiros	45
3.3	Estratégia 2: Método para mensurar os efeitos das variáveis climáticas e as mudanças no uso da terra sobre o valor bruto da produção vegetal (VBV) e da pecuária (VBV) nos estados brasileiros.....	46
<i>3.3.1</i>	<i>Aplicação de testes estatísticos para determinação do modelo adotado na abordagem de painel.....</i>	<i>52</i>
4	RESULTADOS E DISCUSSÃO.....	54
4.1	Resultados da análise da evolução das variáveis relacionadas ao VBV e ao VBP, com ênfase para o ranqueamento dos estados brasileiros.....	54
4.2	Resultados das estatísticas descritivas.....	61
4.3	Influência da mudança no uso da terra e das mudanças climáticas sobre o valor bruto da produção vegetal e da pecuária.....	66

5	CONSIDERAÇÕES FINAIS	72
	REFERÊNCIAS	74
	APÊNDICE A – Estimativas robustas aplicadas aos dados em painel das unidades federativas (UF) do Brasil, considerando o valor bruto da produção vegetal.....	85
	APÊNDICE B – Estimativas robustas aplicadas aos dados em painel das unidades federativas (UF) do Brasil, considerando o valor bruto da produção pecuária.....	86

1 INTRODUÇÃO

A discussão sobre mudanças climáticas constitui matéria central no debate político e econômico global, desde pelo menos o final da década de 1980, impulsionado pelo crescente reconhecimento dos impactos ambientais e sociais decorrentes das atividades humanas (Confessor, 2022; Yamashita *et al.*, 2024). Os efeitos das instabilidades climáticas afetam diretamente a segurança alimentar, porquanto representam uma ameaça crescente à capacidade de produção agrícola e aos níveis de distribuição dos recursos hídricos (Muluneh, 2021; Habib-Ur-Rahman *et al.*, 2022).

1.1 O problema e sua importância

A elevação das emissões globais de gases do efeito estufa é resultado direto das atividades humanas e dos padrões socioeconômicos adotados (Sena; Morgado, 2023). Entre as principais causas, destacam-se a mudança no uso da terra, o uso insustentável de energia, o estilo de vida e os padrões de consumo sociais. Essa relação varia entre os países (IPCC, 2023; Presa, 2024; Aires, 2024; Januário, 2024; Vieira; Lara, 2025).

No Brasil, em 2023, as emissões brutas de gases de efeito estufa totalizaram 2,3 bilhões de toneladas de dióxido de carbono equivalente (GtCO₂e). Em 2023, as mudanças no uso da terra responderam por 46% das emissões brutas de GEE no Brasil (1,062 bilhão de toneladas de CO₂), principalmente pelo aumento do desmatamento em 23% no Cerrado, 11% na Caatinga, 4% na Mata Atlântica e 86% no Pantanal (SEEG, 2024).

Nas últimas décadas, especialmente de 1980 até os dias atuais, o uso e a cobertura da terra no Brasil passaram por intensas transformações, impulsionadas, sobretudo, pelo desmatamento relacionado à expansão de áreas destinadas a produção agrícola e pecuária. Mudanças nesse uso, assim como outras intervenções humanas, provocam transformações no clima, principalmente por intensificarem a liberação de GEE na atmosfera (Santos, 2024; Nonnenberg *et al.*, 2025; Silva; Silva; Gomes, 2010; Batista *et al.*, 2025).

A substituição de áreas naturais por pastagens, monoculturas e infraestrutura agrícola provocou mudanças profundas na paisagem e na dinâmica ambiental dos principais biomas, como o Cerrado e a Amazônia (Ferreira, 2007; Farias *et al.*, 2022). Essas alterações são motivadas por uma combinação de fatores econômicos, políticos e tecnológicos, que incluem desde incentivos governamentais até a demanda crescente por *commodities* agrícolas no mercado internacional e suas consequências nas emissões de GEE resultantes das mudanças no uso do solo (Silva *et al.*, 2019; Nonnenberg *et al.*, 2025).

Nesse âmbito, o Brasil é um país onde a agricultura possui papel de relevância na economia interna e nos mercados globais de produção agrícola. Apesar disso, a produção agrícola estimada para 2024 foi de 292,7 milhões de toneladas, representando uma queda de 7,2% em relação à safra de 2023 (IBGE, 2024). De tal maneira, uma das principais preocupações é sobre como o impacto dessas mudanças climáticas afeta a agricultura, setor vital para a segurança alimentar, a economia e a vida de milhões de pessoas em todo o mundo (Alpino *et al.*, 2022; Oliveira, 2023; Fonseca *et al.*, 2025).

O nível da produção agrícola está diretamente relacionado às instabilidades climáticas e às condições do tempo, já que possíveis alterações na temperatura, nos níveis de precipitação e na concentração de CO₂ afetam de maneira significativa o desenvolvimento de colheitas (Kumar; Gautam, 2014; Petrovic *et al.*, 2023). O avanço das mudanças climáticas é suscetível de alterar padrões climáticos, intensificar secas e eventos extremos, afetando a produção agrícola, a disponibilidade de água e a produtividade das terras (Giménes; Castanha, 2012; Muluneh, 2021; Prado, 2024).

O déficit hídrico é passível de prejudicar a produção, ainda mais, quando se atrela ao fenômeno do aumento das temperaturas. Assim como grandes volumes de chuva reduzem a produtividade provocada pela saturação do solo (Barcelos, 2022; Assad; Assad, 2024). Secas prolongadas e altas temperaturas tornam a produção agrícola mais vulnerável, enquanto chuvas intensas acima do esperado também comprometem a produção, com impactos variando conforme a região de cultivo (Lemos; Sousa; Feitosa, 2023; Assad e Assad, 2024; Li *et al.* 2019; Lucena *et al.*, 2012).

Ademais, é evidenciado o aumento significativo da temperatura média global nas últimas décadas. A temperatura média global aumentou 1,1°C de 2011 a 2020 em comparação com o período de 1850-1900 (IPCC, 2023). No Brasil, conforme dados do Instituto Nacional de Meteorologia (2025), de 1961 a 2024, as médias anuais de temperatura no Brasil mostram tendência significativa de aumento, com 2024 sendo o ano mais quente do período, 0,79°C acima da média. Esse aquecimento é associado às mudanças climáticas decorrentes do aquecimento global e alterações ambientais locais, provocados, especialmente pelos fenômenos climáticos - como o *El Niño* e *La Niña*.¹

O Brasil possui um grande território com grande diversidade agroclimática, no qual os

¹ O *El Niño* e *La Niña* são os principais fenômenos climáticos gerados com o aumento da temperatura das águas do Oceano Pacífico, provocando efeitos sociais, econômicos e ambientais relevantes para a sociedade, como enchentes, secas, tempestades, dificuldades na agricultura, alterações no comportamento humano, na preservação dos ecossistemas e na disponibilidade de água (Prado, 2024).

padrões climáticos de longo prazo variam significativamente entre as regiões, representando diferenças conforme a localidade e a cultura produzida. Apesar de a produção agrícola ser afetada pelas práticas e técnicas agrícolas, como a utilização de fertilizantes, irrigação e controle de pragas, ela também é altamente vulnerável aos efeitos dos fenômenos climáticos, observados, principalmente, por intermédio de variações nos níveis de precipitação e temperatura (Tanure, 2020; Dorisca, 2025). Isso afeta a garantia de que a produção de alimentos se mantenha em níveis adequados, tanto em qualidade quanto em quantidade. Essa relação se torna ainda mais complexa dado o contínuo crescimento populacional, que exige maior produção de alimentos (Bezerra, 2022; Lima; Alves, 2008; Magalhães *et al.*, 2021).

Dado o que foi expresso até aqui, a pesquisa se insere num âmbito de estudo essencial para compreender como as mudanças no clima afetam diretamente o desempenho da produção vegetal brasileira, considerando, além das variáveis climáticas, também fatores relacionados ao uso da terra e às práticas humanas que agravam ou mitigam tais impactos.

Ao combinar uma abordagem quantitativa com dados em painel de longo prazo e abrangência nacional, o experimento intenta oferecer uma análise aprofundada dos efeitos das mudanças climáticas sobre o valor da produção agrícola, fornecendo evidências empíricas habilitadas a subsidiar políticas públicas direcionadas à resiliência do setor agrícola perante os desafios impostos pelas mudanças climáticas.

Haja vista as transformações recentes no clima e no uso da terra no Brasil, abordagem fundamentada conforme o MapBiomas, surgem questionamentos importantes: i) Como essas mudanças no uso da terra influenciam o valor bruto da produção vegetal e da pecuária no decurso do tempo?; e ii) A expansão de atividades agropecuárias ocorre em sinergia com a produtividade ou resulta em maiores impactos climáticos? A pesquisa procurou entender a dinâmica da mudança do uso da terra e do clima na produção agropecuária no Brasil, por meio de uma análise de dados em painel com foco nos 26 estados brasileiros e no Distrito Federal, no período de 1985 a 2023.

Sob dita perspectiva, esta investigação se justifica pela crescente preocupação com os impactos das instabilidades climáticas e as mudanças do uso da terra sobre a produção agrícola no Brasil, um país que, em decorrência da sua grande diversidade agroclimática, enfrenta desafios particulares relacionados à variabilidade climática. O diferencial deste esforço investigativo está no uso de dados em painel, abrangendo um período de quase quatro décadas (1985-2023), o que ensejou uma análise mais robusta das tendências e dos efeitos de longo prazo das mudanças na produção vegetal e da produção pecuária, além dos efeitos captados com suporte em variáveis que mensuram a dinâmica das transformações do uso da terra sob

condições de instabilidade climática e emissões de GEE. O estudo fornece informações essenciais para a elaboração de políticas públicas e estratégias de adaptação aos efeitos climáticos, além de contribuir para um melhor entendimento das interações do uso da terra e dos fenômenos climáticos, sendo capaz de orientar decisões estratégicas que conciliem crescimento produtivo, redução de impactos ambientais e maior capacidade adaptativa do setor agropecuário brasileiro.

1.2 Objetivos

1.2.1 Objetivo Geral

Aferir os efeitos climáticos e das mudanças no uso da terra sobre o valor bruto da produção vegetal (VBV) e da pecuária (VBP), por emissão de gases do efeito estufa, no Brasil, nos anos de 1985 a 2023.

1.2.2 Objetivos Específicos

- Verificar a evolução das emissões de gases do efeito estufa e do valor bruto da produção vegetal (VBV) e da pecuária (VBP) nas unidades federativas brasileiras, de 1985 e 2023.
- Ranquear as unidades federativas quanto ao VBV e VBP.
- Mensurar os efeitos das variáveis climáticas e a influência das mudanças no uso da terra sobre o valor bruto da produção vegetal (VBV) e da pecuária (VBP) nos estados brasileiros, de 1985 e 2023.

1.3 Estrutura do texto

Esta dissertação está estruturada em cinco seções, sendo esta a introdução. Na seção 2, é abordado o modo como as mudanças climáticas afetam a produção vegetal e a produção pecuária, bem como as medidas adotadas por governos e instituições com o objetivo de mitigar os efeitos decorrentes dessa mudança. Demais disso, são discutidos trabalhos empíricos que abrangem o contexto teórico sobre as mudanças climáticas, o uso da terra e seus impactos na agricultura, com uma perspectiva de desafios sobre os principais fatores climáticos e ambientais que influenciam a produção agrícola. A seção 3 contém a metodologia adotada, incluindo a descrição dos dados, as variáveis selecionadas e os métodos utilizados. Os resultados são

descritos e discutidos na seção 4. As considerações finais estão relatadas na seção 5, além de recomendações de políticas públicas para a mitigação dos impactos climáticos na agricultura.

2 MUDANÇAS CLIMÁTICAS, AGRICULTURA E GOVERNANÇA: DINÂMICAS, IMPACTOS E ESTRATÉGIAS DE RESPOSTA

Diversas iniciativas governamentais foram e estão sendo implementadas, haja vista a crescente percepção de fenômenos ambientais incomuns. Essas ações visam a mitigar os efeitos gerados pelas mudanças climáticas e demonstram a necessidade de adoção de iniciativas adaptativas para lidar com esses efeitos decorrentes (Cintra; Melo; Menezes, 2020). Assim, de acordo com estratégias globais, que ressaltam a importância de uma análise mais aprofundada sobre os impactos climáticos, é importante destacar, inicialmente, ações e eventos significativos implementados nas últimas décadas (Bezerra, 2022).

2.1 *Background* político-institucional da evolução da governança climática global

O início das discussões ambientais em âmbito internacional foi um momento decisivo para o avanço de políticas globais dirigidas à proteção do meio ambiente e ao desenvolvimento sustentável. A primeira Conferência Global da Nações Unidas orientada para situações ambientais foi a Conferência de Estocolmo, em 1972. O evento reuniu 113 países e organizações não governamentais. Ficou estabelecida a Declaração de Estocolmo e foi criado o Programa das Nações Unidas para o Meio Ambiente (Pnuma), com o objetivo de coordenar ações globais tendidas para a cooperação internacional sobre a necessidade da proteção do meio ambiente, incentivando políticas e práticas sustentáveis.

De tal modo, o acordo firmado em Estocolmo possibilitou aos países a criação de acordos diversos relacionados ao meio ambiente, em razão da visibilidade gerada em torno de pontos ambientais, e da incorporação de políticas nacionais e internacionais pendidas para o desenvolvimento sustentável. Ainda que a implementação de propostas de cooperação tenha sido desafiadora, houve um avanço significativo (Passos, 2009).

Em 1983, a ex-primeira-ministra da Noruega, Gro Harlem Brundtland, foi nomeada, pelo Secretário Geral da ONU, para criar e presidir a Comissão Mundial sobre Meio Ambiente e Desenvolvimento. O trabalho dessa Comissão resultou na publicação de um relatório, em 1987, denominado *Our Common Future* (Nosso Futuro Comum), mais conhecido como o Relatório Brundtland. O relatório é um marco importante no âmbito do desenvolvimento sustentável, e sua principal contribuição foi a definição do conceito de desenvolvimento sustentável. Mageste (2023) evidencia que o Relatório foi criado como resposta a um aumento da preocupação com os efeitos ambientais resultantes do crescimento econômico rápido e descontrolado dos países.

Em 1987, foi assinado o Protocolo de Montreal. À extensão dos anos, todos os países signatários (197) ratificaram o Documento, havendo sido estabelecida, na peça, a adoção de medidas promotoras da redução de substâncias prejudiciais à camada de ozônio. Essas ações contribuíram para a redução do impacto das mudanças climáticas, na medida em que a redução de substâncias nocivas à camada de ozônio também contribui para a redução do efeito. Assim, ao proteger a camada de ozônio, o Protocolo teve influência positiva na mitigação de mudanças climáticas globais, principalmente pela redução dos gases de efeito estufa a extenso prazo (Goyal, 2019; Morgenstern *et al.*, 2008).

Em 1988, por meio da Organização Meteorológica Mundial (OMM) e do Programa das Nações Unidas para o Meio Ambiente, restou estabelecido o Painel Intergovernamental sobre Mudanças Climáticas (IPCC), com vistas a fornecer, aos formuladores de políticas, avaliações sobre as mudanças climáticas, seus impactos e previsões de risco, além de sugerir opções para adaptação e mitigação. O IPCC, por seus relatórios, mapeia o conhecimento sobre as mudanças climáticas, identificando áreas de consenso entre os cientistas e apontando onde mais pesquisas são necessárias (IPCC, 2025).

Já em 1992, ocorreu a II Conferência das Nações Unidas sobre Meio Ambiente e Desenvolvimento, no Rio de Janeiro. Esse evento ficou conhecido como a Cúpula da Terra ou Rio-92. Na Cimeira, foi adotada a Agenda 21, um plano para a proteção ambiental e o desenvolvimento sustentável, resultado de duas décadas de trabalho que se iniciaram em Estocolmo, em 1972 (Bezerra, 2022). Em complementação, o princípio de CBDR (*Common but Differentiated Responsibilities*, ou Responsabilidades Comuns, mas Diferenciadas), instituído em 1992 durante a Cúpula da Terra no Rio de Janeiro, ressalta que todos os países possuem uma responsabilidade coletiva no enfrentamento das mudanças climáticas, no entanto, deveriam ser considerados o nível de desenvolvimento econômico e histórico de emissões de poluentes, bem como a capacidade de atuação de cada país. Em adição, sobrou evidenciado que, dada a desigualdade histórica de emissão de gases de efeito estufa refletida pela contribuição de cada país para o agravamento do clima, é importante diferenciar as ações de mitigação, o montante de financiamento, capacidade de tecnologia e fortalecimento das capacidades individuais dos países (Jinnah, 2017).

Durante a COP-3, realizada em 1998, ficou estabelecido o Protocolo de Kyoto, no qual foi formalizado o princípio de CBDR, havendo sido, ainda, fixadas metas para reduzir gases de emissão de efeito estufa (GEE) e estimular o desenvolvimento sustentável por meio da cooperação entre os países signatários. As nações-estados em desenvolvimento, inicialmente, foram isentas de obrigações de redução de emissões, que deveriam ser inicialmente cumpridas,

possuindo um impacto maior nos países desenvolvidos, dada a premissa estabelecida no princípio do CBDR (Nunes, 2023).

No decorrer dos anos, alguns países classificados como emergentes passaram a estruturar suas economias de maneira que se tornassem, pelo menos potencialmente, grandes emissores de poluentes. Assim, esse fato foi de encontro ao princípio básico estabelecido no Protocolo de Kyoto. Ademais, tais nações argumentavam que assumir metas de redução dificultaria seu desenvolvimento, principalmente relacionado à tecnologia necessária para descarbonizar a produção (Simão; Martins; Faveto, 2014; Veigas 2009).

Dessa maneira, a falta de incentivos institucionais a fim de ampliar a transição para uma economia de baixo carbono, associada ao posicionamento dos países signatários, enfraqueceu a percepção de que a contenção do aquecimento global possibilitaria novos mercados e oportunidades de negócios. De outro modo, prevaleceu a visão de que assumir compromissos de redução de carbono, conforme estabelecido pelo Protocolo de Kyoto, seria prejudicial ao desenvolvimento econômico dos países, dado o sacrifício necessário para adaptação e em razão do montante de recursos necessários envolvidos (Simão; Martins; Faveto, 2014). Ademais, a saída dos Estados Unidos, em 2001, do Protocolo de Kyoto e as insatisfações decorrentes dos países desenvolvidos, principalmente relacionadas aos problemas do *free rider* (carona) e da exigência de compromissos dos países emergentes, comprometeram ainda mais o progresso do Protocolo (Nunes *et al.*, 2023).

Com a minimização das expectativas do Protocolo de Kyoto na realização das metas de redução dos GEE, ficando abaixo dos níveis desejados, surgiu uma discussão da necessidade de um novo Acordo Global do Clima. Durante a 21ª Conferência das Partes (COP21) da *United Nations Framework Convention on Climate Change* - UNFCCC (Convenção-Quadro das Nações Unidas sobre Mudanças Climáticas), realizada em Paris, foi estabelecido um novo acordo com o objetivo principal de fortalecer a resposta global à ameaça das mudanças climáticas e melhorar a capacidade dos países para lidar com os impactos dessas alterações. O Acordo de Paris foi aprovado pelos 195 países membros da UNFCCC, com a meta de reduzir as emissões de GEE no contexto do desenvolvimento sustentável. O compromisso objetiva limitar o aumento da temperatura média global a bem menos de 2°C em relação aos níveis pré-industriais, com esforços para restringir o aumento a 1,5°C (Rei; Gonçalves; Souza, 2017).

O acordo estabelece as Contribuições Nacionalmente Determinadas (CNDs) de todos os países signatários. Esse mecanismo possibilita que os países definam metas para alcançar o objetivo conforme estabelecido no Acordo e possibilita que haja um monitoramento mútuo, ensejando que os países verifiquem se todos os participantes estão, de fato, cumprindo os

compromissos assumidos (Miranda; Parranhos, 2023). Conforme o contexto atual de mudanças climáticas, todos os países têm papel essencial na redução dos efeitos dessas mudanças. Para isso, cada país adota uma posição que corresponde à sua realidade nacional e às circunstâncias específicas em que se encontram. Assim, destaca-se a principal diferença entre o Acordo de Paris e o Protocolo de Kyoto, já que, então, havia a inclusão de todos os países signatários no esforço de mitigação das mudanças climáticas (Baldino, 2020).

O Governo brasileiro apresentou, em 2023, a nova NDC, reforçando o compromisso com o acordo de Paris, ao estabelecer a meta de reduzir de 59% a 67% suas emissões líquidas de GEE até 2035, em relação aos níveis de 2005. Adicionalmente, com base nessa NDC, Planos Setoriais de Mitigação, com conclusão prevista para o primeiro semestre de 2025, definiriam metas específicas para todos os setores da economia, alinhando o País ao objetivo de neutralidade de carbono até 2050 e ao limite de 1,5°C de aquecimento global, conforme acordado na COP28. Para alcançar esses objetivos, o Brasil propôs a implementação de planos de ação específicos para cada um de seus biomas, tomando como base o PPCDAm e PPCerrado, além de outros instrumentos de ações governamentais com vistas à redução de emissões no setor de mudança do uso da terra e florestas (Sousa; Oliveira, 2024; Cole, 2025; Mera; Bieker; Cieplinski, 2025).

A NDC também reforça a continuidade do Plano Setorial para Adaptação à Mudança do Clima e Baixa Emissão de Carbono na Agropecuária (Plano ABC+), que atualiza o antigo Plano ABC. Esse esforço está ancorado no Plano Clima, que orienta ações de mitigação e adaptação às mudanças climáticas, incluindo sete planos setoriais de mitigação e 16 de adaptação. O Plano é apoiado por instrumentos econômicos como o Plano de Transformação Ecológica, a Plataforma Brasil de Investimentos Climáticos (BIP), Eco Invest Brasil, a Taxonomia Sustentável Brasileira, o mercado regulado de carbono (SBCE) e financiamentos de instituições como o Fundo Amazônia, o Fundo Florestas Tropicais para Sempre (TFFF) e o BNDES (Junker, 2024; Nonnenberg *et al.*, 2025).

Nessa contextura de fortalecimento do compromisso global perante as mudanças climáticas, a realização da 30ª Conferência das Partes (COP30) auferiu relevância. Sediada pela primeira vez na região amazônica, em Belém-PA, a COP30 representou uma oportunidade estratégica para que os países reavaliassem suas CNDs e reforçassem seus compromissos climáticos no contexto do balanço global previsto pelo Acordo de Paris (Fontão, 2024; Maia, 2024; Closs, 2025). A escolha da Amazônia como sede simbólica e política do evento destaca a importância dos ecossistemas tropicais na regulação climática da Terra e enfatiza o papel do Brasil como liderança climática no concerto internacional (Estevo; Thomas; Gondim, 2024).

Haja vista o agravamento dos eventos climáticos extremos e o desafio de manter o aquecimento global dentro dos limites estabelecidos pelo Acordo de Paris, a COP30 possibilitou a revisão de metas, negociações e fortalecimento da cooperação entre países. Além disso, a inclusão do debate e a existência de mecanismos e processos participativos eficazes, equitativos e transparentes, dão ensejo à inserção ativa da sociedade civil e das organizações populares nas discussões sobre a agenda climática no âmbito da política mundial (Gonzales, 2024; Chagas; Butzke; Theis, 2025).

2.2 Estratégias de mitigação e adaptação climática no Brasil

No Brasil, a resposta às mudanças climáticas, também, se constitui gradualmente à extensão dos anos. Demanda-se, junto às parcerias internacionais estabelecidas, a mobilização de políticas direcionadas para mitigação, adaptação e viabilização de ações de conscientização relacionadas aos padrões de comportamento e que gerem efeitos sensíveis no dia a dia (Queiroz; Barbieri; Confalonieri, 2016).

Uma das principais estratégias adotadas como meio de adaptação foi a constituição de Perímetros Públicos Irrigados (PPIs). Dada a diversidade climática, que impacta diretamente na irregularidade da distribuição hídrica, a prática de irrigação representa um importante elemento contributivo para assegurar a sustentabilidade da atividade agrícola. Por tal razão, o Governo Federal deu início ao ciclo político da Política Nacional de Irrigação (Reis; Silveira; Rodrigues, 2012). Principalmente, em regiões semiáridas, onde a distribuição de chuvas se dá de maneira irregular ou escassa, essa prática de irrigação é indescartável para o alcance da qualidade produtiva e do aumento da produtividade agrícola (Fragoso; Pizaia, 2023; Pimentel, 2021; Borges, 2010).

