



UNIVERSIDADE ESTADUAL DE CAMPINAS

Faculdade de Engenharia Mecânica

SOFIA MARQUES ARANTES

**Análise socioeconômica e de uso da terra da
produção de etanol de milho segunda safra,
no Centro-Oeste Brasileiro**

CAMPINAS

2023

SOFIA MARQUES ARANTES

Análise socioeconômica e de uso da terra da produção de etanol de milho segunda safra, no Centro-Oeste Brasileiro

Tese de Doutorado apresentada à Faculdade de Engenharia Mecânica da Universidade Estadual de Campinas como parte dos requisitos exigidos para obtenção do título de Doutora em Planejamento de Sistemas Energéticos.

Orientador: Prof. Dr. Marcelo Pereira da Cunha
Coorientador: Dr. Marcelo Melo Ramalho Moreira

ESTE EXEMPLAR CORRESPONDE À VERSÃO FINAL DA TESE DEFENDIDA PELA ALUNA SOFIA MARQUES ARANTES E ORIENTADA PELO PROF. DR MARCELO PEREIRA DA CUNHA.

**CAMPINAS
2023**

Ficha catalográfica
Universidade Estadual de Campinas
Biblioteca da Área de Engenharia e Arquitetura
Elizangela Aparecida dos Santos Souza – CRB 8/8098

Ar14a Arantes, Sofia Marques, 1988-
Análise socioeconômica e de uso da terra da produção de etanol de milho
segunda safra, no Centro-Oeste brasileiro / Sofia Marques Arantes. –
Campinas, SP : [s.n.], 2023.

Orientador: Marcelo Pereira da Cunha.

Coorientador: Marcelo Melo Ramalho Moreira.

Tese (doutorado) – Universidade Estadual de Campinas, Faculdade de
Engenharia Mecânica.

1. Etanol. 2. Solo - Uso - Brasil. 3. Milho - Cultivo - Brasil. 4. Análise de
insumo - Produto. 5. Indústrias - Aspectos ambientais - Mato Grosso. 6.
Alternância de safras. I. Cunha, Marcelo Pereira da. II. Moreira, Marcelo Melo
Ramalho, 1980-. III. Universidade Estadual de Campinas. Faculdade de
Engenharia Mecânica. IV. Título.

Informações Complementares

Título em outro idioma: Socioeconomic and land use analysis of second-crop ethanol
production in Brazilian Center-West region

Palavras-chave em inglês:

Ethanol

Soil – Use – Brazil

Maize – Cultivation – Brazil

Input-output analysis

Industry – Environmental aspects – Mato Grosso

Harvest rotation

Área de concentração: Planejamento de Sistemas Energéticos

Titulação: Doutora em Planejamento de Sistemas Energéticos

Banca examinadora:

Marcelo Melo Ramalho Moreira [Coorientador]

Angelo Costa Gurgel

Luiz Augusto Horta Nogueira

Rafael Silva Capaz

Pedro Gerber Machado

Data de defesa: 19-05-2023

Programa de Pós-Graduação: Planejamento de Sistemas Energéticos

Identificação e informações acadêmicas do(a) aluno(a)

- ORCID do autor: <https://orcid.org/0000-0002-2404-5022>

- Currículo Lattes do autor: <http://lattes.cnpq.br/8169101899890272>

**UNIVERSIDADE ESTADUAL DE CAMPINAS
FACULDADE DE ENGENHARIA MECÂNICA**

TESE DE DOUTORADO

**Análise socioeconômica e de uso da terra da
produção de etanol de milho segunda safra,
no Centro-Oeste Brasileiro**

Autora: Sofia Marques Arantes

Orientador: Prof. Dr. Marcelo Pereira da Cunha

Coorientador: Dr. Marcelo Melo Ramalho Moreira

A Banca Examinadora composta pelos membros abaixo aprovou esta Tese:

Prof. Dr. Marcelo Melo Ramalho Moreira
Agroicone

Prof. Dr. Angelo Costa Gurgel
FGV-Escola de Economia de São Paulo

Prof. Dr. Luiz Augusto Horta Nogueira
Universidade Federal de Itajubá - Instituto de Recursos Naturais

Prof. Dr. Rafael Silva Capaz
Instituto de Recursos Naturais na UNIFEI

Prof. Dr. Pedro Gerber Machado
Escola Politécnica da USP

A Ata da defesa com as respectivas assinaturas dos membros encontra-se no processo de vida acadêmica do aluno.

Campinas, 19 de maio de 2023.

Agradecimentos

À equipe Agroicone, por todo apoio, auxílio, cooperação, suporte e paciência. Em especial ao Marcelo Moreira, por ter conduzido o projeto desde o início e todo o incentivo durante a evolução do doutorado.

Aos meus familiares pelo apoio à minha formação acadêmica e todo suporte. Em especial para minha mãe, irmã e companheira de vida.

Às minhas amigas de time por toda força dentro e fora de campo.

Ao meu orientador, Professor Marcelo Pereira da Cunha, por sua competência e atenção nas revisões e sugestões, importantes para a finalização deste trabalho.

A todos os professores do Programa de Planejamento Energético que de alguma forma contribuíram para minha formação.

A todos aqueles que acreditaram, auxiliaram e contribuíram. Muito obrigada!

Resumo

Dentro do contexto do Acordo de Paris e da NDC brasileira, o Brasil se comprometeu em aumentar a participação de bioenergia na matriz energética nacional, com expectativa de expandir a produção de biocombustíveis para entre 40 e 52 bilhões de litros até 2032. Para atender a demanda esperada, a intensificação agrícola e, particularmente o cultivo duplo, têm sido sugeridos como uma estratégia prática para conciliar a produção de matérias-primas de biocombustíveis com outras prioridades de uso da terra. A expansão da área agrícola para atender a produção de biocombustíveis pode afetar negativamente o desempenho ambiental do etanol pelas emissões de gases de efeito estufa (GEE) derivadas da mudança do uso da terra (MUT). A produção de etanol de milho foi analisada sob condições que representam a prática atual no estado de Mato Grosso. O sistema de produção considerado utiliza como insumo para a produção de etanol e coprodutos o milho de segunda safra, cultivado em rotação com a cultura da soja, e o uso de cavaco de eucalipto para cogeração de energia a partir de uma termoeletrica anexa à planta de etanol. Este estudo teve como objetivo avaliar os impactos socioeconômicos e de uso da terra a partir da introdução de uma indústria de etanol de milho na região Centro-Oeste do Brasil. Com isso, foram avaliados: (i) Valor da Produção Setorial, (ii) Produto Interno Bruto Setorial – PIB setorial, (iii) Empregos e (iv) Impostos Indiretos Líquidos de Subsídios (IIL) e Impostos e Subsídios Diretos sobre as atividades (ID). Para isso, foi desenvolvido um modelo de insumo-produto tendo como base o ano de 2011, desagregado entre as regiões Mato Grosso e Resto do Brasil. Ao ser implementado, foram capturados os efeitos diretos e indiretos envolvidos em toda a cadeia produtiva, em nível nacional, separando os impactos entre as fases de investimento e operação. Para avaliar os impactos de MUT, foi utilizado o modelo *BLUM* (*Brazilian Land Use Model*) e analisadas: (a) a dinâmica do uso da terra, (b) área, (c) produção, (d) emissões de GEE e (e) *Induced Land Use Change – ILUC*, que contempla tanto efeitos diretos quanto indiretos, a partir de um cenário referência e três alternativos. Para o sistema de produção considerado neste estudo, a introdução de uma indústria de etanol de milho na região Centro-Oeste brasileira vem acompanhada de consideráveis benefícios socioeconômicos. Na fase de investimento, aproximadamente 81% dos empregos e 86% do PIB setorial são gerados fora do estado de Mato Grosso, com significativo efeito de transbordamento para outras regiões do Brasil. Por outro lado, na fase de operação essa dinâmica se inverte de tal modo que a geração de valor ocorre principalmente dentro do estado de Mato Grosso, com a criação de 2,9 mil empregos e R\$ 716 milhões adicionais no PIB setorial, representando 64,6% e 78,6% dos

impactos em nível nacional, respectivamente, onde são gerados 4,5 mil empregos e R\$ 910 milhões adicionais para o PIB setorial. Quanto à análise de uso da terra, este é o primeiro estudo que identifica emissões negativas de *ILUC* para o etanol de milho brasileiro. No cenário referência, o *ILUC* resultou em -4,7 gCO₂e/MJ de etanol anidro para o período de amortização de 30 anos. No cenário assumindo que não há expansão da área de eucalipto (chamado de cenário S2), o *ILUC* resultou em uma emissão líquida de 0,4 gCO₂e/MJ, principalmente em resposta ao maior uso da terra para pastagem e menor área florestal quando comparado ao cenário referência. Tendo em vista os resultados obtidos, o desenvolvimento da cadeia de valor do etanol de milho brasileiro revela-se como uma opção interessante ao alinhar objetivos de redução das emissões de GEE, benefícios socioeconômicos e diversificação da matriz energética nacional. A produção de etanol de milho segunda safra no Brasil pode ser vista como complementar e contribuir com as ações de expansão da produção de biocombustíveis propostas na NDC, associada à mitigação de GEE, constituindo-se como mais uma alternativa que o país dispõe rumo à descarbonização e transição energética.

Palavras-chave: Etanol de Milho, Milho Segunda Safra, Bioenergia, Impactos Socioeconômicos, Análise de Insumo-Produto, Mudança do Uso da Terra, *ILUC*, Brasil, Mato Grosso.

Abstract

Brazil has made a commitment to increase the use of bioenergy in its national energy matrix and aims to produce between 40 to 52 billion liters of biofuel by 2032. To meet this demand, agricultural intensification, specifically double cropping, has been suggested as a practical strategy to balance the production of biofuel feedstocks with other land-use priorities. However, expanding agricultural areas can have negative environmental impacts, such as increased greenhouse gas emissions from land-use change. This study analyzed the production of corn ethanol in the Mato Grosso state, considering the use of second-crop corn grown in rotation with soybeans and the use of eucalyptus chips for the cogeneration of energy. The study evaluated the socioeconomic and land use impacts of introducing a corn ethanol industry in the Brazilian Center-West region, including impacts on sectorial production value, gross domestic product, employment, and taxes. An interregional input-output model was used to capture direct and indirect effects involved in the entire value chain at a national level. The study also assessed the impacts of land use change using the Brazilian Land Use Model, which analyzed land use dynamics, area, production, emissions, and Induced Land Use Change. The results showed that introducing a corn ethanol industry in the Brazilian Center-West region has considerable economic and employment benefits, with 81% of jobs and 86% of sectoral GDP generated outside of Mato Grosso State during the investment phase. However, during the operation phase, this dynamic is reversed, and the generation value occurs mainly within Mato Grosso state, with additional jobs and GDP. The study also identified negative Induced Land Use Change emissions for Brazilian corn ethanol, with the ILUC resulting in -4.7gCO₂e/MJ of anhydrous ethanol for the 30-year amortization period. The development of the Brazilian corn ethanol value chain shows potential as a strategy to reduce greenhouse gas emissions, provide socioeconomic benefits, and diversify the national energy matrix. The production of second-crop corn ethanol in Brazil can be seen as complementary to other efforts to expand biofuel production and reduce greenhouse gas emissions, contributing to the country's decarbonization and energy transition goals.

Key Words: *Corn Ethanol, Second Crop Corn, Bioenergy, Socioeconomic Impacts, Input-Output Analysis, Land Use Change, ILUC, Brazil, Mato Grosso.*

Lista de Tabelas

Tabela 1 - Comparativo entre a produção de etanol de milho (2ª safra) e cana-de-açúcar	44
Tabela 2 - Usinas de etanol de milho em funcionamento no Brasil em 2023	47
Tabela 3 - Usinas de etanol de milho em ampliação ou processos em andamento	48
Tabela 4 - Comparação entre diferentes programas de biocombustíveis para a avaliação de MUT	58
Tabela 5 – Principais diferenças entre a produção de etanol de milho brasileiro e norte- americano.....	71
Tabela 6 - Exemplo esquemático de uma tabela de insumo-produto com três setores	76
Tabela 7 – Choque na fase de investimentos por setor e região de origem.....	89
Tabela 8 - Quadro comparativo entre os modelos didático e grande	94
Tabela 9 - Detalhamento das variáveis e equações do modelo grande	95
Tabela 10 – Insumos utilizados na fase de operação.....	97
Tabela 11 - Despesas consideradas na fase de operação	97
Tabela 12 - Produtos, preços básicos e choque realizado (em 2018).....	98
Tabela 13 - Dados macroeconômicos <i>BLUM</i>	111
Tabela 14 - "Choques" aplicados na demanda por insumos e oferta de coprodutos a partir da produção de 1 bilhão de litros de etanol de milho no Brasil	115
Tabela 15 - Substituição de milho/farelo de soja por <i>DDGS</i> , separado por tipo de animal ...	117
Tabela 16 - Fatores de emissão para período de 30 anos (tCO ₂ eq/ha).....	118
Tabela 17 – Projeção da área total por tipo de atividade agropecuária e região em 2030 - Cenário Base (em mil hectares).....	119
Tabela 18 – Projeção da produção das principais atividades agropecuárias, por região em 2030 - Cenário Base (em milhões de toneladas)	120
Tabela 19 - Impactos socioeconômicos na fase de investimento	121
Tabela 20 - Efeito de transbordamento dos impactos socioeconômicos na fase de investimento	122
Tabela 21 - Impactos socioeconômicos adicionais na fase de operação	123
Tabela 22 - Setores com impacto positivo no valor da produção setorial	124
Tabela 23 – Setores com impacto negativo no valor da produção setorial	125
Tabela 24 - Setores com impacto positivo no PIB setorial.....	126
Tabela 25 - Setores com impacto negativo no PIB setorial.....	127
Tabela 26 - Principais setores com aumento na variável emprego.....	128

Tabela 27 - Principais setores com queda na quantidade de emprego	129
Tabela 28 - Principais setores com aumento na arrecadação de impostos	130
Tabela 29 - Principais setores com queda na arrecadação de impostos	131
Tabela 30 – Comparação entre os resultados: Cenário Alternativo e Cenário Usina Etanol de milho na fase de operação	132
Tabela 31 - Variação da área agropecuária (em mil hectares), em 2030 – Cenário S1.....	134
Tabela 32 - Variação da área de pastagem, por tipo tecnológico (em mil hectares), em 2030 – Cenário S1	135
Tabela 33 - Variação da produção agropecuária (em mil toneladas), em 2030 – Cenário S1	136
Tabela 34 – Mudança no uso da terra, entre Cenário S1 e Cenário Base (em 1000 hectares)	137
Tabela 35 - Emissões da mudança do uso da terra em 2030 (1.000 tCO ₂ eq) - Cenário S1 ...	139
Tabela 36 - Emissões cumulativas de GEE para ILUC dos cenários avaliados (gCO ₂ e/MJ), em 2050	141
Tabela 37 - Variação de preço dos produtos agropecuários no Brasil, em 2030 nos diferentes cenários	142
Tabela 38 - Quadro-resumo dos principais resultados da análise socioeconômica.....	143

Lista de Ilustrações

Figura 1 - Emissões líquidas totais de CO ₂ em nível global	24
Figura 2 - Participação dos setores nas emissões de GEE mundiais	25
Figura 3 – Emissões de GEE totais no Brasil por setor (GWP-100, AR5), 1990-2021	26
Figura 4 - Desmatamento nos Biomas da Amazônia e do Cerrado entre 2004-2021	27
Figura 5 - Repartição da oferta interna de energia no Brasil	29
Figura 6 - Países que adotam mandatos de mistura de biocombustíveis	30
Figura 7 – Evolução do preço do CBIO entre 2020 e 2023	36
Figura 8 – Principais produtores de etanol em 2021	38
Figura 9 - Evolução da área (1ª e 2ª safra), produção de milho e moagem de milho para produção de etanol, entre 2000/01 e 2021/22	41
Figura 10 – Área de soja, milho (1ª e 2ª safra) e participação da área de milho 2ª safra em áreas de soja na região Centro-Oeste	43
Figura 11 - Evolução da produção de etanol de milho no Brasil	50
Figura 12 – Emissões de GEE associadas a <i>LUC</i> , para etanol de milho nos Estados Unidos entre 2008 e 2020	56
Figura 13 - Intensidade de carbono do etanol de milho americano, entre 1990 e 2021	60
Figura 14 - Comparação entre as pegadas de carbono do etanol de milho e cana no Brasil, etanol de milho americano e gasolina	64
Figura 15 - Impactos nas mudanças climáticas do etanol, biodiesel e biogás produzidos a partir de diferentes matérias-primas (gCO ₂ e/MJ de combustível final) estimados com quatro abordagens diferentes	65
Figura 16 - Diagrama do processo de produção da indústria etanol de milho no Brasil	72
Figura 17 - Relações fundamentais de Insumo-Produto	74
Figura 18 - Relações de Insumo-Produto em um sistema inter-regional	82
Figura 19 – Matriz de transações do modelo didático para a análise da fase de operação	90
Figura 20 - Interações entre os produtos e setores no <i>BLUM</i>	99
Figura 21 - Regiões <i>BLUM</i>	101
Figura 22 - Inter-relação entre variáveis e parâmetros do <i>BLUM</i>	109
Figura 23 - Resultados <i>ILUC</i> para etanol de milho segunda safra	140

Lista de Abreviaturas e Siglas

Abreviaturas

ACV - Avaliação de Ciclo de Vida

ANP – Agência Nacional do Petróleo, Gás Natural e Biocombustíveis

BECCS - Bioenergy with Carbon Capture and Storage

BEN – Balanço Energético Nacional

BLUM – Brazilian Land Use Model

CAR – Cadastro Ambiental Rural

CBIO – Crédito de Descarbonização

CF – Código Florestal

CI – *Carbon Intensity*

CNPE – Conselho Nacional de Política Energética

CO₂ – Dióxido de carbono

CO₂eq – Dióxido de carbono equivalente

COP – Conferência das Partes

CORSIA - Carbon Offsetting and Reduction Scheme for International Aviation

COVID-19 - Coronavírus

DDGS - Dried Distillers Grains with Soluble

dLUC – Direct Land Use Change

EMBRAPA - Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária

EPE – Empresa de Pesquisa Energética

EU-RED – Renewable Energy Directive 2009/28/EC

F/F: *full-flex*

FAO – Organização das Nações Unidas para Agricultura e Alimentação

FST – Fiber Separation Technology

GO – Goiás

GEE – Gases de Efeito Estufa

IBGE – Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística

ICAO – *International Civil Aviation Organization*

ID – Impostos e Subsídios Diretos sobre as atividades

IIL - Impostos Indiretos Líquidos de subsídios

ILUC – Induced Land Use Change

IPCC – Intergovernmental Panel on Climate Change
LHV – Lower Heating Value
LUC – Land Use Change
LCFS – Low Carbon Fuel Standard
LULUCF - Land use, land-use change, and forestry
 MT – Mato Grosso
 MIP - Matriz de Insumo-Produto
 MME – Ministério de Minas e Energia
 MUT – Mudança do Uso da Terra
NDC – Nationally Determined Contribution
 NEEA - Nota de Eficiência Energético-Ambiental
 OIE – Oferta Interna de Energia
 ONU – Organização das Nações Unidas
 PB – Proteína Bruta
 PIB – Produto Interno Bruto
 RB – Resto do Brasil
RIN – Renewable Identification Number
 RR - Roraima
RFS – Renewable Fuel Standard
 SBN – Soluções Baseadas na Natureza
 SIG - Sistema de Informação Georreferenciada
SOC – Soil Organic Carbon
 UN. – Unidades
 UNEM - União Nacional do Etanol de Milho
UNFCCC - United Nations Framework Convention on Climate Change
 UNICA - União da Indústria de Cana-de-Açúcar
 USDA - Departamento de Agricultura dos Estados Unidos

Unidade de Medida

gCO ₂ eq/MJ	Gramas de dióxido de carbono equivalente por megajoule
ha	Hectare
kg	Quilograma
km	Quilômetro
kWh	Quilowatt-hora

L	Litros
m3	Metro cúbico
MWh	Mega watt-hora
PB	Proteína bruta
R\$	Reais
t	Tonelada métrica
TC	Tonelada de cana
TWh	Tera watt-hora
°C	Graus celsius

Sumário

1 INTRODUÇÃO	16
1.1. Objetivo Geral	20
1.2. Objetivos Específicos	21
1.3. Estrutura da tese.....	21
2 CONTEXTUALIZAÇÃO.....	23
2.1 Emissões de gases de efeito estufa globais e no Brasil	23
2.2 Acordo de Paris e NDC brasileira	27
2.3 Políticas internacionais e nacionais para biocombustíveis	30
2.4 A produção de etanol e expansão da demanda por biocombustíveis	37
3 DESCRIÇÃO DA INDÚSTRIA ETANOL DE MILHO NO BRASIL E REVISÃO DE LITERATURA	40
3.1 Etanol de milho no Brasil	40
3.2 Sustentabilidade dos biocombustíveis	51
4 METODOLOGIA.....	69
4.1 Identificação da cadeia de valor	69
4.2 Modelo básico de insumo-produto	73
4.3 Matriz de Insumo-Produto Inter-regional.....	80
4.4 Estimação da matriz inter-regional de insumo-produto	86
4.4.1 Modelo MIP: fase de investimentos	87
4.4.2 Modelo MIP: fase de operação	89
4.5 BLUM – Brazilian Land Use Model	98
4.5.1 Utilização do modelo, cenários e premissas para Mudança do Uso da Terra.....	110
5 RESULTADOS E DISCUSSÕES	121
5.1 Resultados dos Impactos socioeconômicos.....	121
5.2 Resultados na Mudança do Uso da Terra	133
6 CONCLUSÕES	142
Referências	148
ANEXO A.....	165
ANEXO B - Resultados Cenário S2.....	171
ANEXO C - Resultados Cenário S3.....	173
ANEXO D – Resultados Cenário S4	175
ANEXO E	177

1 INTRODUÇÃO

No contexto desenvolvimento sustentável e mudanças climáticas os biocombustíveis têm um papel essencial para alcançar um futuro energético de baixo carbono (CASPETA et al., 2013; FULTON et al., 2015; BROWN & LE FEUVRE, 2017; IPCC, 2018; IPCC, 2022). A sua agressiva expansão, em nível mundial, está diretamente relacionada ao Acordo de Paris e aos compromissos assumidos através das Contribuições Nacionalmente Determinadas (*Nationally Determined Contribution* - NDC, em inglês)¹ dos países participantes.

Em 2015, no Acordo de Paris, 195 países se comprometeram durante a 21ª Conferência das Partes das Nações Unidas sobre Mudanças Climáticas (COP 21 - UNFCCC), em fazer esforços para manter o aquecimento global bem abaixo de 2°C, até 2030, em relação aos níveis pré-industriais (ONU, 2015). Para alcançar os objetivos do Acordo, os países participantes apresentaram os seus compromissos para a redução de emissões dos gases de efeito estufa (GEE).

A partir da primeira versão apresentada da NDC brasileira em 2015, as metas estavam explícitas, pretendendo aumentar a participação de bioenergia, adotar medidas no setor florestal e de mudança do uso da terra e, no setor de energia, manter a participação de energias renováveis na composição da matriz energética brasileira, com uma participação estimada de 45% (BRASIL, 2015). O país, que já possui expertise na produção do etanol carburante, assume a meta de aumentar a expansão do consumo de biocombustíveis nos próximos anos, principalmente o aumento da oferta de etanol combustível.

Na 26ª COP que ocorreu em 2021 o Brasil assumiu outros compromissos importantes, como a apresentação da meta de neutralidade de emissões até 2050, zerar desmatamento ilegal até 2028, com metas intermediárias de redução e entre outros (MMA, 2021). Para auxiliar no cumprimento das metas propostas no Acordo, a Política Nacional de Biocombustíveis - RenovaBio² foi criada com o objetivo de expandir a produção de biocombustíveis no país (ANP, 2017; GRASSI et al., 2019).

¹ A NDC envolve compromissos voluntários criados por países signatários do Acordo de Paris. Os compromissos assumidos por cada país são fundamentais para obtenção de resultados concretos rumo à redução das emissões de GEE e à economia de baixo carbono.

² O RenovaBio foi instituído pela Lei nº 13.576/2017 (ANP, 2017) e está baseado na previsibilidade, sustentabilidade ambiental, econômica, e compatível com o crescimento do mercado. A expansão da produção de biocombustíveis no Brasil contribuirá com a redução das emissões de GEE no país.

Em 2022, o governo brasileiro apresentou a NDC atualizada de acordo com o conteúdo acordado entre as Partes da UNFCCC e do Acordo de Paris sob o Pacto Climático de Glasgow. A versão revisada mantém a meta de redução das emissões de GEE em 37% abaixo dos níveis de referência de 2005, em 2025 e adicionalmente assume o compromisso de reduzir as emissões de GEE em 50% abaixo dos níveis de 2005, em 2030. Além disso, a NDC brasileira atualizada antecipa para 2050, ainda, o objetivo indicativo de alcançar a neutralidade climática no longo prazo (BRASIL, 2022).

A liderança brasileira na produção de biocombustíveis teve início em 1975, a partir do Proálcool – Programa Nacional do Álcool, que resultou em ganhos de produtividade, além de eficiências agrícolas e industriais, principalmente na região centro-sul do país. O lançamento do Proálcool teve como principal motivação a segurança energética e o peso das importações de petróleo na balança de pagamentos do país (ARANTES, 2018; IPEA, 2016).

Historicamente, as determinações de percentuais de mistura obrigatória têm impulsionado o consumo de biocombustíveis no Brasil. Ao longo dos anos 70 e juntamente com os períodos de crise do petróleo, a mistura do etanol anidro na gasolina se tornou obrigatória (CRUZ et al., 2012). A partir de 2003 e apesar de momentos conturbados, os veículos *flexfuel* começaram a ser vendidos no Brasil, aumentando e incentivando a produção de etanol no país (UNICA, 2017). O Proálcool progressivamente elevou os níveis de mistura obrigatória de etanol dos fornecedores de combustíveis até atingir a proporção praticada desde 2015 até os dias de hoje (2022). Atualmente, o percentual de mistura de etanol anidro na gasolina comum é de 27% e de 25% na gasolina *premium* (PETROBRAS, 2022).

O Brasil é referência no mercado e domina todo o ciclo produtivo do etanol, além de ser o primeiro do mundo a produzir biocombustível através da cana-de-açúcar como alternativa energética. De acordo com os cenários de projeções da Empresa de Pesquisa Energética Brasileira (EPE), em 2032, os volumes de etanol (considerando etanol de primeira e segunda geração, somando o etanol de milho), podem variar entre 40-52 bilhões de litros (EPE, 2022) visando atingir as metas propostas na NDC brasileira. Com isso, espera-se um aumento entre 28% e 66% do total de etanol produzido na safra 2022/23, que chegou a 31,3 bilhões de litros (CONAB, 2023).

No entanto, para que o aumento da produção de etanol não venha acompanhada de uma expansão da produção de cana-de-açúcar e milho em áreas de vegetação nativa ou agrícola, deve-se priorizar o desenvolvimento de estratégias alternativas. Com isso, alguns questionamentos foram aparecendo ao longo dos anos e são relevantes para este estudo (HAMELINCK, 2013; FILIP et al., 2019). O grande dilema alimentos versus combustíveis

ganhou visibilidade após o período de crise econômica mundial em 2008. A discussão está diretamente relacionada às áreas destinadas para a produção de biocombustíveis, possível competição por terra, segurança alimentar, aumento de preços dos alimentos e impactos no consumo de pessoas marginalizadas, particularmente na região sul do planeta (TOMEI, 2016).

Essa percepção da competição entre biocombustíveis e alimentos tem sido aprofundada por instituições que se dedicam ao assunto, destacando que podem existir grandes sinergias entre biocombustíveis e segurança alimentar (IEA, 2017; IRENA, 2017; FAO, 2017; IPCC, 2018). Porém, atualmente, existem avaliações discrepantes quanto à viabilidade de se utilizar área agrícola para a produção de biocombustíveis sem comprometer a produção de alimentos (debate *food versus fuel*), o habitat natural, os meios de subsistência das populações rurais e os estoques de carbono do ecossistema (SMITH et al., 2014; SLADE et al., 2014; PAWLAK et al., 2020; GODFRAY et al., 2010).

Além disso, devido ao desenvolvimento de tecnologias de produção, melhorias nas práticas de manejo, ganhos de eficiência, aumento da produtividade e entre outros é possível avaliar as medidas que otimizam o uso da terra, assim como os recursos nos sistemas de produção, para que não haja discrepância do uso de matérias-primas destinadas tanto para a produção de alimentos quanto para a de biocombustíveis.

Evidências científicas trazem diferentes resultados quanto ao tema alimento versus combustíveis. Shrestha et al. (2019) demonstraram que os preços dos alimentos são impulsionados principalmente pelo preço do petróleo e Kline et al. (2017) evidenciam que os índices de preços por si só não são indicadores de segurança alimentar pois as oscilações dos preços globais das commodities são distintas das variações de preços dos alimentos ao consumidor. Por outro lado, estudo recente evidencia que embora a produção de biocombustíveis convencionais esteja em estado avançado, no que diz respeito a tecnologia de produção e infraestrutura, por motivos de sustentabilidade e segurança alimentar não são sustentáveis no longo prazo (USMANI, 2023).

Outro estudo destaca que os benefícios gerados pelo sistema de produção dos biocombustíveis são afetados pelos *trade-offs* e sinergias com terra, água, alimentos e biodiversidade. Ou seja, sem um planejamento adequado, haverá impacto dos biocombustíveis sobre segurança alimentar, mudança no uso da terra, desmatamento e biodiversidade que aceleram as mudanças climáticas (DAUVERGNE, 2010). Com isso, perguntas de como conciliar a produção de biocombustíveis e alimentos, sem que haja competição e disputa entre essas atividades quanto ao uso da terra, passam a ser extremamente importantes.

Apesar do avanço de estudos científicos que abordam o tema, os efeitos diretos e indiretos de mudança do uso da terra (do inglês, *Land Use Change – LUC* e *iLUC – Indirect Land Use Change*) ainda estão no centro de extensos debates em nível mundial. O conceito de *Induced Land Use Change – ILUC*, que contempla tanto efeitos diretos quanto indiretos, ganhou força internacionalmente a partir do estudo de Searchinger et al. (2008), que questionou a sustentabilidade da produção de biocombustíveis, que poderiam ter emissões de GEE maiores do que os combustíveis fósseis, quando contabilizados os efeitos induzidos. Tais efeitos no uso da terra são causados pela necessidade de expansão da produção em novas terras, para compensar culturas desviadas do uso original para o de biocombustíveis (SEARCHINGER et al., 2008).