Consoante a evolução legislativa e a importância da utilização racional da água, a Lei 9.443, de 8 de janeiro de 1997, instituiu a Política Nacional de Recursos Hídricos, com a finalidade de garantir a gestão integrada e sustentável do uso dos recursos hídricos no Brasil. Para isso, instituíram-se medidas mais efetivas, como a gestão participativa entre Governo e Sociedade Civil, reconhecendo a água como um bem público e um direito de todos, introduzindo instrumentos como outorgas dos direitos de uso da água mediante cobrança pela utilização desse recurso.

No decorrer das décadas, além de investimentos privados, os PPIs representam, entre outros, os principais instrumentos de política pública para promover a agricultura irrigada e enfrentar os desafios relacionados à disponibilidade de água e à produtividade agrícola nas

distintas regiões do País (Ferreira; Vieira Filho, 2020). Com efeito, o desenvolvimento de perímetros irrigados, mediante planejamento público, emergiu como uma vertente crucial para o crescimento das atividades irrigadas no Brasil, já que essa política é particularmente relevante em regiões onde as camadas mais vulneráveis do setor agrícola necessitam de um suporte adequado das políticas públicas para manter suas atividades (Ferreira; Vieira Filho, 2021).

Suplantando as estratégias de adaptação, foram constituídas táticas de mitigação e a tentativa de reduzir a incidência de ações danosas ao meio ambiente. A preservação de biomas é elemento essencial para o enfrentamento dos efeitos das mudanças climáticas, já que a grande área florestal é responsável pela absorção de carbono (Noletto, 2023). Como meio de reduzir o desmatamento ilegal, foram instituídos em 2004 o Plano de Ação para Prevenção e Controle do Desmatamento na Amazônia Legal (PPCDAm) e o Plano de Ação para a Prevenção e Controle do Desmatamento e da Degradação Florestal no Bioma Cerrado (PPCerrado), pelo Governo Federal, como ações integradas ao combate do desmatamento excessivo (Coy; Kingler, 2014).

Fearnside (2006) ressalta que o desmatamento libera CO₂ e outros gases que intensificam o efeito estufa. Demais disso, a preservação da biodiversidade da floresta, o ciclo da água e os estoques de carbono, que contribuem para a mitigação do agravamento do efeito estufa, são suscetíveis de ser prejudicados. Adicionalmente, a interação das mudanças climáticas com as florestas também é observada por meio de processos como incêndios florestais, a morte de árvores por seca e calor, e a liberação de carbono armazenado no solo, o que representa uma grande ameaça para o agravamento do clima. Em adição, malgrado uma parte desse CO₂ ser reabsorvida pelo crescimento das florestas secundárias resultantes das áreas desmatadas, outros gases como o metano (CH₄) e o óxido nitroso (N₂O) não terminam reabsorvidos. Além do mais, a quantidade reabsorvida é pequena quando comparada à quantidade inicialmente liberada.

Com vistas a preservar e reduzir o desmatamento ilegal, foi instituído em 2004 o Plano de Ação para Prevenção e Controle do Desmatamento na Amazônia Legal (PPCDAm) pelo Governo Federal, demandando por ações integradas. O PPCDAm foi constituído em cinco fases: 1ª (2004 a 2008), 2ª (2009 a 2011), 3ª (2012 a 2015), 4ª (2016 a 2020) e 5ª (2023 a 2027). Durante a primeira fase, dados do Projeto de Monitoramento do Desmatamento na Amazônia Legal por Satélite (Prodes) e do Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais (INPE) indicaram uma redução de cerca de 55% do desmatamento na região. Em aditamento, os dados do INPE de 2012 apontam uma redução de 83%. Apesar dos esforços nas fases iniciais do Programa, ao decorrer dos últimos anos e dadas as decisões políticas adotadas, o desmatamento na região da Amazônia voltou a exprimir índices relevantes de desmatamento. Conforme dados recentes do Instituto do Homem e Meio Ambiente da Amazônia (Imazon), em 2021, a floresta amazônica

registrou o maior índice de desmatamento dos últimos dez anos, com a perda de 10.362 km² de vegetação nativa. A quinta fase do plano prevê o alcance do desmatamento zero até 2030. Sua estrutura está constituída em quatro eixos principais de atividades produtivas sustentáveis, monitoramento e controle ambiental, ordenamento fundiário e territorial, e instrumentos normativos e econômicos que visem a reduzir o desmatamento e garantir a implementação das ações previstas por outros eixos (PPCDAm, 2023).

Já o PPCerrado foi instituído em 2010 pela Portaria nº 128, do Ministério do Meio Ambiente. O Documento tem como objetivo a promoção da prevenção e o controle do desmatamento e da degradação florestal do Cerrado. O Plano intenta a implementação de ações coordenadas para reduzir impactos ambientais provocados pela atividade humana. Procura-se, demais disso, incentivar a recuperação e a conservação de ecossistemas essenciais para o Brasil. Assim como o PPCDAm, ele possui fases: 1ª (2010-2011), 2ª (2014-2015), 3ª (2016-2020), 4ª (2023-2027). A 4ª fase, além de consolidar os resultados obtidos nas anteriores, estabelece o compromisso de reduzir a perda de vegetação nativa do bioma e alcançar o desmatamento zero até 2030. Essa meta será alcançada por intermédio de esforços da erradicação do desmatamento ilegal, mediante a aplicação efetiva da legislação florestal, bem assim da recuperação de estoques da vegetação nativa, com suporte em incentivos econômicos para a conservação e o manejo florestal sustentável (PPCerrado, 2023).

Outra estratégia adaptativa que intentava a compatibilidade entre o desenvolvimento econômico e social com a proteção do sistema climático foi a Política Nacional sobre Mudança do Clima (PNMC). Instituída pela Lei nº 12.187/2009, a PNMC definiu diretrizes para a mitigação e adaptação aos efeitos das mudanças climáticas no Brasil. Para isso, definiram-se metas de redução de GEE e ações que visavam a mitigar os efeitos provocados pela mudança do clima no desenvolvimento social, ambiental e econômico em concordância com o desenvolvimento sustentável, mediante cooperação entre governos e sociedade. Essa política estabelece que planos setoriais pejem por medidas de redução do GEE, principalmente daqueles provenientes do desmatamento, que em 2005 representavam 58% das emissões totais (Neves; Change; Pierri, 2015).

Bôas (2011) enfatiza os princípios aplicados ao PNMC, que promovem valores de sustentabilidade, prevenção, cooperação, humanidade, precaução, responsabilidade e equidade. Assim, as normas sobre mudanças climáticas que se desenvolverem com amparo nele deverão seguir esses princípios, além de incorporar outros que surgirem nos planos nacionais e internacionais, para a garantia de uma proteção mais eficaz ao meio ambiente.

Na concepção de Motta (2011), a instituição do PNMC foi uma importante medida, ao

ratificar as metas estabelecidas pelo Brasil na COP 25 e instituir um conjunto de diretrizes, metas e princípios para o cumprimento delas. Destaca-se, porém, a necessidade de institucionalização e de aparatos regulatórios relativos aos impactos causados pela alocação de incentivos e dos direitos da emissão de carbono.

Com vistas a promover uma gestão ambientalmente adequada aos resíduos, foi proposta a instituição da Lei nº 12.305/2010, conhecida como Política Nacional de Resíduos Sólidos (PNRS). Essa é uma legislação brasileira que estabelece diretrizes para a gestão adequada de resíduos sólidos no Brasil. Ela intenta promover a redução, reutilização, reciclagem e o tratamento adequado dos resíduos, visando a minimizar os impactos ambientais e proteger a saúde pública. Além dos impactos ambientais mais diretos, a destinação inadequada de resíduos sólidos é passível de desempenhar função significativa no agravamento das mudanças climáticas. Grandes quantidades de gases de efeito estufa (GEE), com destaque para o metano (CH_4), o segundo gás mais relevante entre os que contribuem para o aquecimento global, é liberado por meio da decomposição da matéria orgânica. O potencial de emissão de metano tem curso conforme as condições de controle dos aterros e a ampliação de lixões (Gouveia, 2012).

Ademais, no mesmo ano, foi instituído o Plano Setorial de Mitigação e de Adaptação às Mudanças Climáticas para a Consolidação de uma Economia de Baixa Emissão de Carbono na Agricultura (Plano ABC) em 2010 pelo Ministério da Agricultura, Pecuária e Abastecimento (Mapa). O objetivo principal desse Programa é promover práticas agrícolas que contribuam para a redução das emissões de gases de efeito estufa (GEE), ao mesmo tempo em que se quer aumentar a produtividade do setor agrícola, sem comprometer a sustentabilidade ambiental. Para isso, incluem-se ações que irão ajudar, tanto direta quanto indiretamente, a atingir a meta de redução do desmatamento nos biomas Amazônia e Cerrado, estabelecendo reduções de 80% e 40%, respectivamente, conforme o compromisso voluntário do Brasil na COP-15. Esse plano abrange iniciativas como a formação de técnicos e produtores rurais, a transferência de tecnologia, pesquisa, desenvolvimento e inovação, oferecimento de linhas de crédito, regularização fundiária e ambiental, além da disponibilização de insumos. Para isso, destaca-se o oferecimento de linhas de crédito subsidiadas pelo governo para agricultores e pecuaristas que implementem essas práticas (PLANO ABC, 2012).

Já o Plano Nacional de Recuperação da Vegetação Nativa (Planaveg), foi instituído pelo Decreto nº 8.972/2017 e objetiva promover a recuperação e a restauração da vegetação nativa do Território brasileiro. Para isso, o Plano prevê a recuperação de áreas degradadas com foco na reconstituição de áreas desmatadas, a conservação da biodiversidade, o incentivo ao uso sustentável dos recursos e o monitoramento efetivo governamental. O Plano está estruturado

em 3 eixos: Eixo 1 - Planejamento e implementação da restauração, 2 - Mobilização de recursos e 3 - Monitoramento e avaliação (Planaveg, 2017).

Ainda sobre o Plano ABC, ele foi estruturado em seis diretrizes: recuperação de pastagens degradadas, sistemas de integração lavoura-pecuária-floresta, sistemas agroflorestais, fixação biológica de nitrogênio, plantio direto, florestas plantadas e tratamento de dejetos animais, além de uma ação específica para a adaptação às mudanças climáticas. Essas medidas intentam ações relacionadas ao Planaveg, que visa a recuperar a vegetação nativa em pelo menos 12 milhões de hectares até 2030, em Áreas de Preservação Permanente (APP), em áreas de Reserva Legal (RL) e em zonas degradadas com baixa aptidão agrícola.

O Plano ABC e o Planaveg são meios importantes para fortalecer as estratégias de adaptação da agropecuária, principalmente por garantir a conservação da biodiversidade e a proteção dos polinizadores; assegurar a oferta e a qualidade da água; mitigar extremos climáticos, como secas e ondas de calor, que afetam a produção agrícola; reduzir os riscos de desastres naturais, especialmente inundações e erosão do solo; preservar o equilíbrio dos ciclos biogeoquímicos; absorver carbono no solo; promover a diversificação da produção e da renda para os produtores rurais; e contribuir para aumentar a resiliência dos sistemas produtivos ante as mudanças climáticas (Assad *et al.*, 2019).

Outro ponto relevante diz respeito à resiliência e à capacidade de adaptação dos produtores agrícolas perante as mudanças climáticas. Lemos e Bezerra (2023) que, apesar das adversidades climáticas, especialmente em um contexto de agricultura de sequeiro, os agricultores demonstram capacidade de adaptação às variações pluviométricas à proporção do tempo. O estudo sobre o Estado do Ceará de 1945 a 2020 identificou o fato de que os produtores conseguiram manter suas atividades produtivas mesmo após 31 episódios de seca registrados no período, evidenciando um importante grau de resiliência. Essa capacidade de adaptação, desenvolvida, muitas vezes, de maneira autônoma, reforça a importância de políticas públicas que apoiem e ampliem estratégias de convivência com biomas brasileiros, com foco na sustentabilidade da agricultura e no fortalecimento da produção.

2.3 Mudanças no uso e cobertura da terra: dinâmica agropecuária e efeitos climáticos

A alteração no uso da terra expressa papel fundamental nas dinâmicas ambientais globais, influenciando diversos processos que afetam o equilíbrio climático e o ecossistema. Essa mudança contribui para transformações globais e interfere nas transformações climáticas ao afetar as emissões de gases, as interações da superfície terrestre e da atmosfera com os processos

hidrológicos e o fluxo de energia no solo, além de impactar os ecossistemas, provocar perda de biodiversidade e modificar a distribuição e o deslocamento das espécies (Zhang *et al.*, 2010; Roy *et al.*, 2022).

Os padrões de ocupação do território e as transformações no uso da terra são propícios a afetar significativamente o modo como os eventos climáticos extremos impactam a produção agrícola, seja pela conversão de áreas de floresta para outros tipos de uso, como agricultura, pastagens ou áreas urbanas, práticas agrícolas ou a criação de animais. Essas mudanças são suscetíveis de agravar a vulnerabilidade dos sistemas produtivos a eventos extremos climáticos. Demais disso, o carbono capturado por meio de ações de reflorestamento influencia nos níveis líquidos de GEE, contribuindo para as alterações climáticas (Gouvello *et al.*, 2010; Pontes *et al.*, 2023).

A análise de transformações no uso e na cobertura da terra no Brasil se torna uma tarefa ainda mais complexa, considerando a vasta dimensão do território, a diversidade espacial dos biomas e as particularidades regionais relacionadas às modalidades de uso e manejo da terra (Quintão *et al.*, 2021; Ferro, 2021). Essa alteração, juntamente com as mudanças climáticas, têm o potencial de conduzir o sistema ambiental para um estado de equilíbrio mais seco. Em ditas circunstâncias, a vegetação tende a se modificar gradualmente para adaptação às novas condições climáticas (Nobrega, 2014; Cavalcante, 2021).

Essa transformação contínua do uso da terra ainda é uma fonte significativa de emissões de CO₂ na região brasileira, impulsionada principalmente pela ampliação de pastagens e áreas agrícolas destinadas à produção (Gerber *et al.*, 2013). Oliver e Morecroft (2014) e Santos (2024) destacam o modo como a alteração no uso e cobertura da terra é passível de influir nas variáveis de temperatura do ar e precipitação. A combinação entre o aumento dos GEE e as mudanças no uso da terra resulta em alterações significativas entre essas variáveis. A diminuição da evapotranspiração e da convergência de umidade contribuiu para a redução das chuvas, intensificando o ciclo de deterioração ambiental (Pontes *et al.*, 2023).

Quintão *et al.* (2021) destacam em seu trabalho que as emissões resultantes da conversão de áreas de pastagem para uso agrícola, principalmente para cultivos anuais, denotaram crescimento ao longo do período analisado. As emissões partiram de 77 milhões de toneladas de CO₂ de 1994 a 2002, para 220 milhões de 2002 a 2010, e chegando a 278 milhões de toneladas de CO₂ no período de 2010 a 2016. Apesar desse aumento, essas emissões ainda representam uma fração menor em comparação às geradas pela conversão direta de vegetação nativa não protegida em áreas agrícolas. Os autores evidenciam que os biomas Cerrado e Amazônia concentraram as maiores emissões líquidas de CO₂ no intervalo de 2010 a 2016.

Nessas regiões, o uso das pastagens exprime grande dinamismo e, à medida do tempo, existe a possibilidade de que uma parcela significativa dessas áreas venha a ser transformada em áreas agrícolas.

Raza *et al.* (2024) ressaltam que as transformações no uso e na cobertura do solo representam um dos principais fatores que provocam alterações ambientais. O estudo analisou o distrito de Bahawalnagar, no Paquistão. Os autores evidenciam que essas mudanças influenciam negativamente a qualidade do solo, a disponibilidade de recursos hídricos e o clima, influenciando diretamente a produtividade agrícola. Demais disso, a modificação do uso e cobertura da terra resultar na redução de áreas destinadas à agricultura, na degradação de florestas, além da expansão urbana, o que contribui para as mudanças climáticas e prejudica o setor agrícola.

Sato (2025) enfatiza, a seu turno, que as mudanças no uso e cobertura da terra, impulsionadas pela expansão da agropecuária e pela silvicultura exercem influência significativa sobre o estoque e o sequestro de carbono considerado em seu estudo o estado de Mato Grosso do Sul. A expansão dessas atividades econômicas, sem a implementação de práticas de manejo sustentável, resulta numa diminuição na capacidade dos biomas de atuar como sumidouros de carbono, trazendo consequências negativas que se refletem tanto nas perdas de carbono quanto na do valor econômico associado a esse sequestro.

Batista, Duku e Hein (2023) analisaram o modo como o planejamento do uso da terra e a preservação de condições ambientais favoráveis à produção agropecuária se relacionam com alterações nos padrões de precipitação, causadas pelo desmatamento, e como esses fatores afetam a produtividade agrícola nos estados situados na fronteira agrícola dos biomas Amazônia e Cerrado. Os dados, referentes à produtividade de 2011 a 2020, indicam que a perda de cobertura florestal impactou a produtividade com uma média de 6,6% menor para a soja e 9,9% menor para o milho, em comparação ao que seria esperado se a vegetação de 1982 tivesse sido mantida. Destaca-se, ainda, que, malgrado a eficiência da produção tenha aumentado nesse período de 0,6% ao ano para a soja e 1,2% ao ano para o milho, esse avanço não foi suficiente para neutralizar as perdas provocadas pelo desmatamento, evidenciando a importância de um serviço ecossistêmico eficaz.

Silva *et al.* (2025) discutem a interação de fatores socioeconômicos, ambientais e o desmatamento no bioma Mata Atlântica em regiões do estado da Bahia. Os resultados indicaram que a expansão da atividade agropecuária, evidenciada pelo crescimento do efetivo bovino, foi uma das principais causas do aumento do desmatamento na região. Ademais, observou-se que o crescimento econômico medido pelo PIB também esteve relacionado à redução da cobertura

florestal em diversos períodos analisados, evidenciando a pressão que o avanço econômico exerce sobre os recursos naturais. As variáveis climáticas, como a precipitação e a temperatura, exprimiram comportamentos variados em relação ao desmatamento, sugerindo que as alterações no clima são capazes tanto de intensificar quanto reduzir a degradação florestal, a depender das condições regionais e das estratégias de uso da terra adotadas. Em determinadas regiões, períodos de maior pluviosidade estiveram relacionados à regeneração da cobertura vegetal, enquanto em outras áreas coincidiram com a intensificação das atividades agrícolas. Por sua vez, o aumento das temperaturas locais, frequentemente associado à perda de vegetação, evidencia o papel fundamental da Mata Atlântica na regulação do microclima e na preservação dos ciclos hidrológicos.

Ademais, fatores climáticos adversos, como períodos prolongados de seca, incluindo a necessidade de mudanças no uso da terra, particularmente para a agropecuária, aumentam a ocorrência de incêndios, principalmente em biomas de clima tropical. Em transposição, o uso do fogo para limpar áreas desmatadas, com o objetivo de introduzir pastagens ou cultivos, libera CO₂ e outros gases de efeito estufa. Assim, as queimadas, geralmente, possuem como objetivos a limpeza de pastagens ou a transformação do uso do solo, resultando em alterações na estrutura do solo, no ciclo hidrológico e trazendo riscos à saúde humana (Sabino *et al.*, 2023; França, 2025). De efeito, embora o fogo seja empregado como manejo, seus impactos quando fora de controle, frequentemente, produzem danos ecológicos irreparáveis (Ramalho *et al.*, 2024).

Nessa situação, a recuperação da cobertura florestal representa uma medida fundamental no enfrentamento das mudanças climáticas e na degradação ambiental, especialmente pela sua importância absorção e no armazenamento de carbono na atmosfera (Barros; Arenas, 2025). Em aditamento, do ponto de vista produtivo, o aumento da cobertura vegetal também favorece a fertilidade do solo, o equilíbrio hídrico, a preservação da biodiversidade e a regulação do microclima, reduzindo impactos de temperaturas extremas e garantindo condições mais favoráveis ao desenvolvimento das culturas. Dessa maneira, os produtores conseguem obter maiores colheitas por via do aumento da sua eficiência produtiva (Souza, 2023; Oliveira, 2024; Veloso; Carvalho; Silveira, 2024).

A restauração florestal contribui para a melhoria da qualidade do solo, ao promover a retenção de nutrientes e a redução da erosão. Assim, a manutenção do solo resulta fundamental no crescimento das culturas, entretanto, a utilização de práticas agrícolas sem o devido planejamento e execução resulta em efeitos prejudiciais ao meio ambiente. Dessa maneira, fazem-se essenciais o conhecimento e a seleção de métodos de manejo que minimizem os impactos ambientais. Essa escolha constitui estratégia valiosa para promover a sustentabilidade

na agricultura (Thorstensen; Zuchieri, 2021; Assunção, 2024).

Técnicas como a cobertura do solo, o plantio direto, a rotação de culturas, os sistemas agroflorestais e o uso do controle biológico representam estratégias adotadas para diminuir as emissões de carbono na agricultura e desenvolver sistemas produtivos mais adaptáveis às mudanças climáticas. Essas práticas agrícolas são importantes para o aumento da resiliência ecológica dos agroecossistemas, sendo reconhecidas como medidas eficazes de mitigação e adaptação às mudanças do clima (Paes; Goes; Conrado, 2023; Moreira *et al.*, 2025; Lins *et al.*, 2025).

2.4 Impactos climáticos na agricultura e na economia: desafios globais e perspectivas

A agricultura conforma-se indescartável na segurança alimentar e na economia global, principalmente pela produção de grãos. Mundialmente, evidencia-se a maneira como as mudanças climáticas influem na produção agrícola, tanto nos países desenvolvidos quanto naqueles em desenvolvimento. Esses efeitos são impulsionados pela elevada emissão de gases de efeito estufa na atmosfera e pela ampliação do aquecimento global. Tal ocorrência é ainda mais agravada em decorrência da intensificação de atividades, seja pelo desmatamento, tecnologia aplicada de maneira ineficaz ou pelo uso inadequado da terra (Cintra; Melo; Menezes, 2020). Conforme dados da World Resources Institute (2024), países que têm ênfase em setores como energia e agricultura são os principais responsáveis por grandes níveis de emissões de GEE. Esses dois setores representam, respectivamente, 75,7% e 11,7% do total de emissões. Em relação aos principais países que mais emitem GEE, a China ocupa a primeira posição, seguida pelos Estados Unidos, Índia, Rússia, Japão, Indonésia e Brasil, que ocupam os lugares subsequentes no mencionado ranque.

Com isso, em razão das crescentes ameaças ambientais, cada país tem a responsabilidade de minimizar o impacto humano sobre o meio ambiente. A literatura indica que os efeitos climáticos impactam os países de maneira distinta, já que muitos países, especialmente os desenvolvidos, reconhecem a necessidade e a importância de criar meios que ensejem avaliar os efeitos causais em diversos setores e estão dedicados ao estudo desse problema. Com efeito, soluções estratégicas são propostas e adaptadas às condições de eventos climáticos extremos, apesar da diferente realidade econômica entre países desenvolvidos e aqueles ainda em desenvolvimento (Bezerra, 2022).

Mendelsohn, Dinar e Sanghi (2001) analisam a sensibilidade climática da Índia e dos Estados Unidos sob a perspectiva de como a produção agrícola desses países é afetada pelas

condições climáticas e pelo nível tecnológico. Os autores exprimem que os impactos são significativamente diferentes entre as duas nações, evidenciando que a agricultura indiana se mostra mais vulnerável às variações climáticas do que a dos Estados Unidos. A combinação dessa maior sensibilidade climática com as temperaturas elevadas em regiões de baixas latitudes indica que a agricultura nessas áreas é mais afetada. Além disso, é ressaltado que os agricultores de países em desenvolvimento estão mais expostos aos efeitos das mudanças climáticas, principalmente pela utilização de tecnologias e práticas da gestão com menor investimento em capital. Desse modo, sugere-se que o desenvolvimento diminui a sensibilidade climática. Ademais, conforme a probabilidade do aquecimento global cresce, a adaptação se torna uma estratégia cada vez mais essencial.

Sanghi e Mendelsohn (2008) exprimem que a agricultura no Brasil e na Índia denota padrões climáticos semelhantes. Segundo os autores, verões e invernos mais quentes tendem a ser prejudiciais à produção agrícola, enquanto outonos mais quentes são passíveis de trazer benefícios. Demais disso, invernos e primaveras mais chuvosos favorecem a agricultura, embora o excesso de chuvas durante o verão tenha efeitos negativos. Assim, usando dados do Brasil e da Índia, eles analisam como a receita agrícola e o valor das propriedades são afetados por variáveis climáticas e econômicas durante 30 anos. As projeções indicam que o aquecimento global causa perdas anuais de até 39% no Brasil e 26% na Índia, embora parte desses danos seja amenizada pela fertilização de carbono. Sem considerar eventos climáticos extremos, o estudo conclui que um aumento de 2°C na temperatura e 8% na precipitação reduz a receita líquida agrícola em 20% no Brasil e 12% na Índia, caso não haja compensação pela fertilização de carbono.

Dell, Jones e Olken (2012) analisaram as mudanças históricas de temperatura em 125 países e identificaram alguns impactos nos resultados econômicos agregados desses países. Para isso, recorreu-se a dados meteorológicos, que forneceram informações sobre temperatura e precipitação média mensal desses países, além de Indicadores de Desenvolvimento Mundial. Entre os principais resultados, denotou-se que temperaturas mais altas têm um efeito negativo significativo sobre o crescimento econômico em países mais pobres. Em aditamento, a elevação de temperaturas afeta não apenas as taxas de crescimento, mas também o nível de produção. Outro aspecto observado foi que temperaturas mais altas causam efeitos amplos, prejudicando a produção agrícola, a produção industrial e a estabilidade política. Dessa maneira, esses resultados indicaram que a possibilidade de impactos negativos mais substanciais de temperaturas é observada principalmente nos países mais pobres. Neles, um aumento de 1°C na temperatura em um ano reduz, em média, o crescimento econômico.

Cohen *et al.* (2012) evidenciam que, no México, os desastres naturais se tornaram mais frequentes e graves à proporção do tempo. Isso afeta diretamente os meios de subsistência e sobrevivência de muitas famílias, principalmente daquelas que dependem da agricultura. Ressalta-se a necessidade de procurar opções capazes de mitigar os efeitos provocados pelas mudanças climáticas, enquanto a população deve adotar estratégias de adaptação e fortalecimento da resiliência nas suas atividades agrícolas. Esse problema é agravado, principalmente pela condição árida, semiárida e subúmida do país, que abrange aproximadamente 50% do total do território.

Abidoye e Ayodele (2015) destacam em seu trabalho a relação empírica entre as mudanças climáticas e o crescimento econômico no Continente Africano, onde o crescimento econômico é impulsionado por atividades de agricultura, energia, silvicultura e turismo. Os autores analisaram 34 países com dados dos anos de 1961 e 2009. Os resultados indicaram que o aumento de 1°C na temperatura reduz o crescimento do PIB em 0,67 ponto porcentual. Ademais, ressaltou-se que a Nigéria e da África do Sul, as duas maiores economias da África Subsaariana, possuem um importante papel na redução do impacto econômico negativo provocado pelas mudanças climáticas na região.

Machili (2020), ao analisar informações acerca de Moçambique, evidencia que as mudanças climáticas contribuem significativamente para a elevação da temperatura, afetando o nível de precipitação, principalmente nas duas últimas décadas. Assim, essa variação impactou diretamente o setor agrícola do País, tal se observando pela degradação de culturas que não conseguiram se adaptar à escassez de chuva. Como estratégia de adaptação às mudanças, o autor destaca a necessidade de adoção de cultura adaptativas e resilientes, a utilização de novas tecnologias, iniciativas locais e a incorporação da preocupação das mudanças climáticas na estratégia da melhor escolha na implantação da cultura.

Já Chadio *et al.* (2020) destacam a influência das mudanças climáticas no mundo e como isso afetou a produção agrícola chinesa de 1982 a 2014. A análise utilizou uma abordagem de teste de limites para defasagens distribuídas autorregressivas e obteve resultados projetados no curto e longo prazo. Eles revelaram que as emissões de CO₂, a expansão da área cultivada com cereais, o uso de fertilizantes e o consumo de energia exercem um efeito positivo sobre o valor agregado da agricultura. A temperatura e a precipitação, entretanto, demonstraram impacto negativo sobre esse valor no longo prazo, embora denotem influência positiva no curto prazo.

Habib-Ur-Rahman *et al.* (2022) analisaram os impactos das mudanças climáticas nos países da Ásia, especialmente sobre a produção das culturas de arroz e trigo, duas das mais importantes para a segurança alimentar. Para isso, foram utilizados dois métodos distintos - o

Sistema de Apoio à Decisão para Transferência de Tecnologia (DSSAT) e o Simulador de Sistema de Produção Agrícola (APSIM). Os resultados mostraram que, segundo o modelo de DSSAT, a produtividade do arroz é passível de cair 15,2% e a do trigo reduzir-se em 14,1%. Já o APSIM estimou reduções de 17,2% para o arroz e 12% para o trigo. Os autores propõem, também, estratégias de adaptação para o sistema de cultivo dessas culturas, como ajustes na época e densidade de plantio, aplicação de nitrogênio e gestão da irrigação, que se mostram promissoras para melhorar a produtividade e a rentabilidade do cultivo nessas novas condições climáticas. Entre outras ações estratégicas com potencial para atenuar os efeitos negativos das mudanças climáticas sobre a agricultura foram destacadas adoção de sistemas agroflorestais e pecuária integrada, uso de espécies de plantas, técnicas de sequestro de carbono, tecnologias inteligentes para o manejo de água, energia e solo, além da promoção da biodiversidade.

Rezaei *et al.* (2023) evidenciaram a maneira como as mudanças climáticas afetam a produtividade global de trigo, milho, milheto, sorgo e arroz, com foco nas reações dessas culturas ao crescimento das temperaturas, das concentrações de dióxido de carbono e às alterações na disponibilidade de água. Os resultados indicam que, nas circunstâncias mais extremadas de mudanças climáticas, as perdas projetadas na produtividade das culturas variam de 7% a 23%. Destacou-se, também, que a irrigação e o manejo de nutrientes foram as estratégias adaptativas mais eficazes, embora essas soluções demandem grandes investimentos e não sejam capazes de ser viáveis em regiões onde há escassez de água.

O Brasil é um país no qual a agricultura tem papel importante para a economia interna e para mercados externos, entretanto, o País possui um grande território com uma vasta diversidade de condições climáticas. Assim, os impactos diretamente relacionados às mudanças climáticas são ocorrentes de maneira distinta entre as regiões. As projeções do IPCC demonstram que as mudanças climáticas denotam diferenças significativas conforme a localidade analisada. Lucena *et al.* (2012) destacam em seu trabalho que, em condições favoráveis, o clima e as mudanças climáticas têm um impacto favorável na sociedade e nas atividades econômicas. Em situações desfavoráveis, todavia, ocasionado por secas e enchentes extremas, esse impacto será negativo, variando conforme a região e o nível socioeconômico das populações afetadas. Destaca-se a produção agrícola localizada no semiárido nordestino, pois, dado o baixo nível de tecnologia aplicada na atividade, é uma das regiões mais afetadas.

Em razão dessa heterogeneidade climática e dos distintos níveis de vulnerabilidade socioeconômica entre as regiões brasileiras, estudos também procuram projetar ocorrências para avaliar os impactos das mudanças climáticas no País. Marcos (2018) avalia o balanço hídrico do Brasil com suporte no método de Thornthwaite, considerando projeções do IPCC-

AR5 e os efeitos potenciais sobre a classificação climática nacional. Foram analisadas projeções de modelos CMIP5 (Coupled Model Intercomparison Project) de 2010 a 2099 e comparando com a situação histórica (1950-1999). Para isso, foram coletados dados mensais de precipitação e temperatura. Os acumulados mensais de precipitação e os parâmetros de solo do *Harmonized World Soil Database*. As projeções indicam aumento da temperatura e da ETP em todas as regiões do Brasil. As regiões Norte e Centro-Oeste denotam aumento das áreas com climas mais áridos, enquanto o Sul do País prevê um aumento das áreas com climas úmidos. Esses fatores são capazes de resultar em maior escoamento superficial no Sul e numa diminuição nas regiões Norte e Centro-Oeste. Já no Nordeste, é esperado um crescimento das áreas com clima árido. Na região Sudeste, embora haja divergências, a maioria dos modelos projeta um aumento das áreas com clima úmido.

Barbosa (2021) examinou os impactos econômicos decorrentes da mudança climática na agricultura e suas repercussões na economia e nos fluxos migratórios. Para isso, o autor estimou os efeitos dessas mudanças até o ano de 2040, utilizando um modelo dinâmico de equilíbrio geral. As estimativas levaram como base dois possíveis cenários de emissão de GEE estabelecidos pelo IPCC. Ademais, foram consideradas estimativas de perda ou ganho de área apta para o cultivo de seis culturas: arroz, trigo e outros grãos, milho em grão, algodão herbáceo, cana-de-açúcar, soja em grão e outros produtos da lavoura temporária. As estimativas apontam que os efeitos das mudanças climáticas variam regionalmente no Brasil, reduzindo a área cultivável em algumas regiões e beneficiando outras. Culturas como a cana-de-açúcar têm desempenho aprimorado no Sul com o aumento da temperatura e do CO₂ até 2040. Impactos econômicos negativos, no entanto, também são previstos, como queda do PIB, redução do salário real, do consumo, dos investimentos e aumento da migração.

Paula (2020), por sua vez, analisa os efeitos das mudanças climáticas no Brasil na prática da agricultura, mediante dados do Censo Agrícola do IBGE. Para isso, utilizou-se uma abordagem quantil com análise nos dados de nível de fazenda. Os resultados indicam que pequenas variações na temperatura e na precipitação causam impactos consideráveis. Um aumento de 1 °C na temperatura é capaz de reduzir a lucratividade entre fazendas com terrenos de alta e baixa qualidade em regiões mais quentes, levando a uma convergência para uma agricultura de menor rentabilidade. Ademais, uma redução de 100 milímetros na precipitação anual reduz a lucratividade em 10%. Esses efeitos, entretanto, variam conforme o clima local, a capacidade de retenção de água do solo e a decisão do fazendeiro em optar pela irrigação. O autor ainda relata que, especialmente em regiões mais quentes e secas e com terras de menor qualidade, o impacto do nível de precipitação chega a quarenta por cento.

Tanure, Domingues e Magalhães (2023) avaliaram a maneira como as mudanças climáticas afetam a produtividade agrícola no Brasil, considerando distintos tipos de culturas e perfis de produtores em cada unidade da federação. Para isso, foi utilizada uma análise em corte transversal de uma função de produção que considera condições climáticas, geográficas e uso de insumos e tecnologias. Os resultados denotam que os impactos variam conforme o perfil do produtor, o nível de uso de insumos, capital, mão de obra e tecnologia. Assim, considerando a agricultura familiar, culturas como mandioca, café, milho, banana, feijão e laranja tendem a ser prejudicadas em diversas regiões. Já culturas como tabaco, amendoim, uva, trigo e outras de plantio direto são suscetíveis de mostrar ganhos. No caso da produção em larga escala, culturas como milho, algodão, feijão, laranja e café são mais afetadas negativamente, enquanto cana-de-açúcar, uva e trigo têm projeções positivas. A soja exprime efeitos diferenciados, conforme a localização da produção. Demais disso, os autores destacam que a queda média na produtividade agrícola aumenta a pressão no desmatamento como resposta à tentativa de compensar perdas, ampliando a área de cultivo.

Miyajima *et al.*, (2023) realizaram simulações utilizando uma função de produção que considera aspectos climáticos sobre a produtividade agrícola, considerando vetores de produtividades individuais no âmbito dos municípios da Amazônia Legal. Esse estudo mensurou possíveis prejuízos econômicos regionais, considerando duas situações – uma mais severa, em que se projeta um aumento da temperatura média global de aproximadamente 4 °C até o final do século XXI, e outra mais moderada, com estimativa de aquecimento em torno de 1 °C. Os resultados indicaram uma queda no PIB e em diversos indicadores econômicos da região nos ambientes climáticos analisados. O investimento foi identificado como o componente econômico mais impactado negativamente. Além disso, as simulações sugerem que, como resposta à queda de produtividade agrícola causada pelas mudanças climáticas, haverá uma expansão das áreas de lavouras. Esse avanço tende a ocupar espaços anteriormente destinados a pastagens e florestas, contribuindo para o desmatamento e alterando os usos da terra.

Feitosa e Lemos (2025) demonstraram que práticas inadequadas de produção agrícola constituem importantes fontes de elevação das emissões de gases de efeito estufa (GEE). Dessa maneira, entender os fatores que contribuem para esse processo é essencial para promover práticas sustentáveis. Assim, o estudo analisou os principais determinantes das emissões de GEE na região do MATOPIBA, de 2006 a 2017, usando uma metodologia que combinou modelos lineares e não lineares. Ademais, os autores destacaram que a transformação de áreas naturais em terrenos destinados à agricultura e à pecuária intensifica o desmatamento e estimula

a utilização recorrente do fogo. Os resultados indicaram que a maioria dos municípios da região teve aumento nas emissões no período analisado, influenciado principalmente pela densidade de bovinos, uso de máquinas, aplicação de defensivos e aumento das áreas queimadas.

Em adição, a produção agrícola depende intensivamente das condições do solo e do clima, tornando-se especialmente vulnerável às mudanças climáticas. Lemos e Bezerra (2024) analisaram a precipitação anual no estado do Ceará de 1901 a 2020, classificando-a em seis categorias: muito chuvoso, chuvoso, normal-úmido, normal-seco, seco e muito seco. Os resultados indicaram que a irregularidade das chuvas no Ceará, de 1947 a 2017, impactou diretamente variáveis ligadas à produção de grãos no semiárido do Estado, como a área colhida, a produtividade, o valor da produção por hectare e os preços, sendo importante definidora do volume de produção e do preço de grãos nessa Unidade Federada.

2.5 Perspectivas divergentes sobre as mudanças climáticas e seus efeitos sociais

Apesar de muitos estudos sobre os impactos gerados pelas mudanças climáticas estarem em constante expansão, parte da literatura também evidencia uma corrente contrária ao entendimento de prejuízos provocados por essas mudanças. Essa perspectiva nega a ocorrência do aquecimento global decorrente do efeito estufa e, conseqüentemente, seus impactos sobre variados setores da sociedade. Nesse contexto, esta subseção tem como propósito trazer uma breve reflexão acerca dessa perspectiva divergente, com o objetivo de expor e analisar as divergências direcionadas às mudanças climáticas.

Felicio (2014) discute a concepção que sustenta a ideia do aquecimento global, argumentando que o CO₂ não exerce controle sobre o clima da Terra, seja em períodos passados ou no futuro. Em sua análise, o movimento ambiental não possui legitimidade, pois estaria associado a reprodução de atrasos e de dificuldades sociais enfrentadas, especialmente nos países subdesenvolvidos. O autor ainda exprime que a chamada Ciência Climática está comprometida com práticas fraudulentas e eminentemente de natureza política.

Molion (2008) evidencia que, nos últimos 150 anos, a temperatura média da Terra denotou elevação de aproximadamente 0,7 °C. Na sua análise, esse aumento é geralmente atribuído ao crescimento do efeito estufa pelas atividades humanas, que elevaram a concentração de CO₂; entretanto, a hipótese do aquecimento global de origem humana é alvo de críticas, pois, segundo alguns autores, não possui fundamentos científicos consistentes. O autor ainda mostra que a influência humana sobre o clima é mínima ante a variabilidade natural e que, nos próximos 20 anos, é mais provável um resfriamento global do que um aquecimento.

Onça (2011) propõe uma análise crítica da hipótese do aquecimento global antropogênico, sugerindo que ela funciona como uma ideologia que desvia do reconhecimento da sua origem diante da estrutura do sistema capitalista. A autora também critica a forma como o movimento ambientalista contemporâneo, ao focar principalmente no aquecimento global, desvia a atenção de questões estruturais mais prejudiciais, como a crise do capitalismo. Ela sugere que essa abordagem ideológica serve para disfarçar problemas reais e urgentes, ensejando a continuidade da desigualdade e a exploração ambiental.

De modo geral, a literatura analisada demonstra que o tema de como enfrentar os impactos das mudanças climáticas consolidou-se como assunto de grande relevância. A clareza quanto ao objeto investigado e às possíveis relações de causa e efeito é condição importante, tanto para a formulação de hipóteses, quanto para a organização dos argumentos necessários à sua verificação. Com efeito, a dissertação sob relato procurou, com arrimo numa fundamentação teórica apoiada nos debates sobre emissões de GEE, aquecimento global e instabilidade climática, dimensionar o problema de pesquisa delineado.

3 PROCEDIMENTOS METODOLÓGICOS

Como abordagem empírica para avaliar os efeitos das mudanças climáticas sobre a produção agrícola e pecuária no Brasil, no plano estadual, durante o período de 1985 a 2023, esta pesquisa adotou o método de dados em painel. Essa metodologia é detalhadamente explicada nesta seção, com a identificação de suas principais características, além das distinções entre os modelos e estimadores utilizados.

3.1 Área de estudo, descrição das variáveis e fonte dos dados

Considerando o objetivo de mensurar a influência das mudanças climáticas e das modificações no uso da terra no valor da produção vegetal e pecuária, tornou-se indispensável a inclusão de variáveis de tratamento diretamente relacionadas à produção vegetal e pecuária, capazes de capturar os efeitos climáticos em estudo. As variáveis que compõem o modelo de dados em painel estão detalhadas no Quadro 1, servindo de base para a análise estatística proposta.

Quadro 1 - Descrição das variáveis, fonte dos dados e embasamento teórico

(continua)

Variáveis dependentes	Descrição	Fonte	Embasamento empírico
Valor bruto da produção vegetal por emissão de GEE	Razão entre o valor bruto da produção de lavouras temporárias e permanentes (em mil R\$/) e o volume de emissão de dióxido de carbono equivalente (em toneladas de CO ₂ e).	Produção Agrícola Municipal (PAM) do Sistema IBGE de Recuperação Automática – SIDRA (IBGE, 2025) e Sistema de Estimativas de Emissões de Gases de Efeito Estufa – SEEG (OC, 2025)	Mendelsohn (2014); Souza (2018); Tanure (2020); Bezerra (2022); Yang <i>et al.</i> (2024).
Valor bruto da produção pecuária por emissão de GEE	Razão entre o valor bruto da produção pecuária (em mil R\$/) e o volume de emissão de dióxido de carbono equivalente (em toneladas de CO ₂ e).	Produção Pecuária Municipal (PAM) do Sistema IBGE de Recuperação Automática – SIDRA (IBGE, 2025) Sistema de Estimativas de Emissões de Gases de Efeito Estufa – SEEG (OC, 2025)	Mendelsohn (2014); Souza (2018); Tanure (2020); Bezerra (2022); Yang <i>et al.</i> (2024).
Razão de pastagens	Razão entre o ano em que a área foi pela última vez mapeada como pastagem e o ano em que a área foi pela primeira vez mapeada. Sintetiza mudanças estruturais de uso da terra, revelando a dinâmica de conversão de pastagens e a persistência ou renovação de áreas agropecuárias.	MapBiomass (2025)	Wassenaar <i>et al.</i> (2007); Quintão <i>et al.</i> (2021); Cheng; McCarli; Fei (2022).

(conclusão)

Temperatura	Temperatura média do ar (em graus Celsius - °C). Níveis de temperatura acima do intervalo ideal para o desenvolvimento da agricultura tendem a impactar negativamente o VBV e o VBP.	Climate Change Knowledge Portal - World Bank - ERA 5 - 0,25° x 0,25° Copernicus Climate Change Service (C3S) Climatologias Históricas (2025)	Deschênes e Greenstone (2007); Zhang, Zhang e Chen (2017); Machili (2020).
Precipitação pluviométrica	Precipitação pluviométrica média (em milímetros -mm). Valores mais elevados de chuvas geralmente contribuem positivamente para o VBV e o VBP.		
Cicatrizes de fogo	Área com cicatrizes de fogo por classe de cobertura e uso da terra queimada nos biomas (em hectares). A tendência é que isso influencie negativamente o VBV e o VBP.	MapBiomas (2025)	McKenzie et al. (2003), Bezerra (2022); Bernadino (2023).
Área colhida	Área colhida com lavouras temporárias e permanentes (hectare).	Produção Agrícola Municipal (PAM) do Sistema IBGE de Recuperação Automática – SIDRA (IBGE, 2025)	Peñuelas et al. (2017), Chadio <i>et al.</i> (2020); Bezerra (2022).

Fonte: Elaboração própria (2025).²

A análise abrange as 27 unidades federativas do Brasil, sendo os 26 estados e o Distrito Federal, no intervalo temporal de 1985 a 2023, considerando os dados anuais. A escolha desse período fundamenta-se na disponibilidade e consistência dos dados, além de atender ao critério mínimo de 30 anos estabelecido pela Organização Meteorológica Mundial (OMM) para estudos da análise de variáveis climáticas. Ressalta-se que os indicadores empregados nesta pesquisa são de natureza secundária, provenientes de fontes oficiais e amplamente reconhecidas.

Levando em conta a importância de compreender os efeitos das mudanças climáticas sobre a produção agropecuária e de identificar os principais fatores que influenciam esse processo, quis-se pontuar considerações que demonstrem a escolha das variáveis com base na literatura. Ao considerar os estados brasileiros como unidades de análise e utilizar dados em painel, o estudo consegue capturar a heterogeneidade espacial dos efeitos climáticos e ambientais, algo que nem sempre é explorado com profundidade (Ortiz-Bobea, 2019; Bezerra, 2022; Bento, 2022). Este estudo utiliza dados em painel de 1985 a 2023 para analisar como variáveis climáticas, ambientais e de uso do solo influenciam o valor bruto da produção vegetal e pecuária à medida do tempo e entre estados brasileiros.

² Os valores monetários expressos em reais (R\$) foram ajustados com base no Índice Geral de Preços – Disponibilidade Interna (IGP-DI), conforme dados da Fundação Getúlio Vargas (FGV, 2025), utilizando o ano de 2023 como referência.

A combinação dessas variáveis enseja que se entenda, não apenas, como o clima afeta a produção agropecuária, mas também quais interações com o uso do solo, como pastagens, cicatrizes de fogo, efetivo bovino e área colhida estão influenciando a dinâmica agrícola e pecuária, mediante uma perspectiva ambiental, por via da análise do nível de produção em relação ao nível emissões de CO₂. Isso amplia o escopo do estudo e possibilita uma análise sistêmica que contribui para políticas e práticas agrícolas mais sustentáveis, em consonância com alguns dos Objetivos de Desenvolvimento Sustentável (ODS), como: 2 – Fome zero e agricultura sustentável; 11 – Cidades e comunidades sustentáveis; e 13 – Ação contra a mudança global do clima.

A intensificação da atividade agropecuária impulsiona impactos significativos sobre os recursos naturais. O desmatamento, a degradação do solo e a perda de biodiversidade são algumas das consequências observadas em regiões de expansão da fronteira de produção agrícola. A transformação da vegetação nativa em áreas produtivas altera o sistema de liberação e absorção de energia da terra. Além disso, reduz a capacidade de absorção de carbono dessas áreas e contribui para a elevação das concentrações de CO₂, e isso produz alterações no clima local e regional (Morgado, 2023; Costa, 2025).

A mudança no uso da terra é um fenômeno de grande complexidade, resultante da interação múltiplos fatores, tanto diretos quanto indiretos. Esse processo envolve distintos tipos de transição, como o desmatamento, o início de atividades de pastoreio, a introdução de cultivos agrícolas, o abandono de áreas anteriormente exploradas e o posterior crescimento de florestas secundárias (Gerber *et al.*, 2013). As plantas absorvem CO₂ da atmosfera e nitrogênio (N) do solo, armazenando esses elementos em sua biomassa, tanto na parte aérea quanto subterrânea. Florestas, por sua vez, atuam como importantes sumidouros de carbono, acumulando mais carbono em sua vegetação e no solo do que áreas agrícolas ou pastagens. Quando, porém, áreas florestais são convertidas para fins agropecuários, grande parte desse carbono estocado é liberada de volta para a atmosfera (Cheng; McCarl; Fei, 2022).

A substituição da vegetação nativa por práticas humanas, como para a produção vegetal e da pecuária, impacta diretamente o ciclo do carbono. A cobertura vegetal natural tem a capacidade de absorver CO₂, o principal gás de efeito estufa, armazenando carbono tanto na biomassa quanto no solo. Demais disso, essa vegetação contribui para a conservação da biodiversidade e manutenção de serviços ecossistêmicos essenciais, como a regulação do clima e o fornecimento de água. A remoção da vegetação, por meio da mudança da pastagem, expõe o solo e acelera a decomposição da matéria orgânica, liberando CO₂ na atmosfera. Esse processo

também provoca erosão, lixiviação e redução na recarga dos aquíferos subterrâneos (Quintão *et al.*, 2021; Santos, 2023; Reimer, 2023).