Os conceitos de *LUC* e *iLUC* são utilizados para estimar as emissões de CO₂ (dióxido de carbono) derivadas da mudança do uso da terra (MUT). Porém, ainda não existem metodologias amplamente aceitas para calcular os efeitos induzidos de MUT e podem ser observadas variações nos resultados dos cálculos de intensidade de carbono. Por isso, internacionalmente, medidas estão sendo adotadas com o objetivo de diminuir os potenciais riscos dos efeitos induzidos indesejáveis ao mesmo tempo que se passa a estimular práticas mais sustentáveis.

Embora alguns programas de biocombustíveis tentem calcular tais emissões (*Renewable Fuel Standard – RFS* e *Low Carbon Fuel Standard – LCFS*), as abordagens de avaliação de gerenciamento de risco tem sido cada vez mais consideradas, como na Diretiva de Energias Renováveis da Europa (Europeia 2009/28/EC – *RED II*), *CORSIA (Carbon Offsetting and Reduction Scheme for International Aviation)* e *RenovaBio*. Devido à dificuldade de mensuração explícita das emissões indiretas, o *RenovaBio* não incorpora o *ILUC*, mas busca critérios de elegibilidade para evitar o uso de biocombustíveis oriundos diretamente de terras com alto teor de carbono ou áreas de desmatamento. Como alternativa, o que se vê são metodologias que buscam reduzir os riscos e, conseqüentemente, os efeitos induzidos no uso da terra.

A intensificação agrícola e, em particular, a utilização da segunda safra (cultivo duplo) podem ser estratégias que buscam conciliar a produção de matérias-primas para biocombustíveis e para outros usos da terra (WOODS et al., 2015; FEYEREISEN et al., 2013), além de diminuir o risco dos efeitos induzidos no uso da terra. Porém, os exemplos de produção de matéria-prima para biocombustíveis diretamente acoplados ao uso intensificado da terra são escassos.

No Brasil, no entanto, existe um exemplo de produção de etanol de milho que está se desdobrando na região Centro-Oeste brasileira, especificamente no estado de Mato Grosso, a

partir da rotação entre os cultivos de soja e milho segunda safra, em terras que antes cultivavam uma única safra de soja. Este sistema de produção permite aumentar a produção nas áreas agrícolas já existentes e, além disso, a produção de milho segunda safra melhora a proteção do solo e reciclagem dos nutrientes.

Ao longo dos últimos 10 anos, a produção de milho segunda safra cresceu 219% no Brasil e 274% em Mato Grosso e hoje representa 99% da produção total de milho do estado (CONAB, 2023). Esse sistema de produção é muito diferente da produção de milho em cultivo único praticada nos Estados Unidos, local onde os invernos são mais severos e, por isso, não é possível realizar a rotação entre as culturas no período de entressafra (CHADDAD, F., 2016).

Assim, o aumento da oferta de milho segunda safra no estado de Mato Grosso, a baixos preços, atraiu o olhar de investidores internacionais. A produção de etanol de milho segunda safra no Brasil tem chamado a atenção pela velocidade de expansão e pelos altos volumes de investimentos. O etanol a partir do milho tem apresentado um expressivo crescimento e já registrou um salto de 402% entre as safras 2018/19 a 2022/23. Para a safra 2023/24, espera-se um crescimento de aproximadamente 42%, atingindo uma produção de 5,6 bilhões de litros no curto prazo (CONAB, 2023; NEVES et al., 2021).

Apesar do grande potencial e rápida expansão, a indústria do etanol de milho ainda é uma novidade em solo brasileiro cujos impactos socioeconômicos e ambientais são pouco conhecidos. Neste contexto, a presente tese é o primeiro estudo que tem como principal objetivo analisar os impactos socioeconômicos e mudança do uso da terra a partir da implantação da indústria de etanol de milho segunda safra no Centro-Oeste brasileiro, tendo como referência um estudo de caso no estado de Mato Grosso (MT).

1.1. Objetivo Geral

A presente tese tem como objetivo avaliar os impactos socioeconômicos e da mudança do uso da terra no Brasil decorrentes da introdução e expansão de uma indústria de etanol de milho segunda safra, na região Centro-Oeste, especificamente no estado de Mato Grosso. Neste sentido, buscou responder a seguinte pergunta: Quais são os impactos socioeconômicos e na mudança do uso da terra no Brasil a partir da introdução e expansão da indústria etanol de milho no estado de Mato Grosso?

1.2. Objetivos Específicos

Para atender aos objetivos deste trabalho, os objetivos específicos são:

- Introduzir o setor etanol de milho na matriz de insumo-produto inter-regional, com o objetivo de analisar os impactos socioeconômicos no estado de Mato Grosso e Resto do Brasil, utilizando os seguintes indicadores: (i) Valor da Produção Setorial, (ii) Produto Interno Bruto Setorial – PIB setorial, (iii) Empregos e (iv) Impostos Indiretos Líquidos de Subsídios (IIL) e Impostos e Subsídios Diretos sobre as atividades (ID).
- Analisar um cenário alternativo de exportação do milho para a avaliação socioeconômica.
- Avaliar os efeitos sobre a mudança do uso da terra (MUT) devido à introdução do setor etanol de milho brasileiro, utilizando como ferramenta o modelo *Brazilian Land Use Model (BLUM)*.
- Estimar os impactos em produção, área e mudança de uso da terra em diferentes regiões brasileiras e nas principais atividades agropecuárias no Brasil.
- Calcular as emissões de gases do efeito estufa totais causadas pela mudança do uso da terra, incluindo o efeito induzido, *Induced Land Use Change – ILUC*, que contempla tanto efeitos diretos quanto indiretos.
- Analisar cenários alternativos a partir da análise de sensibilidade do eucalipto e *DDGS* para resultados relacionados à mudança do uso da terra.

1.3. Estrutura da tese

Para atingir o objetivo proposto, esta tese foi organizada em seis capítulos, como descrito a seguir. No Capítulo 1, apresenta-se a introdução, objetivos (geral e específicos) e estrutura da tese. No Capítulo 2 foram apresentados e discutidos de forma breve os temas que permitem contextualizar e entender o problema da pesquisa, sendo eles: (i) emissões dos gases de efeito estufa globais e no Brasil; (ii) Acordo de Paris e NDC brasileira; (iii) políticas internacionais e nacionais para biocombustíveis; e, por último, (iv) a produção de etanol e expansão da demanda por biocombustíveis. No Capítulo 3, a revisão de literatura busca apoiar esta pesquisa, trazendo

uma descrição do setor etanol de milho no Brasil, conceitos de sustentabilidade dos biocombustíveis e os impactos econômicos e sociais tanto deste novo setor como da agroindústria canavieira, para melhor compreensão do estudo.

Em seguida, no Capítulo 4, foi apresentada a metodologia de pesquisa adotada neste trabalho, com a identificação da cadeia de valor, delimitação dos cenários adotados para as análises socioeconômicas e mudança do uso da terra, acompanhada da descrição dos dois modelos utilizados, matriz de insumo-produto inter-regional e *Brazilian Land Use Model (BLUM)*.

No Capítulo 5 apresentam-se os resultados obtidos e a discussão dos principais impactos socioeconômicos e de mudança do uso da terra. Neste capítulo é fornecida uma análise detalhada dos resultados no que tange às variáveis estabelecidas anteriormente. Finalmente, o Capítulo 6 apresenta as principais conclusões desta pesquisa e indica possíveis direcionamentos para trabalhos futuros.

2 CONTEXTUALIZAÇÃO

O Acordo de Paris, assinado em 2015, é um marco no reconhecimento da urgência da transição para uma economia global de baixo carbono e os biocombustíveis são essenciais para esse processo. Neste capítulo são apresentados brevemente os principais temas que permitem contextualizar e entender o problema de pesquisa, como as emissões de gases de efeito estufa (GEE) globais e no Brasil, as principais políticas que estimulam o aumento da produção de biocombustíveis no mundo e no Brasil, os maiores produtores de etanol no mundo e a expectativa de expansão da demanda dos biocombustíveis nos próximos anos.

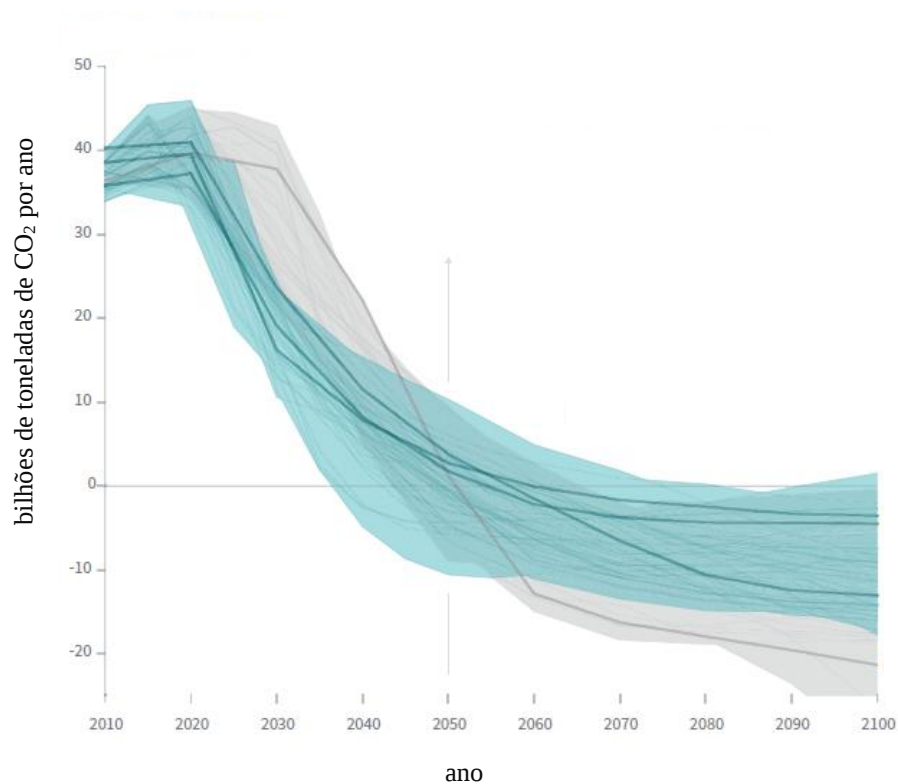
2.1 Emissões de gases de efeito estufa globais e no Brasil

O aquecimento global é uma consequência dos impactos ambientais gerados pela ação antropogênica, que vem ocasionando a cada dez anos um aumento da temperatura média global em 0,2 graus celsius (°C). Impactos já são observados e em alguns casos podem ser irreversíveis, como por exemplo a perda de ecossistemas, danos à saúde humana, ameaça à segurança alimentar, entre outros. Para garantir que o aumento da temperatura da terra se mantenha abaixo de 1,5°C, evitando impactos ambientais que causem danos irreversíveis a humanidade, principalmente em regiões mais vulneráveis, as emissões globais de CO₂ precisam diminuir cerca de 45% até 2030, em relação aos níveis de 2010 (IPCC, 2018).

Neste contexto, espera-se que a partir de 2050 as emissões de GEE globais alcancem níveis negativos ou próximo de zero (Figura 1), principalmente devido a combinação do uso intensivo de energias renováveis e tecnologias de captura e armazenamento de CO₂, como *BECCS* (do inglês, *Bioenergy with Carbon Capture and Storage*) (IPCC, 2018; IRENA, 2020b).

De acordo com IPCC (2018), existem diversos caminhos para alcançar a neutralidade das emissões de GEE globais (*zero emissions*) e limitar o aquecimento global em 1,5°C. Uma transição energética acelerada, com a substituição de fontes fósseis por renováveis, melhor eficiência energética e uso mais racional dos recursos são os caminhos mais recomendados, com menores custos (IEA, 2020; IRENA, 2020; IPCC, 2023). A adoção de ações rápidas e imediatas reduz a necessidade de medidas extremas e pode evitar mudanças climáticas irreversíveis nos próximos anos (IPCC, 2018).

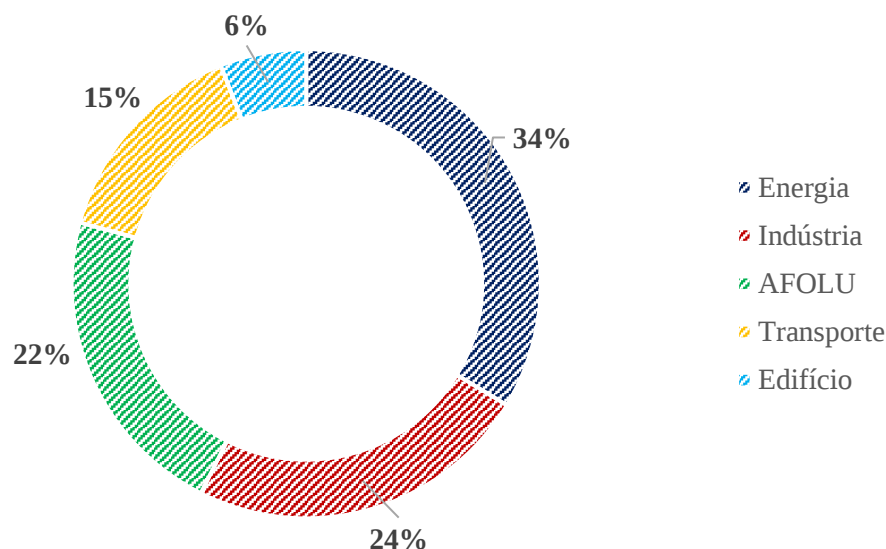
Figura 1 - Emissões líquidas totais de CO₂ em nível global



Fonte: IPCC (2018).

Em 2019, o setor oferta de energia foi responsável por 34% (20 GtCO₂e) das emissões antrópicas líquidas de GEE no mundo, 24% (14 GtCO₂e) da indústria, 22% (13 GtCO₂e) da agricultura, floresta e outros usos da terra (*Agriculture, Forestry and Other Land Use - AFOLU*), 15% (8,7 GtCO₂e) do setor de transporte e 6% (3,3 GtCO₂e) de edifícios. Se as emissões de GEE da eletricidade e produção de calor forem atribuídas aos setores que utilizam a energia final, 90% dessas emissões indiretas são alocadas para os setores da indústria e edifícios, aumentando suas quotas relativas às emissões de GEE de 24% para 34% e de 6% para 16%, respectivamente. Depois de realocar as emissões de produção de eletricidade e calor, o setor de fornecimento de energia é responsável por 12% das emissões antrópicas globais de GEE (Figura 2) (IPCC, 2022).

Figura 2 - Participação dos setores nas emissões de GEE mundiais



Fonte: Elaboração própria a partir de IPCC (2022).

No Brasil, por outro lado, o setor de energia é o terceiro que mais contribui com as emissões de GEE, atrás dos setores agropecuária e uso do solo, mudança do uso da terra e florestas (do inglês, *Land Use, Land Use Change and Forestry – LULUCF*³) (Figura 3). A importância relativa desses dois setores também depende do controle de desmatamento, fator com grande participação nas emissões de GEE totais brasileiras. Estimativas anuais das emissões nacionais de GEE estão disponíveis para o período de 1990 a 2021 e evidenciam reduções das emissões de GEE, comparada aos níveis de 2003. A maior parte da redução está diretamente relacionada à queda do desmatamento, à criação de áreas protegidas e à adoção de tecnologias de baixo carbono.

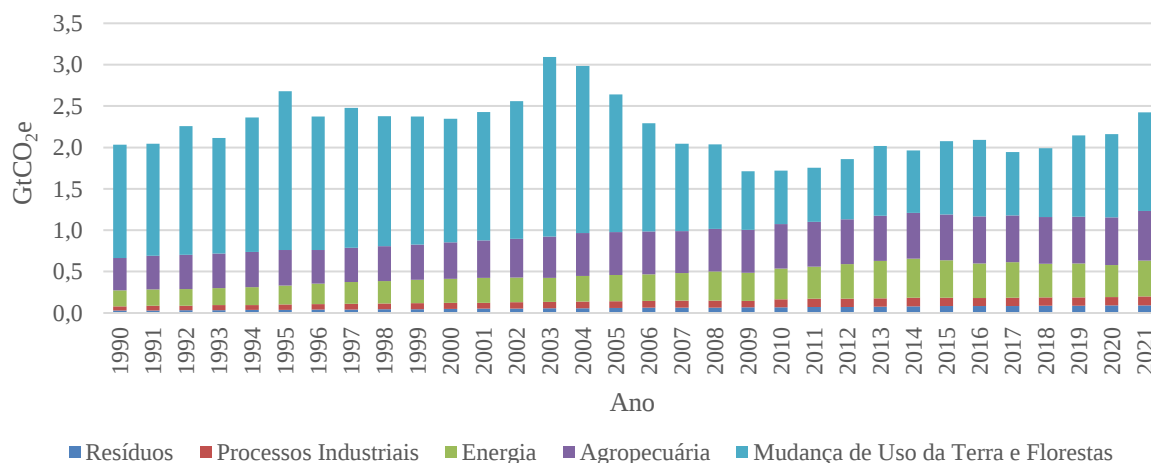
A alta participação das energias renováveis na matriz energética brasileira (44,7%) (EPE, 2022a) e o desenvolvimento tecnológico da agricultura, como a intensificação da pecuária, plantio direto e eliminação da queima da cana-de-açúcar por exemplo, tem contribuído significativamente para redução das emissões de GEE. Porém, em 2021 as emissões de GEE no Brasil aumentaram 12% comparado a 2020, atingindo 2,42 bilhões de toneladas de CO₂ equivalente (GtCO₂e) contra 2,2 bilhões de toneladas de CO₂e em 2020 (SEEG, 2023).

O nível de emissões de GEE verificado em 2021 é o maior desde o ano de 2005, principalmente devido ao aumento de 18% das emissões de GEE no setor mudança do uso da

³ Sigla do inglês, LULUCF - *Land Use, Land-Use Change and Forestry*, pode ser definida como um inventário de GEE que abrange as emissões e remoções de GEE resultantes do uso direto da terra, mudanças de uso do solo e atividades florestais induzidos pela ação do homem (UNFCCC, 2020).

terra e florestas comparado a 2020 (Figura 3), com participação de 49% nas emissões totais de GEE do Brasil. O principal fator de elevação das emissões de GEE foi o desmatamento, especialmente na Amazônia e no Cerrado.

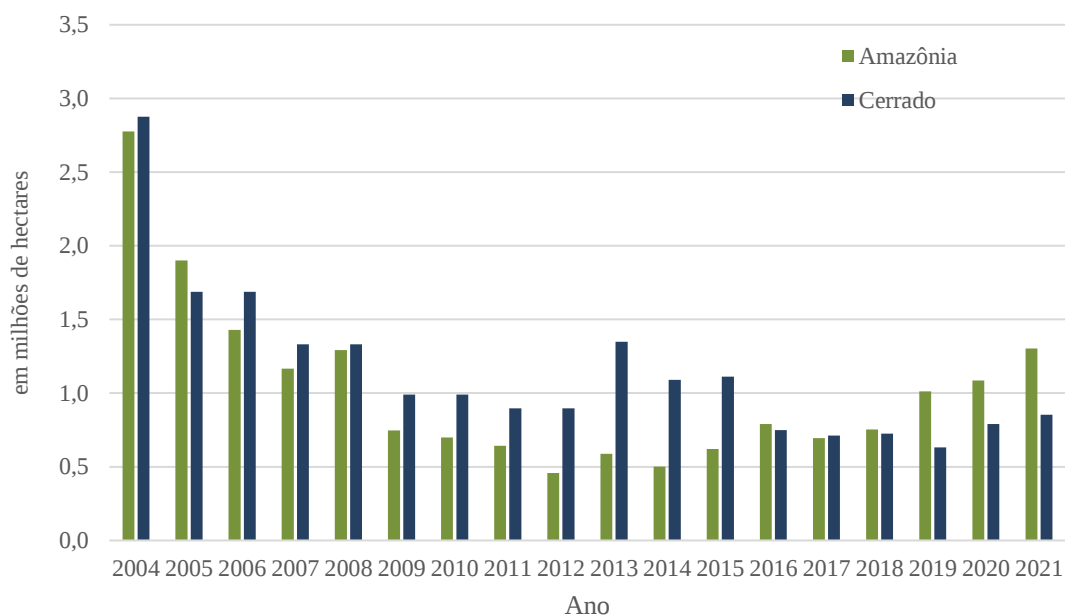
Figura 3 – Emissões de GEE totais no Brasil por setor (GWP-100, AR5), 1990-2021



Fonte: Elaboração própria a partir de SEEG (2023).

Ao olhar especificamente para a evolução dos índices de desmatamento na Amazônia e Cerrado (Figura 4) observa-se que a taxa histórica diminuiu drasticamente após ter atingido seu pico em 2004 para o nível mais baixo observado, em 2012. Ao longo dos últimos anos, o governo brasileiro colocou em prática um conjunto de estratégias, como a criação de novas áreas de proteção, com diferentes níveis de restrição, melhores interações entre órgãos governamentais e vigilância por satélite para monitorar e indicar áreas específicas de foco de desmatamento, com resultados efetivos (GANDOUR et al., 2013; NEPSTAD et al., 2014).

Desde 2012 os índices totais de desmatamento nesses dois biomas vem oscilando em torno de 1,6 milhões de hectares por ano. Os índices atuais de desmatamento são 53% e 70% menores em 2021 comparado a 2004, na Amazônia e no Cerrado, respectivamente. Porém, apesar dos esforços para reduzir o desmatamento, os últimos três anos de dados disponíveis mostram um aumento no índice de desmatamento tanto na Amazônia quanto no Cerrado (INPE, 2023; INPE, 2023b).

Figura 4 - Desmatamento nos Biomas da Amazônia e do Cerrado entre 2004-2021

Fonte: Elaboração própria a partir de INPE (2023) e INPE (2023b).

A partir das duas figuras apresentadas acima (Figura 3 e 4), nota-se que o nível das emissões de GEE do setor mudança do uso da terra e florestas está diretamente relacionado ao aumento do desmatamento nos biomas da Amazônia e do Cerrado. Para reduzir as emissões de GEE em nível nacional é necessário melhorar o desempenho neste setor, principalmente o controle e queda do desmatamento. Para isso, são necessários instrumentos e estratégias efetivas para uma redução virtuosa nas emissões de GEE do país.

2.2 Acordo de Paris e NDC brasileira

Em dezembro 2015, durante a 21ª Conferência das Partes da Convenção-Quadro das Nações Unidas sobre Mudanças Climáticas (COP21 – UNFCCC), foi aprovado o Acordo de Paris e assinado por 195 países e a União Europeia (UE), com o objetivo de manter o aquecimento global abaixo de 2°C até 2030 e limitar o aumento da temperatura a 1,5°C em relação aos níveis pré-indutriais. Para alcançar os objetivos do Acordo, os países participantes apresentaram os seus compromissos para a redução de emissões de GEE em formato de Contribuição Nacionalmente Pretendida (ONU, 2015).

A maioria dos países prioriza reduções no setor de energia devido a participação de 34% nas emissões de GEE globais (IPCC, 2022). Os principais caminhos utilizados para reduzir as emissões de GEE são o uso sustentável de bioenergia, medidas relacionadas a mudança do uso

da terra e florestas, além do aumento significativo de energias renováveis na matriz global até 2050 (CARVALHO et al., 2020). A descarbonização do setor de energia é essencial para atingir a meta de limitar o aumento da temperatura global em 2°C.

No Brasil, após o processo de consulta pública, que antes havia apresentado sua intenção pretendida, ao longo de 2016 passou por ratificação e aprovação do Acordo de Paris. Em setembro de 2016, com o depósito do instrumento de ratificação do Acordo pelo Brasil, a contribuição deixou de ser “pretendida” nos termos do parágrafo 22 da Decisão 1/CP21 (MMA, 2017) e agora passa a ser Contribuição Nacionalmente Determinada (sigla do inglês, *Nationally Determined Contribution - NDC*).

Em 2022 o Brasil reafirmou através da NDC brasileira o compromisso de reduzir as emissões líquidas totais de GEE em 37% em 2025, tendo como base os níveis de referência de 2005. Adicionalmente, o país assume o compromisso de reduzir em 50% as emissões de GEE, até 2030. A NDC brasileira revisada enuncia o objetivo indicativo de atingir neutralidade climática – ou seja, emissões líquidas nulas - em 2050. Para alcançar as metas propostas de redução das emissões de GEE, a NDC tem um escopo amplo, prevendo-se a implementação de ações de mitigação e adaptação à mudança do clima (BRASIL, 2022).

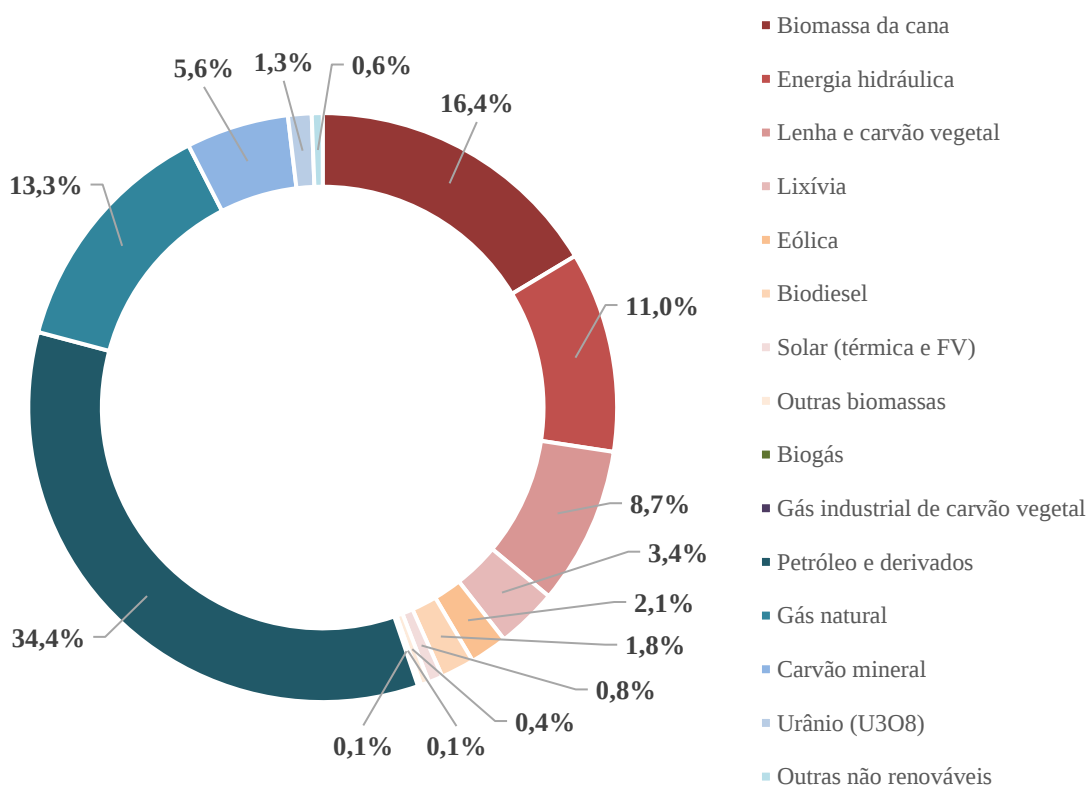
Na primeira NDC apresentada pelo Brasil, estavam descritas as medidas adotadas no setor florestal e de mudança do uso da terra (LULUCF), fortalecendo o cumprimento do Código Florestal (CF), restaurando e reflorestando 12 milhões de hectares de terras degradadas em território nacional (para múltiplos usos), ampliando a escala de sistemas de manejo sustentável de florestas nativas, além de zerar o desmatamento em território nacional (BRASIL, 2015).

Com relação ao setor energético, apesar de não estar explicitado na NDC revisada, a primeira versão havia descrito de forma quantitativa algumas metas, como: (i) aumentar a participação de bioenergia sustentável na matriz energética brasileira para cerca de 18% até 2030⁴; (ii) alcançar 10% de ganhos de eficiência no setor elétrico e 45% de energias renováveis na matriz energética até 2030; (iii) aumentar a parcela de energias renováveis (além da hídrica) na geração de energia elétrica, saindo de 21,3% em 2021 (EPE, 2022) para pelo menos 23% até 2030, incluindo o aumento da participação de energia eólica, outras biomassas e solar; (iv) além de expandir o uso de energias renováveis não hídricas na matriz energética total para entre 28% e 33% até 2030 (BRASIL, 2015).

⁴ Aumento da oferta de etanol (saindo de 31,3 bilhões de litros na safra 2022/23 para 39-50 bilhões de litros), inclusive por meio do aumento da parcela de biocombustíveis avançados (segunda geração) e o aumento do teor de biodiesel na mistura do diesel.

De acordo com dados do Balanço Energético Nacional (BEN) de 2022 (ano base 2021), a participação da bioenergia na Oferta Interna de Energia (OIE) no Brasil já está em aproximadamente 19%, ou seja, acima do compromisso assumido de aumentar a participação para cerca de 18% até 2030. As fontes de biomassa de cana-de-açúcar (16,4%), biodiesel (1,85%), outras biomassas (0,45%) e biogás (0,12%) são biomassas com caráter sustentável. Na Figura 5 abaixo pode ser visto que a OIE no Brasil tem grande participação das fontes renováveis, mas o petróleo e derivados (34,4%), gás natural (13,3%), carvão mineral (5,6%), urânio (1,3%) e outras não renováveis (0,6%) ainda tem grande representatividade (EPE, 2022).

Figura 5 - Repartição da oferta interna de energia no Brasil



Fonte: Elaboração própria a partir de EPE (2022).

De acordo com os valores apresentados acima na Figura 5 é possível notar como os 18% presentes na primeira versão da NDC brasileira para o atendimento ao Acordo de Paris já são uma realidade. O grande desafio para os próximos anos é aumentar a produção de fontes bioenergéticas de maneira sustentável para garantir que a proporção de 18% se mantenha até 2025/2030, dado o crescimento na demanda de energia que acarretará a necessidade de ampliação da oferta.

consumo, reduzir em 20% as emissões de CO₂ e aumentar a eficiência energética em 20% (UNIÃO EUROPEIA, 2008).

O ano de 2020 marcou o início da Diretiva de Energia Renovável (*RED II*), revisada e válida até 2030. A União Europeia estabeleceu uma meta de aumentar o uso de fonte renovável no transporte, saindo de 10% em 2020 para 14% até 2030, dando maior incentivo para os biocombustíveis avançados (USDA, 2019b). No entanto, a partir dos resultados existentes do RED, verifica-se que poucos países conseguiram atingir a meta de 2020 (EEA, 2020).