Assim, a variável referente à razão entre o ano em que a área foi pela última vez registrada como pastagem e o ano em que foi inicialmente classificada como tal enseja se avaliar a longevidade relativa desse uso da terra. É uma *proxy* da longevidade ou persistência da pastagem. Assim, essa análise demanda por captar mudanças estruturais no uso da terra e observar tanto a dinâmica de substituição de pastagens quanto a sua permanência ou renovação dentro dos sistemas agropecuários. A razão de pastagem foi calculada com suporte em:

$$\text{Razão de pastagem} = \frac{\text{Ano da última detecção como pastagem}}{\text{Ano da primeira detecção como pastagem}}$$

A interpretação deste indicador é entendida como: i) Quando a razão de pastagem > 1: Indica que a área permaneceu como pastagem por um período mais longo, persistência ou uso contínuo da terra como pastagem, ao contrário disso quando menor que 1; ii) Quando a razão de pastagem = 1: O ano da primeira e da última detecção são iguais. É passível de indicar uso pontual ou transição rápida para outro uso do solo.

As variáveis climáticas, como a precipitação pluviométrica e a temperatura média, são amplamente reconhecidas na literatura científica que investiga os impactos das mudanças climáticas sobre a agricultura. Esses elementos são considerados de extrema importância, tanto para o crescimento adequado das culturas agrícolas quanto para a continuidade das demais atividades desenvolvidas no meio rural, já que as atividades agrícolas estão fortemente condicionadas à oferta de água, utilizada na irrigação e no crescimento das plantas, e a temperatura influencia etapas essenciais do desenvolvimento das culturas, como a germinação, a floração e a produtividade (Assad *et al.*, 2004; Pellegrino, 2016; Sousa, 2022; Monteiro *et al.* 2023; Lemos; Sousa; Feitosa, 2023).

Desse jeito, variações extremas de temperatura, elevadas ou muito baixas, reduzem a produção e facilitam a ocorrência de pragas e doenças, até impossibilitando o cultivo de determinadas espécies em algumas regiões. Do igual modo, a distribuição irregular das chuvas, seja por excesso ou escassez, compromete a disponibilidade de água, afetando a lavoura, a pecuária e outras atividades econômicas do meio rural (Pellegrino, 2007; Salviano; Groppo; Zhang; Zhang; Chen, 2017; Machili, 2020).

Embora o CO₂ seja essencial ao processo de fotossíntese, e com isso indispensável para o crescimento das plantas e a manutenção da vida, ele também se destaca como um dos principais

agentes das mudanças climáticas quando na atmosfera em concentrações elevadas. Nessas circunstâncias, a agricultura encontra-se em uma contraposição, já que, embora o CO₂ seja indispensável para o desenvolvimento vegetal, seu excesso traz influxos negativos (Cosmo *et al.*, 2023).

A fotossíntese nas plantas depende de fatores como temperatura, luz, disponibilidade hídrica e nutrientes essenciais, como fósforo (P) e potássio (K). Em geral, o aumento na concentração de CO₂ leva à redução da abertura dos estômatos, que são estruturas na epiderme das folhas responsáveis pelas trocas gasosas entre a planta e o ambiente, o que reduz a transpiração e melhora a eficiência no uso da água (Marengo *et al.*, 2014). Essas respostas, no entanto, variam bastante, principalmente de acordo com o tipo de metabolismo fotossintético da planta e com outras condições ambientais (Peñuelas *et al.*, 2017; Bezerra 2022).

Outra variável, também de relevância nesta análise, é a área com cicatrizes de fogo, utilizada como um indicativo de regiões alvos de queimadas, frequentemente associadas ao desmatamento para conversão do uso do solo. Essas áreas, muitas vezes destinadas à agricultura ou à pecuária, tendem a apresentar maiores emissões de gases de efeito estufa (GEE), o que agrava os impactos sobre a produção agrícola (Rocha; Nascimento, 2021; Bernadino, 2023; Feitosa; Lemos, 2025). Em especial, pequenos produtores utilizam as queimadas como maneira acessível de preparar o solo, normalmente em áreas previamente desmatadas (Pereira, 2016). Essa prática, além de ser típica de tradições culturais, é motivada pela falta de acesso a tecnologias alternativas de baixo custo.

A queima recorrente, contudo, degrada progressivamente o solo, comprometendo sua estrutura física, química e biológica, incluindo a microbiota, e, conseqüentemente, reduzindo sua capacidade produtiva. Esse processo resulta na diminuição da fertilidade do solo, menor absorção de nutrientes pelas plantas e perda da aptidão agrícola das áreas anteriormente produtivas (Lima *et al.*, 2021; Bezerra, 2022).

Em adição, o uso contínuo do fogo contribui para o aumento das emissões de GEE e reduz a capacidade do solo e da vegetação atuarem como sumidouros de carbono, uma vez que a queima compromete o crescimento e a regeneração da cobertura vegetal. Em muitos casos, áreas desmatadas ou queimadas tornam-se atraentes para o uso agrícola ou como pastagens, especialmente entre agricultores com limitações financeiras, que não dispõem de maquinário adequado, como tratores, os quais, por sua vez, também geram impactos negativos, como a compactação do solo (Rendim, 2011; Feitosa; Lemos, 2025). As variáveis analisadas nesta pesquisa estão detalhadas no Quadro 1.

As variáveis temperatura e precipitação pluviométrica foram extraídas do *Climate Change Knowledge Portal - World Bank* (CCKP), por meio do ERA5, a quinta geração de reanálises atmosféricas, que analisa o período de 1950 a 2023, com resolução espacial de $0,25^\circ \times 0,25^\circ$ em toda a extensão do globo. Esta reanálise integra observações meteorológicas e dados de satélite por meio de assimilação multivariada, melhorando a análise e dando a oportunidade de capturar variações e mudanças climáticas globais. Os dados estão disponíveis como um bem público por meio do *Copernicus Climate Change Service* (C3S) com climatologias históricas baseadas em períodos de 20 a 30 anos e tendências calculadas para intervalos como 1951–2020 e 1991–2020. O ERA5 é amplamente reconhecido como uma das reanálises mais confiáveis para estudos climáticos (Hersbach *et al.*, 2020).

3.2 Estratégia 1: Análise da evolução das variáveis relacionadas ao VBV e ao VBP, com ênfase para o ranqueamento dos estados brasileiros

Esta subseção analisa o primeiro e o segundo objetivos deste estudo, que consiste em verificar a evolução temporal de emissões de CO₂, bem como a dinâmica do VBV e do VBP nos estados brasileiros, com ênfase no ranqueamento das unidades federativas no Brasil, nos anos de 1985 a 2023. Essa análise procura compreender a maneira como a expansão agropecuária é capaz de estar associada aos impactos ambientais e a mudanças climáticas. Para isso, foi utilizada uma abordagem descritiva e exploratória dos dados, ensejando identificar padrões de comportamentos e variações ao longo dos anos analisados. As principais etapas dessa estratégia incluem o que está sequenciado.

- Elaboração de gráficos para representar e analisar a evolução anual das variáveis.
- Desenvolvimento de mapas com distribuição espacial dos fatores condicionantes aos modelos propostos, com vistas à visualização das áreas com maior intensidade produtiva e/ou emissora ao longo do tempo.
- Ranqueamento dos Estados quanto ao valor bruto da produção vegetal e da pecuária.

Assim, com amparo na análise exploratória e descritiva dos dados, a ideia é revelar a complexidade da relação entre os efeitos climáticos e a mudança no uso da terra sobre o valor da produção vegetal e da pecuária no Brasil.

Foi calculado o Coeficiente de Variação (CV) - indicador estatístico que expressa, em termos percentuais, a proporção entre o desvio-padrão e a média de uma variável. Por meio dessa medida, avalia-se o grau de dispersão dos dados em relação ao valor médio. Em termos interpretativos, valores elevados de CV indicam maior variabilidade, o que reduz a

representatividade da média como medida central. Por outro lado, quanto mais próximo de zero for o CV, mais uniforme e estável tende a ser a distribuição dos dados em torno da média. Portanto, o CV mede o grau de instabilidade da distribuição dos valores em torno da média das variáveis analisadas. Para tanto, Gomes (1985) determinou limites para classificação dos CV em experimentação agrícola, os quais foram adotados nesta pesquisa, conforme o Quadro 2.

Quadro 2 - Classificação do CV de acordo com sua amplitude

Classificação do CV	Amplitude do CV
Baixo	$CV < 10\%$
Médio	$10\% \leq CV < 20\%$
Alto	$20\% \leq CV < 30\%$
Muito Alto	$CV \geq 30\%$

Fonte: Gomes (1985).

Essa abordagem é fundamental para compreender como a agricultura brasileira se comporta perante pressões climáticas e ante o desafio do uso sustentável da terra, especialmente considerando o papel estratégico do País nos compromissos internacionais de sustentabilidade e redução de emissões. Em sendo assim, identificam-se padrões temporais relevantes, como períodos de aumento simultâneo ou inverso entre as variáveis climáticas e o valor bruto da produção vegetal e da pecuária, reconhecendo estados com maior intensidade produtiva e/ou de emissões ao extenso do tempo, destacando diferenças regionais significativas, e analisar possíveis padrões, associadas a eventos externos, desmatamento, alterações no uso da terra ou eventos climáticos extremos.

3.3 Estratégia 2: Método para mensurar os efeitos das variáveis climáticas e as mudanças no uso da terra sobre o valor bruto da produção vegetal (VBV) e da pecuária (VBP) nos estados brasileiros

Esta subseção aborda a estratégia econométrica aplicada a dados em painel, com a pretensão de avaliar o terceiro objetivo específico deste trabalho, destacando seus principais recursos e as vantagens que oferece em relação aos métodos exclusivamente transversais ou de séries temporais. Há uma variedade de modelos aplicáveis a dados em painel, e a variação dessa abordagem se constitui com assento no objetivo da análise e na forma como os dados estão organizados (Fávero, 2013). O modelo de painel conduz à análise de dados que variam temporalmente e entre distintas unidades de observação, aproveitando a estrutura longitudinal das informações para que se obtenham estimativas precisas e robustas (Marques, 2000; Loureira; Costa, 2009).

Segundo descrito por Baltagi (2013), os dados em painel ajudam a controlar a heterogeneidade individual, aproveitando uma maior variabilidade para obter estimativas mais consistentes. Esse método possibilita a identificação e mensuração de efeitos que não seriam observados por meio de dados exclusivamente em corte transversal ou séries temporais univariadas, já que combina variação entre indivíduos e durante o tempo. Dessa maneira, os modelos em painel ensejam maior eficiência estatística, contribuem para previsões precisas e reduzem problemas de multicolinearidade, ao incorporarem variabilidade adicional nos dados (Greene, 2012; Marques, 2000).

Para Cameron e Trivedi (2009), o início para a modelagem com dados em painel é a estimativa por meio do modelo POLS (*pooled ordinary least squares*), que pressupõe a exogeneidade dos regressores e considera termo único de erro ε_{it} , sem separá-lo dos componentes $\alpha_i + \varepsilon_{it}$. Assim, esse modelo é visto como mais restrito, pois ignora as variações no tempo e entre os indivíduos. Assim, assume-se que todos os coeficientes permanecem constantes, tanto no tempo quanto entre as unidades observadas, supondo que não há variação individual específica não observada entre as unidades.

Logo, a estimativa dos parâmetros costuma ser feita por meio do método dos mínimos quadrados ordinários (MQO), sendo essa a formulação geral do modelo. De efeito, esse modelo, ao contrário das outras abordagens, como o de Efeitos Fixos (EF) e o de Efeitos Aleatórios (EA), não leva em consideração a estrutura do painel de dados. Ao estimar esse modelo, todas as unidades i , mesmo que denotem diferenças entre si, são representadas por única função de regressão, aplicável a todos os indivíduos. Isso ocorre porque se presume que o comportamento médio da relação entre a variável dependente e as variáveis explicativas seja comum às unidades analisadas. As particularidades, portanto, não são explicitamente modeladas, sendo incorporadas ao termo de erro, conforme a equação (1) (Fernandes; Figueiredo Filho, 2020; Khan; Silva, 2023):

$$y_{it} = \alpha + x'_{it}\beta + \varepsilon_{it} \quad i = 1, \dots, n, t = 1, \dots, T \quad (1),$$

em que: y_{it} é a variável dependente do indivíduo i no tempo t ; x'_{it} é um vetor transposto de variáveis explicativas de ordem $1 \times k$; β é um vetor de ordem $k \times 1$ dos coeficientes das variáveis; α é o intercepto e ε_{it} o termo de erro do i -ésimo indivíduo no tempo t .

Caso, entretanto, o modelo *pooled* seja corretamente especificado e os regressores não estiverem correlacionados com o termo de erro, os parâmetros podem ser estimados de forma consistente utilizando o MQO. Contudo, é importante ressaltar que, nesse caso, as

heterogeneidades individuais e temporais não são controladas, pois elas não são observadas (Greene, 2012; Baltagi, 2013; Bezerra, 2022).

Quanto ao modelo de efeitos fixos, seu objetivo é controlar os efeitos de variáveis ausentes da regressão, mas que permanecem constantes no tempo e variam entre as unidades. Assim, ele é apropriado quando se quer analisar o impacto de variáveis que mudam temporalmente, focando na relação entre os preditores e o resultado dentro de uma mesma unidade de análise (Fávero, 2013). Para isso, o modelo assume que o intercepto varia entre as unidades da seção transversal, mas se mantém constante ao longo da série temporal. Demais disso, os parâmetros de resposta são semelhantes para as diversificadas unidades durante todo o período analisado (Andrade; Tiriyaki, 2019; Khan; Silva, 2023).

As características invariantes no tempo são exclusivas de cada indivíduo e não devem estar correlacionadas com outras características individuais. Como cada entidade é única, o termo de erro de cada uma é a constante, que captura as particularidades individuais, e não devem se correlacionar. Se os termos de erro estiverem correlacionados, o modelo de efeitos fixos não será adequado, pois as estimativas são passíveis de estar incorretas, sendo necessário modelar essa correlação, provavelmente utilizando efeitos aleatórios. Essa é a principal justificativa para a aplicação do teste de Hausman (Greene, 2012; Bezerra, 2022). Conforme descrito por Greene (2012) o modelo de efeito fixo é definido como:

$$y_{it} = x'_{it} \beta + z'_i \alpha + \varepsilon_{it}$$

$$y_{it} = x'_{it} \beta + c_i + \varepsilon_{it} \quad (2),$$

em que: y_{it} representa a variável dependente do indivíduo i no tempo t ; x'_{it} é o vetor transposto das variáveis explicativas; β é o vetor dos coeficientes das variáveis; $z'_i \alpha$, refere-se à heterogeneidade (ou efeito individual), onde z_i inclui um termo constante e um conjunto de variáveis observadas ou não observadas específicas de indivíduos ou grupos. Os obstáculos são evidenciados quando c_i não é observado; ε_{it} o termo de erro do i -ésimo indivíduo no tempo t .

Em transposição a isso, conforme Wooldridge (2010), na teoria do modelo de efeitos fixos, um regressor que denota pouca variação *within*³ resultará em uma estimativa imprecisa do seu

³ No modelo de dados em painel, tanto a variável dependente quanto os regressores são passíveis de mostrar variações durante o tempo e entre diversificadas unidades. A variação que ocorre dentro de uma mesma unidade no tempo é denominada *within variance*, enquanto a variação observada entre distintas unidades é chamada de *between variance*. Assim, destaca-se que a variação total das observações de um regressor x , em relação à média geral no conjunto de dados, é decompontível em dois componentes: a variação *within* (dentro dos indivíduos no tempo) e a variação *between* (entre os indivíduos). Especificamente, a variação total é expressa como a soma ponderada das variações individuais em torno de suas médias individuais $\bar{x} = 1 / \sum_i T_i \sum_t x_{it}$, que representa a

coeficiente, e, caso não haja qualquer variação temporal, esse efeito não será identificado. Por isso, compreender e diferenciar de forma adequada os dois tipos de variação é essencial para escolher o modelo mais adequado para a análise com dados em painel. Segundo Cameron e Trivedi (2009), a análise dessa decomposição também é fundamental para entender a estrutura dos dados em painel e orientar a escolha entre modelos de efeitos fixos e aleatórios.

Em ocorrendo assim, ante o destaque da limitação do modelo de efeitos fixos, existe alternativa, que é a análise do modelo de efeitos aleatórios, a qual conduz a incorporar variáveis que permanecem constantes no tempo. Relativamente ao modelo de efeitos aleatórios, supõe-se que, com base na equação (1), β_{0i} é um componente estritamente aleatório, isto é, não expressa correlação com os regressores. Com base nessa premissa, a estimação é realizada por meio do método FGLS (mínimos quadrados generalizados factíveis). Uma das principais vantagens desse modelo é a possibilidade de estimar os coeficientes de todas as variáveis explicativas, inclusive aquelas que não variam no tempo, conduzindo, assim, à identificação dos efeitos marginais completos. Além disso, é possível estimar $E(y_{it}|x_{it})$.

A principal limitação do modelo de efeitos aleatórios, no entanto, é que seus estimadores se tornam inconsistentes, caso o modelo de efeitos fixos represente melhor os dados (Fávero, 2013). Diante de efeitos individuais não correlacionados com os regressores, é capaz de ser adequado modelar os indivíduos como unidades com interceptos específicos constantes, distribuídos aleatoriamente entre as unidades transversais. Nessas circunstâncias, assume-se que todas as diferenças individuais são refletidas pelo intercepto α_i , mas tanto os efeitos individuais α_i quanto os erros ε_{it} são tratados como variáveis aleatórias, em vez de constantes (Baltagi, 2009; Cameron e Trivedi, 2009). Assim, formalmente, o modelo de efeitos aleatórios (EA) é assim expresso:

$$\begin{aligned} y_{it} &= x'_{it} \beta + u_{it}, i = 1, \dots, n \text{ e } t = 1, \dots, T \\ u_{it} &= \alpha_i + \varepsilon_{it} \end{aligned} \quad (3).$$

O termo de erro composto é integrado por dois elementos: um componente específico e aleatório para cada indivíduo " α_i ", que representa fatores não observáveis que influenciam y e permanecem constantes ao longo do tempo; e ε_{it} , o erro aleatório da regressão, que reflete outros fatores que afetam y e variam tanto no tempo quanto entre os indivíduos; x_{it} corresponde ao conjunto de variáveis explicativas, enquanto β são os parâmetros a serem

variação *within*, e da variação entre as médias individuais $\bar{x}_i = 1/T \sum_t x_{it}$ em relação à média geral $\bar{x}$, caracterizando a variação *between* (Fávero, 2013).

estimados. A heterogeneidade individual entre as unidades é considerada aleatória, sendo tratada como uma variável aleatória distribuída de maneira não sistemática entre os indivíduos.

Esta pesquisa adota a seguinte função para a análise da atividade da produção vegetal:

$$\ln(VBV_{it}) = \beta_0 + \beta_1 \ln X_{1it} + \beta_2 \ln X_{2it} + \beta_3 \ln X_{3it} + \beta_4 \ln X_{4it} + \beta_5 \ln X_{5it} + \varepsilon_{it} \quad (4),$$

em que:

$V B V_{it}$: Valor bruto da produção vegetal pelo volume de emissão de CO₂ no Estado i e no ano t ;

β_0 : representa o intercepto;

X_1 : razão de pastagens;

X_2 : precipitação pluviométrica anual;

X_3 : temperatura média anual;

X_4 : área com cicatrizes de fogo;

X_5 : área colhida;

ε_{it} : representa o termo de erro aleatório. $\beta_1, \beta_2, \beta_3, \beta_4$ e β_5 são os coeficientes a serem estimados.

Além disso, para a análise da produção pecuária, foi adotado o modelo a seguir:

$$\ln(VBP_{it}) = \beta_0 + \beta_1 \ln X_{1it} + \beta_2 \ln X_{2it} + \beta_3 \ln X_{3it} + \beta_4 \ln X_{4it} + \beta_5 \ln X_{5it} + \varepsilon_{it} \quad (5),$$

em que:

$V B P_{it}$: Valor bruto da produção pecuária pelo volume de emissão de CO₂ no estado i e no ano t ;

β_0 : representa o intercepto;

X_1 : razão de pastagens;

X_2 : precipitação pluviométrica anual;

X_3 : temperatura média anual;

X_4 : área com cicatrizes de fogo;

X_5 : efetivo bovino

ε_{it} : representa o termo de erro aleatório. $\beta_1, \beta_2, \beta_3, \beta_4$ e β_5 são os coeficientes a serem estimados.

De efeito, estados com maior produção, em virtude da elevada eficiência, porém tendem a denotar maior intensidade sobre o meio ambiente em decorrência da expansão de áreas e do uso intensivo de recursos, enquanto os produtores de pequeno porte revelam padrões menos

intensivos em termos de uso de recursos, mais sustentáveis ou de baixa eficiência técnica. Assim, a comparação entre esses grupos no ranqueamento dos estados contribui para compreender as dinâmicas regionais.

A fase de estimação dos modelos utiliza conjuntamente duas dimensões, a temporal e a de seção transversal, características do método de dados em painel (Baltagi, 2013; Greene, 2012). Nesse tipo de abordagem, é crucial determinar o modelo mais adequado à estrutura dos dados. Para isso, realizam-se testes preliminares. A escolha entre o modelo agrupado (*pooled*) e o modelo com efeitos fixos (EF) é orientada pelo teste de Chow (Greene, 2012; Bressan *et al.*, 2012). Esse teste avalia a hipótese nula (H_0), segundo a qual o modelo *pooled* é apropriado, ou seja, não há heterogeneidade entre as unidades. A hipótese alternativa (H_1) indica heterogeneidade, o que favorece o uso do modelo com efeitos fixos. Caso a hipótese nula não seja rejeitada, recomenda-se a utilização do modelo *pooled*; se o contrário, opta-se pelo modelo com efeitos fixos.

Na comparação entre os modelos *pooled* e de efeitos aleatórios (EA), recomenda-se a aplicação do teste do Multiplicador de Lagrange, proposto por Breusch e Pagan (1980), conhecido como teste LM. Esse teste tem como hipótese nula (H_0) a ausência de variância do termo aleatório específico a cada unidade (ε_{it}), o que favorece o modelo *pooled*. A H_1 sugere a heterogeneidade não observada, indicando a adoção do modelo de efeitos aleatórios.

Ademais, o teste de Hausman (Hausman, 1978) é utilizado para decidir entre os modelos de efeitos aleatórios e de efeitos fixos. Nesse caso, a H_0 favorece o modelo de efeitos aleatórios, enquanto a H_1 indica que o modelo de efeitos fixos é mais apropriado, geralmente quando há correlação entre os efeitos individuais e os regressores.

Além dos testes já mencionados, esta pesquisa também incorporou testes adicionais para garantir a robustez dos resultados. Entre eles, destacam-se o teste de Wooldridge para efeitos individuais não observados, o teste de Pesaran para correlação contemporânea, o teste de Wald para heterocedasticidade e, novamente, o teste de Wooldridge, neste caso para detectar correlação serial. O teste de Pesaran CD, especificamente, avalia a existência de dependência entre unidades de corte transversal, ou seja, verifica se os distúrbios são independentes entre os *cross-sections*, o que é particularmente relevante quando a dimensão transversal (N) é elevada. O teste de Wald é aplicado para identificar heterocedasticidade no modelo com efeitos fixos, sendo uma opção estatística eficaz nesse contexto. Já o teste de Wooldridge é para detectar dependência temporal nos resíduos (Greene, 2012; Wooldridge, 2019)

Escolha e aplicação desses testes dependem diretamente da estrutura do painel adotado. Dessa maneira, um painel é considerado curto quando há um número elevado de unidades (N)

observadas por poucos períodos (T). Em contrapartida, um painel longo caracteriza-se por menos unidades acompanhadas por um período mais extenso. Assim, define-se como painel longo aquele em que $T > N$, e como painel curto, quando $N > T$ (Fávero, 2013).

3.3.1 Aplicação de testes estatísticos para determinação do modelo adotado na abordagem de painel

Com o objetivo de avaliar os modelos estimados e compreender as características dos dados utilizados, foram realizados testes específicos aplicáveis à metodologia de dados em painel. Com amparo nesses testes, definiu-se o modelo mais adequado para analisar os efeitos da variabilidade climática e a mudança no uso da terra sobre o valor bruto da produção vegetal e da produção pecuária. Os resultados obtidos estão na Tabela 1.