Além do *RED II*, está vigente o *Green Deal* ou Pacto Ecológico Europeu que tem como objetivo tornar a economia da União Europeia sustentável a partir de medidas em diversas frentes de atuação, como na indústria, nas construções, incluindo a descarbonização do setor de energia, implementação de formas mais limpas no transporte público e privado e investimento em tecnologias não prejudiciais ao meio ambiente (UNIÃO EUROPEIA, 2020).

No contexto norte-americano, especificamente nos Estados Unidos, a primeira política pública aprovada em 2009 e implementada em 2011, *Low Carbon Fuel Standard (LCFS)*, é uma das principais, em contexto internacional, para promoção de biocombustíveis. O Programa *LCFS* se concentra na redução das emissões de GEE por meio da análise da composição dos combustíveis de transportes e redução da intensidade de carbono (do inglês, *Carbon Intensity – CI*), baseado no ciclo de vida do combustível (CARB, 2020).

O propósito da *LCFS* é encorajar a produção e o uso de combustíveis de transporte de baixo carbono dentro da Califórnia, de forma a reduzir as emissões de GEE, com padrões de emissão mais restritivas do que aquele estabelecido pela política federal norte-americana, o (*Renewable Fuel Standard*). O *LCFS* foi atualizado e alterações foram feitas no regulamento, que incluíam uma suavização dos *benchmarks* da intensidade de carbono até 2030 em linha com a meta de redução de emissões de GEE da Califórnia, adicionando novas oportunidade de crédito para promover a adoção de veículos com emissão zero, combustíveis alternativos para o setor de aviação, captura e sequestro de carbono e tecnologias avançadas para profunda descarbonização no setor de transporte (CARB, 2020).

Antes da *LCFS* e criado sob a *Energy Policy Act (EPAct)*, o *Renewable Fuel Standard (RFS)* é uma política nacional que requer um certo volume de combustível renovável para substituir ou reduzir a quantidade de combustível fóssil. A promulgação do *Energy Independence and Security Act (EISA)* de 2007 aumentou significativamente o tamanho do programa e incluiu mudanças importantes como o aumento das metas de 2022 para 36 bilhões de galões de combustível renovável, adicionando definições explícitas para qualificar combustíveis renováveis (por exemplo, emissões de GEE) e entre outros (EPA, 2023).

Para atender aos objetivos do *RFS*, são utilizados os *Renewable Identification Numbers (RINs)*, um certificado comercializado entre os agentes de mercado. Este certificado deve ser comprado pela parte obrigada, que são as refinarias e importadores de gasolina ou óleo diesel (responsáveis por efetuar as misturas de combustíveis e biocombustíveis) que devem cumprir com a meta de redução das emissões de GEE (EPA, 2023).

Ademais, dentro de um ambiente multilateral, vários atores e países discutem a sustentabilidade do setor e dos biocombustíveis. Como exemplo, o *CORSIA (Carbon Offsetting and Reduction Scheme for International Aviation)* é uma política internacional desenvolvida pela *ICAO (International Civil Aviation Organization)*, que tem direcionado esforços para reduzir a emissão de GEE para a aviação mundial.

As ações têm como objetivo minimizar o efeito adverso da aviação civil no meio ambiente e incluir estratégias para limitar ou reduzir o impacto dos GEE da aviação no clima global. Os elementos-chave são: o uso de biocombustíveis sustentáveis e ganhos de eficiência e, dentro das soluções apresentadas, até o momento, a substituição de combustíveis fósseis por renováveis é a principal solução para o setor (ICAO, 2020).

Na Ásia, o Ministério do Petróleo e Gás Natural da Índia publicou uma Política Nacional de Biocombustíveis em 2018, com o objetivo de reduzir a importação de produtos à base de petróleo, fomentando a produção doméstica de biocombustíveis. A emenda sofreu alteração em 2022 e reforça as iniciativas para aumentar a produção doméstica de etanol e acelerar os esforços para atingir as metas de mistura (E20 até 2025). A Política Nacional de Biocombustíveis continua sendo a diretiva central que rege o uso e comércio do etanol no país. A Índia provavelmente alcançará o E10 (adoção de mistura obrigatória de 10% de etanol à gasolina) em 2022/23 (USDA, 2022).

Já na China, a corrida para melhorar a qualidade do ar está emergindo como principal fator para a expansão da produção e uso de etanol combustível. Apesar das dificuldades políticas e falta de incentivo, o país alcança uma taxa de mistura de 5%, embora o E10 continue sendo a política oficial (USDA, 2022b). Ainda no continente asiático, o Japão está em processo de atualização do *Biofuel Standards* para 2023-2027. Em maio de 2022, o Japão se comprometeu a tomar todas as medidas disponíveis para dobrar a demanda por etanol até 2030, tendo como principal foco aumentar a produção de biocombustíveis de aviação (USDA, 2022c; USDA, 2023).

Países africanos já possuem programa para biocombustíveis e adotam mistura à gasolina, entre eles: Angola, Etiópia, Quênia, Malawi, África do Sul, Uganda, Zimbábue, entre outros. Em cada país, a adoção de mistura de etanol à gasolina se apresenta com participações

diferentes, majoritariamente entre E2 e E10, com possibilidade de aumento nos próximos anos. Dessa forma, o etanol surge como uma oportunidade de acesso mais amplo à energia, com possibilidade de aumento da geração de eletricidade e substituição do combustível fóssil líquido (TRINDADE et al., 2019; SOUZA et al., 2016).

Alguns países da América Latina, além do Brasil, também possuem programas para biocombustíveis, sendo Argentina, Bolívia, Colômbia, Costa Rica, Equador, México, Paraguai, Peru e Uruguai. Há muitos anos, países em desenvolvimento tomaram iniciativas pioneiras e programas nacionais de mistura de etanol à gasolina.

Em território brasileiro, a liderança no segmento de biocombustível está diretamente relacionada ao Programa Nacional do Álcool (Proálcool), que teve início em 1975, sendo o peso do petróleo na balança de pagamentos do país e a segurança energética, os principais motivadores para a criação do programa. Na época, o Brasil importava 80% do petróleo que consumia, muito dependente de fonte externa. Porém, embora o Brasil tenha se destacado na produção de biocombustível com o Proálcool, em 1990 o programa entrou em colapso, principalmente devido à queda dos preços do petróleo, impactando a competitividade do etanol (CRUZ et al., 2012; IPEA, 2016).

Atualmente, destaca-se o RenovaBio - Política Nacional de Biocombustíveis, criada em 2016, lançada em 2017 e iniciada em 2020. Aprovada por meio da Lei federal nº 13.576/2017, seu objetivo é reduzir as emissões de GEE no setor de transportes e reconhecer o papel dos biocombustíveis como instrumento de descarbonização da matriz de transportes brasileira, em linha com as metas de redução das emissões de GEE assumidas pelo Brasil no âmbito do Acordo de Paris.

O principal instrumento do RenovaBio, juntamente com a NDC brasileira, é o estabelecimento de metas nacionais anuais de descarbonização para o setor de biocombustíveis, de forma a incentivar o aumento da produção e participação de bioenergia sustentável na matriz energética de transporte do país. As metas nacionais de redução de emissões de GEE para a matriz de combustíveis foram definidas para o período de 2019 a 2029 pela Resolução CNPE nº15, de 24 de junho de 2019 (ANP, 2017).

Além disso, o RenovaBio visa assegurar maior previsibilidade para a participação competitiva dos diversos biocombustíveis no mercado nacional de combustíveis, induzindo ganhos de eficiência energética. Adicionalmente, busca possibilitar a redução das emissões de gases causadores do efeito estufa no processo de produção, comercialização e utilização de biocombustíveis, por meio de mecanismos de avaliação de ciclo de vida (ACV), calculados na RenovaCalc.

A RenovaCalc é uma ferramenta que funciona como uma calculadora para a comprovação do desempenho ambiental da produção de biocombustíveis pelas usinas. Seu benefício econômico é obtido com base num programa de certificação que permite o reconhecimento individual de seu desempenho ambiental, tendo como base dois pilares: critérios de elegibilidade e redução de emissões de GEE comparado ao combustível fóssil (ANP, 2017).

Dentre os critérios de elegibilidade incluem-se restrições a qualquer tipo de supressão direta de vegetação natural a partir de agosto de 2018, em todos os biomas brasileiros e cumprimento do Código Florestal (CF), apresentando a regularidade do Cadastro Ambiental Rural (CAR). Todos os produtores agrícolas (cana-de-açúcar, milho, soja e entre outros) devem demonstrar conformidade, combinando informações de imagens de satélite com dados de localização georreferenciada da fazenda, comprovando a correta atuação no programa. O processo de certificação é avaliado por firmas inspetoras credenciadas junto a Agência Nacional do Petróleo, Gás Natural e Biocombustíveis (ANP) (MOREIRA et al., 2018; MATSUURA et al., 2018).

O governo estabelece metas de redução para as distribuidoras de combustíveis, esperando uma expansão ainda maior na produção de biocombustíveis, onde suas unidades de produção emitem os Créditos de Descarbonização (CBIO)⁵, um ativo financeiro cujo valor corresponde à intensidade de carbono do biocombustível produzido. Os CBIOs são emitidos por produtores de biocombustíveis e comprados por distribuidoras de combustíveis negociados na bolsa de valores (GRASSI et al., 2019).

As metas nacionais estabelecidas pelo Conselho Nacional de Política Energética (CNPE) serão anualmente desdobradas em metas individuais compulsórias para os distribuidores de combustíveis, conforme suas participações no mercado de combustíveis fósseis, nos termos da Resolução ANP nº 791/2019, de junho de 2019. As distribuidoras de combustíveis deverão comprovar o cumprimento das metas individuais compulsórias por meio da compra e aposentadoria de CBIOs (ANP, 2017).

No dia 27 de abril de 2020 foi iniciada a comercialização e o registro do CBIO na bolsa de valores, B3 – Brasil, Bolsa, Balcão. Todo investidor, nacional ou internacional, pode adquirir o CBIO, que corresponde a uma tonelada de gás carbônico equivalente, calculada a partir da

⁵ Os CBIOs são gerados a partir da venda de biocombustíveis no mercado interno e de forma proporcional à nota de eficiência energética – o quanto o renovável “economiza” em emissões de gases-estufa em comparação ao combustível fóssil corrente – daquele produto. Este é um mecanismo de comercialização de créditos de carbono que recompensa os produtores de biocombustíveis mais eficientes.

diferença entre as emissões de GEE no ciclo de vida de um biocombustível e as emissões de GEE do combustível fóssil de referência substituto (MATSUURA et al., 2018).

O primeiro ano de vigência do RenovaBio coincidiu com o cenário imprevisível da pandemia do Coronavírus (COVID-19), que impactou o mercado de combustíveis e a comercialização dos CBIOS, devido ao deslocamento no mercado de combustível. Assim, o Ministério de Minas e Energia (MME) iniciou uma consulta pública para estabelecer novas metas do Programa RenovaBio e, em agosto de 2020, o CNPE aprovou uma resolução que estabeleceu novas metas compulsórias anuais de redução de emissões de GEE da Política Nacional de Biocombustíveis (MME, 2021).

A nova proposta, resultou no ajuste das metas obrigatórias de forma a acomodar o novo cenário, com redução para 14,9 milhões de CBIOS. Trata-se de uma diminuição de quase 50% em relação ao objetivo anterior. Essas metas são referentes às compras compulsórias de CBIOS, que devem ser realizadas pelas distribuidoras de combustíveis. Além da redução para 2020, os objetivos para os próximos anos também sofreram alteração. A meta para 2021, diminuiu para 24,86 milhões de CBIOS, redução de aproximadamente 40%. O objetivo das reduções é acompanhar o movimento do mercado, considerando os recentes impactos da pandemia de COVID-19 no setor de biocombustíveis para curto e médio prazos (MME, 2021; ANP, 2021).

A meta estabelecida para o ano de 2022 foi de 35,98 milhões de CBIOS e para 2023 em 37,47 milhões de CBIOS (ANP, 2022). Em dezembro de 2022, o Conselho Nacional de Política Energética (CNPE) aprovou a resolução que define metas compulsórias anuais de redução de emissões de GEE para a comercialização de combustíveis para o período entre 2023 e 2032, alcançando uma meta anual de 99,22 milhões de CBIOS em 2032 (MME, 2022).

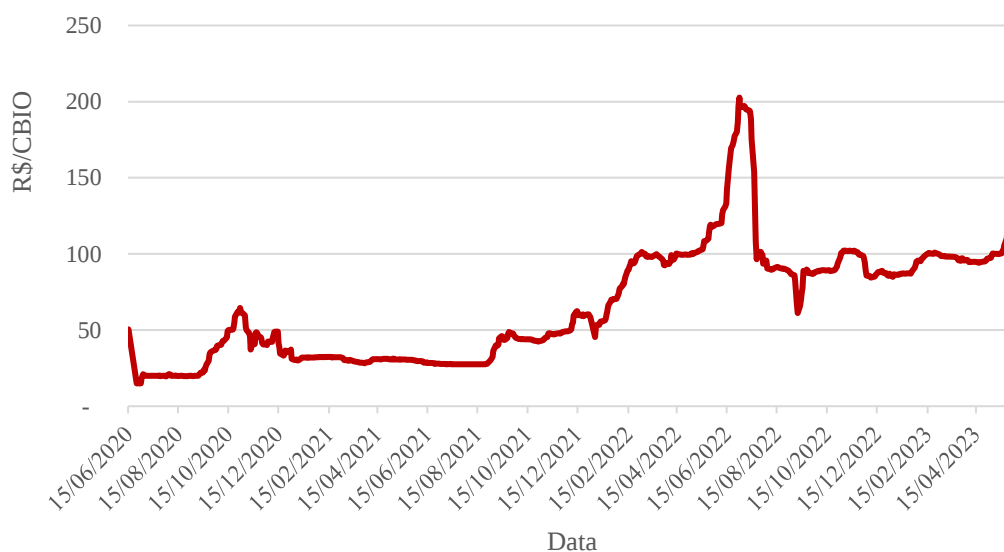
Apesar da grande incerteza do mercado, o ano de 2020 finalizou com uma geração de CBIOS superior à meta obrigatória estabelecida na nova proposta, o que demonstra que o dimensionamento na revisão do objetivo foi assertivo. Paralelamente ao processo de revisão das metas do Programa RenovaBio, no dia 15 de junho de 2020, os primeiros CBIOS foram negociados a um preço médio de R\$ 50,50, por uma parte não-obrigada⁶ (B3, 2020). Antes do início do Programa e conforme modelagem do Ministério de Minas e Energia, esperava-se que o CBIO atingisse o valor de US\$ 10 ou R\$ 34 por tonelada de carbono (considerando uma taxa de câmbio de R\$ 3,40) (MME, 2018b).

⁶ A parte não-obrigada são aqueles agentes, como pessoas jurídicas ou físicas, que não tem obrigação de comprar CBIOS para cumprimento de meta. Os agentes obrigados a adquirir CBIOS são os distribuidores de combustíveis fósseis. Já os agentes não obrigados são pessoas jurídicas ou físicas interessadas em mitigar suas emissões de GEE.

A comercialização tomou maior tração após a divulgação das metas revisadas, quando o mercado ganhou maior liquidez. Neste período, o preço do CBIO atingiu R\$ 72 (B3, 2023). Porém, em 2020, o preço médio ponderado fechou em R\$ 43 por CBIO e o maior volume foi observado no final de outubro, quando o preço atingiu cerca de R\$ 65 por CBIO (EPE, 2021b). Mesmo em um cenário de incerteza, o primeiro ano de vigência do RenovaBio foi concluído com 97,6% da meta cumprida, 18,7 milhões de CBIOs emitidos a um preço médio de R\$ 41,25 e 14,16 milhões de CBIOs aposentados.

No início de 2021 o preço do CBIO estava praticamente estagnado, porém no final do ano observa-se um movimento crescente, atingindo o pico em junho de 2022 (Figura 7). Desde a implantação das negociações, os CBIOs foram vendidos entre R\$ 15 e R\$ 209 (B3, 2023). Em agosto de 2022 os preços dos créditos de descarbonização entraram em queda após o adiamento do prazo para cumprimento das metas daquele ano, que passou de dezembro de 2022 para setembro de 2023 (BRASIL, 2023).

Figura 7 – Evolução do preço do CBIO entre 2020 e 2023



Fonte: Elaboração própria a partir de B3 (2023).

No horizonte decenal, espera-se esforços direcionados pelo setor com vistas à melhoria dos fatores de produção, adicionados aos sinais positivos provenientes do RenovaBio e políticas internacionais. No entanto, para que essa expansão da produção de biocombustíveis não provoque conversão de área de vegetação nativa ou agrícola, deve-se priorizar o desenvolvimento de estratégias alternativas para a expansão da produção de cana-de-açúcar e milho.

2.4 A produção de etanol e expansão da demanda por biocombustíveis

A produção global de biocombustíveis tem aumentado continuamente desde a última década (USMANI, 2023; CORTEZ et al., 2023). Atualmente, a produção mundial de etanol está concentrada nos Estados Unidos (53%), seguida do Brasil, que ocupa a segunda posição de maior produtor (30%). Em 2021, os Estados Unidos (EUA) produziram aproximadamente 59 bilhões de litros de etanol (USDA, 2023) e o Brasil, encerrou a safra 2022/23 com 31,3 bilhões de litros (CONAB, 2023).

O etanol foi o primeiro candidato como combustível veicular ao invés da gasolina. No Brasil já em 1925 havia uma Lei Federal que tornava obrigatória a mistura de etanol à gasolina (ROTHMAN, GREENSHIELDS, & ROSILLO-CALLE, 1983). O Brasil se transformou em um dos maiores produtores de etanol do mundo, principalmente, devido à implementação de políticas nacionais, com início do Proálcool e consolidação dos carros *flexfuel*⁷ (lançados em 2003). Desde 2015, o percentual de mistura obrigatória do etanol na gasolina encontra-se entre 18% e 27,5%. No entanto, apesar da constante crescente, exceto para 2020 devido à pandemia COVID-19, a produção do biocombustível nos EUA tem aumentado mais rapidamente quando comparado ao Brasil, que em alguns períodos tem importado etanol de milho norte-americano.

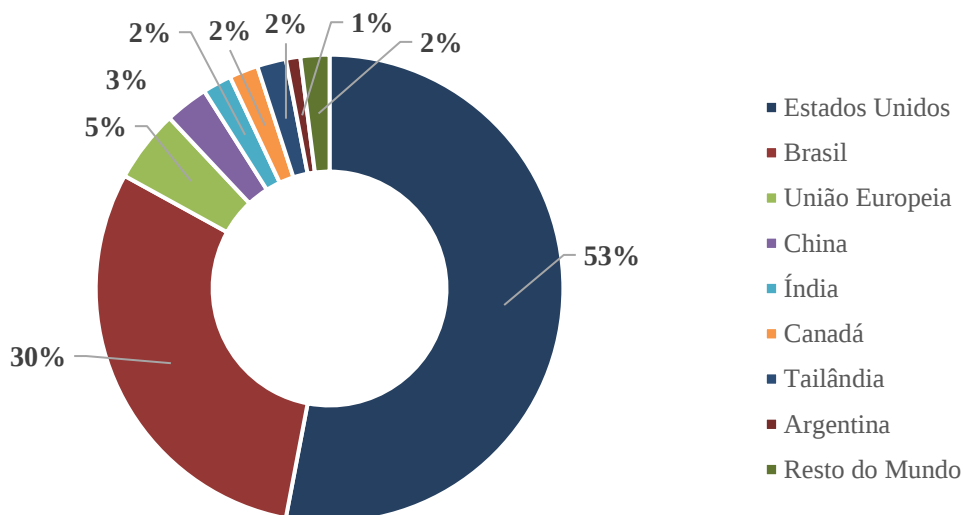
Os países que compõe a União Europeia (UE) respondem pela terceira maior eficiência produtiva mundial de etanol (5%) e, as expectativas são de que a produção, as importações e o consumo de etanol na UE se mantenham constantes (EC, 2019; CORTEZ et al., 2023). Outro aspecto importante que deve limitar o mercado de etanol na UE é a restrição da utilização de biocombustíveis à base de culturas alimentícias, regra estabelecida pela Diretiva de Energia Renovável da UE (*RED II*).

A China é o quarto maior produtor mundial de etanol (3%), porém, as expectativas são de que a demanda seja arrefecida devido a não prioridade da política de biocombustíveis e consequente queda dos investimentos no setor (USDA, 2022b). A Índia ocupa a posição de quinto maior produtor mundial de etanol (2%) e possui uma política nacional de biocombustíveis que entrou em vigor em 2018. Em 2022, o Gabinete da União aprovou oficialmente as alterações na Política Nacional de Biocombustíveis (PNB), que formalizam o avanço do mercado indiano para E20 até 2025, permitindo a exportação de biocombustíveis em casos específicos e medidas para aumentar a produção nacional de biocombustíveis. A Índia

⁷ Tecnologia que permite que veículos *flex* utilizem como combustível a gasolina ou álcool em qualquer proporção de mistura.

provavelmente alcançará E10 na safra 2022/23 (USDA, 2022). Na Figura 8 abaixo encontram-se os principais produtores de etanol no mundo, em 2021.

Figura 8 – Principais produtores de etanol em 2021



Fonte: Elaboração própria a partir de RFA (2023).

De acordo com os cenários apresentados pela Agência Internacional de Energia (do inglês, *International Energy Agency – IEA*) as energias renováveis continuam com uma rápida ascensão, expandindo-se mais rapidamente do que qualquer outra fonte de energia. O aumento das energias renováveis em todo o mundo supera o crescimento da demanda até 2030, diminuindo a participação da geração de combustível fóssil. O uso de biocombustível aumenta para 5,5 milhões de barris de petróleo equivalente em 2030, frente aos 2,2 milhões de barris de petróleo equivalente de 2021, auxiliado pela adoção mais ampla das misturas (IEA, 2022).

Segundo dados publicados pela *IEA* e *Food and Agriculture Organization of the United Nations (OCDE/FAO)*, o consumo de etanol em 2030 deve ser liderado principalmente pelos Estados Unidos e Brasil. Estes dois países juntos, continuarão sendo responsáveis por mais de 80% de todo o etanol consumido globalmente (OCDE/FAO, 2020; IEA, 2019). De acordo com IRENA (2020), para alcançar a transformação energética, a demanda global por biocombustíveis deve sair de 136 bilhões de litros em 2019 para 378 bilhões de litros por ano em 2030 e 652 bilhões de litros por ano em 2050 (IRENA, 2020b), aumento de aproximadamente 80%.

Além disso, os biocombustíveis serão utilizados por modais de transporte mais difíceis de serem descarbonizados (IPCC, 2018). No setor de aviação, por exemplo, esforços estão

sendo direcionados para reduzir a emissão de GEE para aviação internacional. A meta de 50% de redução das emissões de GEE do setor provavelmente exigirá mais de 100 bilhões de litros por ano de *Sustainable Aviation Fuel (SAF)* até 2050. Para a substituição total do querosene de aviação convencional por *SAF* no mercado internacional, seriam exigidos entre 460 e 730 bilhões de litros, no período entre 2020 e 2050 (assumindo uma fração de 50% de *SAF*) (IRENA, 2021).

No Brasil, de acordo com projeções da Empresa de Pesquisa Energética (EPE), a demanda por combustíveis de ciclo Otto⁸ deve aumentar para todas as fontes até 2032, atingindo 60,8 bilhões de litros de gasolina equivalente (EPE, 2022b). Para biodiesel, projeta-se crescimento e pode atingir 12,1 bilhões de litros em 2032. Especificamente para o etanol brasileiro, projeções indicam um aumento potencial da produção entre 21 % e 40% da quantidade produzida na safra 2022/2023⁹ (EPE, 2022).

A demanda por biocombustíveis no Brasil está diretamente relacionada a frota de veículos. Entre 2010-2022, a quantidade de carros *flexfuel* aumentou de 40,9% para 74,4%, com volume recorde para a série histórica. Por outro lado, os veículos movidos apenas a gasolina, diminuíram a participação na frota total, caindo de 47,5% em 2010 para 13,5% em 2022 (SINDIPEÇAS, 2023).

Para os próximos anos, a previsão de demanda por veículos leves no Brasil indica um crescimento ainda maior dos modelos *flexfuel*. A trajetória de licenciamento considerada resulta em um incremento da frota nacional circulante ciclo Otto, que cresce a uma taxa média anual de 2,2% entre 2021 e 2032, atingindo a marca de 47,3 milhões de unidades no final do período. Os veículos *flex* representarão 89% desta frota (EPE, 2022b).

A expansão da produção de biocombustíveis, incentivada pelas políticas e acordos nacionais e internacionais gera, há mais de 10 anos, questionamentos quanto ao seu desempenho ambiental, principalmente devido à possível conversão de área de vegetação nativa ou agrícola em áreas de cana-de-açúcar e/ou soja, que podem afetar negativamente as emissões de GEE resultantes da mudança do uso da terra (direta e indireta) (ALKIMIM et al., 2015; BERNDES et al., 2016; EGESKOG et al., 2014; LAPOLA et al., 2010; SEARCHINGER et al., 2008). Este tema e as discussões relacionadas são apresentadas na próxima seção.

⁸ Ciclo Otto é o ciclo termodinâmico que representa o funcionamento de motores de combustão interna.

⁹ Produção de etanol total (cana-de-açúcar e milho) na safra 2022/2023: aproximadamente 31,3 bilhões de litros (CONAB, 2023).

3 DESCRIÇÃO DA INDÚSTRIA ETANOL DE MILHO NO BRASIL E REVISÃO DE LITERATURA

A revisão de literatura busca apoiar esta pesquisa, trazendo informações do setor de etanol de milho no Brasil, sua recente história e potencial de expansão, conceitos de sustentabilidade dos biocombustíveis e outros estudos complementares que podem auxiliar na compreensão do objeto de pesquisa. Para isso, foram introduzidos, além dos conceitos de mudança do uso da terra, *Induced Land Use Change – ILUC*, que contempla tanto efeitos diretos quanto indiretos, e impactos socioeconômicos, outros temas importantes como a evolução e crescimento do setor etanol de milho brasileiro, pegada de carbono, alimentos versus combustíveis e sustentabilidade.

3.1 Etanol de milho no Brasil

O etanol de milho no Brasil tem chamado a atenção pela velocidade de expansão, expectativa de crescimento e volume de investimentos, impulsionado pelo Programa RenovaBio (após 2017). Nos últimos seis anos, os investimentos no setor etanol de milho brasileiro foram da ordem de R\$ 15 bilhões e outros R\$ 15 bilhões devem ser investidos até 2030, de acordo com a União Nacional do Etanol de Milho (UNEM). Embora, a tecnologia de conversão de milho em etanol e outros coprodutos seja dominante nos Estados Unidos (EUA), vem ganhando força em território brasileiro (MOREIRA & ARANTES, 2018b).

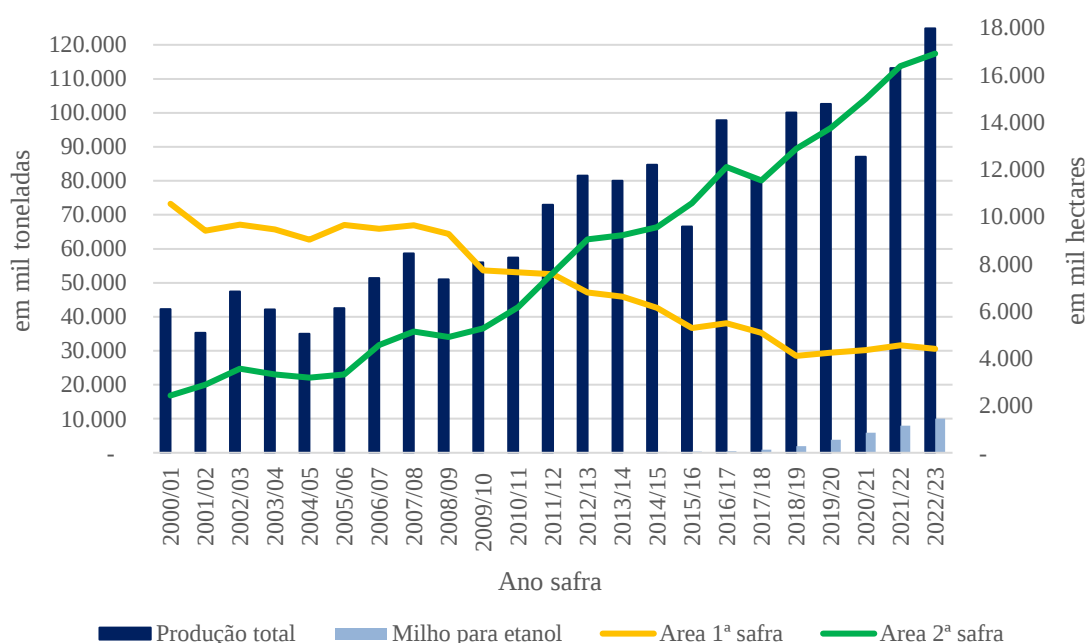
Como exemplo, o processo de produção do etanol de milho norte-americano é caracterizado pelo uso de milho primeira safra, por usinas grandes e uso de fontes de energia tradicionais, em grande parte fósseis (i.e., gás natural). Por outro lado, tais características são diferentes do setor de biocombustíveis nacional, pois possui claras vantagens em uso da terra e uso de fontes renováveis (MILANEZ et al., 2014), devido ao ambiente e contexto do plantio brasileiro.

Na última década (entre as safras 2011/12 e 2021/22), o Brasil aumentou a produção total de milho em 55%, atingindo 113 milhões de toneladas na safra 2021/22. Em 2013/14, a quantidade de milho destinada para a produção de etanol de milho era de apenas 70 mil toneladas e em 2021/22 alcançou 8 milhões de toneladas (IMEA, 2023). A moagem de milho

para a produção de etanol ainda é muito pequena quando comparada ao volume de milho total produzido no Brasil, representando apenas 7% (Figura 9).

Em termos de área, o milho segunda safra vem crescendo nos últimos anos, saindo de 460 mil hectares em 1985/86 para 16 milhões de hectares em 2021/22. Por outro lado, em relação a área de milho primeira safra pode ser observada uma tendência contrária, caindo de 10,5 milhões de hectares em 2000/01 para 4,5 milhões de hectares na safra 2021/22 (CONAB, 2023). O aumento da produção de milho 2ª safra se deve, principalmente, às melhores tecnologias e práticas de cultivo, como o aumento da produção e produtividade em áreas de segunda safra (MAGALHÃES et al. , 2020; NOVELLI et al. , 2023).

Figura 9 - Evolução da área (1ª e 2ª safra), produção de milho e moagem de milho para produção de etanol, entre 2000/01 e 2021/22



Fonte: CONAB (2023) e IMEA (2023).