Tabela 1 - Resultados dos testes realizados e suas respectivas hipóteses avaliadas

Teste	Foco da análise	Hipóteses	VBV	VBP
			P-valor	P-valor
Chow (Teste F)	Verifica entre o modelo <i>Pooled</i> e EF	H0: Modelo <i>pooled</i> H1: Modelo EF	0,0000	0,0000
LM de Breusch-Pagan	<i>Pooled versus</i> EA	H0: Modelo <i>pooled</i> é preferível; H1: Modelo EA é preferível.	0,0000	0,0000
Hausman	Verifica entre o modelo de EF e EA	H0: Ausência de correlação entre os erros do mesmo grupo; H1: Existem efeitos não observados.	0,0000	0,0000
Wooldridge	Efeitos individuais não observados	H0: Ausência de correlação entre os erros do mesmo grupo; H1: Existem efeitos não observados.	0,008	0,003
Pesaran LM	Identificar correlação contemporânea entre os indivíduos	H0: Independência dos <i>cross-section</i> ; H1: Correlação contemporânea	0,0000	0,0000
Wald	Identificar presença de Heterocedasticidade em EF	H0: Homocedasticidade H1: Heterocedasticidade	0,0000	0,0000
Wooldridge/BreuschGodfrey	Verificar a correlação serial em EF	H0: Não existe correlação serial H1: Existe correlação serial	0,0000	0,0000

Fonte: Elaboração própria, com base nos dados da pesquisa (2025).

O teste Chow (teste F para efeitos fixos) indicou a rejeição da hipótese nula de ausência de efeitos fixos individuais. Assim, demonstra-se que o modelo com efeitos fixos é preferível ao *pooled*, já que existem diferenças significativas entre os estados brasileiros que influenciam a variável resposta, evidenciando heterogeneidade não observada. Já o teste de Breusch-Pagan

(Lagrange Multiplier) também rejeitou a hipótese nula de ausência de efeitos aleatórios. Este resultado confirma a variabilidade significativa entre estados, indicando que o modelo a *pooled* não é o adequado.

Para escolher entre o modelo de efeitos fixos e o de efeitos aleatórios, o teste de Hausman foi realizado, apresentando um p-valor extremamente baixo. Esse resultado indica que o modelo de efeitos aleatórios é inconsistente, uma vez que os efeitos individuais estão correlacionados com as variáveis explicativas, justificando assim o uso do modelo de efeitos fixos para essa análise.

Demais disso, o Teste de Wooldridge evidenciou autocorrelação serial nos resíduos do modelo de efeitos fixos, indicando que os erros não são independentes no tempo. O teste de Dependência Cruzada, de Pesaran, revelou intensiva evidência de dependência entre os estados. Isso mostra que a independência de unidades seccionais não é possível ser observada. No que se refere ao teste de Wald, a hipótese nula de homocedasticidade foi rejeitada, indicando heterocedasticidade nos resíduos do modelo. Conforme o resultado do teste de Wooldridge/Breusch-Godfrey, o p-valor foi menor do que 0,05, indicando a rejeição da hipótese nula e apontando a existência de correlação serial no modelo de efeitos fixos.

Após a detecção de heterocedasticidade e autocorrelação serial, foi necessário ajustar os modelos para corrigir esses pontos. Ademais, a análise dos fatores de inflação da variância (VIF) indicou ausência de multicolinearidade relevante entre as variáveis explicativas, com valores inferiores ao limite crítico comum de 2,5. Isso assegura que os coeficientes estimados são robustos e confiáveis, não sendo afetados por colinearidade excessiva.

4 RESULTADOS E DISCUSSÃO

A seguir, encontram-se os resultados sobre as variáveis analisadas neste estudo, incluindo análise dessas variáveis no período de 1985 a 2023, a estatística descritiva e a análise das estimativas dos parâmetros obtidos por meio dos modelos aplicados aos dados em painel. Assim, avaliam-se os efeitos da variabilidade climática e da mudança no uso da terra sobre o valor bruto da produção vegetal e da pecuária nos estados brasileiros.

4.1 Análise da evolução das variáveis relacionadas ao VBV e ao VBP, com ênfase para o ranqueamento dos estados brasileiros

De 1985 a 2023, a produção vegetal e pecuária, no Brasil, mostrou uma trajetória marcadamente crescente, refletindo o fortalecimento do setor agropecuário como um dos pilares da economia nacional. Para compreender a distribuição da atividade agrícola no Brasil no tempo, é fundamental observar como o volume de produção vegetal e pecuária se comporta entre os estados. Por via dessa análise espacial, identificam-se diferenças de produção entre os estados, evidenciando as áreas com maior dinamismo econômico no setor agropecuário. Nesse sentido, a Tabela 2 indica os 10 maiores e os 10 menores estados produtores de cada setor, em termos médios, no período de 1985 a 2023, concedendo uma visão geral da concentração da produção.

Tabela 2 - Estados brasileiros com maiores e menores VBVs e VBPs.

(continua)

MAIORES PRODUTORES				
Lugar	VBV		VBP	
1º	São Paulo	R\$ 1.424.623.271,53	Minas Gerais	R\$ 263.843.501,24
2º	Mato Grosso	R\$ 1.136.612.694,96	Paraná	R\$ 130.414.196,30
3º	Paraná	R\$ 1.021.579.838,77	Rio Grande do Sul	R\$ 121.979.946,01
4º	Rio Grande do Sul	R\$ 980.090.817,24	Goiás	R\$ 86.706.399,88
5º	Minas Gerais	R\$ 853.253.735,83	Santa Catarina	R\$ 82.792.988,74
6º	Goiás	R\$ 630.586.405,13	São Paulo	R\$ 60.224.173,30
7º	Bahia	R\$ 446.714.094,58	Bahia	R\$ 32.212.169,83
8º	Mato Grosso do Sul	R\$ 390.268.515,60	Pernambuco	R\$ 27.716.033,21
9º	Santa Catarina	R\$ 278.206.070,57	Rondônia	R\$ 22.017.606,13
10º	Pará	R\$ 263.116.541,22	Ceará	R\$ 21.845.085,62

(conclusão)

MENORES PRODUTORES				
Lugar	VBV		VBP	
1º	Amapá	R\$ 5.268.981,73	Amapá	R\$ 292.636,02
2º	Roraima	R\$ 13.306.267,33	Roraima	R\$ 686.885,80
3º	Acre	R\$ 13.959.538,72	Distrito Federal	R\$ 916.740,94
4º	Distrito Federal	R\$ 21.654.789,45	Acre	R\$ 1.495.284,54
5º	Sergipe	R\$ 35.778.145,93	Amazonas	R\$ 2.005.484,91
6º	Paraíba	R\$ 37.620.168,71	Piauí	R\$ 4.245.867,00
7º	Rio de Janeiro	R\$ 37.722.372,86	Paraíba	R\$ 8.073.922,70
8º	Rio Grande do Norte	R\$ 40.088.725,10	Sergipe	R\$ 10.289.881,42
9º	Amazonas	R\$ 42.607.529,96	Mato Grosso do Sul	R\$ 10.381.092,57
10º	Alagoas	R\$ 62.393.720,33	Tocantins	R\$ 10.926.012,37

Fonte: Elaboração própria, com base nos resultados da pesquisa (2025).

Observa-se que os estados com maior média de VBV estão concentrados nas regiões Sul, Sudeste e Centro-Oeste, com destaque para Paraná, São Paulo, Minas Gerais, Goiás e Mato Grosso. Essas UF se destacam historicamente pela elevada produção de grãos, como soja, milho e trigo, além de importantes polos de agroindústria e pecuária comercial. De outra parte, estados das regiões Norte e Nordeste, como Amapá, Roraima, Acre, Alagoas e Sergipe, apresentam os menores valores médios de VBV no período analisado. A distribuição espacial do VBV reflete, portanto, desigualdades estruturais e produtivas entre as regiões brasileiras.

No caso da produção vegetal, os estados com os maiores valores médios de VBV foram São Paulo, Mato Grosso, Paraná, Rio Grande do Sul, Minas Gerais, Goiás, Bahia, Mato Grosso do Sul, Santa Catarina e Pará. Entre eles, Mato Grosso se destaca como um dos principais produtores, e, entre as culturas, se destaca o avanço da soja, do milho e do algodão sobre áreas do Cerrado. Estados do Sul, como Paraná e Rio Grande do Sul, possuem grande influência agrícola e produtividade elevada. Já Minas Gerais e Goiás exprimem grande diversidade de culturas, enquanto a Bahia se destaca no Nordeste pelo crescimento da produção vegetal.

Ao contrário disso, os menores valores do VBV foram registrados em estados como Amazonas, Rio Grande do Norte, Rio de Janeiro, Paraíba, Sergipe, Distrito Federal, Acre, Roraima e Amapá. Nesses casos, a produção vegetal é de menor escala, muitas vezes direcionada à subsistência. Ante condições climáticas e restrições ambientais, são passíveis de influenciar diretamente o desempenho agrícola dessas unidades federativas, especialmente nas regiões Norte e Nordeste.

Quanto ao setor pecuário (VBP), os estados com maiores valores foram Minas Gerais, Paraná, Rio Grande do Sul, Goiás, Santa Catarina, São Paulo, Bahia, Pernambuco, Rondônia e Ceará. Minas Gerais lidera o ranque nacional, com destaque para a produção de leite. Paraná e

Santa Catarina também figuram entre os maiores produtores. Goiás e Bahia, por sua vez, se destacam pela ampliação da disponibilidade de áreas de pastagem e de uma pecuária cada vez mais intensiva; além de Pernambuco, que conseguiu avançar em termos de produção leiteira no Nordeste.

As unidades federativas com menor Valor Bruto da Produção pecuária incluem Tocantins, Mato Grosso do Sul, Sergipe, Paraíba, Piauí, Amazonas, Acre, Roraima, Amapá e o Distrito Federal. Nesses locais, a pecuária possui menor expressão econômica, seja por limitações estruturais ou também por outros fatores, condições ambientais menos favoráveis à expansão pecuária, menor disponibilidade de áreas consolidadas para produção e competitividade reduzida ante outras atividades econômicas predominantes nessas regiões.

Dessa maneira, destaca-se o fato de que as regiões do Centro-Oeste e o Sul concentram a maior parte da produção agrícola do País, enquanto o Sudeste e o Sul mantêm predominância na produção pecuária. O Nordeste e o Norte, por outro lado, continuam denotando menor participação relativa no valor total da produção pecuária.

Evidencia-se, ainda, que, desde 2010, conforme os dados analisados e destacados no Gráfico 1 abaixo, observa-se um aumento mais acelerado de emissão de CO₂, ultrapassando 30 milhões de toneladas em 2023. Além disso, de 1993 a 2009, há flutuações consideráveis, com anos de alta e queda *abruptu*. Após 2010, o gráfico mostra uma trajetória consistentemente ascendente, com crescimento maior de 2017 a 2023.

Gráfico 1 - Evolução da emissão de CO₂ no Brasil (1985-2023).



Fonte: Elaboração própria, com base nos resultados da pesquisa (2025).

A Figura 1 ilustra as médias de emissões de CO₂, por Estado brasileiro, de 1985 a 2023, utilizando uma escala de tonalidades de verde para representar níveis de emissão. As tonalidades mais escuras indicam maiores médias de emissão, enquanto as mais claras representam valores mais baixos ao longo do período analisado.

Observa-se que os estados das regiões Centro-Oeste e Sudeste, como Mato Grosso, Goiás, Minas Gerais, São Paulo e Paraná, apresentam os maiores níveis médios de emissão de CO₂. Em contrapartida, estados das regiões Norte e Nordeste, como Amapá, Roraima, Alagoas e Sergipe, exibem as menores médias de emissão no período analisado. Assim, sobra constatado que o padrão regional de emissões está diretamente associado à intensificação da produção agropecuária durante os anos, especialmente nas áreas em que a atividade possui maior escala e uso mais intensivo de recursos produtivos.

Figura 1 – Médias de emissões de CO₂ por estado brasileiro (1985-2023)



Fonte: Elaboração própria, com base nos resultados da pesquisa (2025).

Arelado a isso, a Figura 2, a seguir, ilustra a média das cicatrizes de fogo, por Estado brasileiro, no período de 1985 a 2023. As tonalidades variam do laranja ao vermelho, indicando a intensidade média da ocorrência de queimadas, com os tons mais escuros representando maior incidência. Nota-se que o estado do Mato Grosso mostra a maior média de cicatrizes de fogo do País, evidenciado pela coloração vermelha. Esse resultado está associado ao avanço da fronteira agrícola na região, indicando práticas de desmatamento e uso do fogo para limpeza de áreas destinadas à produção vegetal e à pecuária. A situação reflete a pressão sobre os ecossistemas naturais, especialmente no bioma amazônico e no Cerrado.

Outros estados com médias elevadas, marcados em tons laranja escuro, incluem Maranhão, Tocantins, Pará, Rondônia e Piauí, regiões que compõem parte da chamada

Amazônia Legal e da região do MATOPIBA (Maranhão, Tocantins, Piauí e Bahia), onde a expansão agrícola se intensificou nas últimas décadas. Ao contrário disso, estados do Sul e Sudeste expressam médias relativamente menores. Desse modo, o padrão espacial evidencia intensa relação entre o uso do fogo e a conversão de áreas naturais para uso produtivo.

Figura 2 – Médias de cicatrizes de fogo por estado brasileiro (1985-2023).

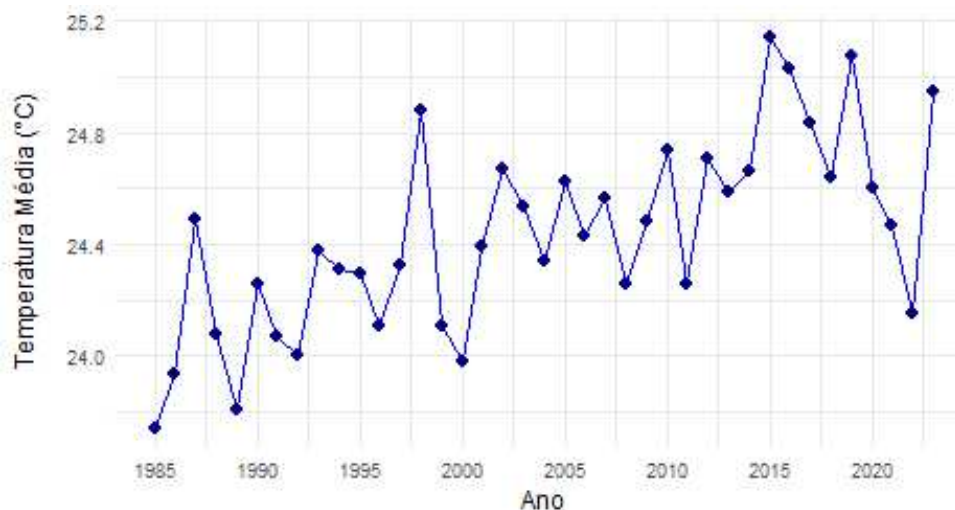


Fonte: Elaboração própria, com base nos resultados da pesquisa (2025).

Essa análise também reforça uma relação entre a expansão agropecuária e os impactos ambientais associados à alta emissão de CO₂. Observa-se que o estado de Mato Grosso, com um dos maiores registros de fogo, coincide com aquele que também denota elevadas médias de emissão de CO₂.

O Gráfico 2 da temperatura média anual mostra uma tendência de aumento ao longo das últimas décadas. Enquanto nas décadas de 1985 e 1990 as temperaturas médias variavam de 24,0 °C a 24,4 °C, desde os anos 2000 observa-se uma elevação gradual, com diversos anos superando a marca de 25,0 °C. Esse aquecimento acompanha o comportamento observado nas emissões de CO₂, que também exprimem crescimento à medida dos anos, especialmente desde a década de 2000. Então, se observa uma tendência geral de aumento na temperatura média, o que é capaz de estar associado às mudanças climáticas globais. Essa elevação de temperatura, ainda que gradual, afeta significativamente a produtividade agrícola, exigindo adaptações no calendário agrícola, nas culturas cultivadas e no uso de tecnologias resilientes ao clima.

Gráfico 2 - Evolução da temperatura média no Brasil (1985-2023).

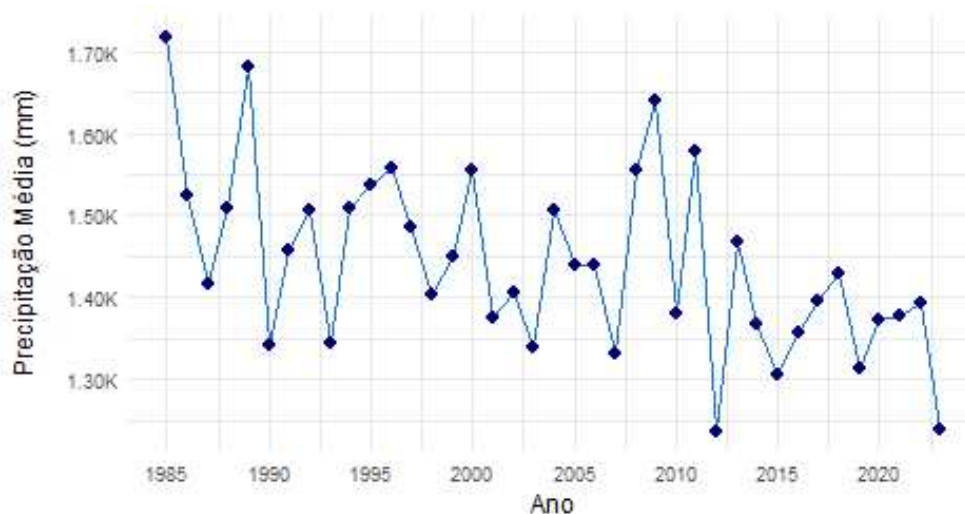


Fonte: Elaboração própria, com base nos resultados da pesquisa (2025).

Ao mesmo tempo, o Gráfico 3, que revela a evolução da precipitação média anual no Brasil, evidencia uma tendência de redução nos volumes de chuva no período analisado. Observa-se que a média anual, que ultrapassava aproximadamente 1.700 mm em 1985, passou a registrar valores inferiores a 1.500 mm em vários anos mais recentes, especialmente desde 2010. Essa redução no volume de chuvas, quando associada ao crescimento contínuo da temperatura média, aponta para a intensificação da crise hídrica, caracterizada por maior frequência de eventos de seca e menor disponibilidade de água para diversos usos, incluindo o abastecimento humano, a produção agrícola e os ecossistemas naturais. Vale frisar que, de 2012 a 2017, houve uma seca prolongada que afetou principalmente os produtores rurais da região Nordeste.

Dessa maneira, o aumento da temperatura média e a redução da precipitação são intensificados pelas emissões crescentes de CO₂, criando um ambiente de maior instabilidade climática. Esse contexto traz riscos consideráveis à sustentabilidade da produção agrícola, uma vez que afeta a disponibilidade hídrica, altera o calendário de plantio e colheita, exigindo maior capacidade de adaptação por parte dos produtores rurais.

Gráfico 3 - Evolução do volume de precipitação média no Brasil (1985-2023).



Fonte: Elaboração própria, com base nos resultados da pesquisa (2025).

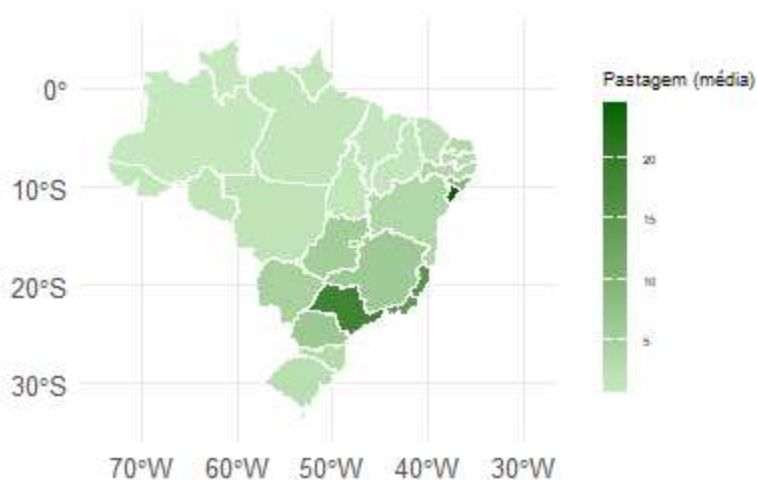
Já a Figura 3 oferece a visão da média da razão de pastagem, por Estado brasileiro, no período de 1985 a 2023, usando uma medida que relaciona o ano da última vez em que uma área foi mapeada como pastagem com o ano da primeira vez em que foi identificada como tal. O mapa utiliza tonalidades de verde, onde as cores mais escuras representam valores médios mais elevados da razão de pastagem à medida temporal.

Observa-se que os maiores valores médios se concentram nos estados da Região Sudeste e Centro-Oeste. Essa concentração está associada à tradição agropecuária dessas regiões, marcadas por sistemas de produção intensiva e extensiva de gado, além de estruturas consolidadas de mercado e logística.

Por outro lado, os estados do Norte e Nordeste exprimem valores médios significativamente menores, o que está relacionado a uma menor disponibilidade de conversão em áreas de pastagem, maior presença de limitações climáticas ou menor grau de desenvolvimento da atividade agropecuária em larga escala.

Esse padrão espacial evidencia diferenças regionais no uso do solo para pastagem, refletindo tanto as condições ambientais quanto os modelos produtivos adotados em cada estado. Além disso, indica que regiões com maior proporção de pastagens também estão mais sujeitas à conversão de terras, degradação ambiental ou mudanças associadas à intensificação da agricultura.

Figura 3 – Médias da razão de pastagem por estado brasileiro (1985-2023).



Fonte: Elaboração própria, com base nos resultados da pesquisa (2025).

Essa análise demonstra uma conjuntura complexa da dinâmica agropecuária brasileira. A expansão da atividade agrícola, especialmente nas regiões Centro-Oeste, Sudeste e Sul, coincide com áreas de elevada média de produção, maior intensidade na razão média de pastagens e maior emissão de CO₂, refletindo a dimensão dessas regiões na estrutura produtiva nacional.

Essa análise, contudo, indica que os estados com maior dinamismo agropecuário são também aqueles com maiores registros médios de emissão de gases de efeito estufa, destacando a relação entre a intensificação do uso da terra e os impactos ambientais resultantes. Ademais, a elevação da temperatura média anual e a tendência de redução da precipitação demonstram sinais de mudanças climáticas em curso, potencialmente agravadas pelas emissões crescentes. A redução no volume de chuvas e o aumento das temperaturas comprometem a regularidade dos ciclos produtivos, acentuam a regulação hídrica e impõem desafios à sustentabilidade da atividade agropecuária.

4.2 Caracterização do VBV e VBP e das variáveis explicativas analisadas

As estatísticas descritivas são apresentadas nas Tabela 3 e a Tabela 4 retrata o resumo das variáveis selecionadas para as estimações realizadas. Embora as variáveis estejam listadas em seus valores originais na referida tabela, elas foram transformadas para o logaritmo natural no modelo econométrico aplicado, em razão da maneira funcional adotada. Os dados coletados refletem as características específicas de cada Unidade da Federação.

De modo geral, observa-se, na Tabela 3, que o valor bruto da produção vegetal e da pecuária varia entre os estados.

Tabela 3 - Estatística descritiva por estado das variáveis dependentes utilizadas nos modelos analisados.

UF	Variáveis			
	Valor bruto da produção vegetal (R\$ mil/tCO ₂ e)		Valor bruto da produção pecuária ((R\$ mil/tCO ₂ e)	
	Média	CV	Média	CV
AC	13959538,7	434,12	1495284,54	400,93
AL	62393720,3	397,70	15466289,62	479,03
AP	5268981,73	468,88	292636,02	406,23
AM	42607530	475,98	2005484,91	366,26
BA	446714095	406,70	32212169,83	365,71
CE	76200284,9	419,01	21845085,62	432,29
DF	21654789,5	447,33	916740,94	390,42
ES	152411711	418,59	12449337,70	407,83
GO	630586405	457,52	86706399,88	431,43
MA	116577897	425,20	12238268,80	436,17
MT	1136612695	450,68	17158206,83	421,20
MS	390268516	462,01	10381092,57	376,12
MG	853253736	430,44	263843501,24	421,86
PR	1021579839	444,91	130414196,30	460,71
PB	37620168,7	375,72	8073922,70	435,21
PA	263116541	479,72	17927583,06	424,42
PE	101871707	383,27	27716033,21	434,49
PI	96358556,3	468,61	4245867,00	406,10
RN	40088725,1	414,45	11036173,76	438,72
RS	980090817	449,66	121979946,01	452,52
RJ	37722372,9	388,13	14831191,74	416,87
RO	82487208,5	456,38	22017606,13	466,37
RR	13306267,3	469,86	686885,80	397,87
SC	278206071	427,71	82792988,74	460,36
SE	35778145,9	411,03	10289881,42	444,78
SP	1424623272	439,49	60224173,30	406,29
TO	95938927,4	457,58	10926012,37	474,51

Fonte: Elaboração própria, com base nos dados da pesquisa.

De 1985 a 2023, os estados brasileiros mostraram variações expressivas nas variáveis analisadas. O VBV indicou a média mais elevada em São Paulo, com aproximadamente R\$ 1,42 trilhão, seguida de Mato Grosso com R\$ 1,13 trilhão. Ao contrário disso, Acre (R\$ 13,9 milhões), Roraima (R\$ 13 milhões) e Amapá (R\$ 5,2 milhões) exibiram os menores valores médios. Já com relação aos valores máximos, São Paulo também apresentou um dos maiores, com picos superiores a R\$ 39 bilhões em anos específicos, enquanto os menores valores registrados foram nos estados de Roraima e Tocantins. Além disso, todos os estados apresentaram um alto coeficiente de variação (CV), em sua maioria, acima de 400, assim como

o VBP. Essa variabilidade é também evidenciada pelos altos desvios-padrão, que apontam flutuações significativas nos valores no tempo.

Em relação ao VBP, o padrão regional denota algumas diferenças em comparação à produção vegetal. Os maiores valores são observados em Minas Gerais, Paraná, Rio Grande do Sul, Santa Catarina, Goiás e São Paulo. Minas Gerais se destaca nacionalmente, em especial pela produção de leite e intensiva presença de cooperativas e agroindústrias. Goiás e Mato Grosso também se sobressaem na pecuária de corte, impulsionados pela disponibilidade de grandes áreas de pastagem.

Tabela 4 - Estatística descritiva, por Estado, das variáveis explicativas utilizadas nos modelos.

UF	Variáveis											
	Área colhida (ha)		Efetivo bovino (número de cabeças)		Precipitação pluviométrica (mm)		Temperatura (°C)		Cicatrizes de fogo (ha)		Razão de pastagem	
	Média	CV	Média	CV	Média	CV	Média	CV	Média	CV	Média	CV
AC	102987,82	16,80	1916373,00	68,94	2078,14	7,55	25,20	1,66	217618,56	64,19	1,04	557,16
AL	629740,46	23,36	1030656,08	20,00	790,96	21,83	25,36	1,19	4063,44	48,75	9,54	520,31
AP	18358,00	62,53	83345,05	33,91	2139,53	15,88	26,07	1,65	237772,29	51,59	1,33	115,55
AM	141687,13	31,91	1085132,15	39,87	2731,40	5,53	25,87	1,45	335309,79	77,61	0,79	344,07
BA	3977460,85	12,25	10550457,95	8,32	764,83	24,48	24,57	2,03	814293,36	51,32	3,71	468,55
CE	1744451,82	18,52	2447327,38	7,51	828,60	33,73	26,97	1,92	51247,96	64,94	1,77	449,65
DF	115282,54	32,20	101408,51	12,69	1297,42	16,88	22,28	2,10	26403,65	74,61	6,15	369,09
ES	728800,85	13,21	1971169,74	10,46	1176,70	19,36	23,13	1,77	12729,95	69,48	15,22	428,67
GO	4310183,23	40,24	20397527,69	10,22	1424,21	15,50	24,44	1,82	823015,26	61,02	5,32	423,91
MA	1656058,21	16,66	5847561,31	33,63	1523,64	17,49	26,86	1,81	2258212,65	36,45	1,10	444,47
MT	8326735,21	68,70	21589109,03	41,89	1701,65	10,37	25,44	1,67	4148448,11	37,87	1,68	361,73
MS	3288200,87	49,39	20824626,67	11,19	1395,74	16,09	24,57	1,93	750761,96	64,34	4,74	324,14
MG	4821102,59	13,18	21601796,18	6,26	1193,53	17,05	22,59	2,11	491897,42	46,80	5,95	401,35
PR	9120566,46	14,96	9205816,18	6,86	1671,19	15,40	20,08	2,20	36421,97	57,84	6,31	310,42
PB	613940,54	56,06	1181490,31	15,08	566,79	37,48	25,99	1,42	19649,14	72,09	2,95	496,18
PA	1242228,54	36,36	13809302,15	48,41	2164,14	11,16	26,04	1,66	2529016,09	41,49	1,34	490,46
PE	972450,03	31,85	1886047,15	15,75	596,00	33,25	25,38	1,61	21043,59	44,88	3,43	456,32
PI	1310351,33	23,18	1733455,08	10,63	1010,66	27,67	27,29	2,44	1389666,84	31,46	1,16	297,11
RN	458522,33	43,96	921135,67	13,86	597,29	40,10	27,16	1,50	7699,45	76,34	3,19	438,66
RS	8053362,10	12,60	13619596,18	6,52	1700,52	16,98	18,74	2,33	45211,02	60,16	2,46	161,79
RJ	250130,36	40,10	2139776,69	12,96	1577,97	13,83	22,35	1,81	19992,90	70,74	14,26	509,78
RO	632134,62	21,43	8621859,56	61,16	1967,95	7,81	25,49	1,49	705944,87	36,64	1,42	554,62
RR	51141,38	69,57	539392,51	48,95	2363,37	11,68	25,63	1,70	672881,48	67,26	0,73	378,54
SC	1814151,08	15,53	3571953,03	17,64	1846,80	13,43	17,82	2,50	21619,62	83,09	2,94	258,46
SE	319039,97	17,85	1018045,95	12,90	759,51	19,05	25,52	1,28	2950,95	83,88	24,44	512,55
SP	7118212,33	16,18	11925507,31	9,26	1436,31	14,01	22,28	2,02	54258,82	54,58	18,54	302,61
TO	671764,49	81,91	6491776,26	43,30	1626,34	15,32	26,60	1,84	2632823,06	41,93	1,31	418,04

Fonte: Elaboração própria, com base nos dados da pesquisa.

Na Tabela 4, é destacada a análise descritiva das variáveis explicativas utilizadas nas análises dos modelos. A análise da área colhida demonstra uma distribuição territorial semelhantemente desigual. Os maiores valores médios de área colhida estão concentrados em Mato Grosso, Paraná, Rio Grande do Sul e São Paulo. Por outro lado, estados como Amapá, Roraima e o Distrito Federal registram áreas colhidas médias bastante pequenas, refletindo a limitação da produção vegetal de larga escala nessas regiões. Em comparação com os valores de produção, a área colhida expressa coeficientes de variação menores, indicando maior estabilidade no volume de produção. De maneira geral, área colhida demonstra que os estados com maiores áreas agrícolas também tendem a concentrar os maiores valores de produção. O Norte e o Nordeste continuam indicando baixos níveis médios de produção e elevada instabilidade, reflexo de vulnerabilidades climáticas, estruturais e econômicas.

A análise do efetivo bovino médio evidencia intensa concentração da pecuária nas regiões Centro-Oeste e Sudeste do Brasil. Os estados de Mato Grosso (21,6 milhões de cabeças), Minas Gerais (21,6 milhões), Mato Grosso do Sul (20,8 milhões) e Goiás (20,4 milhões) figuram como os principais produtores, seguidos pela Bahia (10,5 milhões). Esses estados se destacam pelas grandes extensões territoriais e tradição na pecuária. Ao contrário disso, os menores efetivos médios foram observados em Amapá (83 mil cabeças), Distrito Federal (101 mil), Roraima (539 mil) e Alagoas (1,03 milhão). Nesses casos, o número reduzido de bovinos se relaciona tanto à menor disponibilidade de áreas destinadas à pecuária quanto à predominância de outras atividades econômicas, como agricultura de subsistência.

Ao observar o CV, nota-se que há estados com menor variabilidade. Esses resultados indicam que o efetivo bovino nesses locais se mantém estável no curso do tempo em alguns estados, como Minas Gerais e Paraná, refletindo estruturas produtivas consolidadas e menor influência de fatores externos sobre a produção. Ao contrário disso, estados como Acre e Rondônia relatam variações significativas.

Durante o período analisado, a precipitação pluviométrica também indicou grandes diferenças. O menor índice de precipitação pluviométrica foi registrado no estado do Rio Grande do Norte, em 1993, com apenas 201,36 mm. Por outro lado, o maior volume ocorreu no Amazonas, em 1986, com 2990,74 mm. A maior média anual de chuva ocorreu no Amazonas, seguido de Roraima e Amapá. Já os menores volumes médios foram registrados nos estados nordestinos, com destaque para Paraíba (566 mm) e Pernambuco (596 mm), os quais possuem municípios inseridos na região do Semiárido. Além disso, o Coeficiente de Variação (CV) da precipitação foi especialmente elevado no Nordeste, indicando robusta irregularidade nas chuvas. Já em regiões como o Centro-Oeste e Norte, o CV foi mais baixo, refletindo padrões

mais estáveis de precipitação no período analisado. Esses valores refletem a diversidade climática do Brasil, de estados com baixos índices de precipitação e outros registrando volumes elevados e constantes ao longo do ano.

No que diz respeito à temperatura média (°C), observou-se em 1989 o menor valor em Santa Catarina (17,04°C) e, em 2016, o maior valor no Piauí (28,66°C). Esses estados estão inseridos, respectivamente, nas regiões Sul e Nordeste do Brasil. Com relação à temperatura média anual, os estados mais quentes foram Piauí (27,3 °C), Rio Grande do Norte (27,2 °C) e Maranhão (26,9 °C). Já os estados mais frios foram Santa Catarina (17,8 °C) e Rio Grande do Sul (18,7 °C), refletindo a influência da latitude e da altitude. Ademais, a temperatura média anual apontou pouca variação. Os coeficientes de variação foram muito baixos, variando de 1 a 3. O desvio-padrão da temperatura permaneceu em torno de 0,4 °C, evidenciando pequena flutuação anual. Assim, a região Sul tende a apresentar temperaturas mais amenas, enquanto a região Nordeste, com períodos prolongados de seca, registra temperaturas mais elevadas.

Os dados da variável de emissão de CO₂, referentes à produção agropecuária, apontaram menor de emissão no Estado do Amapá em 1993, com 85,78 toneladas, e o maior no estado de Mato Grosso, em 2023, com o total de 7334213,35 toneladas de emissão. Nas emissões médias de CO₂, Mato Grosso foi o maior emissor, mais de 2,3 milhões de toneladas anuais, seguido por São Paulo e Minas Gerais. Já estados como Roraima, Amapá e Distrito Federal registraram emissões muito inferiores, com médias abaixo de 30 mil toneladas anuais. Os valores máximos de emissões ultrapassaram sete milhões de toneladas em MT e 3,2 milhões em SP, enquanto novamente em Roraima e Tocantins. Essa variável também apresentou um alto desvio-padrão, indicando uma grande dispersão entre os estados analisados.

Em relação à área atingida por cicatrizes de fogo, o estado de Sergipe revelou o menor valor, com 518,90 hectares em 1997, enquanto Mato Grosso registrou a maior extensão queimada, somando 7.454.707,16 hectares em 1987. Além disso, as cicatrizes de fogo exibiram médias mais altas em estados localizados na região Amazônica e no Cerrado, como Tocantins (2,6 milhões de ha), Mato Grosso (4,1 milhões de ha) e Pará (2,5 milhões de ha). Nesses estados, tanto o desvio-padrão quanto o CV foram altos, indicando que a intensidade do uso do fogo variou consideravelmente entre os anos. Os valores máximos estão acima de sete milhões de hectares queimados em Mato Grosso e Tocantins. Já os menores valores médios foram registrados em Espírito Santo, Sergipe e Rio de Janeiro, com valores menores do que 30 mil hectares por ano. Segundo dados do MapBiomas (2022), aproximadamente 20% do Território brasileiro já foram submetidos a queimadas ao menos uma vez desde 1985, totalizando 1.672.142 km², o que corresponde a 19,6% da área nacional. Demais disso, verifica-se elevada

dispersão em todos os estados, conforme o desvio-padrão, indicando que a ocorrência de queimadas varia significativamente entre os estados e no curso do tempo, com algumas unidades federativas concentrando áreas muito superiores à média nacional.

A análise da razão de pastagem no período de 1985 a 2023 revela padrões distintos entre os estados brasileiros, refletindo dinâmicas regionais no uso do solo. O estado de Sergipe apresentou os valores extremos da razão de pastagem, com a menor proporção registrada em 1985 (aproximadamente 0,001) e a maior em 2023 (cerca de 785,84), indicando uma transformação expressiva na ocupação do solo no tempo. Essa variação acentuada sugere uma intensificação recente do uso de áreas como pastagem ou uma reconfiguração significativa da matriz agrícola no estado.

Os maiores valores médios da razão de pastagem foram observados nos estados de Sergipe (24,44), São Paulo (18,54) e Espírito Santo (15,22), indicando maior persistência relativa das áreas de pastagem em relação à área agrícola total. Por outro lado, estados como Roraima, Amazonas e Acre exibiram valores médios significativamente menores, o que está relacionado, decerto, com menor pressão antrópica sobre o uso da terra, com predominância de vegetação nativa ou menores atividades agropecuárias intensivas.

O coeficiente de variação (CV) elevado em estados como Alagoas, Amapá e Sergipe evidencia uma alta variabilidade temporal da razão de pastagem, sugerindo mudanças expressivas no uso e na cobertura do solo ao longo das décadas. Essa instabilidade também é refletida nos altos desvios-padrão observados, especialmente em estados que apontaram picos de proporção de pastagem em determinados anos. Tais flutuações estão associadas, certamente, a fatores como políticas públicas, expansão agrícola, substituição de pastagens por lavouras ou processos de degradação e recuperação de áreas.

4.3 Influência da mudança no uso da terra e das mudanças climáticas sobre o valor bruto da produção vegetal e da pecuária

A escolha da abordagem econométrica em painel se justifica por sua capacidade de controlar heterogeneidades não observáveis entre os estados, como diferenças culturais, institucionais ou tecnológicas; melhorar a eficiência estatística das estimativas ao utilizar a variabilidade temporal e espacial simultaneamente e identificar efeitos causais potenciais com maior robustez, especialmente ao considerar defasagens ou controles específicos de tempo. Assim, os resultados oferecem evidências quantitativas cruciais para entender os efeitos da

mudança do uso da terra e das mudanças climáticas, instabilidade climática sobre o valor bruto da produção vegetal e da pecuária.

A partir disso, foram estimados os coeficientes com base em variáveis climáticas e estruturais relacionadas à atividade agropecuária, permitindo capturar a influência desses fatores sobre o VBV e VBP, por emissão de CO₂. Essa análise se insere no debate sobre os efeitos do clima na produção vegetal e da produção pecuária, ao incorporar elementos que aproximam o modelo econométrico da realidade observada, utilizando a distinção entre estados inseridos em biomas distintos, permitindo uma análise que considera o uso da mudança da terra como uma variável importante no contexto das mudanças climáticas e produção do setor agrícola.

O intervalo de 38 anos (1985 a 2023) analisado serve como referência para o cálculo das médias das variáveis analisadas, possibilitando a detecção de alterações significativas entre períodos distintos. No modelo adotado, as mudanças nas temperaturas e nos níveis de precipitação foram utilizadas para representar as mudanças climáticas, e a razão entre o valor área de pastagem ao final do ano sob a área de pastagem observada no início do ano, de cada estado, representou a mudança ocorrida na utilização da terra. As variáveis dependentes utilizadas foram a da produção vegetal e a da produção pecuária, medidas pela razão entre o valor bruto da produção e o volume de emissão de CO₂.

Seguindo a organização dos dados e a estimação dos modelos por meio de dados em painel, foram conduzidos os testes necessários para a continuidade da análise, conforme se detalhou na metodologia. Assim, com base nesses resultados, foi interpretado o modelo que mais adequadamente representa o impacto sobre a variável dependente, conforme proposto inicialmente neste estudo. (Chen; Chen; Xu, 2016; Ochieng; Kirimi; Mathenge, 2016; Bezerra, 2022).

Para resolver problemas como heterocedasticidade e autocorrelação, foram realizadas novas estimativas. Dessa maneira, os resultados da Tabela 5 correspondem aos modelos ajustados e corrigidos, em conformidade com as orientações metodológicas referentes na literatura da área analisada.

A Tabela 5 exprime os resultados das estimativas robustas para os modelos de efeitos fixos (EF), que foram escolhidos após os testes realizados, aplicados aos dados em painel das unidades federativas do Brasil, considerando duas variáveis dependentes: o valor bruto da produção vegetal (VBV) e o valor bruto da produção da pecuária (VBP). De modo geral, os resultados indicam que as variáveis climáticas e estruturais selecionadas exercem influência estatisticamente significativa sobre o desempenho da produção vegetal e da pecuária nacional.

Tabela 5 - Estimativas robustas aplicadas aos dados em painel das unidades federativas (UF) do Brasil, considerando a abordagem de efeitos fixos (EF).

Variáveis explicativas	VBV		VBP	
	EF	P-valor	EF	P-valor
ln_áreacolhida	0,17389 (0,05782)	0,027**	-	-
ln_precipitação	0,72088 (0,32294)	0,0258**	0,5753 (0,3934)	0,144 ^{NS}
ln_temperatura	22,22953 (4,01112)	0,0000***	18,6019 (4,3727)	0,0000***
ln_cicatrizfogo	-0,00661 (0,12103)	0,9565 ^{NS}	-0,0970 (0,1198)	0,4119 ^{NS}
ln_razãodepastagem	0,36892 (0,04609)	0,000***	0,3558 (0,0567)	0,000***
ln_efetivobovino	-	-	0,0949 (0,0430)	0,028**
R² ajustado	0,122	-	0,123	-

Fonte: Elaboração própria, com base nos resultados da pesquisa, incluindo, também, os dados da PAM (IBGE, 2025), MapBiomass (2025), Climate Change Knowledge Portal (2025) e SEEG (OC, 2025). Nota: (^{NS}) Não significativo; (***) significativo a 1%; (**) significativo a 5%; (*) significativo a 10%.

No modelo que possui VBV como variável dependente, as variáveis área colhida, precipitação pluviométrica, temperatura e razão de pastagens apresentaram coeficientes positivos e estatisticamente significativos, enquanto a variável cicatrizes de fogo não mostrou efeito relevante. A elasticidade da área colhida (0,17) sugere que, mantendo as demais variáveis não observadas constantes, um aumento de 1% na área cultivada está associado a um acréscimo de aproximadamente 0,17% no valor da produção agrícola. Esse resultado reforça a importância da expansão física da produção.

A variável precipitação também mostrou relação positiva e significativa, porém, ao nível de significância de 10%, indicando que o aumento das chuvas tende a favorecer o desempenho agrícola. Apesar disso, esse resultado não foi considerado no modelo, pois o limite determinado foi de até 5%. Esse resultado é coerente com o fato de que a agricultura brasileira, especialmente nas regiões Centro-Oeste e Nordeste, ainda depende fortemente do regime hídrico, sobretudo em lavouras não irrigadas. Por outro lado, a temperatura média exibiu o coeficiente alto, significativo ao nível de 1%, sugerindo que a variação térmica exerce forte impacto sobre o valor da produção vegetal, ou seja, o aumento de 1% na temperatura tende a elevar o VBV por CO₂ em 22,23%, resultado surpreendente, mas que, pelo fato de algumas regiões se

beneficiarem com o aumento da temperatura, essa realidade agregada tende, possivelmente, a interferir nessa realidade. A alta sensibilidade pode refletir o papel da temperatura na produtividade das culturas e na adaptação regional a diferentes condições climáticas, e, dependendo da região, esse efeito é passível de ser alterado pela vulnerabilidade climática, principalmente em regiões semiáridas. Apesar do resultado apresentado ter mostrado um efeito elevado, ele deve ser interpretado com parcimônia.

A razão de pastagens, também indicou efeito positivo. Esse resultado aponta que, nos estados com maior participação das pastagens, a agricultura tende a se beneficiar, possivelmente por meio de sistemas integrados de produção ou pela conversão de áreas de pastagens em lavouras e/ou produção animal. De outra parte, a variável cicatrizes de fogo apontou coeficiente negativo, porém estatisticamente insignificante, sugerindo que os efeitos de queimadas sobre a produção da atividade agrícola não foram mostrados robustamente pelo modelo.

No modelo que utiliza o VBP como variável dependente, os resultados são semelhantes, embora com algumas diferenças importantes. As variáveis temperatura e razão de pastagens mantêm-se positivas e altamente significativas ao nível de 1%, indicando que o aumento da temperatura média e a expansão das áreas de pastagem estão associados à elevação no valor da produção pecuária em aproximadamente 18,60%. O coeficiente de temperatura reforça o relevante papel na produtividade da pecuária extensiva, especialmente nas regiões Centro-Oeste e Norte, onde as condições climáticas são mais adequadas à criação de bovinos.

A variável precipitação, apesar de também mostrar coeficiente positivo, não é estatisticamente significativa, sugerindo que o volume de chuvas tem influência limitada sobre o valor da produção pecuária. Além disso, a variável de efetivo bovino mostrou-se positiva e significativa ao nível de 5%, indicando que o aumento do rebanho está associado a um acréscimo no valor da produção pecuária por emissão de CO₂, em torno de 0,09%, como esperado. Por outro lado, as cicatrizes de fogo novamente não apresentaram significância estatística, embora o sinal negativo esteja de acordo com a hipótese de que as queimadas reduzem a produtividade ou o valor econômico das atividades agropecuárias.

Fazendo uma análise dos coeficientes estimados pelos modelos, por meio de analogias numéricas, de como as variáveis explicativas impactam o VBV e o VBP em estados que se destacam na estrutura produtiva nacional, tem-se que, no caso da área colhida, Paraná figura o estado com maior média de área agrícola. Assim, em termos monetários, considerando o valor médio da produção no estado aproximado de R\$ 1 bilhão, isso representaria cerca de R\$ 1,7 milhão adicional, evidenciando o elevado retorno econômico associado à expansão da produção agrícola em estados de grande porte produtivo.

Já com relação ao VBP, Minas Gerais se destaca como um dos principais estados brasileiros em produção pecuária. Com um VBP médio em torno de R\$ 263,84 milhões, o acréscimo representaria aproximadamente de R\$ 251 mil, reforçando a importância econômica da pecuária no Estado.

No que se refere à precipitação pluviométrica, Roraima é o estado com maior média anual, atingindo 2.363 mm. Utilizando como referência um VBV médio de R\$ 13 milhões e VBP de R\$ 686 mil, esse incremento corresponderia a cerca de R\$ 94 mil e R\$ 4 mil, respectivamente, demonstrando uma sensibilidade das atividades agropecuárias em relação ao regime hídrico.

A temperatura média mais elevada entre os estados da amostra é observada no Piauí, que apresenta 27,29 °C. Considerando um valor médio de VBV de R\$ 96 milhões e de VBP de R\$ 4 milhões, aproximadamente, o impacto seria de R\$ 21 milhões e de R\$ 744 mil, respectivamente. Diante disso, revela-se uma forte sensibilidade do modelo às variações térmicas, sobretudo em regiões já caracterizadas por altas temperaturas.

Em relação às cicatrizes de fogo, Mato Grosso denota a maior média nacional, com mais de 4,1 milhões de hectares afetados anualmente. Considerando um valor médio de VBV R\$ 1,13 bilhão e de R\$ 17 milhões de VBP, o impacto negativo seria aproximadamente de R\$ 75 mil e de R\$ 15 mil; entretanto, como o coeficiente não se apresenta estatisticamente significativo, esses resultados não são considerados nesta análise.

Relativamente à razão de pastagem, Sergipe possui a maior média do País (24,44), indicando elevada proporção de área destinada à formação de pastagens em relação às demais categorias de uso do solo. Considerando um valor médio aproximado de R\$ 35 milhões de VBV e R\$ 10 milhões de VBP, o impacto seria de aproximadamente R\$ 130 mil e de R\$ 35 mil, reforçando o papel importante das áreas de pastagem para a dinâmica econômica da agropecuária sergipana.

Adicionalmente, os valores de R^2 ajustado (0,122 para VBV e 0,123 para VBP) indicam que os modelos explicam cerca de 12% da variação observada no valor da produção agropecuária entre os estados e ao longo do tempo. Embora modestos, esses resultados são comuns em análises com dados em painel de larga abrangência espacial e temporal, nas quais fatores climáticos são observados. Ao analisar os efeitos de cenários climáticos que influenciam a produtividade sobre a agricultura chinesa, no período de 2001 a 2019, Song *et al.* (2022) obtiveram um R^2 ajustado de aproximadamente 17% em um cenário de homogeneidade tecnológica e 21% para quando há diferenças de tecnologia sobre índice de produtividade total. Já Bezerra (2022), ao avaliar os impactos da variabilidade climática sobre o valor bruto da produção vegetal no Brasil, utilizando dados de 1990 a 2020, encontrou um R^2 ajustado de

aproximadamente 20%. Assim, indica-se que os resultados apresentados neste estudo se enquadram nos níveis de R^2 ajustado considerados adequados pela literatura especializada.