Nos Estados Unidos, no mesmo ano safra, a produção total de milho alcançou 382 milhões de toneladas, ou seja, 3,4 vezes maior do que a produção de milho total no Brasil (USDA, 2023). Avanços recentes em tecnologia agrícola em ambiente tropical possibilitaram a disseminação de sistemas de produção em múltiplas safras, destacando-se o sistema que combina soja de ciclo curto e milho de segunda safra. Como benefícios, além de uma maior produção por área, as lavouras de segunda safra permitem uma melhor proteção do solo e

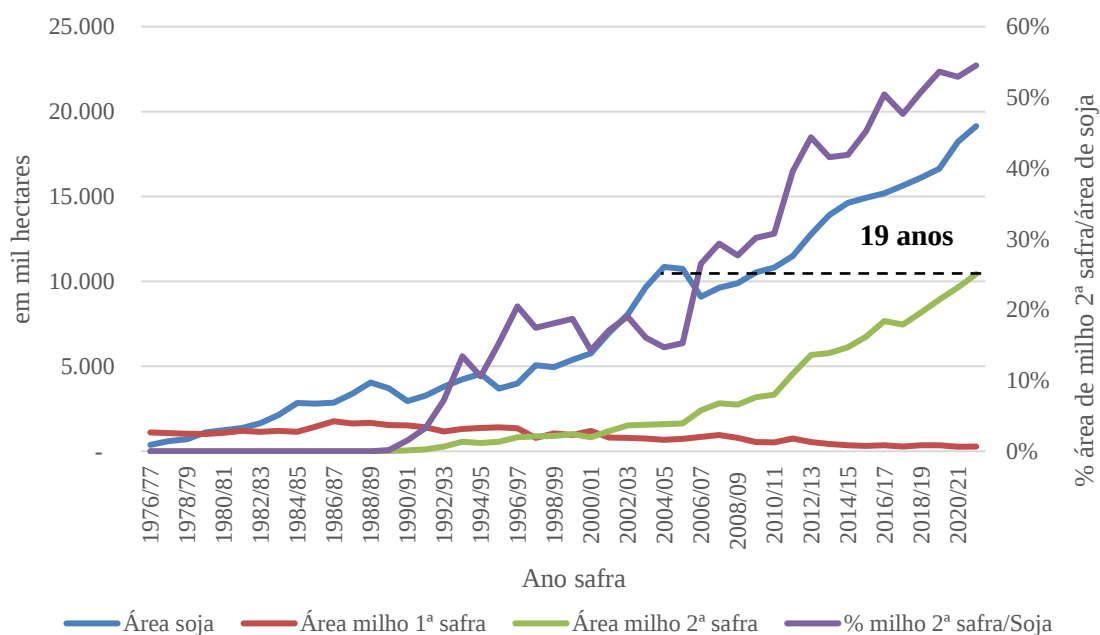
otimização dos recursos no processo de produção agrícola (EMBRAPA, 2020; MILANEZ et al., 2014; MAGALHÃES et al. , 2020; NOVELLI et al. , 2023).

Na safra 2021/22 a área de soja no Brasil alcançou 41,5 milhões de hectares sendo que apenas 16 milhões estão ocupados com milho 2ª safra. Ou seja, ainda existem 25 milhões de hectares de soja em nível nacional que podem ser convertidos para o sistema soja somado ao milho 2ª safra, se houver incentivo de mercado. A adoção e aprimoramento desse pacote tecnológico levou à rápida expansão dos volumes produzidos de grãos no Centro-Oeste do Brasil, principalmente de milho segunda safra no estado de Mato Grosso. Na região Centro-Oeste, 95% foram de milho segunda safra e no estado de Mato Grosso a produção de milho total foi composta por aproximadamente 99% de milho segunda safra, em 2021/22 (CONAB, 2023).

Nos últimos 10 anos (entre 2011/12 e 2021/22), a produção de milho segunda safra cresceu 141% na região Centro-Oeste e 174% no estado de Mato Grosso, atingindo 61 e 41 milhões de toneladas, respectivamente, ocupando a posição de maior estado produtor de grãos do Brasil. Praticamente todo esse milho (99%) é produzido em cultivo duplo, em rotação com a soja. Por outro lado, a produção de milho primeira safra tem uma menor representatividade na produção de milho total, principalmente no estado de Mato Grosso (CONAB, 2023).

Na Figura 10 abaixo, evidencia-se que a área de soja da região Centro-Oeste brasileira já alcançava na safra 2002/03 a área de milho 2ª safra observada em 2020/21. Ou seja, para aumentar a produção de milho 2ª safra atualmente não é necessário expandir sobre outras culturas, devido à disponibilidade de áreas de soja, há aproximadamente 20 anos. Além disso, observa-se que na safra 20/21, 55% da área de soja está ocupada com milho 2ª safra na região Centro-Oeste, restando ainda 45% para aumento da produção (Figura 10).

Figura 10 – Área de soja, milho (1ª e 2ª safra) e participação da área de milho 2ª safra em áreas de soja na região Centro-Oeste



Fonte: Elaboração própria a partir de CONAB (2023).

A expansão da produção de milho 2ª safra não foi acompanhada pelo desenvolvimento proporcional de sistemas de escoamento logísticos, resultando em condições inadequadas das estradas (ECKERT et al., 2018), acúmulo de estoques de milho, preços locais inferiores às normas internacionais (IMEA, 2015) e a necessidade de acionar políticas para manutenção dos preços. Embora existam melhorias de infraestrutura em andamento, ainda levarão tempo e estão sem prazo para serem concluídas.

Ao mesmo tempo, as importações de etanol estão aumentando para atender à crescente demanda doméstica de combustível no Brasil, principalmente nas regiões norte e nordeste (ANP, 2018; EPE, 2017). Dessa forma, seria possível que as futuras melhorias logísticas para expandir o acesso do milho aos mercados também beneficiasse o escoamento e logística do etanol.

À luz dessa situação, os produtores locais, juntamente com o governo do estado, desenvolveram um programa, com o objetivo de transformar o excedente de milho da região Centro-Oeste, principalmente do estado de Mato Grosso, em etanol e coprodutos de maior valor agregado (IMEA, 2017). Devido ao desenvolvimento do programa, crescente produção de milho e baixos preços, foram feitos altos investimentos em indústrias de etanol de milho, particularmente na região Centro-Oeste do Brasil, no estado de Mato Grosso (FORBES, 2023).

Com isso, etanol de milho no Brasil, que possui uma história muito recente, foi inicialmente adotado em usinas *flex*, aproveitando instalações e infraestrutura disponíveis nas usinas de cana-de-açúcar existentes durante o verão, quando a cana-de-açúcar não é colhida (SILVA et al., 2021). É importante ressaltar que, o setor sucroenergético a partir da cana-de-açúcar é diretamente influenciado pela sazonalidade da produção de matéria-prima, sendo necessário formar estoques do etanol produzido no período de colheita para regularizar a oferta no período da entressafra, entre novembro e abril (DONKE et al., 2017).

Em contexto de atipicidades climáticas cada vez mais recorrentes, a busca por outras matérias-primas para a produção de biocombustíveis se torna estrategicamente importante, reduzindo a dependência da produção de etanol a uma só cultura (DONKE et al., 2017). Assim, ao invés de operar durante 180 a 240 dias por ano, as indústrias *full* conseguem trabalhar 360 dias por ano. Na Tabela 1 abaixo foram levantados alguns parâmetros comparativos entre a produção de etanol de milho (2ª safra) e cana-de-açúcar.

Tabela 1 - Comparativo entre a produção de etanol de milho (2ª safra) e cana-de-açúcar

Parâmetros	Milho 2ª safra	Cana-de-açúcar
Ciclo de colheita	4 meses	12 a 18 meses
Sistema de produção	Milho 2ª safra em rotação com a soja	Perene, 1ª safra
Produtividade média das culturas	5 a 6,3 ton. por hectare	74 ton. por hectare
Área (hectares)	16,4 milhões	8,3 milhões
Produção total da cultura agrícola	85,6 milhões de toneladas	610 milhões de toneladas
Sistema de produção	Milho 2ª safra em rotação com a soja	Perene, 1ª safra
Rendimento de etanol/tonelada	400-430 litros	70 a 80 litros
Rendimento de etanol/hectare	3,2 mil litros	7 mil litros
Tempo de operação (aprox..)	360 dias	180-240 dias
Tempo de fermentação	Aprox. 40 horas	10 a 12 horas
Produtos e coprodutos	Etanol, DDG, WDG e óleo	Etanol, açúcar, bagaço, torta de filtro, melaço e vinhaça
Matéria-prima para energia utilizada no processo	Cavaco de eucalipto	Bagaço de cana-de-açúcar
Produção de etanol nacional	4 bilhões de litros	27,3 bilhões de litros

Fonte: Elaboração própria a partir de CONAB (2018); CONAB (2020^a); CONAB (2020c); CONAB (2023). *Os dados de cana-de-açúcar são da safra 22/23 e do milho safra 2021/22.

A estimativa de produção de etanol a partir da cana-de-açúcar na safra 22/23 é de aproximadamente 27 bilhões de litros, redução de 3,6% em comparação à safra 21/22. Em relação ao etanol de milho, a produção total continuará em crescimento e deverá atingir aproximadamente 5,6 bilhões de litros em 23/24, um aumento de 42% se comparado a safra passada. No total, espera-se uma produção de 33 bilhões de litros de etanol na safra 23/24 (CONAB, 2023).

Calcula-se que as indústrias que operam somente com cana-de-açúcar ficam aproximadamente 33% do ano sem produzir devido à entressafra, nos meses de dezembro a março (120 dias críticos para o abastecimento). Nesse período é natural que os preços ao consumidor acabem se elevando, devido à redução na oferta de combustível. Porém, a médio prazo, com o aumento da produção pelo milho, essa oscilação tende a perder força. Conforme avançar a participação do etanol de milho no mercado brasileiro, menor a sazonalidade de oferta e preços.

A produção de etanol de milho no Brasil teve início em 2012 com a inauguração de uma planta industrial pela USIMAT, na cidade de Campos de Júlio, no estado de Mato Grosso. A USIMAT que já produzia etanol a partir da cana-de-açúcar desde 2006, também inaugurou o modelo *flex*, otimizando a estrutura para a produção de etanol de cana e milho na mesma planta. Em 2013, a usina Libra inaugurou uma planta *flex* em São José do Rio Claro, e no ano seguinte, o Grupo Porto Seguro na cidade de Jaciara, ambas em Mato Grosso. Em 2015, as usinas SJC e Rio Verde foram integradas às unidades de etanol de cana no estado de Goiás e, em 2016 a Cereale Brasil no estado de São Paulo (NEVES et al., 2021).

A primeira usina *full*¹⁰ de etanol de milho, a FS “*Fueling Sustainability*” iniciaram as obras da unidade de Lucas do Rio Verde em 2015 (MANO et al., 2017), no estado de Mato Grosso. Dentro do primeiro ano de operação, em 2017, a FS iniciou a duplicação da capacidade de produção, podendo alcançar de 240 a 500 milhões de litros por ano, além da geração de coprodutos. Para atender essa produção de etanol são necessárias 1.260 mil toneladas de milho por ano (FS, 2017).

Também em 2017, uma unidade *full* foi lançada, a Safra Biocombustíveis, em Sorriso (MT). Em 2018, entrou em operação a usina no modelo *flex*¹¹ Caçu, em Vicentinópolis, no estado de Goiás. De forma comparativa, o modelo *full* emprega apenas milho na produção de

¹⁰ Usinas *full*: emprega apenas milho na produção de etanol.

¹¹ Usinas *flex*: emprega cana-de-açúcar e milho na produção de etanol. O milho é utilizado no período de entressafra da cana (*flex* integrada).

etanol. Já as usinas *flex*, empregam cana-de-açúcar e milho na produção de etanol, sendo o milho utilizado no período de entressafra da cana (NEVES et al., 2021).

Finalmente, o modelo “*full-flex*¹²” busca eficiência no processo produtivo a partir da unificação dos sistemas (conceito *Zero Waste*), tendo como principal marca a continuidade devido a possibilidade de instalar duas unidades industriais no mesmo local, processando milho e cana de forma independente e simultânea, trabalhando continuamente, o ano todo, sem que seja necessário paralisar o processamento de milho na chegada da safra de cana-de-açúcar. Dessa forma, permite que as duas unidades (cana e milho) utilizem uma única estrutura que engloba manutenção, destilaria, cogeração, armazenagem, tancagem, utilização de resíduos, mão-de-obra e logística (NEVES et al., 2021).

Em novembro de 2019 a Neomille S/A iniciou as operações com sua planta situada ao lado da unidade de cana-de-açúcar, visando aproveitar sinergias de geração de energia e toda a infraestrutura e logística instalada para escoamento da produção. Ainda em 2019, foi inaugurada a segunda planta *full* do país, pela Inpasa Bioenergia, multinacional especializada na produção de etanol de milho, na cidade de Sinop, no estado de Mato Grosso, com capacidade de produzir 525 milhões de litros de etanol de milho por ano (NEVES et al., 2021; INPASA, 2023).

Em agosto de 2020, a Inpasa deu início a primeira etapa das operações da segunda unidade na cidade de Nova Mutum, em Mato Grosso, com capacidade para produzir 890 metros cúbicos por dia de etanol hidratado, moer até 2,3 mil toneladas de milho diariamente, podendo alcançar uma demanda de 800 mil toneladas de milho por ano (INPASA, 2023). Ainda em 2020, a FS deu início às operações da segunda unidade, em Sorriso, Mato Grosso, com capacidade de produzir 530 milhões de litros de etanol por ano (FS, 2023).

O processo de expansão foi concluído em outubro de 2021, aumentando a capacidade total de produção da unidade para 880 milhões de litros de etanol por ano, 212 mil toneladas de DDG, 28 mil toneladas de óleo de milho e 190 MWh por ano de cogeração de energia. Em dezembro do mesmo ano a FS deu início às obras de uma nova planta em Primavera do Leste, em Mato Grosso, que terá uma produção de 2 bilhões de litros de etanol por ano (NEVES et al., 2021; FS, 2023).

Nos anos seguintes, apesar das adversidades, usinas anunciaram expansão e outras entraram em operação. Em 2021, começa a ser construída a terceira unidade da Inpasa na cidade de Dourados, em Mato Grosso do Sul e iniciadas as obras de ampliação da unidade de Sinop.

¹² Usinas *full-flex*: usina opera cana-de-açúcar e milho o ano todo.

Em 2022, a Inpasa deu início a operação da unidade de Dourados, em Mato Grosso do Sul, e dobrou a capacidade produtiva no mesmo ano. Ainda em 2022, a Inpasa deu início a ampliação da planta em Nova Mutum (Mato Grosso). A nova fase terá investimentos de R\$ 450 milhões, totalizando R\$ 1 bilhão (somado aos R\$ 550 milhões investidos anteriormente) (INPASA, 2023).

Os investimentos privados no setor etanol de milho foram estimulados principalmente pela disponibilidade de matéria-prima a preços competitivos, potencial do mercado consumidor para biocombustível (ganho de competitividade frente a gasolina), mercado consumidor dos coprodutos do processo produtivo (*DDG* e *WDG*), políticas públicas e incentivos fiscais para a instalação das unidades e entre outros (NEVES et al., 2021).

Atualmente existem 20 usinas *full* e *flex* autorizadas pela ANP no Brasil (treze usinas em Mato Grosso, uma usina em Mato Grosso do Sul, cinco em Goiás e uma em São Paulo), que juntas tem capacidade de produzir aproximadamente 13.260 metros cúbicos por dia de etanol anidro e 19.296 metros cúbicos por dia de etanol hidratado (Tabela 2). Destas usinas, quatorze utilizam apenas milho para gerar biocombustível e seis delas também utilizam a cana-de-açúcar no processo produtivo (ANP, 2023).

Tabela 2 - Usinas de etanol de milho em funcionamento no Brasil em 2023

Usina	Município	Estado	Tipo	Capacidade produção anidro (m ³ /dia)	Capacidade de produção hidratado (m ³ /dia)
ALD Bioenergia	Nova Marilândia	MT	Full	0	323
Bioflex	Poconé	MT	Full	0	20
Caçu	Vicentinópolis	GO	Flex	0	1.200
Cereale Brasil Agro	Dois Córregos	SP	Full	0	60
Libra	São José do Rio Claro	MT	Flex	600	600
FS Agrisolutions	Lucas do Rio Verde	MT	Full	1.650	1.716
FS Agrisolutions	Sorriso	MT	Full	2.500	2.600
GEM Agroindustrial	Acreúna	GO	Full	0	120
Manto Azul Eireli	Primavera do Leste	MT	Full	0	12
INPASA Agroindustrial	Dourados	MS	Full	2.500	2.500
INPASA Agroindustrial	Nova Mutum	MT	Full	1.300	2.600
INPASA Agroindustrial	Sinop	MT	Full	3.000	3.000
Neomille	Chapadão do Céu	GO	Full	800	1.600
Porto Seguro Flex	Jaciara	MT	Flex	240	480
Safras Biocomb.	Sorriso	MT	Full	0	95
SJC Bioenergia	Quirinópolis	GO	Flex	350	1.505

Tiago M. de Almeida	Itaúba	MT	Full	0	5
USIMAT	Campos de Júlio	MT	Flex	200	470
Usina Três Irmãos	Ipiranga do Norte	MT	Full	0	60
Rio Verde Ltda.	Rio Verde	GO	Flex	120	330
SUBTOTAL				13.260 m³/dia	19.296 m³/dia

Fonte: Elaboração própria a partir de ANP (2023).

Com os atuais volumes de produção de milho, preços relativamente baixos e economia favorável, investimentos agressivos na ordem de bilhões de reais foram anunciados no médio e longo prazo (condição Pré-Pandemia). Como observado na Tabela 3, existem usinas em construção, ampliação e projetos em andamento que podem adicionar 10.262 m³ por dia de etanol hidratado e 8.525 m³ por dia de etanol anidro nos próximos anos.

Neste cenário, diversos investidores já sinalizaram novos projetos de usinas de etanol de milho. Também é importante destacar que os valores indicados para capacidade produtiva podem sofrer alterações de acordo com adaptações no projeto e estratégias de cada uma das empresas citadas acima. Embora a construção de usinas específicas para a produção do etanol de milho tenha se dado em 2017, em um cenário anterior constata-se que o crescimento da participação do etanol de milho brasileiro na produção total do biocombustível tenha aumentado rapidamente a partir da safra 2014/2015.

De acordo com dados fornecidos pela União da Indústria da Cana-de-Açúcar e Bioenergia (UNICA, 2022), na safra 2014/15, a produção total de etanol de milho era de apenas 37 mil metros cúbicos, ainda pouco representativo. Na safra 2017/18, apenas três anos depois, a produção acumulada de etanol de milho chegou a 521 milhões de litros, um aumento expressivo de 123% em relação ao volume produzido em 2016/17.

Tabela 3 - Usinas de etanol de milho em ampliação ou processos em andamento

USINAS EM PROCESSO DE AMPLIAÇÃO					
Usina	Município	Estado	Tipo	Capacidade produção anidro (m³/dia)	Capacidade de produção hidratado (m³/dia)
FS Agrisolutions	Primavera do Leste	MT	Full	1.700	1.768
Cereale	Dois Córregos	SP	Full	0	120
Cooperativa de Colonização Agrop.	Coruripe	AL	Full	300	540
Cooperval	Jandaia do Sul	PR	Flex	400	600
Buriti	Sorriso	MT	Flex	0	250
Manto Azul Eireli	Primavera do Leste	MT	Full	0	60
INPASA Agroindustrial	Sinop	MT	Full	4.300	4.300
USIMAT	Campos de Júlio	MT	Flex	225	460

SUBTOTAL				6.925	8.098
USINAS EM CONSTRUÇÃO					
Destilaria TJ	Sorriso	MT	Full	0	30
Etamil Bioenergia	Campo Novo dos Parecis	MT	Full	0	294
Fermap	Ipiranga do Norte	MT	Full	0	60
Lazarotto Bioenergia	Tapurah	MT	Full	0	120
Neomille	Maracajú	MS	Full	1.600	1.600
Safra Ind.	Rio Claro	SP	Full	0	60
SUBTOTAL				1.600	2.164
TOTAL				8.525	10.262

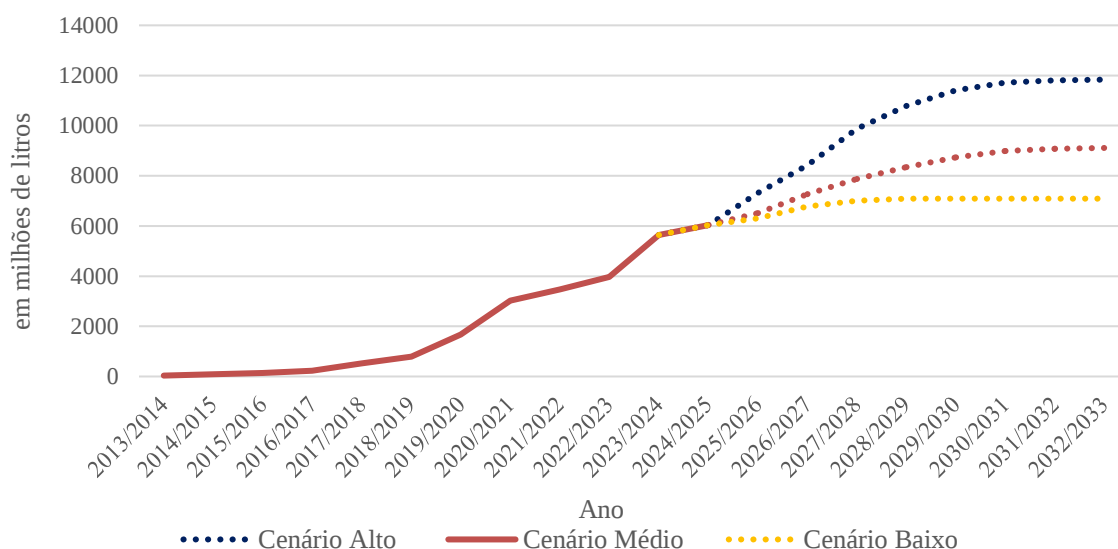
Fonte: Elaboração própria a partir de (ANP, 2023).

A partir da safra 2017/18, maiores informações relacionadas a produção quinzenal de etanol de milho, anidro e hidratado, passaram a ser publicadas. Em 2018/19, a produção de etanol de milho alcançou 791 milhões de litros e em 2019/20, 1,6 bilhões de litros (CONAB, 2023). Em 2019 o percentual de etanol de milho na produção do etanol total brasileiro chegou a 4% (ANP, 2020).

No período de janeiro a dezembro de 2019, as usinas *flex* e *full* produziram juntas aproximadamente 2,19 bilhões de litros de etanol, dos quais 713 milhões (32,58%) foram fabricados pelas unidades que utilizam somente milho como matéria-prima. Já no primeiro quadrimestre de 2020, 13 usinas produziram 617,22 milhões de litros, sendo que 488 milhões foram apenas de milho, representando 80%. Entre abril e julho de 2020, foram produzidos 768 milhões de litros, 85% a mais do que no ano passado (UNICA, 2020).

A região Centro-Oeste é a que mais se destaca na produção de etanol a base de milho, com cerca de 99% da oferta nacional. Os estados com maior volume de produção são Mato Grosso e Mato Grosso do Sul onde novas unidades estão sendo construídas e devem aumentar ainda mais a produção total brasileira nos próximos anos. Na safra 22/23, o estado de Mato Grosso do Sul respondeu por 714 milhões de litros, representando 18% da produção de etanol de milho na região Centro-Oeste (UNEM, 2020; UNICA, 2020; ANP, 2020; CONAB, 2023).

Em 2020/21, a produção mato-grossense totalizou aproximadamente 2,4 bilhões de litros, incremento de 88% em relação ao período anterior. No estado de Mato Grosso o combustível proveniente do grão será maior do que o volume oriundo da cana-de-açúcar, quando consolidado a operação das grandes usinas *full*. As safras 2021/22 e 22/23 fecharam em 3 bilhões de litros e 3,2 bilhões de litros, respectivamente (CONAB, 2023). Este aumento da produção ao longo das últimas safras é resultado de sucessivos investimentos nos últimos anos.

Figura 11 - Evolução da produção de etanol de milho no Brasil

Fonte: Elaboração própria a partir de UNICA (2020); EPE (2022b); CONAB (2023).

A expectativa é aumentar ainda mais a produção de etanol de milho em nível nacional na próxima safra, atingindo 5,7 bilhões de litros em 2023/24, incrementando consideravelmente a produção em menos de 10 anos (CONAB, 2023). Até 2032, o setor tem como expectativa produzir 9,1 bilhões de litros de etanol de milho no cenário de crescimento médio (Figura 11), aumentando a produção em 133% em comparação com a safra 2022/23. Nos cenários de crescimento baixo e alto projetados pela Empresa de pesquisa Energética, a produção de etanol de milho pode variar entre 7,1 e 11,8 bilhões de litros em 2032 (EPE, 2022b).

O setor tem crescido de forma acelerada e, em 2022/23, consumiu aproximadamente 9,8 milhões de toneladas de milho para produzir 3,9 bilhões de litros de etanol, 3 milhões de toneladas de *DDGS/WDG* e 177 milhões de litros de óleo. Os coprodutos da produção do etanol de milho, *DDGS* (do inglês, *Dried Distillers Grains with Solubles* – Grãos Secos de Destilaria com solúveis) e *WDG* (*Wet Distillers Grains* – Grãos Úmidos de Destilaria), são farelos compostos por grãos de milhos secos pelo processo de destilação e podem ser utilizados para alimentação animal (TALAMINI et al., 2022).

O *DDGS*, além de ser uma fonte de proteína, possui bons níveis de energia em sua composição. Por ser um alimento com baixo teor de amido e alto teor de fibra digestível, o *DDGS* tem maior concentração energética comparado ao próprio milho. Por isso, além da proteína, o *DDGS* e *WDG* fornecem bons níveis de energia na dieta, que poderá substituir o milho ou outro alimento concentrado energético a ser utilizado na ração de animais como bovinos, suínos, equinos, aves, peixes e pets (TALAMINI et al., 2022; UNEM, 2023).

Quando possuem teor de proteína bruta (PB)¹³ acima de 39%, são considerados de alta proteína e abaixo de 38% de baixa proteína. Os *DDGS/WDG* de alta proteína podem substituir as fontes proteicas das rações e, dependendo do preço, reduzir os custos da alimentação. De acordo com relatório publicado pela Scot Consultoria, ao serem convertidos em reais por quilo de PB, o *DDGS* sai ainda mais barato do que o farelo de soja e caroço de algodão, comumente utilizados para ração animal. Com isso, dentre os principais concentrados energéticos consumidos, a substituição do farelo de soja por *DDGS* acaba sendo bastante atrativa (SCOT CONSULTORIA, 2023).

O sistema produtivo do etanol de milho permite que novos produtos sejam gerados ao longo do processo, trazendo impactos positivos para outras cadeias. A alta oferta regional de *DDG/WDG* e óleo de milho tende a melhorar os indicadores de eficiência e produtividade das carnes, gerando uma menor demanda por área de produção. Este ponto é muito importante para a avaliação dos efeitos induzidos da mudança do uso da terra, que será tratado a seguir.

3.2 Sustentabilidade dos biocombustíveis

Dentro do contexto apresentado no subcapítulo anterior, os biocombustíveis são identificados como uma solução potencial para o atingimento das metas de mitigação de GEE propostas no Acordo de Paris (IPCC, 2018; IPCC, 2023). Porém, apesar dos benefícios comprovados por estudos científicos, a produção de biocombustíveis vem acompanhada de críticas e debates internacionais ao longo de anos (particularmente alimentos versus combustíveis e efeito induzido do uso da terra).

O fornecimento de alimentos para a população global prevista para mais de 9 bilhões em 2050, sob condições das mudanças climáticas, é um dos maiores desafios do século XXI (HENRY et al., 2018). A expansão da produção de biocombustíveis, incentivada por políticas e acordos nacionais e internacionais, gera questionamentos quanto ao seu benefício e competição com alimentos.

À medida que a pressão sobre os sistemas agrícolas globais aumenta devido ao rápido crescimento populacional e as mudanças climáticas, a segurança nutricional e a capacidade de garantir e manter dietas saudáveis estão ameaçadas. Relatório publicado pela FAO (2022) procurou identificar, usando a literatura disponível, as ligações entre a bioenergia, nutrição, e

¹³ A porcentagem (% PB) se refere ao teor de proteína bruta do alimento.

as formas pelas quais a bioenergia pode ser empregada para uma melhor nutrição global. A produção e o uso da bioenergia em sistemas produtivos integrados e sustentáveis oferecem potencial para auxiliar na manutenção e melhoria da segurança nutricional (FAO, 2022).

Adicionalmente, a produção de bioenergia e seus subprodutos oferecem a oportunidade de facilitar a segurança nutricional, melhorando a qualidade do solo através de mecanismos como sistemas de cultivo múltiplo, correção do solo e entre outros. A produção de biomassa para bioenergia apresenta uma oportunidade de diversificar a renda, principalmente dos agricultores rurais e pequenos produtores. O uso de bioenergia para armazenamento de alimentos pode reduzir a deterioração e o desperdício, garantindo assim a segurança alimentar, melhorando o acesso das populações rurais a mercados mais diversificados (FAO, 2022).

O grande dilema alimento versus combustíveis está no centro dos debates políticos, principalmente devido ao questionamento quanto à ética de utilizar terra da produção de alimentos para energia. Dois pontos principais são destacados: primeiramente, a possibilidade de aumento dos preços dos alimentos, devido a maior demanda para produção de combustível e, como segundo ponto, levar à concorrência de área agrícola ou necessidade de expansão da fronteira agrícola (TOMEI, 2016).

Existem estudos que levantaram preocupações quanto a competição entre a produção de bioenergia e alimentos, que podem gerar grandes impactos nos preços, disponibilidade dos alimentos, consumo e no risco à fome. Ao mesmo tempo, existem outros estudos que dizem ao contrário (HASEGAWA et al., 2015; TO et al., 2015; BALDOS et al., 2014; TENENBAUM, 2008; HAMELINCK, 2013; PAWLAK et al., 2020; SCHULTE et al., 2021; GONÇALVES et al., 2023). De acordo com o relatório divulgado pela FAO (2022), existem vários artigos e evidências que fazem múltiplas ligações indiretas ou implícitas entre bioenergia e nutrição. Porém, a pesquisa disponível nesta área é escassa e requer maior exploração.