O modelo de EF se destaca por capturar melhor a heterogeneidade não observada entre os estados, reforçando a importância de considerar características específicas de cada unidade federativa na análise. Em síntese, os resultados sugerem que o desempenho agrícola e pecuário no Brasil está positivamente associado à dinâmica do uso da terra e às condições climáticas, enquanto os impactos negativos do fogo sobre a produção não foram estatisticamente comprovados neste recorte.

Assim, os principais resultados econométricos indicam que o desempenho do setor agropecuário brasileiro é influenciado principalmente por variáveis climáticas e de uso do solo. No modelo em que o VBV é a variável dependente, área colhida, temperatura e razão de pastagens apresentaram impactos positivos e significativos, enquanto precipitação mostrou efeito positivo, porém sem significância estatística para o modelo final, e cicatrizes de fogo não apresentaram efeitos robustos. Esses achados reforçam estudos que destacam a importância da expansão agrícola, disponibilidade hídrica e condições térmicas para a produtividade, como os de Assunção e Chein (2016), Ferreira e Vieira Filho (2020) e Mendelsohn *et al.* (2001). O coeficiente elevado da variável temperatura é propício a refletir adaptações regionais, conforme discutido por Deschenes e Greenstone (2007).

No modelo do VBP, temperatura, razão de pastagens e efetivo bovino apresentaram efeitos positivos e significativos, destacando a sensibilidade da pecuária a variáveis térmicas e ao tamanho do rebanho, em linha com estudos sobre sistemas extensivos em regiões tropicais como de Gerber *et al.* (2013) e Cheng *et al.* (2022). Além disso, os resultados convergem com o estudo de Abidoye e Odusola (2015), ao indicar que temperatura tende a exercer influência mais consistente que precipitação em países com agricultura majoritariamente de sequeiro.

5 CONSIDERAÇÕES FINAIS

A presente dissertação teve como finalidade analisar os efeitos das mudanças climáticas e das transformações no uso da terra sobre o desempenho agropecuário brasileiro. Os resultados obtidos por meio de modelos de efeitos fixos demonstraram que variáveis relacionadas ao uso da terra e às condições climáticas exercem influência significativa sobre o desempenho produtivo das unidades federativas, reforçando a importância de compreender as interações do clima, com manejo territorial e produtividade.

A comparação entre os resultados VBV e o VBP revela tanto similaridades estruturais quanto diferenças significativas na sensibilidade das atividades agropecuárias aos fatores climáticos e produtivos analisados, permitindo também avaliar não apenas a capacidade produtiva dos setores da produção vegetal e da pecuária, mas também sua intensidade de emissões de CO₂. Os resultados demonstraram que variáveis, como temperatura e o uso de pastagens, exercem influência significativa tanto sobre o valor bruto da produção vegetal (VBV) quanto sobre o valor bruto da produção pecuária (VBP). A precipitação não apresentou significância no volume de produção vegetal e pecuária, ao nível de 5% de significância.

O impacto da temperatura foi expressivo e positivo, entretanto possuindo impacto mais significativo na produção vegetal (22,23%) do que na pecuária (18,60%), entretanto este resultado deve ser interpretado com parcimônia. A variável relacionada à razão de pastagens também exibiu um efeito positivo e significativo, indicando que a intensificação do uso da terra pode estar correlacionada com o aumento da produção vegetal e da pecuária.

Comparando os dois setores, verifica-se que a produção vegetal é mais fortemente influenciada por variáveis climáticas, refletindo sua maior dependência das condições meteorológicas e do uso intensivo de solo e insumos. Já a pecuária mostra-se mais relacionada a fatores estruturais e de uso do solo, sugerindo maior resiliência às variações climáticas.

De forma geral, conclui-se que esta pesquisa conseguiu responder aos objetivos propostos, trazendo inferências sobre a contribuição relacionada aos impactos da variabilidade climática e da mudança no uso da terra na produção vegetal e pecuária brasileira. Quanto ao primeiro questionamento, observou-se que as mudanças no uso da terra influenciaram positivamente o valor da produção agrícola e pecuária ao longo do tempo, sobretudo por meio da intensificação da atividade produtiva. No que diz respeito à segunda questão, constatou-se que a expansão agropecuária tem ocorrido predominantemente com o aumento da produtividade, ainda que a forte influência da temperatura aponte para a necessidade de estratégias de adaptação capazes de mitigar riscos futuros.

Os achados apontam para a relevância de políticas públicas que considerem as especificidades regionais e promovam práticas agrícolas sustentáveis. Além disso, o modelo de efeitos fixos se mostrou o mais adequado para captar as heterogeneidades entre os estados brasileiros, o que destaca a importância de abordagens analíticas que considerem as singularidades espaciais em estudos sobre clima e agricultura.

Espera-se que as evidências contribuam para o debate científico e para a formulação e aprimoramento de políticas que visem a equilibrar produtividade, conservação ambiental e segurança alimentar no Brasil. Nesse contexto, o fortalecimento do Plano ABC+ (Agricultura de Baixa Emissão de Carbono), por meio da ampliação do crédito rural direcionado à adoção de tecnologias sustentáveis, como a integração da recuperação de pastagens degradadas e o manejo eficiente do solo e da irrigação. Além disso, ordenamento e uso sustentável da terra e a efetiva implementação do Cadastro Ambiental Rural (CAR), podem contribuir para a regularização fundiária e ao planejamento territorial adequado.

De forma geral, é importante a integração entre produção e sustentabilidade, por meio de instrumentos de financiamento verde, incentivos fiscais, programas de capacitação e mecanismos de monitoramento ambiental. Assim, será possível buscar uma agropecuária de baixo carbono, eficiente e resiliente.

No que se refere às limitações do estudo, é de se reconhecer que o recorte estadual reduz diferenças locais relevantes. Além disso, a disponibilidade de dados de variáveis potencialmente importantes, como crédito rural, que poderiam ser utilizadas no modelo para demonstrar efeitos, não puderam ser incorporadas ao modelo em razão da ausência de informações para todo o período analisado. A inclusão dessas variáveis poderia aprimorar a capacidade explicativa do modelo e oferecer uma compreensão mais abrangente dos fatores que influenciam o desempenho da produção vegetal e pecuária. Assim, recomenda-se que pesquisas futuras aprofundem a análise em escala municipal e objetivem projeções de cenários climáticos futuros, bem como incluam outras variáveis que permitam avaliar a produtividade total da produção agrícola e pecuária e o volume de emissões de CO₂.

REFERÊNCIAS

- ABIDOYE, B. O.; ODUSOLA, A. F. Climate change and economic growth in Africa: an econometric analysis. **Journal of African Economies**, Oxford, v. 24, n. 2, p. 277-301, 2015.
- AIRES, A. N. M. **Avaliação do setor elétrico brasileiro na adaptação às metas internacionais sobre mudanças climáticas**. 2024. Trabalho de Conclusão de Curso (Graduação em Engenharia Ambiental) – Centro de Tecnologia, Universidade Federal do Ceará, Fortaleza, 2024.
- ALPINO, T. M. A.; MAZOTO, M. L.; BARROS, D. C.; FREITAS, C. M. Os impactos das mudanças climáticas na segurança alimentar e nutricional: uma revisão da literatura. **Ciência e Saúde coletiva**, Rio de Janeiro/RJ, v. 27, n. 01, p. 273-286, 2022.
- ASSAD, E. D.; ASSAD, M. L. R. C. L. Mudanças do clima e agropecuária: impactos, mitigação e adaptação. Desafios e oportunidades. **Estudos Avançados**, São Paulo/SP, v. 38, n. 112, p. 271-292, 2024.
- ASSAD, E. D.; COSTA, L. C.; MARTINS S. C.; CALMON, M. FELTRAN-BARBIERI, R.; CAMPANILI, M.; NOBRE, C. A. **Papel do Plano ABC e do Planaveg na adaptação da agricultura e da pecuária às mudanças climáticas**. São Paulo: WRI Brasil, 2019. 48 p. (Working Paper). Disponível em: wribrasil.org.br. Acesso em: 27 mar. 2025.
- ASSUNÇÃO, J.; CHEIN, F. Mudanças climáticas e produtividade agrícola no Brasil: perspectivas futuras. **Environment and Development Economics**, Cambridge, v. 21, n. 5, p. 581-602, 2016.
- ASSUNÇÃO, S. J.; PEDROTTI, A.; ANDRADE, B. M.; CONCEIÇÃO, S.; CARVALHO, L.; JESUS, J.; LIMA, G.; SANTOS, P.; OLIVEIRA, M. V.; MOURA, M. A. **Manejo do solo e adubos verdes como tecnologias sustentáveis para a produção agrícola**. In: Avanços da pesquisa e inovação em sistemas agrícolas: conjunturas das Ciências Agrárias, Curitiba/PR, v. 2, 2024. p. 70-89.
- BARBOSA, W. **Mudanças climáticas na agricultura e migrações internas no Brasil**. 2021. Tese (Doutorado em Ciências) – Centro de Ciências, Escola Superior de Agricultura, Universidade de São Paulo, Piracicaba, 2021.
- BARCELOS, G. F. **Efeito da utilização de prolina na tolerância ao estresse hídrico na cultura de soja**. 2022. Dissertação (Mestrado em Ciências) – Escola Superior de Agricultura Luiz de Queiroz, Universidade de São Paulo, Piracicaba, 2022.
- BARROS, C. L. F. A.; ARENAS, M. V. S. Venda de crédito de carbono de áreas especialmente protegidas: uma solução para custear o reflorestamento da Amazônia. **Verum: Revista de Iniciação Científica**, São Borja/RS, v. 5, n. 1, p. 1–20, 2025.
- BENTO, J. A. N. **Ensaio sobre economia ambiental na América Latina**. 2022. Tese (Doutorado em Economia Rural) – Centro de Ciências Agrárias, Universidade Federal do Ceará, Fortaleza, 2022.
- BEZERRA, F. N. R. **Avaliação da agricultura de baixa emissão de carbono e inteligente ao clima no Brasil**. 2022. Tese (Doutorado em Economia Rural) – Centro de Ciências

Agrárias, Universidade Federal do Ceará, Fortaleza, 2022.

BLUNDELL, R.; BOND, S. R. Initial conditions and moment restrictions in dynamic panel data models. **Journal of Econometrics**, Amsterdam, v. 87, n. 1, p. 115-143, 1998.

BÔAS, G V. Princípios da política nacional sobre mudança do clima. **Seara Jurídica**, Salvador/BA, v. 2, n. 6, p. 12-21, 2011.

BORGES, J. L. V. **Avaliação de sistemas de irrigação em perímetros públicos da Bahia e Pernambuco**. 2010. Dissertação (Mestrado em Ciências Agrárias) – Centro de Ciências Agrárias, Universidade Federal do Recôncavo Baiano. Salvador, 2010.

BRASIL. **Lei 9.443 de 8 de janeiro de 1997**. Institui a Política Nacional de Recursos Hídricos, cria o Sistema Nacional de Gerenciamento de Recursos Hídricos, regulamenta o inciso XIX do art. 21 da Constituição Federal, e altera o art. 1º da Lei nº 8.001, de 13 de março de 1990, que modificou a Lei nº 7.990, de 28 de dezembro de 1989. Disponível em: https://www.planalto.gov.br/ccivil_03/leis/19433.htm. Acesso em: 25 mar. de 2025.

BRASIL. Ministério da Agricultura, Pecuária e Abastecimento. **Plano setorial de mitigação e de adaptação às mudanças climáticas para a consolidação de uma economia de baixa emissão de carbono na agricultura**. Plano ABC. Brasília, DF: MAPA/ACS, 2012. 173 p. Disponível em: www.gov.br. Acesso em: 27 mar. 2025.

BRESSAN, V. G. F.; BRAGA, M. J.; BRESSAN, A. A.; RESENDE, M. A. O seguro depósito induz ao risco moral nas cooperativas de crédito brasileiras? Um estudo com dados em painel. **Revista Brasileira de Econometria**. Rio de Janeiro/RJ. v.66. n. 2. p. 167-185. 2012.

BUENO, P. H. **Educação ambiental no ensino superior: uma proposta para discutir mudanças climáticas na perspectiva da geopolítica**. 2022. Dissertação (Mestrado em Ensino de Ciências) – Centro de Formação Científica, Educacional e Tecnológica, Universidade Tecnológica Federal do Paraná, Curitiba, 2022.

CAMERON, A. C.; TRIVEDI, P. K. **Microeconometrics using Stata**. College Station, TX: Stata Press, 2009.

CANUTO, J. C.; CAMARGO, R. C. R.; URCHE, M. A.; ÁVILA, P. C. Os sistemas agrofloreais biodiversos na perspectiva da segurança alimentar. In: **Jornada científica na escola: ciência, tecnologia e sociedade – mobilizar o conhecimento para alimentar o Brasil**, 2017, Jaguariúna/SP. Anais. Embrapa Meio Ambiente, 2017.

CARDOSO, E. **O impacto das mudanças climáticas nas economias em desenvolvimento: uma análise comparativa de índices de vulnerabilidade**. 2024. Dissertação (Mestrado em Economia Internacional e Estudos Europeus) – Faculdade de Ciências e Tecnologia, Universidade de Lisboa, Portugal, 2024.

CAVALCANTE, M. C. C. **A Integração de Estratégias de Adaptação às Alterações Climáticas no Planejamento Urbano Amazônico**. 2021. Dissertação (Mestrado em Urbanismo Sustentável e Ordenamento do Território) - Faculdade de Ciências e Tecnologia, Universidade de Lisboa, Portugal, 2021.

CHANDIO, A. A.; JIANG, Y. REHMAN, A.; RAUF, A. Short and long-run impacts of climate change on agriculture: an empirical evidence from China. **International Journal of Climate Change Strategies and Management**, Bingley, v. 12, n. 2, p. 201-221, 2020.

CHANDIO, A. A.; JIANG, Y.; AHMAD, F.; ADHIKARI, S.; AIN, Q. U. Assessing the impacts of climatic and technological factors on rice production: Empirical evidence from Nepal. **Technology in Society**, Oxford, v. 66, p. 101607, 2021.

CHENG, M.; MCCARL, B.; FEI, C. Climate change and livestock production: a literature review. **Atmosphere**, Basel, v. 13, n. 1, p. 140, 2022.

CINTRA, P. H. N.; MELO, O. F. P.; MENEZES, J. O. S. Produção agrícola: uma revisão bibliográfica sobre as mudanças climáticas e produtividade de plantas graníferas no Brasil. **Revista Agroecologia-Agrotec**, Anápolis/GO, v. 11, n. 1, p. 87-94, 2020.

COHEN, I. S.; PADILLA G. D.; OJEDA-BUSTAMANTE, W.; CHEHBOUNI, A. Forced migration, climate change, mitigation and adaptive policies in Mexico: some functional relationships. **International Migration**, Genebra, v. 51, n. 4, p. 53-72, 2013.

COLEN, C. M. L. Estimativa de Emissões de Carbono evitadas: impactos positivos dos financiamentos em energias renováveis em 2024. Fortaleza/CE: Banco do Nordeste do Brasil – **ETENE**, abr. 2025. ‘Artigo ETENE’, ano 6, n. 1, 2025.

CONFESSOR, S. L. M.; MACHADO, J. W. F.; SOUZA, E. C. B.; COSTA, P. H. P; DOCA, T. S. F. Avaliação dos impactos ambientais gerados em empreendimento eólicos. In: **Brazil Windpower Conference and Exhibition**, 2022, São Paulo/SP. Anais [...]. São Paulo: ABEEólica; GWEC, 2022.

COY, M.; KLINGLER, M. Frentes pioneiras em transformação: o eixo da BR-163 e os desafios socioambientais. **Territórios e Fronteiras**, Cuiabá/MT, v. 7, n. 1, p. 1-26, 2014.

CUADRA, S. V.; BARIONI, L. G.; HEINEMANN, A. B.; BERGIER, I. **Ação contra a mudança global do clima: contribuições da Embrapa**. Brasília, DF: Embrapa, 2018, p. 75, (Objetivos de Desenvolvimento Sustentável, 13), 2018.

DELL, M.; JONES, B. F.; OLKEN, B. A. Temperature shocks and economic growth: Evidence from the last half century. **American Economic Journal: Macroeconomics**, Nashville, v. 4, n. 3, p. 66-95, 2012.

DESCHENES, O.; GREENSTONE, M. The economic impacts of climate change: Evidence from agricultural profits and random fluctuations in weather. **American Economic Review**, Nashville, 97(March): 354-385, 2007.

DINIZ, M. B. et al. Causas do desmatamento da Amazônia: uma aplicação do teste de causalidade de granger acerca das principais fontes de desmatamento nos municípios da Amazônia Legal brasileira. **Nova Economia**, Belo Horizonte/MG, v. 19, n. 1, p. 121-151, 2009. FapUNIFESP (SciELO).

DOMINGUES, E. P.; MAGALHÃES, A. S.; RUIZ, R. M. Cenários de mudanças climáticas e agricultura no Brasil: impactos econômicos na região Nordeste. **Revista Econômica do Nordeste**, Fortaleza/CE, v. 42, n. 2, p. 229-246, 2011.

DORISCA, E. **Percepção de agricultores familiares em relação às mudanças climáticas e estratégias de adaptação no município de Pelotas RS, Brasil**. 2025. Dissertação de Mestrado em Sistemas de Produção Agrícola Familiar) – Faculdade de Agronomia Eliseu Maciel, Universidade Federal de Pelotas, Pelotas, 2025.

FÁVERO, L. P. L. Dados em painel em contabilidade e finanças: teoria e aplicação. **BBR-Brazilian Business Review**, Vitória/ES, v. 10, n. 1, p. 131-156, 2013.

FEARNSIDE, P. M. Desmatamento na Amazônia: dinâmica, impactos e controle. **Acta amazônica**, Manaus/AM, v. 36, p. 395-400, 2006.

FEITOSA, M. M. ; LEMOS, J. J. S. Hybrid model of artificial neural networks and principal component decomposition for predicting greenhouse gas emissions in the brazilian region of MATOPIBA. **Global Journal of HUMAN-SOCIAL SCIENCE**, Nova York, v. 25, p. 68-80, 2025.

FELÍCIO, R. A. “Mudanças Climáticas” e “Aquecimento Global”– Nova formatação e paradigma para o pensamento contemporâneo? **Ciência e Natura**, Santa Maria/RS, v. 36, p. 257-266, 2014.

FERREIRA, M. D. P.; VIEIRA FILHO, J. E. R. Eficiência técnica na agropecuária: capacidade de armazenagem e densidade de rodovias. **Uma jornada pelos contrastes do Brasil: cem anos do Censo Agropecuário**. Brasília: Ipea; IBGE, 2020, Brasília/DF, p. 170–191, 2020.

FERREIRA, Z. R.; VIEIRA FILHO, J. E. R. Irrigação pública e fruticultura no semiárido. **Revista de Política Agrícola**, Brasília/DF, v. 30, n. 1, p. 34, 2021.

FERRO, A. A. P. M. **Aprendizagem automática para classificar a cobertura do solo em espaços verdes urbanos através de dados de satélite**. 2021. Dissertação (Mestrado em Engenharia Geográfica) – Faculdade de Ciências, Universidade de Lisboa, Portugal, 2021.

FONSECA, G. J. S.; LÍRIO, V. S. Mudanças climáticas e segurança alimentar no Brasil. Brasília: BRSA – Brasil Sustentável, Fortaleza/CE. **Anais [...]**. São Paulo/SP: ABER, 2025. p. 1-34. .

FONSECA, R. B.; PEREIRA, G. M. L.; OLIVEIRA, J. B.; MAGALHÃES, C. A. S. Agroecologia e mudanças climáticas no semiárido: a contribuição da Agricultura Familiar para a segurança alimentar. **Cadernos de Agroecologia**, Recife/PE, v. 20, n. 1, 2025.

FRAGOSO, R. M. S.; PIZAIA, M. G. Efficiency and its determinants in the public irrigation projects of Brazil. **Revista de Economia e Sociologia Rural**, Brasília/DF, v. 61, p. e276113, 2023.

GALON, L.; TIRONI, S. P.; ROCHA, A. A.; SOARES, E. R.; CONÇENCO, G.; ALBERTO, C. M. Influência dos fatores abióticos na produtividade da cultura do milho. **Revista Tropica–Ciências Agrárias e Biológicas**, Mossoró/RN, v. 4, n. 3, p. 18, 2010.

GERBER, P. J. et al. **Tackling climate change through livestock**: a global assessment of emissions and mitigation opportunities. Rome: Food and Agriculture Organization of the United Nations (FAO), 2013. 115 p. Disponível em: CABI Digital Library.

- GIMÉNEZ, A.; CASTANHA, J. P. Estimativa de áreas ocupadas por culturas de inverno no Uruguai usando sensoriamento remoto. **Revista Mexicana de Ciências Agrárias**, Chapingo, v. 3, n. 2, pág. 391-396, 2012.
- GOUVEIA, N. Resíduos sólidos urbanos: impactos socioambientais e perspectiva de manejo sustentável com inclusão social. **Ciência e saúde coletiva**, Rio de Janeiro/RJ, v. 17, p. 1503-1510, 2012.
- GOYAL, R.; ENGLAND M. H.; GUPTA, A. S.; JUCKER, M. Reduction in surface climate change achieved by the 1987 Montreal Protocol. **Environmental Research Letters**, Bristol, v. 14, n. 12, p. 124041, 2019.
- HABIB-UR-RAHMAN, M.; AHMAD, A.; RAZA, A. HASNAIN, M. U.; ALHARBY, H. F.; ALZAHIRANI, Y. M.; BAMAGOOS, A. A.; HAKEEM, K. R.; AHMAD, S.; NASIM, W. ALI, S. MANSOUR, F. SABAGH, A. E. Impact of climate change on agricultural production; Issues, challenges, and opportunities in Asia. **Frontiers in Plant Science**, Lausanne, v. 13, p. 925548, 2022.
- HERSBACH, H.; BELL, B.; BERRISFORD, P.; HIRAHARA, S.; HORÁNYI, A.; MUÑOZ-SABATER, J.; THÉPAUT, J. N. The ERA5 global reanalysis. **Quarterly journal of the royal meteorological society**, Reading, v. 146, n. 730, p. 1999-2049, 2020.
- HOSSAIN, M. S.; QIAN, L.; ARSHAD, M.; SHAHID, S.; FAHAD, S.; AKHTER, J. Climate change and crop farming in Bangladesh: an analysis of economic impacts. **International Journal of Climate Change Strategies and Management**, Bingley, v. 11, n. 3, p. 424-440, 2019.
- INSTITUTO BRASILEIRO DE GEOGRAFIA E ESTATÍSTICA. **Levantamento Sistemático da Produção Agrícola**: abril de 2024. 2024. Disponível em: <https://www.ibge.gov.br/>. Acesso em: 23 mar. 2025.
- JANUARIO, J. L.; SANTOS, A. R.; JANUARIO, P. A. S.; NASCIMENTO, F. C. Análise comparativa da combustão do etanol e com adição de hidrogênio verde, para o monitoramento da emissão de CO₂. **Revista Foco**, Curitiba/PR, v. 17, n. 11, p. e6349-e6349, 2024.
- JINNAH, S. Makers, takers, shakers, shapers: emerging economies and normative engagement in climate governance. **Global Governance**, Leiden, v. 23, p. 285-306. 2017.
- JUNKER, P. V. **Impacto da regionalização do plano setorial para adaptação à mudança do clima e baixa emissão de carbono na agropecuária com vistas ao desenvolvimento sustentável**. 2024. Plano Setorial para Adaptação à Mudança do Clima e Baixa Emissão de Carbono na Agropecuária 2020-2030: Plano Operacional. 2021. 133 f. Ministério da Agricultura e Pecuária, Brasília, 2021.
- KIEFER, A. P.; COSTA, R. M.; PETSCH, C.; SCOOTI, A. A. V. Panorama das alterações nos padrões de precipitação e erosão diante de mudanças climáticas: revisão de literatura. **Revista Brasileira de Geografia Física**, Recife/PE, v. 14, n. 3, p. 1724-1747, 2021.
- KUMAR, R.; GAUTAM, H. R. Mudanças climáticas e seu impacto na produtividade agrícola na Índia. **Journal of Climatology and Weather Forecasting**, Londres, v. 2, n. 1, p. 1-3, 2014.

LEITE FILHO, A. T. **Interações entre desmatamento, mudanças climáticas e produção agrícola no cerrado e na Amazônia Brasileira**. 2022. Tese (Doutorado em Análise e Modelagem de Sistemas Ambientais) – Centro de Geociências, Universidade Federal de Minas Gerais, Belo Horizonte, 2022.