Shrestha et al. (2019) destaca que o aumento da produção de biocombustíveis não tem relação com aumento de preços dos alimentos. Entre algumas variáveis analisadas como causa do aumento do índice de preços dos alimentos, o preço do petróleo bruto teve a maior correlação (SHRESTHA et al., 2019; JUDIT et al., 2017; ROMAN et al., 2020). Outro estudo aponta que os índices de preços por si só não são indicadores de segurança alimentar.

As oscilações dos preços globais das commodities são distintas das variações de preços dos alimentos ao consumidor (KLINE et al., 2017). Por outro lado, To et al. (2015) evidencia que a produção de biocombustíveis e os preços mais altos do petróleo bruto têm um efeito estatisticamente significativo no aumento dos preços dos alimentos nos EUA e globalmente (TO et al., 2015).

Allee et al. (2017) analisou a relação entre duas medidas de segurança alimentar, *Food Insecurity Experience Scale (FIES)*¹⁴ e *Global Food Security Index (GFSI)*¹⁵, além de um conjunto de variáveis que caracteriza 65 nações em termos de qualidade e quantidade de terras agrícolas, produção agrícola, governança, infraestrutura e renda familiar. Para isso, foram utilizados modelos de regressão linear para quantificar a contribuição de cada variável e variação em ambas as métricas.

Como principais resultados, avaliou que as despesas de consumo final das famílias (per-capita) explicam e tem maior relação na variação da segurança alimentar do que os outros conjuntos de variáveis. Os resultados desta análise reforçam que na ausência de fatores locais, um aumento na renda impulsiona o aumento na segurança alimentar. Iniciativas que buscam melhorar a segurança alimentar nacional concentrando-se em outros conjuntos de variáveis, sem um caminho claro para melhorar a renda, têm menos probabilidade de alcançar o efeito desejado (ALLEE et al., 2021).

Adicionalmente, pesquisas mostram que os principais fatores de insegurança alimentar são impulsionados por problemas de distribuição, pobreza, corrupção, guerra e conflito, desastres naturais e mudanças climáticas, ao invés de escassez da capacidade global de produção de alimentos (SCHULTE et al., 2021; ALLEE et al., 2021; PAWLAK et al., 2020; THUROW, 2009).

Documento recente da *OECD-FAO Agricultural Outlook 2022-2031* aponta que os preços internacionais atuais estão altos para a maioria das commodities agrícolas, incluindo alimentos, devido à recuperação da demanda após a pandemia de COVID-19 e as interrupções de oferta e demanda exacerbadas pela guerra da Federação Russa contra a Ucrânia. A guerra tem afetado os mercados agrícolas e de insumos, especialmente para grãos e oleaginosas, dos quais a Rússia e a Ucrânia são os principais exportadores (OECD/FAO, 2022).

Esse tema ainda tem sido estudado atualmente por instituições relevantes que se dedicam ao assunto, como IPCC (2018), IEA, IRENA e FAO (2017), no qual destacam que podem existir grandes sinergias entre biocombustíveis e segurança alimentar (IEA, 2017; IRENA,

¹⁴ A medida *Food Insecurity Experience Scale (FIES)* mede a dimensão de acesso da insegurança alimentar através da “experiência vivida” de uma pessoa (CAFIERO, 2016). O FIES está calibrado globalmente para garantir a comparabilidade entre países e surgiu como um dos principais indicadores de segurança alimentar (SAINT VILLE et al., 2019).

¹⁵ O *Global Food Security Index (GFSI)* é um indicador que monitora a segurança alimentar em nível nacional (EIU, 2019). O GFSI é construído com base em 34 indicadores que abrangem três pilares conceituais relacionados à segurança alimentar: (i) acessibilidade; (ii) disponibilidade; e (iii) qualidade e segurança (IZRAELOV et al., 2019). Diferentemente do FIES, que mede diretamente as experiências dos indivíduos, o GFSI é centrado no país e considera a segurança alimentar de acordo com a capacidade nacional de promover a acessibilidade, disponibilidade e qualidade/segurança dos alimentos (THOMAS et al., 2017).

2017; FAO, 2017; IPCC, 2018). Devido ao avanço tecnológico da produção, melhores práticas de manejo, diversificação da agricultura, ganhos de eficiência, melhor gestão de terras agrícolas e ganhos de produtividade, é possível avaliar as oportunidades e medidas que implicam no melhor uso de terras e recursos nos sistemas de produção, para que não haja discrepância da produção de matérias-primas utilizadas para alimentos e biocombustíveis (IPCC, 2018).

Outro tema relacionado à produção de biocombustíveis que ainda provoca intensos debates e preocupações em nível mundial é o efeito indireto do uso da terra, trazido inicialmente por Searchinger et al. (2008). A mudança do uso da terra se refere a uma alteração no uso ou manejo da terra pelos seres humanos (por exemplo, entre uso agrícola e pastagens ou florestas e uso industrial) e podem ser classificadas entre direta (*Direct Land Use Change - dLUC*), quando dentro do sistema do produto avaliado e indireta (*Indirect Land Use Change - iLUC*) quando ocorrem como consequências da *dLUC*, mas fora do sistema de produto (ISO, 2013).

Esta mudança pode conduzir a uma alteração na cobertura do solo, com impactos no albedo superficial, evapotranspiração, fontes e sumidouros de GEE e outras propriedades que podem impactar o sistema climático (IPCC, 2006). Os conceitos de *dLUC* e *iLUC* são utilizados para estimar as emissões de CO₂ derivadas da mudança do uso da terra (MUT). No ciclo de vida dos combustíveis, este processo de MUT pode ser o principal fator de contribuição no perfil de emissões de GEE do produto, principalmente quanto à alteração nos estoques de carbono do solo e vegetação (CASTANHEIRA et al., 2013).

Estudos reforçam que a expansão da produção de biocombustíveis pode estar parcialmente relacionada ao aumento do *dLUC* (YAN et al., 2010). Neste caso, o cálculo da mudança do uso da terra causada pelo desmatamento está parcialmente relacionado à produção de culturas que são direcionadas aos biocombustíveis. Por esse motivo existe grande preocupação nacional e internacional quanto à relação entre expansão da produção, MUT e mitigação de emissões de GEE relacionadas aos biocombustíveis.

Os primeiros estudos se dedicaram a entender os impactos de conversão direta (*dLUC*) de diferentes paisagens para a produção de biocombustíveis (RIGHELATO & SPRACKLEN, 2007; FARGIONE et al., 2008) e, alertaram que os biocombustíveis a partir de insumos de baixa performance, em locais de altos estoques de carbono, podem emitir mais GEE do que o uso de combustíveis fósseis.

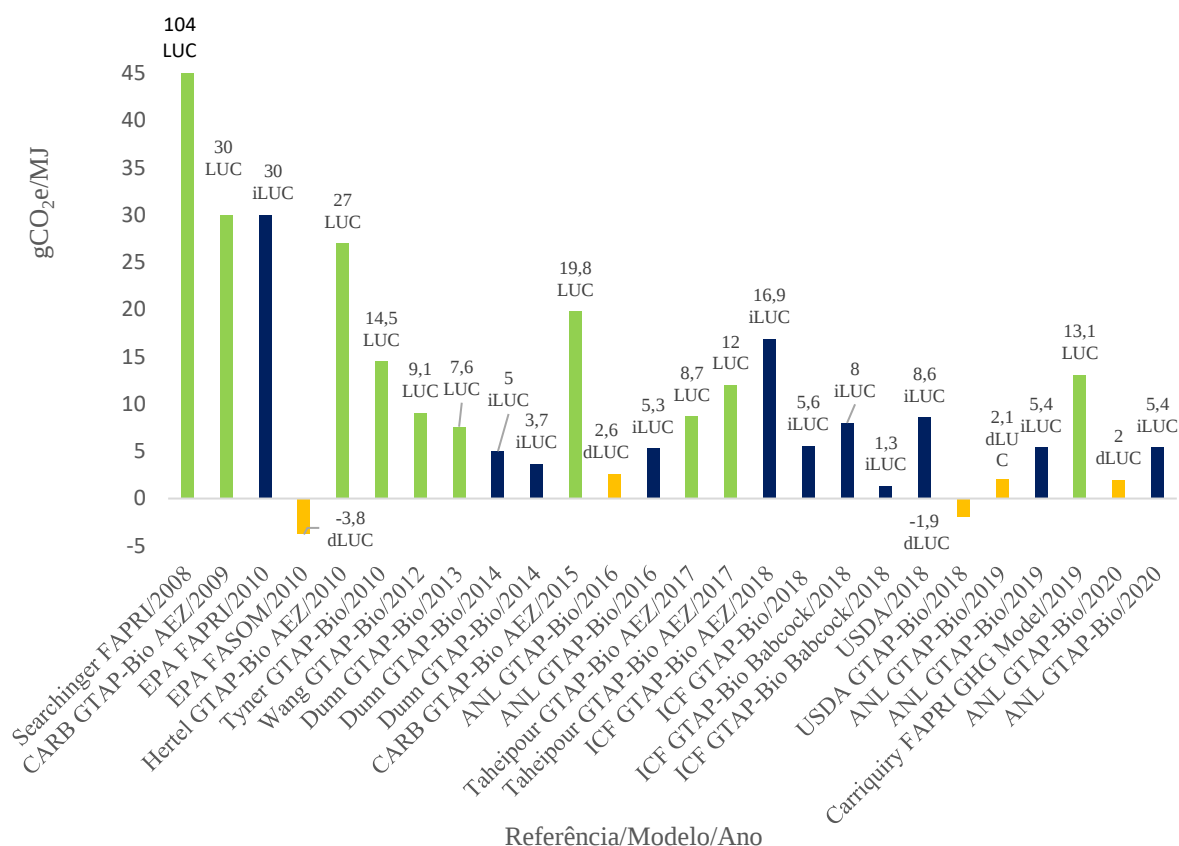
O conceito *Induced Land Use Change – ILUC*, que contempla tanto efeitos diretos quanto indiretos, ganhou força internacionalmente a partir do estudo de Searchinger et al. (2008), que colocou questionamentos quanto à sustentabilidade da produção de biocombustíveis, que poderiam ter emissões de GEE maiores do que os combustíveis fósseis, se contabilizados os

efeitos induzidos. Tais efeitos no uso da terra são causados pela necessidade de expandir a produção em novas terras, para compensar culturas desviadas do uso original para o de biocombustíveis (SEARCHINGER et al., 2008).

No entanto, embora metodologias tenham evoluído desde 2008, ainda há uma enorme variação nos resultados dos cálculos de intensidade de carbono dos biocombustíveis. Ao acoplar diferentes tipos de modelagem (econômica, uso da terra e de ciclo de carbono) foi possível ao longo dos anos e através de diversos estudos, avaliar o impacto da mudança do uso da terra de diversos biocombustíveis, mesmo que os insumos jamais venham a converter diretamente áreas de vegetação natural. Os resultados são convergentes para alguns combustíveis e práticas de manejo, como o etanol de cana-de-açúcar brasileiro, mas ainda diferem bastante em outras, como por exemplo para o biodiesel de soja.

Scully et al. (2021), apresentam diferentes intensidades de carbono para etanol de milho nos Estados Unidos, relacionados a mudança do uso da terra. Como observado em forma de linha do tempo, as emissões estimadas de GEE associadas à mudança do uso da terra (total, indireta e direta) diminuíram de 104 gCO₂e/MJ para abaixo de 10 gCO₂e/MJ, entre 2008 e 2020. Os valores parecem estar caminhando para estimativas mais convergentes, embora um grau moderado de variabilidade permaneça entre os modelos e análises (Figura 12).

Figura 12 – Emissões de GEE associadas a LUC, para etanol de milho nos Estados Unidos entre 2008 e 2020



Fonte: Adaptado de SCULLY et al. (2021).

Legenda: Colunas em verde se referem a resultados para LUC – *Total Land Use Change*; Colunas em azul se referem a resultados para iLUC – *Indirect Land Use Change*; e, as colunas em amarelo se referem a resultados para dLUC – *Direct Land Use Change*.

Ainda segundo os autores, as variações entre as estimativas de LUC derivam principalmente de quatro elementos: o modelo agro econômico, ano dos dados, intensificação da terra e elasticidade-preço relacionada a produtividade (*Yield Price Elasticity – YDEL*)¹⁶. Os modelos agro econômicos preveem a demanda global por commodities agrícolas em resposta às mudanças na oferta e são usados para avaliar a mudança do uso da terra após aumento na produção de biocombustíveis (SCULLY et al., 2021).

Apesar do desenvolvimento dos modelos, até o momento não existem metodologias amplamente aceitas e há grande debate científico sobre quais abordagens são mais adequadas de acordo com cada especificidade geográfica, produtiva e entre outros fatores (PLEVIN et al, 2014; ROSA et al, 2016). As estimativas de ILUC são incertas e bastante díspares dependendo da cultura, região, padrão de produção considerado, bem como o modelo que foi utilizado para

¹⁶ Descreve a variação percentual da produtividade por unidade de terra, por variação percentual no preço da safra.

a análise. Por isso, ainda não existe consenso sobre o tema na literatura científica. Assim, a MUT associada à produção de biomassa para biocombustíveis pode resultar em emissões significativas de GEE e minar a economia de carbono associada ao uso de biocombustíveis (BRANDÃO et al., 2022; LARK et al., 2022).

Diante das incertezas, os programas de biocombustíveis adotaram diferentes estratégias para lidar com o tema. As principais estratégias adotadas pelos programas são: (i) estimar emissões *dLUC* e/ou estimar *iLUC* (em gCO₂e/MJ) e somar a pegada de carbono; (ii) não permitir uso de áreas específicas para produção de biocombustíveis; (iii) gerenciamento de risco em combinação com outras políticas relacionadas ao uso da terra; (iv) identificação e incentivo de práticas de baixo risco de *ILUC*; (v) restringir matérias-primas com alto risco de *ILUC*; e, (vi) classificação de combustíveis avançados com acesso prioritário a fatia de mercado (UNIÃO EUROPEIA, 2008; ICAO, 2020; ANP, 2017; CARB, 2020).

Embora alguns programas de biocombustíveis tentem calcular tais emissões de GEE, as abordagens de avaliação de gerenciamento de risco tem sido cada vez mais consideradas, como na *RED II*, *CORSIA* e *RenovaBio*, para diminuir os potenciais riscos dos efeitos induzidos (UNIÃO EUROPEIA, 2008; ICAO, 2020; ANP, 2017). As principais políticas internacionais para promoção de biocombustíveis (Tabela 4) tratam tais emissões de GEE por meio da contabilização da MUT direta e mecanismos de avaliação de risco para *ILUC* (*Renewable Energy Directive 2009/28/EC - EU-RED*) ou pela estimativa de fatores da MUT induzida (*RFS - Renewable Fuel Standard* e *LCFS – Low Carbon Fuel Standard*) (MOREIRA et al., 2018). O *RenovaBio*, de maneira similar à política europeia, adota medidas de gestão de risco, através de critérios de elegibilidade.

No contexto nacional, o governo brasileiro, juntamente com o setor produtivo, tem adotado políticas que buscam o ordenamento do uso da terra no país e são utilizadas como critérios de elegibilidade no Programa *RenovaBio*. Com isso, os produtores de biocombustíveis terão de cumprir os critérios de elegibilidade para ingressar no Programa e ter direito aos CBIOS: (i) Não conversão de vegetação nativa; (ii) Legislação ambiental comprovada pelo Cadastro Ambiental Rural (CAR) no Brasil; (iii) Zoneamento da palma; (iv) reconhecimento da rota de produção; e (v) rastreabilidade da matéria-prima (MOREIRA et al., 2018; MATSUURA et al., 2018).

O zoneamento agroecológico oficial da palma de óleo (BRASIL, 2010) busca restringir a expansão de tal lavoura em áreas sensíveis e sobre vegetação nativa. A moratória da soja destaca-se como iniciativa privada que logrou resultados na gestão territorial no bioma Amazônia (NEPSTAD et al., 2014). Além desses, a Lei de Proteção à vegetação nativa nº

12.651/2012 (BRASIL, 2012), que tem como um dos principais elementos o CAR, tem potencial para impulsionar o uso eficiente e mais sustentável da terra no país e se tornar uma ferramenta efetiva contra a mudança climática (CHIAVARI et al., 2017).

O *CORSIA* utiliza critérios de sustentabilidade e o gerenciamento de risco (*low LUC risk*), especificamente para dois tipos de abordagens: aumento comprovado de produtividade e uso de terras ainda não utilizadas, abandonadas, marginais ou outras similares. O *CAEP* (*Committee on Aviation Environmental Protection*) considerou uma série de opções para determinar um valor apropriado para *ILUC* (*default*), principalmente nos casos em que as estimativas produzidas pelos modelos *Global Biosphere Management Model (GLOBIOM)* (Ecofys, 2016) e *GTAP-BIO* (PURDUE, 2022) diferem (ICAO, 2019).

Tabela 4 - Comparação entre diferentes programas de biocombustíveis para a avaliação de MUT

	RED	RFS	LCFS	CORSIA	RenovaBio
Local	União Europeia	Federal – Estados Unidos	Estado da Califórnia	Aviação Comercial Internacional	Brasil
Ferramenta de análise	Não tem uma ferramenta específica.	<i>CA-GREET</i> , <i>Century</i> , <i>Daycent</i> , <i>FASOM</i> e <i>FAPRI-CARD</i>	<i>CA-GREET 3.0</i> + dados de entrada dos modelos, <i>OPGEE</i> , <i>GTAP/AEZ-EF</i>	<i>GTAP-BIO</i> e <i>GLOBIOM</i>	RenovaCalc
Amortização Emissões	20 anos, sem taxa de desconto. Jan/2008 como data de referência para o cálculo.	30 anos	30 anos	25 anos	-
MUT	Cálculo apenas dos efeitos diretos. Não há valores “default” atribuídos à <i>dLUC</i> . Para os efeitos induzidos, foi adotada uma abordagem de avaliação e gerenciamento de risco.	Efeitos diretos e induzidos são modelados conjuntamente. Há divisão entre <i>dLUC</i> doméstico (EUA) e internacional.	Efeitos diretos e induzidos são modelados conjuntamente.	Critérios de sustentabilidade. Gerenciamento de risco (<i>low LUC risk</i>) a partir da comprovação do aumento de produtividade e uso terras não utilizadas/abandonadas. Há valores “default” para <i>ILUC</i> , mas também podem ser calculadas a partir dos modelos.	Cálculo apenas dos efeitos diretos e há valores “default”. Para os efeitos induzidos, foram adotadas medidas de gestão de risco, através de critérios de elegibilidade.

Fonte: adaptado de MOREIRA et al. (2018).

As regulamentações norte-americanas adotam a contabilização do *ILUC* para atribuir diferentes intensidades de carbono, porém em ambas as regulamentações houve revisões significativas de tais estimativas para valores mais baixos após aprimoramento das metodologias de avaliação das emissões indiretas de GEE. Como resultado das preocupações e recorrentes críticas aos biocombustíveis, relacionado aos possíveis impactos negativos sobre o meio ambiente, a sustentabilidade foi promovida à condição essencial para a viabilidade a longo prazo dos biocombustíveis e para o contínuo apoio público às energias renováveis e à mitigação das mudanças climáticas (ELBEHRI et al., 2013).

Tendo em vista que as formas de contabilização de MUT nos protocolos internacionais sofreram muitas alterações no decorrer do tempo, devido ao tempo de maturação das discussões e modelagem, no RenovaBio optou-se pela implementação de uma abordagem de gestão de riscos através de critérios de elegibilidade. O Programa brasileiro considera os efeitos diretos, contabilizados como pegada de carbono através da RenovaCalc (MATSUURA et al., 2018), tema abordado no subcapítulo 2.3 desta tese.

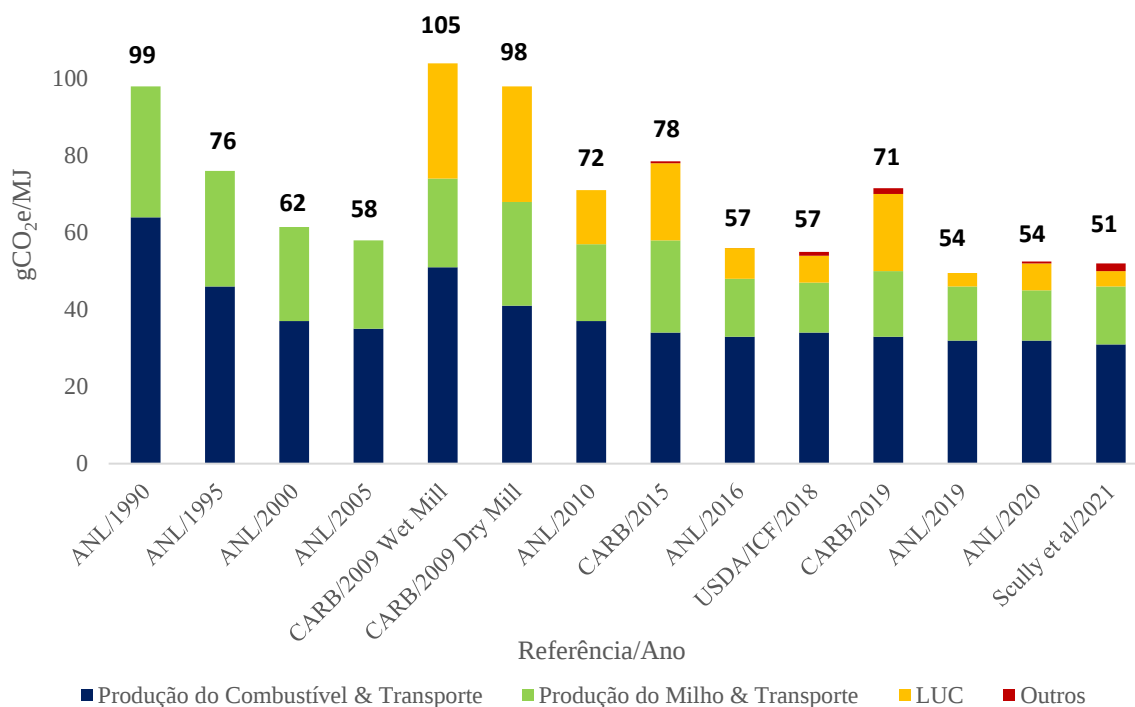
Por outro lado, liderados pela Europa e Estados Unidos, e impulsionados por políticas públicas, programas de certificação foram criados para assegurar os benefícios econômicos, ambientais e sociais dos biocombustíveis. Em muitos desses programas, a metodologia de cálculo das emissões de GEE é realizada por meio da Avaliação do Ciclo de Vida (ACV), regulamentada pela norma ISO 14040 (SCARLAT et al., 2011; LEAL et al., 2010).

A ACV é uma ferramenta utilizada para avaliar, de forma holística, o impacto ambiental de um produto ou serviço ao longo de sua produção e uso, seguindo os princípios da avaliação do ciclo de vida, seguindo as normas ISO 14040 e ISO 14044 (ISO, 2006a) (ISO, 2006b). O aprimoramento das metodologias de ACV permitiram avanço de confiabilidade dos resultados da pegada de carbono dos biocombustíveis, mas a comparação exige atenção e deve ser feita de forma cuidadosa devido às premissas, escopo e entre outros aspectos considerados no cálculo.

Ao longo dos últimos anos, grandes variações foram observadas nas estimativas dos GEE e pegada de carbono dos biocombustíveis, mas o aprimoramento em modelagem e acesso a novos dados permitiram o avanço no cálculo da ACV. Vale ressaltar que fatores como metodologia, dados de entrada, modelo, tratamento de coprodutos, fronteiras do sistema, abordagem, alocações, nível de detalhamento do cálculo e atributos específicos da ACV podem influenciar diretamente as estimativas da pegada de carbono do biocombustível. Na Figura 13 observa-se diferentes estudos entre 1990 e 2021, relacionados às estimativas da intensidade de

carbono (do inglês, *Carbon Intensity - CI*) do etanol de milho nos Estados Unidos, utilizando diferentes modelos.

Figura 13 - Intensidade de carbono do etanol de milho americano, entre 1990 e 2021



Fonte: Elaboração própria a partir de SCULLY et al. (2021).

Conforme evidencia o gráfico acima, em 1990, a pegada de carbono do etanol de milho americano foi calculada em 99 gCO₂e/MJ, sendo 64 gCO₂e/MJ relacionado à produção do combustível somado ao transporte e 34 gCO₂e/MJ para a produção do milho e transporte, sem contabilização da mudança do uso da terra. Ademais, as intensidades de carbono divulgadas pela *Argonne National Lab* (ANL) entre 1990 e 2005 consideram apenas as emissões de GEE decorrentes diretamente do ciclo de vida do etanol de milho, ou seja, da agricultura e produção do etanol.

Após 2005, os cálculos para as intensidades de carbono passaram a considerar as emissões de GEE que podem ocorrer indiretamente em resposta às mudanças na produção do etanol de milho. Ao expandir o limite do sistema para contabilizar a mudança do uso da terra, as estimativas da intensidade de carbono para o etanol de milho americano aumentaram entre 40% e 55% (SCULLY et al., 2021).

Ao final, percebe-se que ao longo de 20 anos existe grande variabilidade da intensidade, mas a pegada de carbono do etanol de milho americano tem convergido para valores mais

baixos, principalmente devido a melhorias na prática agrícola, com redução de 35% no uso de fertilizantes nitrogenados e queda de 40% no consumo de combustível fóssil. A redução das emissões de GEE, com queda de 50% entre 1990 e 2010, decorre principalmente do uso mais eficiente da energia nas usinas (SCULLY et al., 2021).

O aprimoramento das metodologias de ACV permitiram avanços de confiabilidade dos resultados da pegada de carbono dos biocombustíveis, mas a comparação exige atenção e deve ser feita de forma cuidadosa, principalmente quando considerado o efeito induzido de uso da terra, que pode ter grande intervalo de resultados para diferentes matérias-primas. De acordo com Brandão et al. (2022), como tem sido reconhecido em diversas políticas, é crucial que os efeitos induzidos, como *ILUC*, sejam incluídos na avaliação de sistemas de biocombustíveis, mesmo com alta variabilidade das estimativas.

Existem duas abordagens para calcular a pegada de carbono: a atribucional e consequential. A primeira abordagem é intuitiva, dada uma quantidade total de emissões de GEE identificadas em um sistema e utiliza diferentes métricas para atribuir as emissões de GEE a um produto específico. Por outro lado, a abordagem consequential avalia todas as perturbações (diretas e indiretas) que um determinado produto provoca ao ser introduzido no ambiente, incluindo mudança direta e indireta do uso da terra. Dessa forma, é possível estabelecer uma relação de pontos convergentes e divergentes nas abordagens para avaliação da pegada de carbono. Diferentes autores analisam as emissões de GEE diante dessas duas abordagens, promovendo assim discussões importantes sobre as emissões de GEE.

De acordo com Pereira et al. (2019), a pegada de carbono do etanol de milho americano, em uma abordagem atribucional, pode variar entre 43,4 e 62 gCO₂e/MJ, principalmente devido às práticas agrícolas (como por exemplo, o uso de fertilizantes), energia utilizada no processo industrial (gás natural, carvão ou biomassa), uso de diesel destinado para transporte na fase agrícola e tratamento dos coprodutos. Já no Brasil, os benefícios ambientais do uso do etanol de cana-de-açúcar como substituto da gasolina têm sido evidenciados em extensa literatura (GOLDEMBERG et al., 2008; CAVALETT et al., 2013; GOLDEMBERG, 2007; WALTER et al., 2014; SEABRA et al., 2011; MACEDO et al., 2008) e reportam uma redução de emissões de GEE (em gCO₂e/MJ) com variação entre 67% e 86% quando comparado à gasolina.

A pegada de carbono do etanol de cana-de-açúcar brasileiro é menor do que o etanol de milho americano devido aos diferentes processos agrícolas e industriais. Em uma abordagem atribucional, a pegada de carbono do etanol de cana pode variar entre 16 e 28 gCO₂e/MJ, principalmente devido à alocação econômica ou energética utilizada (PEREIRA et al., 2019; ANP, 2023).

Por outro lado, o etanol de milho no Brasil foi inicialmente adotado em usinas “*flex*”, aproveitando instalações e infraestrutura disponível das usinas de cana-de-açúcar existentes. A pegada de carbono do etanol a partir da cana-de-açúcar e milho é estimada entre 28 e 31,4 gCO₂e/MJ (MILANEZ et al., 2014; ANP, 2023). No RenovaBio, as usinas *full* têm uma pegada de carbono média de 36 gCO₂e/MJ, tendo algumas usinas mais eficientes, com menores pegadas de carbono, e outras menos, variando entre 16,8 e 50,7 gCO₂e/MJ (ANP, 2023).

A partir do estudo de Moreira et al. (2020), em uma abordagem atribucional, a pegada de carbono do etanol de milho no Brasil foi calculada em 18,3 e 25,9 gCO₂e/MJ (dois cenários com diferentes tipos de alocação – econômica e culturas separadas - para a avaliação das emissões de GEE da fase agrícola do milho). A produção do milho tem a principal contribuição para a pegada de carbono neste tipo de abordagem (entre 66% e 75%, respectivamente). A variedade de práticas do cultivo do milho pode afetar significativamente o desempenho ambiental do etanol, enquanto a sensibilidade em relação aos parâmetros do eucalipto, utilizado no processo produtivo para cogeração de energia, tende a ser menor.

Por outro lado, as emissões de GEE do processamento do milho (2,8 gCO₂e/MJ) são inferiores às do seu cultivo, com aproximadamente 60% de redução das emissões de GEE na etapa de processamento, atribuíveis ao uso de cavaco de eucalipto (biomassa) para cogeração (vapor e eletricidade). Nesta abordagem, o etanol de milho brasileiro tem capacidade de mitigação de aproximadamente 80% em comparação com a gasolina e 70% menor quando comparado ao etanol de milho americano, que usa majoritariamente gás natural como fonte de energia (MOREIRA et al., 2020).

Dessa forma, os valores da pegada de carbono do etanol de milho brasileiro, assim como o etanol a partir da cana-de-açúcar, representam uma redução significativa quando comparado a gasolina (87,4 gCO₂e/MJ) e, principalmente, são menores do que o etanol de milho produzido nos EUA (PEREIRA et al., 2019). As principais razões entre a diferença da pegada de carbono do etanol de milho norte-americano e o brasileiro são o uso de biomassa de eucalipto para cogeração de energia, ao invés de gás natural e, além disso, o uso do milho segunda safra no sistema de plantio direto, que otimiza recursos na sua rotação com a soja no mesmo ano e não demanda terra adicional.

No sistema integrado soja/milho, geralmente acompanhado pela técnica de plantio direto, é possível um grande ganho de eficiência, particularmente, o menor uso de fertilizantes nitrogenados (fixação de nitrogênio pela soja), redução de gastos com diesel nas operações agrícolas pela eliminação/redução de gradagem do solo, proteção do solo, preservação de nutrientes e acúmulo de carbono no solo (MOREIRA et al., 2020).

Apesar da história recente, são encontradas na literatura diferentes pegadas de carbono para o etanol de milho brasileiro. Como apresentado anteriormente, o estudo de Moreira et al. (2020) apresenta uma pegada de carbono entre 18,3 e 25,9 gCO₂e/MJ, considerando dois tipos de alocação diferentes. Resultados semelhantes são evidenciados no estudo de Milanez et al. (2014), que para os diferentes cenários analisados, são emitidos entre 24,1 e 31,4 gCO₂e/MJ (MILANEZ et al., 2014), para uma usina brasileira de etanol de *flex* (considerando a mesma abordagem).

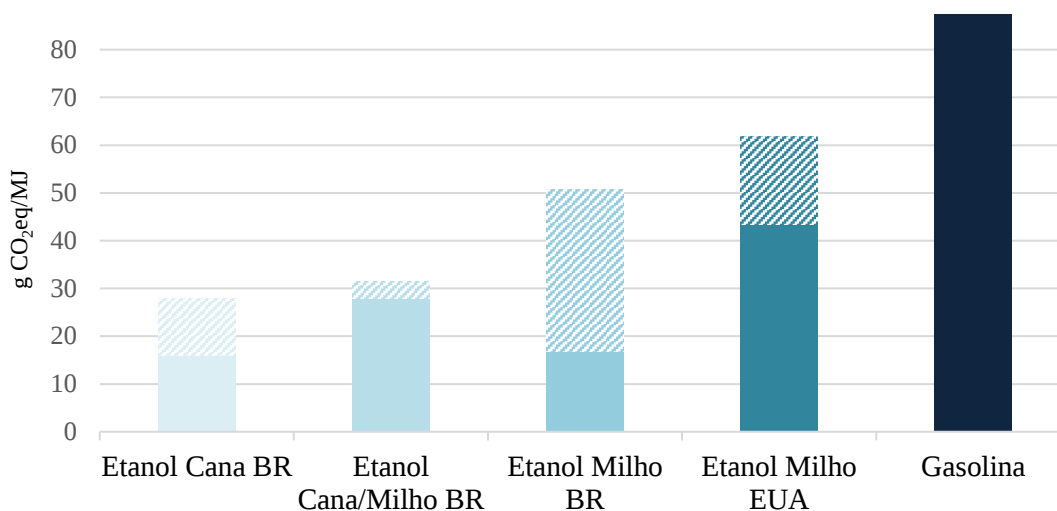
Por outro lado, Donke et al. (2017) encontrou um resultado muito diferente, apresentando uma pegada de carbono de 85 gCO₂e/MJ. As diferenças entre os resultados desses estudos estão, principalmente nas diferentes estimativas de emissões de *LUC* e, também, a cogeração de eletricidade. Para calcular a mudança direta no uso da terra este estudo utilizou dados de Mato Grosso para o período entre 1993-2013, concluindo que pode ter ocorrido expansão em áreas de cultura perene ou florestas primárias. Esse tipo de conversão de terras de fato gera grandes quantidades de emissões de GEE (DONKE et al., 2017).

No RenovaBio (também com abordagem atribucional), as usinas *full* têm uma pegada de carbono média de aproximadamente 36 gCO₂e/MJ (ANP, 2023). Porém, existem algumas que são mais eficientes. Como exemplo, a usina *full* FS de Lucas do Rio Verde tem uma Nota de Eficiência Energético Ambiental (NEEA)¹⁷ igual a 70,58 gCO₂e/MJ (ANP, 2023), que equivale a uma pegada de carbono de 16,82 gCO₂e/MJ para etanol anidro. Esses dados foram obtidos a partir da calculadora RenovaCalc, que é utilizada para comprovação do desempenho ambiental da produção de biocombustíveis pelas usinas, detalhando aspectos agrícolas e industriais dos processos produtivos que resultam na emissão de GEE, com base na Avaliação de Ciclo de Vida (ACV).

Na Figura 14 abaixo podem ser observadas as pegadas de carbono do etanol de milho brasileiro em comparação com o etanol de cana-de-açúcar, o etanol de milho dos Estados Unidos e com a gasolina. Quando comparado à gasolina (87,4 gCO₂e/MJ), as emissões de GEE podem ser reduzidas em até 80%, dependendo da pegada de carbono deste biocombustível, que pode variar entre 16,8 e 50,7 gCO₂e/MJ no Programa RenovaBio (ANP, 2023).

¹⁷ A Nota de Eficiência Energético-Ambiental (NEEA) é o potencial de redução de GEE do biocombustível, em comparação com o combustível fóssil substituto. Ou seja, uma maior nota indica melhor perfil do biocombustível.

Figura 14 - Comparação entre as pegadas de carbono do etanol de milho e cana no Brasil, etanol de milho americano e gasolina

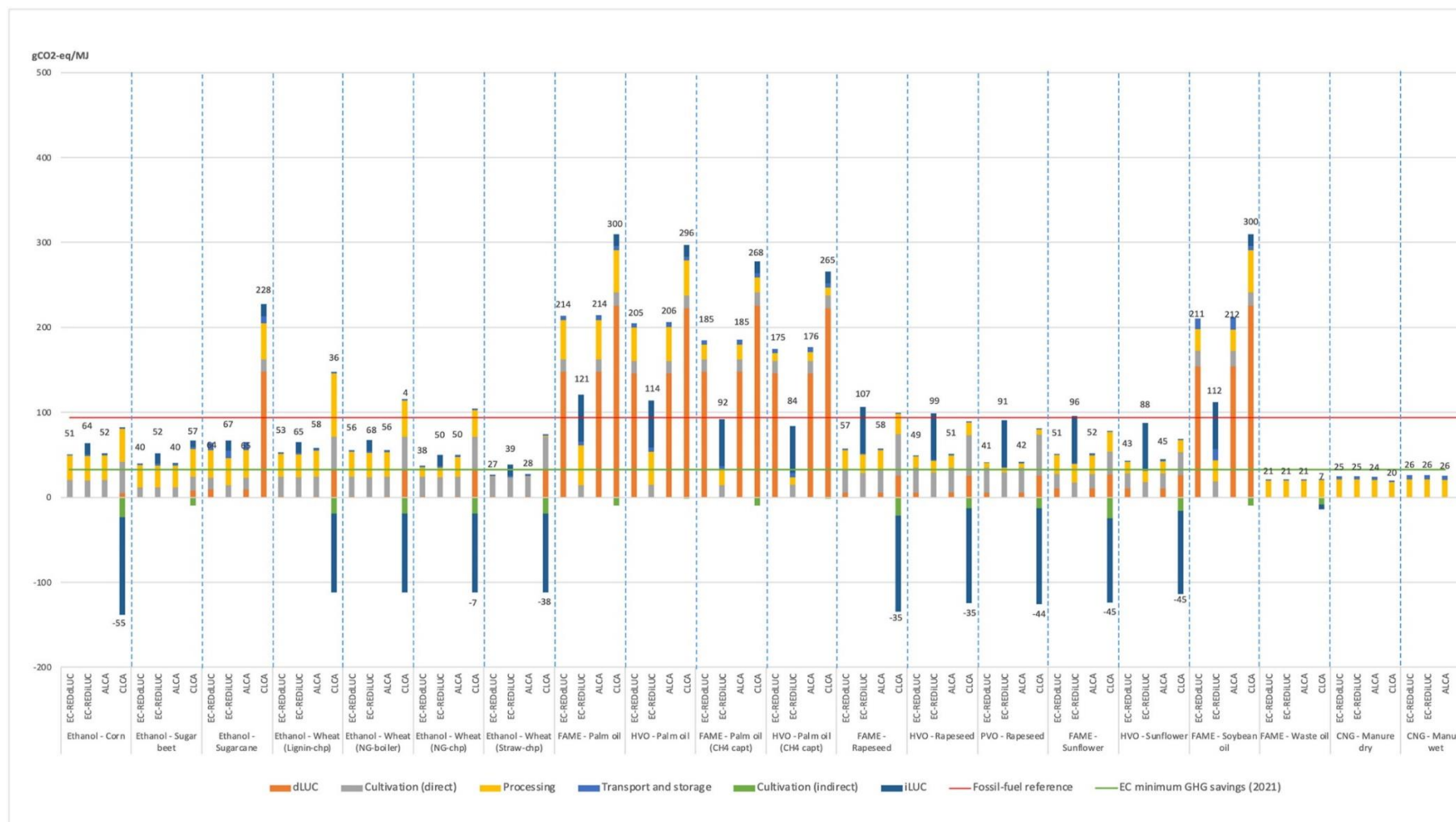


Fonte: Elaboração própria a partir de ANP (2023); PEREIRA et al. (2019).

Ao incluir os efeitos diretos e indiretos do uso da terra numa abordagem consequencial, a pegada de carbono do etanol de milho brasileiro foi calculada em 4,5 gCO₂e/MJ no cenário referência (MOREIRA et al., 2020). A principal diferença entre a abordagem atribucional e consequencial neste estudo está relacionado à contabilização de *LUC* (devido ao uso de área de milho 2ª safra) e os créditos com excedente de bioeletricidade (dada a premissa de deslocamento da geração de gás natural). Entre os quatro cenários analisados, todos estão abaixo de 10 gCO₂e/MJ e em um deles (Cenário 4), está próximo a zero (0,8 gCO₂e/MJ).

De acordo com Brandão et al. (2021), a inclusão de *ILUC* (direto e indireto) no cálculo da pegada de carbono pode gerar resultados melhores ou piores para os biocombustíveis e por isso não pode ser ignorado nas análises do ciclo de vida (Figura 15). Esta tese é o primeiro estudo que traz valores de *ILUC* para o etanol de milho segunda safra brasileiro.

Figura 15 - Impactos nas mudanças climáticas do etanol, biodiesel e biogás produzidos a partir de diferentes matérias-primas (gCO₂e/MJ de combustível final) estimados com quatro abordagens diferentes



Fonte: BRANDÃO et al. (2021).

Atualmente, quando novos produtos ou novas formas de produção aparecem, questiona-se a sustentabilidade deles. No ano de 2017, surgiu um novo conceito que indica como operacionalizar ou instrumentalizar práticas de desenvolvimento sustentável, o Soluções Baseadas na Natureza (do inglês, *Nature-Based Solutions – NBS*). A União Internacional para Conservação da Natureza (IUCN), organização que cunhou a expressão, define as SBN como as “intervenções que utilizam a natureza e as funções naturais de ecossistemas, saudáveis para enfrentar alguns dos desafios mais urgentes”, como o risco de desastres, bem-estar humano, promover uma economia verde e socialmente inclusiva, entre outros. Esse tipo de solução ajuda a proteger o ambiente, mas também proporciona inúmeros benefícios econômicos e sociais (FGVces, 2017).

Pesquisas acerca do uso do solo, mudança indireta do uso da terra e emissões de GEE em nível nacional ainda são incipientes para o setor etanol de milho brasileiro e a maioria das informações disponíveis sobre o tema é internacional, o que dificulta a aplicação à realidade brasileira. Porém, o grande trunfo das NBS é sua ampla abordagem e suas soluções valem-se de uma gama de ações em variados campos, como restauração, infraestrutura, gestão e proteção, entre outros (FGVces, 2017).

Sistemas produtivos baseados em biomassa precisam buscar sinergias de produtos que atendam aos múltiplos desafios, tendo particular atenção à questão da segurança alimentar. A produção de energia concomitante à de alimentos (soluções integradas energia-alimento) tem sido apontada como uma dessas possíveis vias, embora exemplos práticos ainda sejam raros. Ainda devem buscar o uso de matérias-primas oriundas de sistemas produtivos que adotem práticas de manejo sustentável e aderentes ao conceito *NBS* (GRISCOM et al., 2017; IPCC, 2022).

Ao olhar para o arranjo produtivo do etanol de milho segunda safra na região Centro-oeste, especificamente para a técnica de plantio direto e *double cropping* (sistema integrado soja/milho), estas práticas estão alinhadas, parcialmente, às Soluções Baseadas na Natureza. Principalmente, porque entrega uma solução efetiva para um desafio global utilizando a natureza, apresenta melhor relação custo-efetividade em relação a outras soluções e pode ser comunicada de maneira simples e convincente, princípios que estão atrelados à *NBS*.

Apesar da grande relevância das questões ambientais com relação à produção de biocombustível, a sustentabilidade socioeconômica também é extremamente importante para o desenvolvimento sustentável. Como exemplo, dentro dos 17 Objetivos de Desenvolvimento Sustentável (ODS) da ONU, estão incluídas metas de erradicação da pobreza, trabalho decente crescimento econômico e entre outros (ONU, 2021).

Nos Estados Unidos, mais de 78 mil empregos estão diretamente associados à indústria de etanol de milho, que gerou mais de 342,8 mil empregos indiretos e induzidos em todos os setores da economia. Além disso, o setor gerou US\$ 35 bilhões em renda para as famílias e contribuiu para aumento do Produto Interno Bruto (PIB) em US\$ 57 bilhões. Adicionalmente, a indústria do etanol americano resultou em mais de US\$ 12 bilhões em impostos federais, estaduais e locais (RFA, 2023).

Por outro lado, no Brasil, devido a recente história do setor, são poucos os estudos que olham para os impactos socioeconômicos da indústria brasileira do etanol de milho. Porém, antes mesmo de analisar os impactos socioeconômicos desta indústria, VanWey et al. (2013) evidenciam a forte relação e resultados positivos entre a expansão da dupla safra e bem-estar no estado de Mato Grosso, com geração de empregos, distribuição de renda e investimento em bens públicos (VANWEY et al. , 2013).

Em 2017, o Instituto Mato-grossense de Economia Agropecuária (IMEA) publicou um estudo sobre o potencial de produção do etanol de milho e a integração (*clusters*) de cadeias produtivas específicas de Mato Grosso, analisando para cada macrorregião do Estado as viabilidades econômicas, os impactos sociais e ambientais (IMEA, 2017). Nesse contexto, a instauração de novas indústrias de etanol de milho gera novos empregos e, adicionalmente, renda para a economia local, sendo esta última um indicador utilizado para medir a riqueza. Como resultado, o setor produtor de etanol empregou 4,4 mil trabalhadores em 2015, concentrados principalmente nas macrorregiões centro-sul, oeste e sudoeste de Mato Grosso.

Evidencia-se, portanto, a evolução da geração de empregos do setor, tendo em vista que em 2007 empregava apenas 1,3 mil trabalhadores, ou seja, um crescimento de 230,6% entre 2007 e 2015. Além disso, vale ressaltar a evolução da remuneração paga pelo setor em Mato Grosso. Em valores nominais, o estado de Mato Grosso paga 24,4% a mais do que a média da remuneração brasileira observada no setor de fabricação de etanol em outros estados (IMEA, 2017).

De acordo com este estudo publicado pelo IMEA (2017) e a partir de uma matriz de insumo-produto inter-regional desagregada entre Mato Grosso e resto do Brasil, estima-se que a partir da criação de um emprego direto no setor fabricação de etanol, são gerados 14 empregos indiretos e 10 empregos induzidos. Ou seja, a geração de apenas um emprego direto adicional neste setor pode criar até 24 empregos indiretos e induzidos. Além disso, destaca-se a importância econômica e social da instalação desta nova indústria, ressaltando aspectos positivos para a sociedade civil, visto que proporciona o desenvolvimento regional e ganho em bem-estar da sociedade (IMEA, 2017).

Embora escassas análises sobre os impactos socioeconômicos da indústria de etanol de milho no Brasil, onde grande parte do etanol ainda vem da cana-de-açúcar, diferentes estudos evidenciam que a produção de matéria-prima para biocombustíveis e a fase de processamento da cana-de-açúcar trazem efeitos socioeconômicos positivos, estendendo-se para além das fronteiras do município e proporcionam dinamismo econômico local e regional (WALTER et al., 2014; GILIO et al., 2016; MORAES et al., 2016; MACHADO et al., 2015; MORAES et al., 2015; MARTÍNEZ et al., 2013).

Corroborando com essas constatações, Brinkman et al. (2018) avalia que o setor sucroenergético contribui significativamente para a economia nacional. A expansão da produção de etanol de cana no Brasil em 2030 pode aumentar o PIB nacional em US\$ 2,6 bilhões e gerar 53 mil empregos, embora o autor destaque que esses impactos não são distribuídos igualmente em todo o país, nem entre classes de renda (BRINKMAN et al., 2018).

A partir dos estudos apresentados neste capítulo evidencia-se que a produção do etanol no Brasil vem acompanhada de benefícios sociais, econômicos e ambientais, embora existam desafios. Dentro do contexto do desenvolvimento sustentável e mitigação dos GEE, a expansão da produção do etanol de milho brasileiro se encaminha como uma alternativa para atingir as metas propostas pelo Brasil no Acordo de Paris, estabelecidas através da NDC brasileira no ano de 2015 (SILVA et al., 2021; MOREIRA et al., 2020; ZIERO et al., 2021).

Ao final, avalia-se que, apesar da história recente, sabe-se que a tecnologia dominante nos Estados Unidos, quando adaptada às condições do território brasileiro, obtém benefícios ambientais significativos. Porém, ainda não existem estudos que avaliam de maneira aprofundada os impactos socioeconômicos e de mudança do uso da terra para o etanol de milho brasileiro. Esta é a primeira tese que visa investigar o setor etanol de milho no Brasil e contribuirá significativamente para avançar no estado de conhecimento e literatura científica.

4 METODOLOGIA

Este quarto capítulo tem como objetivo apresentar a metodologia utilizada neste trabalho a partir da identificação da cadeia de valor, descrição da análise de insumo-produto, ferramenta utilizada para avaliar os impactos socioeconômicos e apresentação do BLUM (*Brazilian Land Use Model*), utilizado para avaliação dos impactos na mudança do uso da terra. Além disso, estão descritos: premissas, métodos e cenários considerados para cada uma das análises deste estudo.

4.1 Identificação da cadeia de valor

A produção do etanol de milho no Brasil envolve uma fusão de características como o maquinário e *know-how* importados dos Estados Unidos (EUA) e, por outro lado, as especificidades dos setores agrícola e biocombustível brasileiro. Os principais fornecedores internacionais de equipamentos industriais são a *ICM Inc.* e a *Fluid Quip Technologies*, ambas norte-americanas, e juntas correspondem a pelo menos metade dos projetos entre as usinas de etanol de milho em operação. Por outro lado, outras empresas nacionais têm dedicado esforços no desenvolvimento de equipamentos e projetos para o setor, como por exemplo a Fermentec e Piracicaba Engenharia, que já possuem alguns projetos implementado e usinas em fase de teste e operação (NEVES et al., 2021).

A fermentação de milho para o etanol no Brasil baseia-se principalmente na tecnologia desenvolvida nos EUA, como por exemplo o processamento de moagem a seco ou úmido. O tratamento inicial do grão difere os processos, mas ambos envolvem uma hidrólise prévia para quebrar as cadeias de amido para obtenção de xarope de glicose, que pode ser convertido por leveduras em etanol (BOTHAST et al., 2005; MANOCHIO et al., 2017).

O processo de moagem úmido era mais utilizado até a década de 90, mas atualmente a moagem a seco é dominante nos Estados Unidos, devido aos menores custos de capital associados a esta tecnologia, sendo responsável por quase 90% da produção total de etanol nos Estados Unidos (MANOCHIO et al., 2017).

Neste estudo, a usina avaliada utiliza o processo de moagem seco (FS, 2022). O milho é moído, cozido e liquefeito em água. Em seguida segue para a etapa de fermentação que, com adição de enzimas e levedura, transforma o amido em açúcares e, posteriormente, em etanol.

As usinas de etanol de milho podem trabalhar ininterruptamente 350 dias, com paradas apenas para manutenções preventivas. O processo é todo monitorado por automação industrial e supervisionado por uma central de inteligência (NEVES et al., 2021).

Ainda com relação a produção de etanol de milho no Brasil, a Tecnologia de Separação de Fibras (do inglês, *FST – Fiber Separation Technology*) permite recuperar fibras e proteínas do milho, resultando na coprodução de produtos ricos em nutrientes essenciais (proteína, gordura, minerais e vitaminas). Comumente conhecidos como *DDGS (Dried Distillers Grains with Soluble)*, os coprodutos podem ser utilizados para alimentação animal, um suplemento altamente nutritivo para a alimentação de bovinos, suínos e aves (NEVES et al., 2021; FS, 2022).

Diferente dos Estados Unidos, que utiliza majoritariamente o gás natural como fonte de energia, na usina analisada a geração de energia para o processo de produção do etanol de milho tem como base a produção integrada de vapor e eletricidade, a partir do cavaco de eucalipto, gerada por uma termoelétrica anexa à fábrica de etanol. O sistema energético é otimizado de maneira que a eletricidade gerada pela termoelétrica é superior que a demanda dos processos de produção.

A eletricidade excedente é vendida à rede. A usina avaliada neste estudo é certificada para a comercialização de certificados *International Renewable Energy Certificates (I-RECs)*, que garantem a rastreabilidade da energia exportada para a rede, assegurando uma origem renovável. Emitidos pelos *I-REC Standard*, um sistema global de rastreamento de atributos ambientais de energia, esses certificados têm ganhado relevância por representar uma oportunidade de neutralização das emissões relacionadas ao consumo de eletricidade das empresas (FS, 2022).

Como apresentado acima, é possível identificar que a produção do etanol de milho brasileiro se assemelha com os EUA em alguns aspectos, como por exemplo o processo de moagem a seco, alguns equipamentos e o milho como principal insumo. Por outro lado, a produção brasileira se diferencia a partir do uso de cavaco de eucalipto para cogeração de energia e milho 2ª safra, que não compete por terra, contribuindo para redução de pressões sobre o uso da terra (Tabela 5).

Tabela 5 – Principais diferenças entre a produção de etanol de milho brasileiro e norte-americano

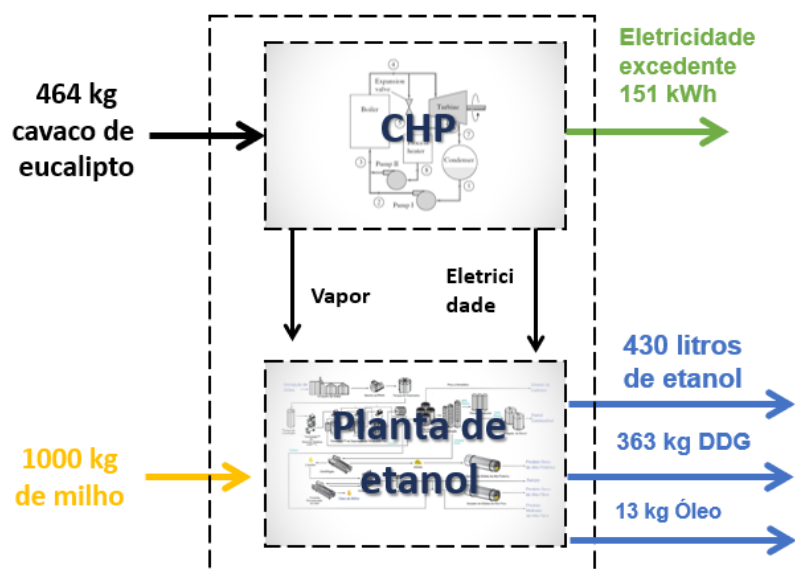
	Brasil	Estados Unidos
Produção Milho	Milho 2 ^a safra (rotação com a cultura da soja, no sistema soja-milho), reduz a pressão sobre o uso da terra.	Milho 1 ^a safra
Energia do processo	Cavaco de eucalipto	Gás Natural e outras fontes de origem fóssil

Fonte: Elaboração própria.

Para a elaboração deste estudo, foram utilizados os dados primários da primeira usina autônoma de etanol de milho do Estado de Mato Grosso. As informações da *Fueling Sustainability* (FS) foram utilizadas porque na época em que este estudo teve início (em 2017), esta era a única usina *full* em operação. A partir da Figura 16 abaixo, pode ser visto o diagrama do fluxo de materiais e energia da usina de etanol de milho brasileira avaliada neste estudo.

De acordo com as informações fornecidas empresa, a cada 1.000 quilos (kg) de milho são produzidos aproximadamente 430 litros de etanol anidro, 363 kg de *DDGS* (seco e úmido) e 13 quilos de óleo de milho bruto. Anexa à estrutura produtiva da indústria de etanol de milho, existe uma termoelétrica que usa cavaco de eucalipto para a geração de eletricidade e vapor, que são utilizados no processo. Para a mesma quantidade de milho, os mesmos 1.000 quilos, são necessários 464 kg de cavaco de eucalipto para atender a demanda de energia da usina. Além de atender à demanda de energia da usina, ainda são exportados 151 kWh de bioeletricidade excedente para a rede.

Figura 16 - Diagrama do processo de produção da indústria etanol de milho no Brasil



Fonte: Elaboração própria.

Como premissa deste estudo e dentro desse sistema produtivo, considerou-se que o milho demandado pela indústria seja proveniente de um raio médio de 50 quilômetros (km) da usina de etanol, enquanto distâncias mais longas (690 km) são assumidas para o transporte do biocombustível. O DDGS, utilizado para alimentação animal, é transportado para uma distância média de 140 km (o DDG seco pode ser transportado para distâncias mais longa, porém o WDG úmido deve ser consumido mais rapidamente devido à validade e, por isso, é transportado até um raio de 30 km).

Por outro lado, o óleo de milho, é utilizado para produção de biodiesel em um pequeno complexo industrial próximo à usina de etanol, por isso a distância considerada é zero. O diagrama do processo de produção da indústria etanol de milho apresentado acima na Figura 16 foi utilizado tanto para a análise de impacto socioeconômico quanto para o uso da terra avaliados neste estudo. As especificidades de cada análise, como os cenários e premissas, estão detalhadas em suas respectivas seções (4.4 e 4.5).

Devido ao recente início das operações da usina de etanol de milho em território brasileiro, foram feitas várias reuniões com os profissionais da indústria e comercial para entender o funcionamento do setor e do mercado. Este processo inicial foi de extrema importância para identificar especificidades do setor e a melhor forma de refletir essas características nos modelos utilizados para a avaliação socioeconômica e ambiental.

Além disso, devido à escassez de informação para o caso brasileiro, o estudo publicado pelo IMEA (2017) foi utilizado como base para entender e estudar o modelo de negócios, mercado, a cadeia de valor e o processo de produção brasileiro. Em alguns casos específicos, como no caso dos *DDGS* foi necessário utilizar dados do mercado de etanol de milho americano, devido a não existência de informações para o etanol de milho brasileiro, como o caso da substituição do farelo de soja e milho por *DDGS*.

Com isso, foram definidas premissas e substituições/alocações que refletiam de forma mais próxima o mercado de etanol de milho brasileiro. Para os dados inexistentes ou não coletados de forma primária, foram extraídos da literatura, buscando, a partir das informações secundárias, dados que refletem a realidade do novo setor e da região Centro-Oeste do Brasil. A seguir, serão explicitados.

4.2 Modelo básico de insumo-produto

Esta parte da tese busca introduzir e apresentar a metodologia de insumo-produto, utilizada para a análise socioeconômica proposta neste estudo. Para esta tese foram utilizadas informações de: Miller e Blair (2009); Guilhoto (2011) e Cunha (2011).

O modelo de insumo-produto, utilizado com referência principal para a análise socioeconômica deste estudo, foi formulado por Wassily Leontief (década de 1930) e descreve o fluxo monetário entre os setores produtivos em uma economia. Além disso, busca analisar a interdependência da economia de uma forma sistêmica e prática através de equações lineares, que tem como objetivo descrever e interpretar operações em termos de relações estruturais básicas observáveis. O modelo descreve o fluxo monetário entre os setores produtivos da economia, ou seja, as relações intersetoriais da cadeia produtiva (CUNHA, 2011).

De acordo com Leontief:

“A análise de Insumo-Produto é uma extensão prática da teoria clássica de interdependência geral que vê a economia total de uma região, um país ou mesmo do mundo todo como um sistema simples, e parte para descrever e para interpretar a sua operação em termos de relações estruturais básicas observáveis” (LEONTIEF W. , 1987).

O sistema produtivo da economia de um país é composto por setores produtivos, pertencentes a uma rede, que se relacionam e interagem entre si, e a cadeia produtiva às vezes pode ser complexa e diversificada, dependendo do seu estágio de desenvolvimento (CUNHA,

2011). Porém, para enxergar a economia de maneira simplificada, basta observar os fluxos que entram e saem do processo produtivo. Recursos naturais e fatores primários de produção (capital e trabalho) entram na cadeia produtiva e, após todo o processo, saem bens e serviços para atender à demanda final (o consumo das famílias, o consumo do governo, a formação bruta de capital fixo (investimento em bens de capital) e as exportações (GUILHOTO J. M., 2011).

Leontief conseguiu realizar a construção de uma “fotografia econômica”, demonstrando como os setores estão relacionados entre si, ou seja, quais setores suprem e/ou compram serviços e produtos de outros setores. O resultado foi demonstrar como a economia funciona e como os setores se relacionam de forma mais ou menos dependente uns dos outros (CUNHA, 2011).

Esse sistema de interdependência é demonstrado a partir de uma tabela de insumo-produto. Enquanto alguns setores compram e vendem entre si, outros de forma individual interagem com um número relativamente pequeno de setores. Porém, devido à natureza desta dependência, todos os setores estão interligados, direta ou indiretamente.

A partir da Figura 17 observa-se que as relações fundamentais de insumo-produto evidenciam que as vendas dos setores podem ser utilizadas dentro do processo produtivo pelos diversos compradores da economia ou podem ser consumidas pelos diversos componentes da demanda final. Por outro lado, para se produzir são necessários insumos, importados, impostos são pagos e gera-se valor adicionado, como o pagamento de salários, remuneração do capital e da terra agrícola, além da geração de empregos (GUILHOTO et al., 2010).

Figura 17 - Relações fundamentais de Insumo-Produto

	Setores Compradores			
Set. Vend	Insumos Intermediários		Dem. Final	Prod Total
	Impostos Indiretos Líquidos (IIL)		IIL	
	Importações (M)		M	
	Valor Adicionado			
	Produção Total			

Fonte: GUILHOTO et al. (2010).

O modelo de insumo-produto pressupõe que somente os produtos domésticos são exportados, o que implica que os produtos importados devem passar por um processo de produção interna antes de serem exportados. Compreendendo a produção interna, os produtos domésticos utilizam uma combinação de insumos domésticos (que foram obtidos por meio da produção doméstica), insumos importados e insumos primários (trabalho, capital e terra). Os produtos domésticos são empregados pelas indústrias como insumos intermediários no processo produtivo ou consumidos como produtos finais (exportação, consumo das famílias, gastos do governo, investimentos, etc.) (GUILHOTO et al., 2005).