LEMOS, J. J. S.; BEZERRA, F. N. R. . Climate resilience agriculture (CRA) in the brazilian semi-arid region. **IOSR Journal of Humanities and Social Science**, Ghaziabad, v. 28, p. 1-10, 2023.

LEMOS, J. J. S.; BEZERRA, F. N. R. ARIMAX Model to forecast grain production under rainfall instabilities in brazilian Semi-Arid Region. **Global Journal of human-social science: e economics**, Framingham, v. 24, p. 1-15, 2024.

LEMOS, J. J. S.; SOUSA, E. C.; FEITOSA, M. M. Spatial and temporal comparison of agricultural production in the semi-arid region of Ceará state, Brazil in the years 1996, 2006 and 2017. **IOSR Journal of Humanities and Social Science**, Ghaziabad, v. 28, n. 10, p. 23–32, out. 2023.

LI, Y.; GUAN, K.; SCHNITKEY, G. D.; DELUCIA, E.; PENG, B. Excessive rainfall leads to maize yield loss of a comparable magnitude to extreme drought in the United States. **Global change biology**, Hoboken, v. 25, n. 7, p. 2325-2337, 2019.

LIMA, M. A.; ALVES, B. J. R. **Vulnerabilidades, impactos e adaptação à mudança do clima no setor agropecuário e solos agrícolas**. Parcerias Estratégicas – Edição Especial: Mudança do clima no Brasil: vulnerabilidade, impactos e adaptação, Brasília/DF, p. 74–113, 2008.

LINS, L. S. C.; BARBOSA, A. C. F.; SANTOS, C. A. B.; LIRA, K. F. S.; DINIZ, M. C. Mapeamento das principais técnicas agroecológicas utilizadas na agricultura: uma revisão sistemática da literatura. **Revista Ouricuri**, Paulo Afonso/BA, v. 15, n. 1, p. 03-19, 2025.

LUCENA, J. A.; SOUZA, B. I.; MOURA, M. O.; LIMA, J. O. Análise da variabilidade da precipitação pluviométrica como subsídio para o planejamento agrícola em Caicó/RN. **Revista brasileira de Climatologia**, Curitiba/PR, v. 10, 2012.

MACHADO, J. R. F. Metodologias de pesquisa: um diálogo quantitativo, qualitativo e quali quantitativo. **Devir Educação**, Lavras/MG, v. 7, n. 1, 2023.

MACHILI, B. J. As mudanças climáticas na Província do Niassa e seu impacto para a agricultura. **Holos**, Natal/RN, v. 36, n. 7, p. 1-15, 2020.

MAGALHÃES, G.; DUARTE, E. R.; ZAWADZKI, F.; BERTOLINI, E.; PADUAN, F. N.; LAJUS, C. R.; MIYASHIRO, C. F.; SAUER, A. V. Agricultura e sustentabilidade: mudanças climáticas e modificações no desenvolvimento agropecuário. **Divers@ Revista Eletrônica Interdisciplinar**, Campo Grande/MS, v. 14, n. 1, p. 100-112, 2021.

MAGESTE, A. E. S. **Uma análise do conceito de desenvolvimento sustentável apresentada no relatório Brundtland (1987) a partir da perspectiva decolonial**. 2023. Trabalho de Conclusão de Curso (Graduação em Direito) – Faculdade de Direito, Universidade Federal de Uberlândia, Uberlândia, 2023.

MARCOS, A. D.; SILVEIRA, C. S.; VASCONCELOS, F. C. J.; GUIMARÃES, S. O.;

COSTA, J. M. F. Classificação climática de Thornthwaite para o Brasil com base em cenários de mudanças climáticas do IPCC-AR5. **Revista Brasileira de Meteorologia**, São Paulo/SP, v. 33, p. 647-664, 2018.

MARENCO, R. A.; VERA, S. A. A.; GOUVEIA, P. R. S.; CAMARGO, M. A. B.; OLIVEIRA, M. F.; SANTOS, J. K. S. Fisiologia de espécies florestais da Amazônia: fotossíntese, respiração e relações hídricas. **Revista Ceres**, Viçosa/MG, v. 61, p. 786-799, 2014.

MARTINS, S. R.; SCHLINDWEIN, S. L.; D'AGOSTINI, L. R.; BONATTI, M.; VASCONCELOS, A. C. F.; HOFFMANN, A. F.; FANTINI, A. C. Mudanças climáticas e vulnerabilidade na agricultura: desafios para desenvolvimento de estratégias de mitigação e adaptação. **Revista Brasileira de Ciências Ambientais**, Florianópolis/SC, n. 17, p. 17-27, 2010.

MENDELSON, R.; DINAR, A.; SANGHI, A. O efeito do desenvolvimento na sensibilidade climática da agricultura. **Environment and Development Economics**, Cambridge, v. 6, n. 1, p. 85-101, 2001.

MENIN, J. **O Plano Nacional de adaptação à mudança do clima: uma agenda de desenvolvimento na política ambiental brasileira?** 2018. Trabalho de Conclusão de Curso (Graduação em Ciências Sociais) – Centro de Ciências Sociais, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2018.

MERA, Z.; BIEKER, G.; CIEPLINSKI, A. **Comparação das emissões de gases de efeito estufa no ciclo de vida de carros de passeio a combustão e elétricos no Brasil**. Washington, DC: International Council on Clean Transportation, out. 2023. 50 p. Disponível em: theicct.org. Acesso em: 27 abr. 2025.

MIYAJIMA, D. N.; MAGALHÃES, A. S.; DOMINGUES, E. P.; CARVALHO, T. S. **Cenário de mudanças climáticas, efeitos sobre a produtividade agrícola e seus impactos econômicos nas regiões da Amazônia Legal Brasileira**. 2023. Dissertação (Mestrado em Economia) – Centro de Ciências Sociais Aplicadas, Universidade Federal de Minas Gerais, Belo Horizonte, 2023.

MOLION, Luiz Carlos Baldicero. Aquecimento global: uma visão crítica. **Revista brasileira de climatologia**, Curitiba/PR, v. 3, 2008.

MONTEIRO, A. P.; CAMPOS, K. C.; LEMOS, J. J. S.; SOUZA, E. C.; LESSA, L. C. R. Produção agropecuária e precipitações no estado do Maranhão: uma análise multivariada a partir dos censos agropecuários de 2006 e 2017. **Ecologia e Região**, Londrina/PR, v.11, n.3, p.359–377, 2023.

MOREIRA, M. F. R.; MEIRELLES, L. C.; CORADIN, C. M.; PORTELA, S.; OLIVEIRA, S. S. Mudanças climáticas e suas implicações para a saúde de trabalhadores e trabalhadoras, produção agrícola e ambiente. **Revista Brasileira de Saúde Ocupacional**, São Paulo/SP, v. 50, p. eddsst5, 2025.

MORGENSTERN, O.; BRAESICKE, P. HURWITZ, M. M.; O'CONNOR, F. M.; BUSHELL, A. C.; JOHNSON, C. E.; PYLE, J. A. O mundo evitado pelo Protocolo de Montreal. **Geophysical Research Letters**, Washington, v. 35, n. 16, 2008.

MOTTA, R. S. A política nacional sobre mudança do clima: aspectos regulatórios e de governança. **Mudança do clima no Brasil**, Belo Horizonte/ MG, p. 31, 2011.

MULUNEH, M. G. Impact of climate change on biodiversity and food security: a global perspective—a review article. **Agriculture and Food Security**, Londres, v. 10, n. 1, p. 1-25, 2021.

NEVES, F. M.; CHANG, M.; PIERRI, N. As estratégias de enfrentamento das mudanças climáticas expressas nas políticas públicas federais do Brasil. **Desenvolvimento e Meio ambiente**, Curitiba/PR, v. 34, n. 1, p. 5-23, 2015.

NÓBREGA, R. S. Impactos do desmatamento e de mudanças climáticas nos recursos hídricos na Amazônia ocidental utilizando o modelo SLURP. **Revista Brasileira de Meteorologia**, São Paulo/SP, v. 29, p. 111-120, 2014.

NOLETO, R. S. **Abordagem dos objetivos do desenvolvimento sustentável na formulação do Projeto Florestas+ Amazônia: Uma estratégia de combate às mudanças climáticas e de Conservação Ambiental da Amazônia Legal**. 2023. Dissertação (Mestrado em Maestria Estado, Gobierno y Políticas Públicas). Centro de Ciências Sociais, Faculdade Latino-Americano de Ciências Sociais, Sede Brasil, Brasília, 2023.

NONNENBERG, M. J. B.; MARTINS, M. M. V.; CECHIN, A.; VIANNA, R. S.; CRUZ, C. C. P.; SILVA, F. A.; BISPO, S. Q. A.; SANTOS, F. E. L. A. **Efeitos da lei europeia contra desmatamento sobre as exportações brasileiras**. Brasília, DF: Ipea, 2025. 42 p. Disponível em: www.ipea.gov.br. Acesso em: 27 abr. 2025.

NUNES, T. G. A.; UNGARETTI, C. R.; MARCO, G. M. R. D.; MENDONÇA, M. A. A. Financiamentos chineses de projetos de energias renováveis na América Latina: uma análise à luz dos desafios das mudanças climáticas. **Boletim de Economia e Política Internacional**, Brasília/DF, n. 35, p. 9–65, 2023.

OLIVEIRA, S. C. **O papel do direito na agricultura como propulsora da segurança alimentar no Brasil**. 2023. Dissertação (Mestrado em Direito) – Centro de Ciências Jurídicas, Faculdade de Direito, Universidade Federal do Ceará, Fortaleza, 2023.

OLIVEIRA, Y. P. L. Desafios do Mercado de Carbono após o Acordo de Paris: Uma Revisão. **Meio Ambiente (Brasil)**, Curitiba/PR, v. 4, n. 1, 2021.

OLIVER, T. H.; MORECROFT, M. D. Interactions between climate change and land use change on biodiversity: attribution problems, risks, and opportunities. **Wiley Interdisciplinary Reviews: Climate Change**, Hoboken, v. 5, n. 3, p. 317-335, 2014.

ORTIZ-BOBEA, A. The role of nonfarm influences in Ricardian estimates of climate change impacts on us agriculture. **American Journal of Agricultural Economics**, Oxford, v. 102, n. 3, p. 1–26, 2020.

PAAPE, M. M. P. **O efeito pluviométrico: uma análise em painel na produtividade agrícola dos municípios brasileiros (2000-2014)**. 2019. Monografia (Bacharelado em Economia) – Centro de Ciências Jurídicas e Econômicas, Instituto de Economia, Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 2019.

PACHECO, M. S.; MASCARENHAS, M. S.; RUVIARO, C. F. Eficiência produtiva e

emissões de CH₄ na pecuária brasileira. **Aracê**, São Paulo/SP, v. 7, n. 6, p. 29521-29534, 2025.

PAES, C. S.; GÓES, G. B.; CONRADO, J. A. A. Caracterização dos sistemas de produção de leite bovino em um município no semiárido brasileiro. **Revista de Ciências Agroveterinárias**, Lages/SC, v. 22, n. 2, p. 312-320, 2023.

PASSOS, P. N. C. A conferência de Estocolmo como ponto de partida para a proteção internacional do meio ambiente. **Revista Direitos Fundamentais e Democracia**, Curitiba/PR, v. 6, 2009.

PAULA, G. O efeito distribucional das mudanças climáticas na agricultura: evidências de uma análise quantílica ricardiana de dados censitários brasileiros. **Journal of Environmental Economics and Management**, Amsterdam, v. 104, p. 102378, 2020.

PETROVIC, G.; IVANOVIC, T.; KNEZEVIC, D.; RADOSAVAC, A.; OBHODAS, I.; BRAZAKOVIC, T. GOLIC, Z. RADICEVIC, T. D. Assessment of climate change impact on maize production in Serbia. **Atmosphere**, Basileia, v. 14, n. 1, p. 110, 2023.

PIMENTEL, J. N. F. **Impacto da escassez hídrica na agricultura irrigada e estratégia de cultivo e manejo da irrigação em condições de déficit hídrico**. 2021. Tese (Doutorado em Engenharia Agrícola) – Centro de Tecnologia, Universidade Federal do Ceará, Fortaleza, 2021.

PRADO, F. L. **As mudanças climáticas e suas relações com os usos múltiplos da água e a disponibilidade dos recursos hídricos**. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) – Faculdade de Engenharia, Campus de Ilha Solteira, Universidade Estadual Paulista Júlio de Mesquita Filho (UNESP), Ilha Solteira, 2024.

PRESA, I. M. **Evidências preliminares do Inventário de Exposição a Desastres Ambientais e Climáticos (PSY-ID)**. 2024. Trabalho de Conclusão de Curso (Graduação em Psicologia) – Centro de Ciências da Saúde, Universidade La Salle, Canoas, 2024.

QUINTÃO, J. M. B.; CANTINHO, R. Z.; ALBUQUERQUE, E. R. G. M.; MARACHIPES, L.; BUSTAMANTE, M. M. C. Mudanças do uso e cobertura da terra no Brasil, emissões de GEE e políticas em curso. **Ciência e Cultura**, São Paulo/SP, v. 73, n. 1, p. 18-24, 2021.

RAZA, A.; SHAHID, M. A.; SAFDAR, M.; ZAMAN, M.; SABIR, R. M.; MUZAMMAL, H.; AHMED, M. M. Impact of land use and land cover change on agricultural production in district Bahawalnagar, Pakistan. **Environmental Sciences Proceedings**, Basel, v. 29, n. 1, p. 46, 2024.

REIMER, K. D. C. Análise dos impactos socioambientais provocados pela expansão agrícola no bioma da Mata Atlântica. **ESG Studies Review**, São Paulo/SP, v. 6, n. 1, p. e01615-e01615, 2023.

REIS, P. R. da C.; SILVEIRA, S. F. R.; RODRIGUES, P. E. L. Impactos da Política Nacional de Irrigação sobre o desenvolvimento socioeconômico da região Norte de Minas Gerais: uma avaliação do Projeto Gorutuba. **Revista de Administração Pública**, Rio de Janeiro/RJ, v. 46, p. 1101-1130, 2012.

REZAEI, E.E.; WEBBER, H.; ASSENG, S.; BOOTE, K.; DURAND, J.L.; EWERT, F.; MARTRE, P.; MACCARTHY, D.S. Climate change impacts on crop yields. **Nat. Rev. Earth Environ**, Londres, n. 4, p. 831–846, 2023.

RIVERO, S. Pecuária e desmatamento: uma análise das principais causas diretas do desmatamento na Amazônia. **Nova Economia**, Belo Horizonte/MG, v. 19, n. 1, p. 41–66, 2009.

ROY, P. S.; RAMACHAANDRAN, R. M.; PAUL, O.; THAKUR, P.; RAVAN, S.; BEHERA, M. D.; SARANGI, C.; KANAWADE, V. P. Anthropogenic land use and land cover changes—A review on its environmental consequences and climate change. **Journal of the Indian Society of Remote Sensing**, New Delhi, v. 50, n. 8, p. 1615-1640, 2022.

SANGHI, A.; MENDELSON, R. The impacts of global warming on farmers in Brazil and India. **Global Environmental Change**, v. 18, n. 4, p. 655-665, 2008.

SANTOS, B. M. S. **Biodiversidade e carbono: avaliação de diferentes compartimentos florestais como alternativa na mitigação das mudanças climáticas**. 2023. Trabalho de Conclusão de Curso (Graduação em Engenharia Florestal) – Centro de Ciências Rurais, Universidade Federal de Santa Maria, Santa Maria, 2023.

SENA, R.; MORGADO, E. DESMATAMENTO NA AMAZÔNIA: CAUSAS, CONSEQUÊNCIAS E SOLUÇÕES. **RICTS| Revista Internacional de Ciências, Tecnologia e Sociedade**, São Paulo/SP, v. 6, n. 2, p. 71-82, 2023.

SIMÃO, N.; MARTINS, G.; FAVARETO, A. As teorias econômicas implícitas no protocolo de Kyoto The implicit economic theories on the Kyoto Protocol. **Sustainability in Debate**, Brasília/DF, v. 5, n. 2, 2014.

SONG, Y.; ZHANG, B.; WANG, J.; KWEK, K. The impact of climate change on China's agricultural green total factor productivity. **Technological Forecasting and Social Change**, Amsterdam, v. 185, p. 122054, dez. 2022.

SOUSA, E. C.; CAMPOS, K. C.; LEMOS, J. J. S.; LESSA, L. C. R. Instabilidade pluviométrica na produção agrícola de sequeiro no Estado do Piauí. **Revista de Economia e Agronegócio**, Viçosa/MG, v. 20, n. 2, 2022.

SOUZA, M. E. A.; OLIVEIRA, M. F. Regime internacional de meio ambiente e sustentabilidade e políticas públicas ambientais no Brasil. **Brazilian Journal of International Relations**, Marília/SP, v. 13, p. e024001-e024001, 2024.

SOUZA, M. N.; NASCIMENTO, P. O.; MONTEIRO, R., J.; TRUGILHO, G. A.; MOREIRA, M. F.; LOUBACK, G. C.; CRESPO, A. M.; PERON, I. B.; COSTA, W. M.; FIGUEIREDO, J. S. M. Revegetação, matéria orgânica e a sustentabilidade nos procedimentos de recuperação de solos degradados. **Tópicos em recuperação de áreas degradadas**, Ponta Grossa/PR, v. 6, p. 72-93, 2023.

TANURE, T. M. P.; DOMINGUES, E. P.; MAGALHÃES, A. S. Regional impacts of climate change on agricultural productivity: evidence on large-scale and family farming in Brazil. **Revista de Economia e Sociologia Rural**, Brasília/DF, v. 62, p. e262515, 2023.

THOMPSON, H. E.; BERRANG-FORD, L.; FORD, J. D. Mudanças climáticas e segurança

alimentar na África subsaariana: uma revisão sistemática da literatura. **Sustainability**, Basel, v. 2, n. 8, p. 2719-2733, 2010.

THORSTENSEN, V. H.; ZUCHIERI, A. M. **OCDE e agricultura: meio ambiente e mudança climática**. São Paulo: FGV EESP, nov. 2021. 39 p. (Working Paper Series, TD 555; CCGI, 39). Disponível em: <https://repositorio.fgv.br/>. Acesso em: 30 mar. 2025.

TSAI, D.; PONTEZA, R.; QUINTANA, G.; CARDOSO, A. M.; ALVES, P. SILVA, F. B.; GRACES, I.; SOUSA, H.; COLUNA, I.; OLIVEIRA, J.; ZIMBRES, B.; SHIMBO, J.; SILVA, C.; SILVA, C. J.; SILVA, W.; ALENCAR, A.; ANGELO, C. **Análise das emissões de gases de efeito estufa e suas implicações para as metas climáticas do Brasil 1970-2023**. Relatório Analítico SEEG 12. Brasília, DF: Observatório do Clima, 2024. Disponível em: <https://seeg.eco.br/>. Acesso em: 24 mar. 2025.

VEIGA, J. E. **Mundo em transe: do aquecimento global ao ecodesenvolvimento**. Campinas: Armazém do Ipê, 2009. Acesso em: 14 mar. 2025.

VELOSO, C. A. C.; CARVALHO, E. J. M.; SILVEIRA, A. Dinâmica da fertilidade do solo em sistemas agrossilvipastoris na região Nordeste do estado do Pará. **Brazilian Journal of Animal and Environmental Research**, Curitiba/PR, v. 7, n. 4, p. e75229-e75229, 2024.

VIEIRA, B.; ANDREAZZA, R. C. L.; LARA, D. M. Mudanças climáticas e governança: um panorama das iniciativas e estratégias. **Revista Eletrônica Leopoldianum**, Santos/SP, v. 51, n. 143, p. 13-13, 2025.

WASSENAAR, T.; GERBER, P.; VERBURG, P. H.; ROSALES, M.; IBRAHIN, M.; STEINFELD, H. Projecting land use changes in the Neotropics: The geography of pasture expansion into forest. **Global Environmental Change**, Amsterdam, v. 17, n. 1, p. 86-104, 2007.

WOOLDRIDGE, J. M. **Econometric analysis of cross section and panel data**. 2. ed. Cambridge, MA: MIT Press, 2010. 1096 p.

YAMASHITA, M. E. S.; COELHO, M. P.; SANTOS, A. J. A abordagem de mudanças climáticas na educação básica e os desafios emergentes da Educação Ambiental. **Revista Brasileira de Educação Ambiental (RevBEA)**, São Paulo, SP, v. 19, n. 4, p. 212-230, 2024.

YANG, Y.; TILMAN, D.; JIN, Z. Climate change exacerbates the environmental impacts of agriculture. **Science**, Washington, DC, v. 385, n. 6713, p. 3747, 2024.

ZHANG, Y.; SONG, C.; ZHANG, K.; CHENG, X.; BAND, L. E.; ZHANG, Q. Effects of land use/land cover and climate changes on terrestrial net primary productivity in the Yangtze River Basin, China, from 2001 to 2010. **Journal of Geophysical Research: Biogeosciences**, v. 119, n. 6, p. 1092-1109, 2014.

APÊNDICES

Apêndice A - Estimativas robustas aplicadas aos dados em painel das Unidades Federativas (UF) do Brasil, considerando o valor bruto da produção vegetal.

Variável dependente: ln(valor bruto da produção agrícola por emissão de CO ₂)						
Variáveis explicativas	Modelo					
	<i>Pooled</i>	P-valor	EA	P-valor	EF	P-valor
ln_áreacolhida	-0.0638 (0.0630)	0.3119 ^{NS}	0.0422 (0.0558)	0.44951 ^{NS}	0.0422 (0.0558)	0.44951 ^{NS}
ln_precipitação	0.07351 (0.2024)	0.0003***	0.6043 (0.2472)	0.01449**	0.6043 (0.2472)	0.01449**
ln_temperatura	5.4401 (0.9486)	0.0000***	6.9030 (1.3319)	0.0000***	6.9030 (1.3319)	0.0000***
ln_cicatrizfogo	-0.1695 (0.0490)	0.0005***	-0.1367 (0.0597)	0.0220**	-0.1367 (0.0597)	0.0220**
ln_razãodepastagem	0.3925 (0.0443)	0.0000***	0.4334 (0.0405)	0.0000***	0.4334 (0.0405)	0.0000***
ln_efetivobovino	-	-	-	-	-	-
Intercepto	-14.8069 (4.3461)	0.0006***	-20.3392 (5.2807)	0.000***	-20.3392	0.000***
R²	0.118	-	0.118	-	0.118	-

Fonte: Elaboração própria, com base nos resultados da pesquisa, incluindo, também, os dados da PAM (IBGE, 2025), MapBiomass (2025), Climate Change Knowledge Portal (2025) e SEEG (OC, 2025). Nota: (^{NS}) Não significativo; (***) significativo a 1%; (**) significativo a 5%; (*) significativo a 10%.

Apêndice B: Estimativas robustas aplicados aos dados em painel das Unidades Federativas (UF) do Brasil, considerando o valor bruto da produção pecuária.

Variável dependente: ln(valor bruto da produção pecuária por emissão de CO ₂)						
Variáveis explicativas	Modelo					
	<i>Pooled</i>	P-valor	EA	P-valor	EF	P-valor
ln_áreacolhida	-	-	-	-	-	-
ln_precipitação	0.7066 (0.3042)	0.0239**	0.3630 (0.2725)	0.1828 ^{NS}	0.5753 (0.3934)	0.144 ^{NS}
ln_temperatura	5.9457 (1.2421)	0.0000***	7.0575 (1.6218)	0.0000***	18.6019 (4.3727)	0.0000***
ln_cicatrizfogo	-0.2860 (0.815)	0.0004***	-0.1988 (0.702)	0.0446**	-0.0970 (0.1198)	0.4119 ^{NS}
ln_razãodepastagem	0.3055 (0.0815)	0.0000***	0.3927 (0.0422)	0.0000***	0.3558 (0.0567)	0.000***
ln_efetivobovino	0.0244 (0.0697)	0.7261 ^{NS}	0.0737 (0.0534)	0.1672*	0.0949 (0.0430)	0.028**
Intercepto	-18.2361 (5.6290)	0.0012***	-21.0232 (6.0278)	0.000***	-	-
R²	0.103	-	0.106	-	0.123	-

Fonte: Elaboração própria, com base nos resultados da pesquisa, incluindo, também, os dados da PAM (IBGE, 2025), MapBiomass (2025), Climate Change Knowledge Portal (2025) e SEEG (OC, 2025). Nota: (^{NS}) Não significativo; (***) significativo a 1%; (**) significativo a 5%; (*) significativo a 10%.