Posto isto, as importações podem ser insumos intermediários, que se destinam ao processo produtivo, ou de bens finais, que são diretamente adquiridos pelos consumidores finais. A renda da economia, utilizada no consumo dos bens finais, sejam destinados para o consumo ou investimento, é gerada por meio da remuneração do trabalho, capital e terra agrícola e a receita do governo é obtida por meio do pagamento de impostos pelas empresas e pelos indivíduos. Dessa forma, o modelo supõe que existe equilíbrio em todos os mercados da economia (GUILHOTO et al., 2005).

Importante ressaltar que a produção de bens e serviços afeta diretamente o uso dos recursos naturais e os fatores primários e, ainda com a mesma estrutura da demanda final, combinações de arranjos tecnológicos diferentes podem impactar de forma divergente as entradas na cadeia produtiva. Como exemplo, o aumento da demanda final por um determinado produto pode, também, causar um “efeito cascata” em todos os outros setores produtivos (MILLER e BLAIR, 2009). O “efeito cascata” se prolonga para outros setores, gerando mais efeitos indiretos dentro da cadeia produtiva.

Para compreender o modelo de forma didática, pode-se utilizar a economia agregada de 2011, com apenas três setores. A Tabela 6 tem como objetivo auxiliar na compreensão do funcionamento do modelo insumo-produto, para proporcionar uma melhor leitura e entendimento.

Tabela 6 - Exemplo esquemático de uma tabela de insumo-produto com três setores

	Setor 1	Setor 2	Setor 3	Consumo Famílias	Governo	Investimento	Exportações	Total
Setor 1	Z ₁₁	Z ₁₂	Z ₁₃	C ₁	G ₁	I ₁	E ₁	X ₁
Setor 2	Z ₂₁	Z ₂₂	Z ₂₃	C ₂	G ₂	I ₂	E ₂	X ₂
Setor 3	Z ₃₁	Z ₃₂	Z ₃₃	C ₃	G ₃	I ₃	E ₃	X ₃
Importação	M ₁	M ₂	M ₃	M _C	M _G	M _I		M
Impostos Indiretos Líquidos de Subsídios	T ₁	T ₂	T ₃	T _C	T _G	T _I	T _E	T
Valor Adicionado Bruto	VAb ₁	VAb ₂	VAb ₃					VAb
Total	X ₁	X ₂	X ₃	C	G	I	E	

Fonte: Elaboração própria a partir de GUILHOTO (2011).

Sendo que:

Z_{ij} é o fluxo monetário entre os setores i e j ;

C_i é o consumo doméstico das famílias dos produtos do setor i ;

G_i é o gasto do governo junto ao setor i ;

I_i é a demanda por bens de investimento produzidos no setor i ;

E_i é o total exportado pelo setor i ;

X_i é o total da produção doméstica do setor i ;

T_i é o total de impostos indiretos líquidos pagos por i ;

M_i é a importação realizada pelo setor i ;

W_i é o valor adicionado gerado pelo setor i ;

A Tabela 6 permite estabelecer a igualdade:

$$X_1 + X_2 + X_3 + C + G + I + E = X_1 + X_2 + X_3 + M + T + W \quad (1)$$

Eliminando X_1 , X_2 e X_3 de ambos os lados, tem-se que:

$$C + G + I + E = M + T + W \quad (2)$$

Rearranjando:

$$C + G + I + (E - M) = T + W \quad (3)$$

A partir da reorganização das equações acima, comprova-se que a tabela de insumo-produto preserva as identidades macroeconômicas. De acordo com Guilhoto (2011), da Tabela 6 e equações (1), (2) e (3) apresentadas anteriormente, pode-se generalizar o sistema para o caso de n setores, obtendo-se:

$$\sum_{j=1}^n z_{ij} + c_i + g_i + I_i + e_i = x_i \quad (4)$$

$$i = 1, 2 \dots n$$

Sendo:

z_{ij} é a produção do setor i que é utilizada como insumo intermediário pelo setor j ;

c_i é a produção do setor i que é consumida domesticamente pelas famílias;

g_i é a produção do setor i que é consumida domesticamente pelo governo;

I_i é a produção do setor i que é destinada ao investimento;

e_i é a produção do setor i que é exportada;

x_i é a produção doméstica total do setor i .

A equação (4) evidencia que o valor da produção (x_i) corresponde à soma dos insumos que o setor i destina a todos os setores produtivos da economia, para que estes realizem suas produções (z_{ij}), o consumo doméstico das famílias dos produtos do setor i (c_i), ao gasto do governo junto ao setor i (g_i), à demanda por bens de investimento produzidos pelo setor i (I_i) e ao valor total exportado pelo setor i (e_i) (CUNHA, 2011).

A Demanda Final (Y) é composta por consumo das famílias (C), consumo do governo (G), exportações (E) e investimentos (I). O valor adicionado bruto (VAb) corresponde à soma entre a remuneração do fator trabalho, remuneração do fator capital e os impostos e subsídios sobre a produção (CUNHA, 2011). Por isso, a Equação (4) pode ser escrita como:

$$X_i = \sum_{j=1}^n Z_{ij} + Y_i \quad \text{para } 1 \leq i \leq n \quad (5)$$

De modo geral, o coeficiente técnico direto da produção a_{ij} , identificado como os insumos fornecidos pelo setor i ao setor j para a produção de R\$ 1,00 do setor j é definido por (CUNHA, 2011):

$$a_{ij} = \frac{z_{ij}}{x_j} \quad (6)$$

Sendo:

Matriz $\mathbf{A} = [a_{ij}]$ identificada como a matriz de coeficientes diretos de insumo.

A partir da Equação (6) e ao assumir que os fluxos intermediários por unidade do produto final são fixos, o sistema aberto de Leontief pode ser derivado, ou seja:

$$\begin{aligned} \sum_{j=1}^n a_{ij}X_j + y_i &= x_i \\ i &= 1, 2 \dots n \end{aligned} \quad (7)$$

Como dito anteriormente, o coeficiente técnico a_{ij} indica a quantidade de insumo do setor i necessária para a produção de uma unidade de produto final do setor j . A demanda final por produtos do setor é identificada através do y_i , isto é, a soma entre c_i , g_i , I_i e e_i . Além da forma apresentada acima, a equação 7 pode ser descrita em forma matricial, como:

$$\mathbf{AX} + \mathbf{Y} = \mathbf{X} \quad (8)$$

Sendo:

$\mathbf{A}$ se refere à matriz de coeficientes diretos de insumo de ordem $(n \times n)$.

x e y são os vetores colunas de ordem $(n \times 1)$.

A equação matricial (8) pode ser resolvida para X (vetor com o valor da produção de cada um dos setores) em função de Y (vetor com o valor da demanda final de cada um dos setores), cujo resultado é:

$$\mathbf{X} = (\mathbf{I} - \mathbf{A})^{-1} \mathbf{Y} \quad (9)$$

A matriz identidade de ordem n é identificada pela letra $\mathbf{I}$. A equação (9) apresenta um resultado interessante. Esta equação fornece o valor da produção de cada um dos setores para atender à demanda final por um ou mais setores, considerando que um setor usa insumos dos

outros setores para sua produção, e esses setores usam também insumos de outros setores para atender a demanda por estes insumos, e assim sucessivamente.

Esse efeito de somar os insumos necessários de todos os setores para atender a demanda final é chamado de efeito direto e indireto. Explicando a equação (9): $(\mathbf{I} - \mathbf{A})^{-1}$ é a matriz de coeficientes diretos e indiretos ou matriz de Leontief. Em $\mathbf{L} = (\mathbf{I} - \mathbf{A})^{-1}$, o elemento b_{ij} deve ser interpretado como sendo a produção total do setor i , necessária para produzir uma unidade de demanda final do setor j .

Do ponto de vista da álgebra matricial, nota-se que ao multiplicar a matriz $(\mathbf{I} - \mathbf{A})$ por $(\mathbf{I} + \mathbf{A} + \mathbf{A}^2 + \mathbf{A}^3 + \dots + \mathbf{A}^n)$, conclui-se que: $(\mathbf{I} - \mathbf{A}^{n+1})$. Como todos os coeficientes técnicos da matriz $\mathbf{A}$ estão entre 0 e 1, adicionalmente que n tende ao infinito, os valores do último termo se aproximam de zero e, dessa forma, pode-se considerar como resultado da multiplicação apenas o termo $\mathbf{I}$ (matriz identidade). Sendo assim, conclui-se que $(\mathbf{I} + \mathbf{A} + \mathbf{A}^2 + \mathbf{A}^3 + \dots + \mathbf{A}^n)$ pode ser considerada como a matriz inversa de $(\mathbf{I} - \mathbf{A})$ quando n assume valores altos (GUILHOTO et al., 2010).

Como exemplo, se houver aumento da demanda por produtos de determinado setor j , o impacto inicial corresponderá exatamente ao aumento da produção deste setor. Esta variação está refletida no primeiro termo $\mathbf{I}$ do somatório $(\mathbf{I} + \mathbf{A} + \mathbf{A}^2 + \mathbf{A}^3 + \dots + \mathbf{A}^n)$. Porém, para aumentar a produção do setor j , outros insumos dos demais setores seriam demandados, segundo a proporção estabelecida pela coluna j .

Ao pré-multiplicar o vetor da variação da demanda pela matriz $(\mathbf{I} - \mathbf{A})^{-1}$ conclui-se que o setor j teria um aumento de produção correspondente à variação da demanda somado ao valor necessário de insumo demandado pelo próprio setor em função do aumento da demanda final. Portanto, o termo $\mathbf{A}$ representa a necessidade de insumo do setor originalmente demandado e mede os efeitos da “primeira rodada”. Porém, a produção desses insumos demandará outros insumos e o valor desta demanda será calculada por meio do termo $\mathbf{A}^2$. Este encadeamento não tem fim e cada “rodada” é contemplada pela inclusão de mais um termo no somatório (GUILHOTO et al., 2010).

Em resumo, a Equação (9) fornece o valor da produção de cada um dos setores para atender à demanda final por um ou mais setores, isto é, para concretizar sua produção todos os demais setores que fornecem insumos ao setor j também teriam suas produções alteradas. O acréscimo seria correspondente à variação da demanda multiplicado pelo coeficiente técnico a_{ij} .

A partir do exposto, identifica-se que a Equação (9) é uma ferramenta valiosa para avaliar o impacto na produção de todos os setores da economia em função do choque realizado para atender à demanda final de um ou mais setores. Dessa forma, a Equação (9) foi utilizada para calcular os impactos socioeconômicos na fase de investimentos. A partir da matriz $(\mathbf{I} - \mathbf{A})^{-1}$, pode-se obter o valor da produção de todos os setores considerando tanto os efeitos diretos quanto os indiretos de toda a cadeia produtiva para atender à demanda final. Para isso, subtraindo a Matriz $\mathbf{A}$ da matriz identidade $(\mathbf{I})$ e, posteriormente, calculando sua inversa, encontramos a inversa de Leontief $(\mathbf{L})$ (GUILHOTO J. M., 2011).

As matrizes $\mathbf{A}$ e $\mathbf{L}$ são expressas em termos de relações físicas entre insumos e produtos, e os seus elementos são chamados de coeficientes técnicos. Porém, em termos práticos, estas matrizes são estimadas a partir de fluxos medidos em termos monetários, o que pode gerar problemas quando estas matrizes são utilizadas. Mesmo se fosse possível a estimação das matrizes $\mathbf{A}$ e $\mathbf{L}$ a partir de relações físicas, existiriam problemas relacionados à estabilidade dos coeficientes ao longo do tempo, à definição de como deveria ser feita a agregação dos setores, entre outros (GUILHOTO et al., 2010).

No Brasil, o Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística (IBGE) é o órgão responsável pela construção oficial das matrizes de insumo-produto que podem ser obtidas diretamente no site oficial do instituto¹⁸ e estão disponíveis em diferentes níveis de desagregação setorial (12, 20 ou 67 setores). Atualmente a matriz de insumo produto divulgada pelo IBGE é composta por 15 tabelas. A matriz $\mathbf{A}$ de coeficientes técnicos corresponde a Tabela 14 e a inversa de Leontief a Tabela 15.

4.3 Matriz de Insumo-Produto Inter-regional

Desde a década de 1950 diferentes modelos regionais de insumo-produto foram desenvolvidos, principalmente com o intuito de capturar as peculiaridades e os padrões de interdependência regionais. Esses modelos podem ser classificados de acordo com os seguintes critérios: (i) número de regiões consideradas; (ii) reconhecimento (ou não) das ligações inter-regionais; (iii) grau de detalhamento implícito nos fluxos inter-regionais de comércio; e (iv) as hipóteses assumidas para estimar os coeficientes de comércio (GUILHOTO et al., 2017).

¹⁸ As tabelas da matriz de insumo produto podem ser encontradas no site oficial do IBGE, a partir do link: <https://www.ibge.gov.br/estatisticas/economicas/contas-nacionais/9085-matriz-de-insumo-produto.html?=&t=resultados>

Os sistemas regionais de insumo-produto podem ser construídos com apenas uma região, duas ou mais regiões. Para Isard et al. (1998), os modelos inter-regionais conseguem identificar os transbordamentos (*spillover effects*), através dos quais podem se verificar as consequências e impactos do aumento na demanda de uma dada região sobre as demais regiões consideradas, bem como o *feedback* na própria região onde houve o incremento inicial. A magnitude desses efeitos caracteriza o grau de interdependência econômica regional (ISARD et al., 1998).

De acordo com Leontief (1986) a interdependência econômica entre duas regiões ou entre dois setores da economia pode ser direta ou indireta. A interdependência direta ocorre na medida em que os bens e serviços produzidos em uma região são absorvidos por setores produtivos ou pela demanda final de outra região. A interdependência indireta, por outro lado, acontece quando a ligação entre tais regiões ou indústrias é estabelecida por meio de setores produtivos de outras regiões, formando os chamados padrões triangulares ou multilaterais de comércio.

O maior foco geográfico a partir da análise insumo-produto permite a incorporação de peculiaridades regionais e a concepção de estratégias ligadas ao planejamento urbano. Entretanto, a falta de informações aparece como principal dificuldade para construção de sistemas regionais de insumo-produto, principalmente acerca dos fluxos comerciais intermediários entre os setores e as regiões (ISARD et al., 1998).

O sistema insumo-produto de várias regiões tem um problema fundamental: a estimação das transações entre as regiões. As matrizes de comércio inter-regional dificilmente estão disponíveis no nível de detalhamento necessário. Porém, vale destacar que desde os primeiros estudos de Isard (1951) e Leontief et al. (1953) muito se avançou em extensões regionais de modelos insumo-produto (ISARD, 1951; Leontief et al., 1953). Ao longo dos últimos anos, diversas pesquisas nacionais e internacionais construíram sistemas regionais e inter-regionais de insumo-produto (HADDAD et al., 2017; GUILHOTO et al., 2017; GUILHOTO et al., 2010; GUILHOTO et al., 2005; HADDAD et al., 2016; CUNHA, 2011; FLEGG et al., 2016).

A descrição do modelo de insumo-produto vista na seção anterior se refere às matrizes nacionais. O modelo inter-regional de insumo-produto, também chamado de “modelo Isard”, devido à aplicação de Isard (1951), requer grande massa de dados, reais ou estimados, principalmente quanto às informações sobre fluxos intersetoriais e inter-regionais (ISARD, 1951). A Figura 18 apresenta de forma esquemática as relações dentro de um sistema de insumo-produto inter-regional. Neste sistema, existe uma troca de relações entre as regiões, exportações e importações, expressas por meio do fluxo de bens que se destina tanto ao consumo intermediário como à demanda final (GUILHOTO J. M., 2011).

Figura 18 - Relações de Insumo-Produto em um sistema inter-regional

	Setores - Região L	Setores - Região M	L	M	
Set. Reg. L	Insumos Intermediários LL	Insumos Intermediários LM	DF LL	DF LM	Prod. Total L
Set. Reg. M	Insumos Intermediários ML	Insumos Intermediários MM	DF ML	DF MM	Prod. Total M
	Imp. Resto Mundo (M)	Imp. Resto Mundo (M)	M	M	M
	Impostos Ind. Liq. (IIL)	Impostos Ind. Liq. (IIL)	IIL	IIL	IIL
	Valor Adicionado	Valor Adicionado			
	Prod. Total Região L	Prod. Total Região M			

Fonte: GUILHOTO et al. (2010).

De forma simples e hipotética, pode-se apresentar os fluxos intersetoriais e inter-regionais de bens para as regiões *L* e *M*, com dois setores, como exemplificado abaixo:

Z_{ij}^{LL} – fluxo monetário do setor *i* para o setor *j* da região *L*,

Z_{ij}^{ML} – fluxo monetário do setor *i* da região *M*, para o setor *j* da região *L*.

Como isso, pode-se montar a seguinte matriz:

$$\mathbf{Z} = \begin{bmatrix} Z^{LL} & Z^{LM} \\ Z^{ML} & Z^{MM} \end{bmatrix} \quad (10)$$

Sendo que:

Z^{LL} e Z^{MM} , representam matrizes dos fluxos monetários intrarregionais, e

Z^{LM} e Z^{ML} , representam matrizes dos fluxos monetários inter-regionais.

Ao considerar a equação de (Leontief, 1951; LEONTIEF W. , 1986), tem-se que:

$$X_i = z_{i1} + z_{i2} + \dots + z_{in} + Y_i \quad (11)$$

X_i indica o total da produção do setor *i*, z_{in} o fluxo monetário do setor *i* para o setor *n*, e Y_i é a demanda final por produtos do setor *i*, como apresentado abaixo,

$$X_1^L = z_{11}^{LL} + z_{12}^{LL} + z_{11}^{LM} + z_{12}^{LM} + Y_1^L \quad (12)$$

X_1^L se refere ao total do bem 1 produzido na região L . Considerando os coeficientes de insumo regional para L e M , tem-se os coeficientes intrarregionais:

$$a_{ij}^{MM} = \frac{z_{ij}^{LL}}{X_j^L} \Rightarrow z_{ij}^{LL} = a_{ij}^{LL} X_j^L \quad (13)$$

Dessa forma, podem-se definir os a_{ij}^{LL} como coeficientes técnicos de produção, que representam a quantidade que o setor j da região M compra do setor i da região M . E, por último, os coeficientes inter-regionais:

$$a_{ij}^{ML} = \frac{z_{ij}^{ML}}{X_j^L} \Rightarrow z_{ij}^{ML} = a_{ij}^{ML} X_j^L \quad (14)$$

Com isso, são definidos os a_{ij}^{ML} como coeficientes técnicos de produção que representam quanto o setor j da região L compra do setor i da região M :

$$a_{ij}^{LM} = \frac{z_{ij}^{LM}}{X_j^M} \Rightarrow z_{ij}^{LM} = a_{ij}^{LM} X_j^M \quad (15)$$

Dessa forma, a_{ij}^{LM} correspondem aos coeficientes técnicos de produção que representam a quantidade que o setor j da região M compra do setor i da região L . Estes coeficientes podem ser substituídos na Equação 15, obtendo que:

$$X_1^L = a_{11}^{LL} X_1^L + a_{12}^{LL} X_2^L + a_{11}^{LM} X_1^M + a_{12}^{LM} X_2^M + Y_1^L \quad (16)$$

As produções para os demais setores são obtidas de forma similar. Ao isolar Y_1^L e colocar X_1^L em evidência, tem-se que:

$$(1 - a_{11}^{LL}) X_1^L - a_{12}^{LL} X_2^L - a_{11}^{LM} X_1^M - a_{12}^{LM} X_2^M = Y_1^L \quad (17)$$

As demandas finais restantes podem ser obtidas similarmente. Portanto, de acordo com:

$$A^{LL} = Z^{LL} (\hat{X}^L)^{-1} \quad (18)$$

Com isso, constrói-se a matriz A^{LL} para os dois setores. A^{LL} representa a matriz de coeficientes técnicos intrarregionais de produção. Esta mesma formulação tem validade para A^{LM} , A^{MM} e A^{ML} . Tendo isso, as matrizes podem ser definidas, como demonstrado abaixo:

$$A = \begin{bmatrix} A^{LL} & \vdots & A^{LM} \\ \dots & \dots & \dots \\ A^{ML} & \vdots & A^{MM} \end{bmatrix} \quad (19)$$

$$X = \begin{bmatrix} X^L \\ \dots \\ X^M \end{bmatrix} \quad (20)$$

$$Y = \begin{bmatrix} Y^L \\ \dots \\ Y^M \end{bmatrix} \quad (21)$$

O sistema inter-regional completo de insumo-produto é representado por:

$$(I - A) \cdot X = Y \quad (22)$$

E as matrizes são organizadas da seguinte forma:

$$\left\{ \begin{matrix} I & \vdots & 0 \\ \dots & \dots & \dots \\ 0 & \vdots & I \end{matrix} - \begin{bmatrix} A^{LL} & \vdots & A^{LM} \\ \dots & \dots & \dots \\ A^{ML} & \vdots & A^{MM} \end{bmatrix} \right\} \begin{bmatrix} X^L \\ \dots \\ X^M \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} Y^L \\ \dots \\ Y^M \end{bmatrix} \quad (23)$$

Após efetuar estas operações, obtêm-se os modelos básicos necessários à análise inter-regional proposta por Isard, isto é:

$$\begin{aligned} (1 - A^{LL}) X^L - A^{LM} X^M &= Y^L \\ -A^{ML} X^L + (I - A^{MM}) X^M &= Y^M \end{aligned} \quad (24)$$

Resultando no Sistema de Leontief inter-regional da forma:

$$X = (I - A)^{-1} \cdot Y \quad (25)$$

$$\mathbf{X} = (\mathbf{I} - \mathbf{A})^{-1} \cdot \mathbf{Y} = \mathbf{L} \cdot \mathbf{Y} \quad (26)$$

Em que $\mathbf{Y}$ é a demanda final, como já evidenciado anteriormente e $\mathbf{L}$ a inversa de Leontief. Diante do exposto, o modelo convencional de insumo-produto, descrito pela Equação 9, pode ser utilizado em um sistema inter-regional como apresentado nas Equações 25 e 26. O efeito multiplicador da produção é então obtido pelas colunas da matriz inversa de Leontief. O multiplicador de produção total considera o impacto na produção provocado pela variação na demanda final, considerando a injeção inicial de uma unidade monetária. Já o multiplicador da produção líquido, dá o efeito multiplicador descontado da injeção inicial (GUILHOTO et al., 2017).

O modelo apresentado acima é apenas uma descrição teórica do modelo inter-regional. Especificamente para este estudo foi utilizada a matriz de insumo-produto elaborada por Guilhoto et al. (2017). Como evidenciado anteriormente, no Brasil, como em outros países do mundo, existe grande restrição de informações para a construção de um sistema interestadual de insumo-produto.

Por isso, a necessidade da combinação de dados oficiais, provenientes das Contas Regionais e de pesquisas realizadas por órgãos como o IBGE, às técnicas não censitárias de estimação de sistemas inter-regionais de insumo-produto. Neste contexto, Guilhoto et al. (2017) propõe uma técnica de estimação híbrida para a elaboração de um modelo inter-regional de 27 unidades federativas (UFs) do Brasil.

O ponto de partida é o sistema de insumo-produto nacional para o ano de 2011, desagregado em 68 setores e 128 produtos¹⁹, obtido utilizando o método apresentado por: (GUILHOTO & SESSO FILHO, 2010) e (GUILHOTO & SESSO FILHO, 2005). Esse sistema tem como base as Matrizes de Usos e Produção nacionais que são utilizadas como base para a construção do sistema inter-regional para as 27 UFs brasileiras utilizando o método TUPI (GUILHOTO et al., 2017).

A Matriz de Produção nacional informa o que cada indústria (setor) da economia produz de cada produto no país. O primeiro passo para a construção das Matrizes de Produção regionais é a estimação dos Valores Brutos da Produção (VBPs) estaduais para os 68 setores e 128 produtos. Para isso, foram inicialmente utilizadas as Contas Regionais divulgadas pelo IBGE e adicionalmente consultadas diversas fontes para desagregar em maior número de setores. Para

¹⁹ Este é o maior nível de detalhamento dos dados das Contas Nacionais de 2011 (GUILHOTO et al., 2017).

maiores detalhes relacionados à construção deste modelo inter-regional, consultar Guilhoto et al. (2017).

Para atingir o objetivo proposto neste estudo, modificações no modelo de insumo-produto foram motivadas para uma análise econômica em nível regional, que pudesse refletir as peculiaridades da região analisada (MILLER e BLAIR, 2009). A partir da análise inter-regional foi possível verificar a interdependência ou nível de interações entre as regiões com a análise de seus fluxos de bens e serviços.

4.4 Estimação da matriz inter-regional de insumo-produto

Nesta seção, serão apresentadas as premissas adotadas para elaboração e construção da matriz de insumo-produto. Para este estudo, os impactos socioeconômicos (diretos e indiretos ao longo da cadeia de valor) foram separados entre:

- **Fase de investimentos:** período de construção da usina.
- **Fase de operação:** período de operacionalização da usina.

Esta estratégia foi adotada para identificar e diferenciar os impactos socioeconômicos da implantação do investimento e operacionalização da usina, principalmente com o objetivo de identificar os impactos anuais permanentes (longo prazo), diferente do que acontece no período de construção da usina (obras), que tem duração de aproximadamente 2 anos. Com isso, na primeira fase de investimento, ainda não foi introduzido o setor etanol de milho, apenas feito o choque nos setores demandados para realizar o investimento do novo setor.

Vale destacar que o modelo utilizado foi o mesmo para as duas fases, porém foram feitos choques e fechamentos diferentes. As especificidades de cada fase e modelo estão descritas nas seções seguintes. Os dois modelos têm como base a análise de Insumo-Produto (MIP), desagregados de forma inter-regional, de acordo com a metodologia de Guilhoto et al. (2017), setor por setor, separado em duas regiões: Mato Grosso (MT) e Resto do Brasil (RB), tendo como base as contas nacionais de 2011.

Quando foi realizada a avaliação dos impactos socioeconômicos, não havia disponível a MIP do ano de 2015 (a mais recente disponibilizada pelo IBGE) e a estimativa de MIP inter-regional mais recente no nível de desagregação desejada neste estudo disponível pelo Prof. Joaquim Guilhoto foi a do ano de 2011. Por outro lado, de acordo com vários autores, por exemplo Miller e Blair (2009), a estrutura produtiva da economia de um país não muda significativamente em um intervalo de 5 anos. Por este motivo, para a realização desta pesquisa,

foi utilizada a estimativa de uma MIP inter-regional brasileira de 2011 para avaliar os impactos socioeconômicos da indústria etanol de milho no MT em 2016.

Além disso, na fase de operação considerou-se um novo setor: uma planta de etanol de milho com produção de 500 milhões de litros por ano, somado aos coprodutos, que demanda 1,2 milhão de toneladas de milho de segunda safra. Para maiores esclarecimentos, foi escolhido este tamanho de planta com produção de 500 milhões de litros porque esta era a quantidade produzida pela primeira planta de etanol de milho brasileira, inaugurada em julho de 2017.

Com isso, por ser a primeira planta *full* de etanol de milho em território nacional, esta parte do estudo teve como objetivo avaliar os impactos de apenas uma usina, tendo em vista que outras usinas *full* iniciariam suas operações no Brasil nos anos seguintes. As quantidades dos outros insumos e coprodutos são proporcionais ao considerado na Figura 16 apresentada anteriormente. Para introduzir um novo setor na MIP, foram coletados dados da indústria de etanol de milho, diretamente com a usina FS “*Fueling Sustainability*”.

Após a caracterização tecnológica do setor e definição das premissas, foram construídos os modelos de insumo-produto para avaliar os impactos socioeconômicos, que incluiu as seguintes variáveis: (i) Valor da Produção Setorial, (ii) Produto Interno Bruto Setorial (PIB setorial)²⁰, (iii) Empregos e (iv) Impostos Indiretos Líquidos de subsídios e Impostos Diretos e subsídios diretos sobre as atividades (ID e IIL), tanto para a fase de investimentos quanto para a fase de operação. Os detalhes de cada modelo estão descritos abaixo.

4.4.1 Modelo MIP: fase de investimentos

Para a construção da MIP na fase de investimentos, ou seja, no período de construção da usina, foi utilizada uma matriz inter-regional, produto por produto (cada setor faz um único produto), tecnologia baseada na indústria, separada entre duas regiões, Mato Grosso (MT) e Resto do Brasil (RB), desagregada em 187 setores e 187 produtos, tendo como base as contas nacionais de 2011. Com isso, no total, foram 748 variáveis e 374 equações lineares, sendo 374 variáveis para *X* (nível do valor da produção) e 374 variáveis para *Y* (demanda final).

²⁰ O PIB Setorial é igual ao valor adicionado bruto da atividade, somado com o pagamento de impostos indiretos líquidos de subsídios devido ao consumo de insumos de origem doméstica e importados (como exemplo para o etanol, os insumos utilizados para a produção do etanol pagam Imposto sobre Circulação de Mercadorias e Serviços - ICMS, Imposto sobre Produtos Industrializados - IPI, entre outros). O valor adicionado bruto são os gastos relacionados as remunerações (fator trabalho) + rendimento misto bruto (rendimento dos autônomos) + excedente operacional bruto (gasto relacionado a depreciação econômica + a remuneração sobre o fator capital) + impostos e subsídios diretos sobre a atividade.

Nesta fase de investimentos, a variável exógena é toda a demanda final, mantida igual a zero em todos os outros setores, exceto os 12 setores mencionados abaixo na Tabela 7 (edificações, obras de infraestrutura, serviços especializados para construção, serviços de arquitetura e engenharia, entre outros). As variáveis endógenas são todos os X , ou seja, o impacto no nível da produção de cada um dos setores, do estado de Mato Grosso e Resto do Brasil.

Vale ressaltar que, para a fase de investimentos, olha-se para o componente formação bruta de capital fixo, pertencente a demanda final. Ou seja, neste momento da análise ainda não foi introduzido o novo setor etanol de milho, apenas os equipamentos e materiais necessários para a fase de construção da usina. O choque foi feito na demanda final daqueles setores apresentados na Tabela 7 e foi utilizada a equação básica do modelo aberto de Leontief (Equação 25). Os choques dizem respeito a necessidade do investimento para implantar uma usina de etanol de milho, com capacidade produtiva de 500 milhões de litros de etanol, adicionados os coprodutos.

O impacto sobre o nível da produção é o vetor X , que já gera resultados por ser variável endógena. Por outro lado, para estimar o impacto sobre emprego, PIB e impostos, são necessários os impactos na produção de cada setor, multiplicados pelos respectivos coeficientes técnicos, para ter endogenamente, o impacto naquelas variáveis. Para calcular o PIB setorial, tem-se o impacto na produção de cada setor e, para cada um deles, o coeficiente técnico de PIB setorial.

Este coeficiente é formado pelo coeficiente de valor adicionado bruto e pelo coeficiente de impostos que incide sobre o consumo intermediário. Ou seja, cada setor tem um coeficiente de PIB setorial. O impacto na produção de cada setor multiplicado pelo respectivo coeficiente técnico do PIB setorial, resulta no impacto do PIB setorial do respectivo setor. A soma do impacto do PIB setorial de todos os setores gera como resultado o impacto do PIB em toda a economia.

Nesta fase, foram consideradas como premissas de investimento as aquisições de bens de capital (máquinas, equipamentos e instalações), engenharia e serviços utilizados como aportes iniciais para a construção da usina de etanol de milho. Na fase de investimentos, 100% dos bens de capital foram fornecidos pelo Resto do Brasil e foram feitos choques em todos os setores demandados para a realização do investimento (Tabela 7), para prover aquela capacidade produtiva de 500 milhões de litros da indústria de etanol de milho no estado de Mato Grosso. Relembrando, neste choque de investimento ainda não foi criado o setor de etanol de milho na MIP.

Tabela 7 – Choque na fase de investimentos por setor e região de origem

Setores	Choques (R\$ milhões 2018*)	Mato Grosso	Resto do Brasil
Obras de infraestrutura	96	50%	50%
Edificações	108	50%	50%
Serviços especializados para construção	77	20%	80%
Máquinas para escritório e equipamentos de informática	24	0%	100%
Material eletrônico	79	0%	100%
Máquinas, aparelhos e materiais elétricos	76	0%	100%
Outras máquinas e equipamentos mecânicos	247	0%	100%
Serviços de arquitetura e engenharia	63	20%	80%
Total	770	17%	83%

Fonte: Elaboração própria, a partir de entrevistas com especialistas do setor. Valores aproximados, deflatores para cada um dos produtos de acordo com a tabela de recursos e usos. *Valores trazidos pelo IPCA para jan./2018.

Vale ressaltar que parte dos equipamentos, tecnologias e serviços são importados (aproximadamente 15% do investimento total vem de fora do Brasil), por isso, não foram introduzidos na MIP. Ou seja, esses 15% foram desconsiderados porque não trazem, obviamente, impactos sobre a produção dos setores da economia brasileira. Deste modo, os impactos da fase de investimentos na economia brasileira foram realizados considerando-se os equipamentos e as instalações de origem doméstica, separando os valores que eram originados dentro do estado de Mato Grosso (17%) e no Resto do Brasil (83%), como se nota na Tabela 7.

4.4.2 Modelo MIP: fase de operação

O modelo desenvolvido neste trabalho deve ser adequado para inserir na economia um novo setor etanol de milho no estado de Mato Grosso. Para a fase de operação, foi utilizado o mesmo modelo inter-regional, porém com fechamento e choques diferentes da fase de investimentos. Nesta seção será apresentado o modelo didático que possui os mesmos fundamentos com o objetivo de estruturar, de forma mais simples, o modelo utilizado para este estudo.

Para isto, considere as transações apresentadas na Figura 19, que traz a ilustração de uma economia com seis setores produtivos ($n=6$) na região de Mato Grosso (setores S_1 a S_6) e cinco setores ($n=5$) no Resto do Brasil (setores S_7 a S_{11}), todos eles identificados nas colunas. É

importante notar que as duas regiões (MT e RB) possuem exatamente os mesmos setores, exceto o setor produtor de etanol de milho (setor S_1) que está somente no estado do MT.

Dessa forma: S_1 – Setor etanol de milho em Mato Grosso; S_2 – Etanol convencional em Mato Grosso; S_3 – Rações convencionais em Mato Grosso; S_4 – Geração de eletricidade em Mato Grosso; S_5 – Óleos vegetais em Mato Grosso; S_6 – Resto da economia em Mato Grosso; S_7 – Etanol convencional no Resto do Brasil; S_8 – Rações convencionais no Resto do Brasil; S_9 – Geração de eletricidade no Resto do Brasil; S_{10} – Óleos vegetais no Resto do Brasil; S_{11} – Resto da economia no Resto do Brasil.

Figura 19 – Matriz de transações do modelo didático para a análise da fase de operação

			MT						RB					
			Etanol Milho	Etanol Conv.	Rações Conv.	Geração de eletricidade	Óleos vegetais	RE	Etanol Conv.	Rações Conv.	Geração de eletricidade	Óleos vegetais	RE	Demanda Final
			S_1	S_2	S_3	S_4	S_5	S_6	S_7	S_8	S_9	S_{10}	S_{11}	Y_{Brasil}
MT	Etanol total	P_1	$u_{1,1}$	$u_{1,2}$	$u_{1,3}$	$u_{1,4}$	$u_{1,5}$	$u_{1,6}$	$u_{1,7}$	$u_{1,8}$	$u_{1,9}$	$u_{1,10}$	$u_{1,11}$	Y_1
	Ração total	P_2	$u_{2,1}$	$u_{2,2}$	$u_{2,3}$	$u_{2,4}$	$u_{2,5}$	$u_{2,6}$	$u_{2,7}$	$u_{2,8}$	$u_{2,9}$	$u_{2,10}$	$u_{2,11}$	Y_2
	Geração total de eletricidade	P_3	$u_{3,1}$	$u_{3,2}$	$u_{3,3}$	$u_{3,4}$	$u_{3,5}$	$u_{3,6}$	$u_{3,7}$	$u_{3,8}$	$u_{3,9}$	$u_{3,10}$	$u_{3,11}$	Y_3
	Óleos vegetais	P_4	$u_{4,1}$	$u_{4,2}$	$u_{4,3}$	$u_{4,4}$	$u_{4,5}$	$u_{4,6}$	$u_{4,7}$	$u_{4,8}$	$u_{4,9}$	$u_{4,10}$	$u_{4,11}$	Y_4
	Resto da economia	P_5	$u_{5,1}$	$u_{5,2}$	$u_{5,3}$	$u_{5,4}$	$u_{5,5}$	$u_{5,6}$	$u_{5,7}$	$u_{5,8}$	$u_{5,9}$	$u_{5,10}$	$u_{5,11}$	Y_5
RB	Etanol total	P_6	$u_{6,1}$	$u_{6,2}$	$u_{6,3}$	$u_{6,4}$	$u_{6,5}$	$u_{6,6}$	$u_{6,7}$	$u_{6,8}$	$u_{6,9}$	$u_{6,10}$	$u_{6,11}$	Y_6
	Ração total	P_7	$u_{7,1}$	$u_{7,2}$	$u_{7,3}$	$u_{7,4}$	$u_{7,5}$	$u_{7,6}$	$u_{7,7}$	$u_{7,8}$	$u_{7,9}$	$u_{7,10}$	$u_{7,11}$	Y_7
	Geração total de eletricidade	P_8	$u_{8,1}$	$u_{8,2}$	$u_{8,3}$	$u_{8,4}$	$u_{8,5}$	$u_{8,6}$	$u_{8,7}$	$u_{8,8}$	$u_{8,9}$	$u_{8,10}$	$u_{8,11}$	Y_8
	Óleos vegetais	P_9	$u_{9,1}$	$u_{9,2}$	$u_{9,3}$	$u_{9,4}$	$u_{9,5}$	$u_{9,6}$	$u_{9,7}$	$u_{9,8}$	$u_{9,9}$	$u_{9,10}$	$u_{9,11}$	Y_9
	Resto da economia	P_{10}	$u_{10,1}$	$u_{10,2}$	$u_{10,3}$	$u_{10,4}$	$u_{10,5}$	$u_{10,6}$	$u_{10,7}$	$u_{10,8}$	$u_{10,9}$	$u_{10,10}$	$u_{10,11}$	Y_{10}

Fonte: Elaboração própria.

Nas linhas da Figura 19 são identificados os produtos nela consumidos: aqueles que são fornecidos pelo estado de MT (produtos P_1 a P_5) e os fornecedores pelo Resto do Brasil (produtos P_6 a P_{10}). Percebe-se, também, que os produtos fornecidos pelas duas regiões são exatamente os mesmos.

Na economia apresentada na Figura 19 o valor da produção de cada setor é identificado pela variável x_j . Desse modo, x_j diz respeito ao valor da produção do setor S_j . Por exemplo, x_1 identifica o valor da produção do setor etanol do estado de MT. Por outro lado, $u_{i,j}$ corresponde ao valor do insumo do produto P_i utilizado pelo setor S_j e y_i representa a demanda final pelo

produto P_i . Para cada produto da economia, sua demanda total corresponde à soma do consumo de insumos de cada setor por ele e de sua demanda final. Assim, generalizando para um produto P_i , sua demanda total (D_i) pode ser expressa pela equação (27):

$$u_{i,1} + \dots + u_{i,11} + Y_i = D_i \quad (27)$$

Admitindo-se que o consumo de insumos é sempre proporcional ao valor da produção setorial, pode-se generalizar esta hipótese através da equação (28):

$$u_{i,j} = a_{i,j} \cdot X_j \quad (28)$$

Onde $a_{i,j}$ é o coeficiente técnico direto de produção do setor S_j com relação ao produto P_i .

A substituição da equação (28) na equação (27) resulta na equação (29):

$$a_{i,1} \cdot x_1 + \dots + a_{i,11} \cdot x_{11} + y_i = D_i \quad (29)$$

Por outro lado, admite-se que a demanda total de cada produto é igual à sua respectiva oferta. Para o produto P_1 (Etanol total do MT), sua oferta O_1 corresponde à produção de etanol de milho do setor S_1 (Etanol de milho do MT) somada à produção do setor S_2 (Etanol convencional do MT). É importante destacar que a produção do produto etanol de milho do MT é uma parcela (α_1) da produção do setor etanol de milho no MT. Sendo assim, a oferta do produto P_1 (O_1) pode ser expressa pela equação (30):

$$O_1 = \alpha_1 \cdot x_1 + x_2 \quad (30)$$

Levando-se em consideração a equação (29) expressa para o produto P_1 e a equação (30), a igualdade entre a demanda total do produto P_1 (D_1) e sua oferta O_1 resulta na equação (31):

$$a_{1,1} \cdot x_1 + \dots + a_{1,11} \cdot x_{11} + y_1 = \alpha_1 \cdot x_1 + x_2 \quad (31)$$

A equação (31), que traz a igualdade entre a demanda total (D_1) do produto P_1 e sua oferta (O_1), pode ser expressa para cada um dos dez produtos da economia correspondentes à Figura 19, como descrito no sistema de equação (32) a (41):

$$a_{1,1} \cdot x_1 + \dots + a_{1,11} \cdot x_{11} + y_1 = \alpha_1 \cdot x_1 + x_2 \quad (32)$$

$$a_{2,1} \cdot x_1 + \dots + a_{2,11} \cdot x_{11} + y_2 = \alpha_2 \cdot x_1 + x_3 \quad (33)$$

$$a_{3,1} \cdot x_1 + \dots + a_{3,11} \cdot x_{11} + y_3 = \alpha_3 \cdot x_1 + x_4 \quad (34)$$

$$a_{4,1} \cdot x_1 + \dots + a_{4,11} \cdot x_{11} + y_4 = \alpha_4 \cdot x_1 + x_5 \quad (35)$$

$$a_{5,1} \cdot x_1 + \dots + a_{5,11} \cdot x_{11} + y_5 = x_6 \quad (36)$$

$$a_{6,1} \cdot x_1 + \dots + a_{6,11} \cdot x_{11} + y_6 = \alpha_6 \cdot x_1 + x_7 \quad (37)$$

$$a_{7,1} \cdot x_1 + \dots + a_{7,11} \cdot x_{11} + y_7 = \alpha_7 \cdot x_1 + x_8 \quad (38)$$

$$a_{8,1} \cdot x_1 + \dots + a_{8,11} \cdot x_{11} + y_8 = \alpha_8 \cdot x_1 + x_9 \quad (39)$$

$$a_{9,1} \cdot x_1 + \dots + a_{9,11} \cdot x_{11} + y_9 = \alpha_9 \cdot x_1 + x_{10} \quad (40)$$

$$a_{10,1} \cdot x_1 + \dots + a_{10,11} \cdot x_{11} + y_{10} = x_{11} \quad (41)$$

O sistema de equações (32) a (41) possui 10 equações e 21 variáveis (x_1 a x_{11} e y_1 a y_{10}), pois cada $a_{i,j}$ e $\alpha_1, \alpha_2, \alpha_3, \alpha_4, \alpha_6, \alpha_7$ e α_8 são parâmetros. Os parâmetros α_i dizem respeito a:

α_1 : parcela do valor da produção do setor S_1 que é igual à oferta do produto etanol de milho no estado de MT.

α_2 : parcela do valor da produção do setor S_1 que é igual à oferta do produto *DDG* no estado de MT.

α_3 : parcela do valor da produção do setor S_1 que é igual à oferta do produto bioeletricidade no estado de MT.

α_4 : parcela do valor da produção do setor S_1 que é igual à oferta do produto óleo de milho no estado de MT.

α_6 : parcela do valor da produção do setor S_1 que é igual à oferta do produto etanol de milho no Resto do Brasil (RB).

α_7 : parcela do valor da produção do setor S_1 que é igual à oferta do produto *DDG* no Resto do Brasil (RB).

α_8 : parcela do valor da produção do setor S_1 que é igual à oferta do produto bioeletricidade no Resto do Brasil (RB).

α_9 : parcela do valor da produção do setor S_9 que é igual à oferta do produto óleo de milho no Resto do Brasil (RB).

De fato, o sistema de equações lineares (32) a (41) contém a concepção conceitual do modelo de insumo-produto implementado para a avaliação dos impactos socioeconômicos da fase de operação.

Como o sistema de equações (32) a (41) possui 10 equações, 10 de suas 21 variáveis são endógenas e 11 exógenas. Na fase de operação, admitiu-se que (i) a produção do produto etanol de milho não reduz a produção de etanol convencional (ou seja, a partir da cana-de-açúcar) e (ii) as produções de *DDG*, bioeletricidade e óleo de milho deslocam (reduzem) os valores da produção da ração convencional, a geração total de eletricidade e óleos vegetais convencionais, respectivamente. Admitiu-se, também, que a demanda final de todos os produtos da economia (exceto a demanda final pelos produtos P_1 - etanol total no estado de MT – e P_6 – etanol total no Resto do Brasil) ficam inalterados com a introdução do setor de etanol de milho no estado de MT.

Deste modo, a escolha das variáveis exógenas (e por consequência das variáveis endógenas, ou seja, o fechamento do modelo) no modelo didático da fase de operação consistente com estas hipóteses são:

x_1 : valor da produção do setor etanol de milho no MT.

x_2 : valor da produção do setor etanol convencional no MT.

x_7 : valor da produção do setor etanol convencional no RB.

Y_2 : demanda final pelo produto etanol total no estado do MT.

Y_3 : demanda final pelo produto rações total no estado do MT.

Y_4 : demanda final pelo produto geração total de eletricidade no estado do MT.

Y_5 : demanda final pelo produto resto da economia no estado do MT.

Y_7 : demanda final pelo produto etanol total no RB.

Y_8 : demanda final pelo produto rações total no RB.

Y_9 : demanda final pelo produto geração total de eletricidade no RB.

Y_{10} : demanda final pelo produto resto da economia no RB.

Vale destacar que os valores de todas as variáveis exógenas foram mantidos constantes, exceto o valor da produção do setor Etanol de milho no MT (variável x_1). Com isto, o modelo respondeu os valores das dez variáveis endógenas dado o choque relacionado ao valor da produção no setor S_1 devido a sua introdução na economia. As variáveis endógenas no modelo didático são as seguintes, com suas respectivas interpretações:

x_3 : valor da produção do setor Rações convencionais no estado do MT, refletindo a redução em seu nível de produção em função de sua substituição parcial por *DDG*.

x_4 : valor da produção do setor geração de eletricidade no estado do MT, refletindo a redução em seu nível de produção em função de sua substituição parcial por bioeletricidade.

x_5 : valor da produção do setor óleos vegetais no estado do MT, refletindo a redução em seu nível de produção em função de sua substituição parcial por óleo de milho.

x_6 : valor da produção do setor Resto da economia no estado do MT, refletindo a variação em seu nível de produção em função da introdução do setor etanol de o modelo grande e milho no estado de MT.

x_8 : valor da produção do setor Rações convencionais no RB, refletindo a redução em seu nível de produção em função de sua substituição parcial por *DDG*.

x_9 : valor da produção do setor geração de eletricidade no RB, refletindo a redução em seu nível de produção em função de sua substituição parcial por bioeletricidade.

x_{10} : valor da produção do setor óleos vegetais no RB, refletindo a redução em seu nível de produção em função de sua substituição parcial por óleo de milho.

x_{11} : valor da produção do setor Resto da economia no RB, refletindo a variação em seu nível de produção em função da introdução do setor etanol de milho no estado do MT.

y_1 : demanda final por etanol total no MT, cuja variação representa o valor de etanol excedente para reduzir parcialmente as importações de etanol combustível feitas pelo Brasil.

y_6 : demanda final por etanol total no RB, cuja variação representa o valor de etanol excedente para substituir parcialmente as importações de etanol combustível feitas pelo Brasil.

Na Tabela 8 abaixo pode ser visto um quadro comparativo entre os modelos didático e grande, utilizado neste estudo. Em termos do número de variáveis e equações, a diferença entre o modelo didático e o modelo grande diz respeito a quantidade de setores que existem no resto da economia.

Tabela 8 - Quadro comparativo entre os modelos didático e grande

	Modelo Didático	Modelo Grande
Variável X	6 MT e 5 RB	188 MT e 187 RB = 375
Variável Y	5 MT e 5 RB	187 MT e 187 RB = 374
Variáveis totais	21	749
Equações	10	374
Variáveis endógenas	10	374
Variáveis exógenas	11, sendo 8 (Y_L) e 3 (X_I)	375

No modelo grande, foram consideradas 749 variáveis totais, sendo 375 variáveis X (188 variáveis X no MT e 187 no RB) e 374 variáveis Y (MT e RB são 187 produtos em cada uma das regiões). Diferente do modelo utilizado para a fase de investimentos, a variável X , referente ao valor da produção setorial está dividida entre 188 setores no Mato Grosso e 187 setores no Resto do Brasil. Como dito anteriormente, em relação a variável Y (demanda final), foram considerados 187 produtos tanto no Mato Grosso quanto no Resto do Brasil.

Toda demanda final foi mantida constante (por produto doméstico), em todos os setores das duas regiões. Vale destacar que na demanda final, foram considerados os consumos totais do etanol e outros produtos, sem separação por tipo de insumo utilizado (como exemplo, etanol feito a partir da cana ou milho). Nesta fase de operação, o modelo não é convencional já que existe um único setor que produz mais de um produto. Na Tabela 9 abaixo pode ser visto o detalhamento das variáveis (X e Y) do modelo grande utilizado neste estudo.

Tabela 9 - Detalhamento das variáveis e equações do modelo grande

Setor etanol de milho no MT	1 variável X
4 produtos convencionais no MT e 4 produtos convencionais no RB	8 variáveis X
Resto da economia no MT	183 variáveis X
Resto da economia no RB	183 variáveis X
Total variáveis X	375 variáveis X, sendo 187 RB e 188 MT
Resto da economia MT	183 variáveis Y
Resto da economia RB	183 variáveis Y
Total variáveis Y	374 variáveis Y
Total variáveis	749

As variáveis exógenas foram: demanda final da economia (todos os setores das duas regiões, igual a 375 variáveis) e, o nível do valor da produção total (X) do setor indústria etanol de milho, ou seja, somando a produção do etanol, *DDGS*, bioeletricidade e óleo. Como variável endógena, o valor da produção de todos os outros setores, tanto no Mato Grosso quanto no Resto do Brasil, exceto o nível de produção da indústria de etanol de milho que está exógena no modelo. No anexo A estão identificados os níveis de desagregação dos setores adotados no modelo de insumo-produto, separados entre as regiões de Mato Grosso e Resto do Brasil.

Como premissa, e especificamente para o modelo em fase de operação, este estudo considerou que o deslocamento de produtos e coprodutos para a análise socioeconômica se baseia na equivalência monetária. O pressuposto básico é que não há maior possibilidade de

arbitragem entre bens substitutos tomados a preços ao consumidor. Como premissa, cada R\$ 1 (um real) de etanol e coprodutos da usina desloca o mesmo valor, em reais, do produto substituto. Isso significa que para esta análise, existe a hipótese de que os produtos são substitutos perfeitos.

Neste caso, os produtos deslocados que foram considerados estão descritos a seguir:

- Na MIP, o setor etanol de milho foi adicionado, deslocando a demanda de etanol importado, sem afetar a produção e a demanda final do etanol brasileiro e sem reduzir a produção nacional do etanol convencional de cana-de-açúcar;
- A introdução do *DDGS* desloca em mesmo valor monetário a ração convencional de origem doméstica (mistura entre farelo de soja e milho). Outras possibilidades (como maior suplementação de animais) são possíveis, mas não foram consideradas neste estudo;
- A bioeletricidade excedente exportada para a rede substitui, em igual valor monetário, a eletricidade gerada a partir do gás natural; e,
- O óleo de milho substitui, em igual valor monetário, o óleo de soja vegetal utilizado para a produção de biodiesel.

A partir da introdução do novo setor de etanol de milho na região de Mato Grosso, a matriz foi reequilibrada, mantendo a demanda final inalterada. Ou seja, não houve aumento da demanda de etanol no mercado interno.

Durante a fase de operação, os principais insumos considerados foram milho, eucalipto, insumos industriais (enzimas e produtos químicos), somados às remunerações e encargos dos 340 funcionários empregados pela usina de etanol de milho (empregos diretos). Nesta fase, grande parte dos insumos e atividades econômicas vieram dentro do estado de Mato Grosso. Na Tabela 10 abaixo podem ser evidenciados os dados de insumos assim como os preços básicos utilizados nesta fase de operação, cujos valores foram utilizados para obter os coeficientes técnicos do setor etanol de milho no MT para análise da fase de operação.

Para a produção de 500 milhões de litros de etanol de milho por ano são demandados 1,16 milhões de toneladas de milho segunda safra e 539 mil toneladas de cavaco de eucalipto, originados 100% na região de Mato Grosso (cálculo feito a partir do balanço de massas da Figura 16). Na MIP, os choques são feitos a partir de valores monetários por isso a necessidade dos preços básicos (Tabela 10).

Tabela 10 – Insumos utilizados na fase de operação

Produtos	Unidade	MT	RB	Brasil	Preço Básico (R\$/t)
Milho	t	1.162.791	0	1.162.791	580
Eucalipto	t	539.535	0	539.535	198

Fonte: Elaboração própria a partir de IMEA (2017). Valores aproximados, trazidos pelo IPCA para janeiro 2018.

Além dos insumos mostrados na Tabela 10, também foram considerados aqueles relacionados às despesas (em valores monetários) na fase de operação (Tabela 11). Para isso, foram utilizados os preços básicos extraídos da PAM (2011) e Tabela de Recursos e Usos IBGE (2011).

Tabela 11 - Despesas consideradas na fase de operação

Produto	Valor (R\$ milhão)
Milho	674
Eucalipto	107
Enzimas e Químicos	31
Salários e ordenados	27
Encargos previdência social e FGTS	17
Benefícios para o empregado	14
Despesas operacionais e administrativas	29

Fonte: Elaboração própria a partir de PAM (2011) e Tabela de Recursos e Usos IBGE (2011). Valores aproximados, trazidos pelo IPCA para janeiro 2018.

Para simular a introdução de um novo setor de etanol de milho segunda safra na economia brasileira foi construído um modelo de insumo-produto que teve como base as quantidades e valores econômicos apresentados na Tabela 12. Podem ser observadas as quantidades introduzidas no modelo para cada produto (etanol, *DDGS*, excedente de bioeletricidade e óleo), os preços básicos²¹ e o choque realizado no valor da produção do setor etanol de milho no MT e seus produtos.

²¹ Preço básico – exclui valores de importação, impostos indiretos, margem de transporte e margem de comércio CUNHA (2011), extraídos da Tabela de Recursos e Usos do (IBGE, 2011) e do Instituto Matogrossense de Economia Agropecuária (IMEA).

Tabela 12 - Produtos, preços básicos e choque realizado (em 2018)

Produto	UN.	MT	RB	Brasil	Preço básico (R\$/UN.)	Choque (R\$ milhão)
Etanol	L	150 milhões	350 milhões	500 milhões	2,02	1.015
DDGS	t	462.093	55.349	517.442	548	284
Bioeletricidade	MWh	175.581	0	175.581	238	42
Óleo	t	4.419	0	4.419	2.094	9
Total	-	-	-	-	-	1.350

Fonte: FS (2018); IMEA (2017); IBGE (2011). Os preços utilizados como ponto de partida eram de 2016 e trazidos pelo IPCA para janeiro 2018 (valores aproximados).

Para estimar e validar o preço básico do *DDGS*, foram considerados os preços ao produtor (sem impostos) do farelo de soja e milho (composição de 30% e 70%, respectivamente), devido a não precificação do produto no momento de realização deste estudo (IMEA, 2017). Por fim, com o objetivo de analisar um cenário alternativo de exportação do milho para a avaliação socioeconômica, foi feita uma simulação sem a indústria do etanol de milho no estado de Mato Grosso. Ou seja, ao invés de utilizar o milho para produção de etanol, neste cenário alternativo a quantidade de milho produzida é enviada diretamente para o mercado internacional (exportação). Nesse caso, foi utilizada a equação (25) fazendo-se um choque na demanda final pelo valor da exportação do milho.

4.5 BLUM – *Brazilian Land Use Model*²²

O *Brazilian Land Use Model (BLUM)*, desenvolvido em parceria pelos pesquisadores da Agroicone e do *FAPRI/CARD* da Universidade de Iowa²³, foi utilizado neste estudo para avaliar os efeitos induzidos de mudança do uso da terra, caracterizado pelo *ILUC*. O modelo é reconhecido internacionalmente como referência e tem sido utilizado para análises e projeções de longo prazo do uso da terra no Brasil (USEPA, 2010; WORLD BANK, 2010; BRASIL, 2016a; BRASIL, 2016b; GROTTERRA et al., 2022; MOREIRA et al., 2020).

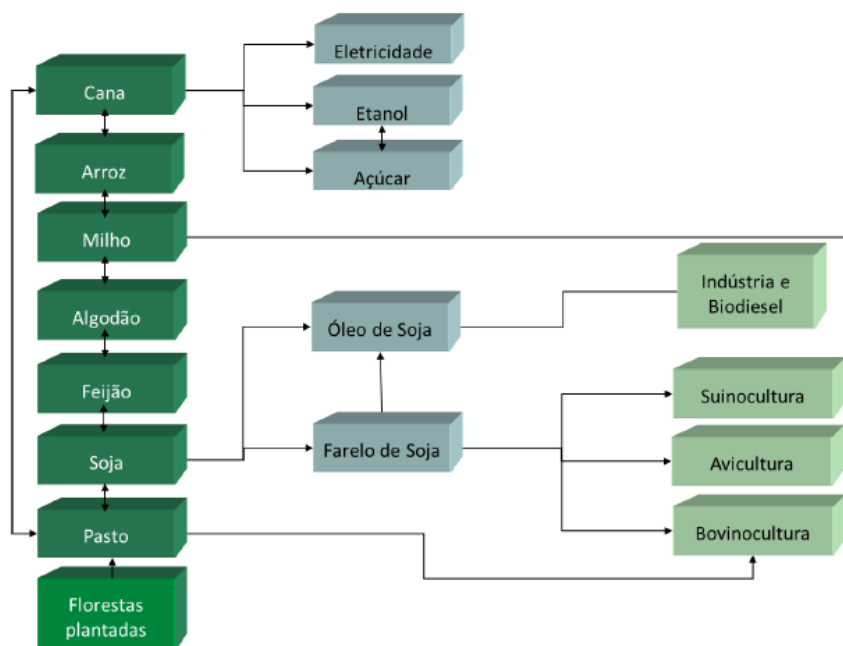
²² Esta seção é fundamentada em Moreira (2016), Harfuch et al. (2017) e ICONE (2013).

²³ O *BLUM* é um modelo de propriedade da Agroicone, que pode ser utilizado com autorização prévia.

O *BLUM* é um modelo econômico dinâmico de equilíbrio parcial, multirregional e multimercado para o setor agropecuário brasileiro, composto por dois módulos: oferta e demanda, e uso da terra. A principal contribuição do *BLUM* é a capacidade de representar a dinâmica de uso da terra no Brasil. O setor da agropecuária está desagregado entre os seguintes produtos (Figura 20): soja, milho (primeira e segunda safras), algodão, arroz, feijão (primeira e segunda safras), cana-de-açúcar, trigo, cevada, pecuária de leite e de corte (separadas em faixas de tecnologias produtivas), carnes bovina, suína e de frango e ovos. As florestas comerciais são consideradas como projeções exógenas no modelo (HARFUCH et al., 2017).

O modelo também considera as interações entre os setores analisados, assim como entre um produto e seus subprodutos. Por exemplo, a relação entre os grãos e a pecuária ocorre a partir do consumo de ração, composta basicamente por milho e farelo de soja, que é função da oferta de carnes, leite e ovos, sendo um componente da demanda doméstica de milho e soja. No caso do complexo de soja, farelo e óleo de soja, estes produtos são parte da demanda doméstica de soja em grão e são determinados pela demanda por esmagamento (bem como pela obrigatoriedade de biodiesel, que também inclui parte da demanda de soja no Brasil). Similarmente, açúcar, etanol e eletricidade são componentes da demanda por cana-de-açúcar.

Figura 20 - Interações entre os produtos e setores no *BLUM*



Fonte: MOREIRA (2016).

O modelo tem uma representação endógena dos sistemas de produção de segunda safra ou culturas de inverno, como milho, feijão, cevada e trigo que não geram demanda adicional por terra devido à rotação com uma cultura principal de primeira safra (ou safra verão). No entanto, a produção destas safras é contabilizada na oferta nacional de cada uma das lavouras (HARFUCH et al., 2017; MOREIRA, 2016).

Este estudo tem alguns aspectos diferenciais devido à utilização do *BLUM*, que emprega especificidades para o caso brasileiro. Entre eles, podem ser destacados: (i) o maior detalhamento dos setores da agropecuária; (ii) a representação endógena dos sistemas de produção de segunda safra (elemento de extrema importância para a acurácia desse estudo); (iii) representação de três níveis tecnológicos da pecuária bovina com migração endógena entre os sistemas (capaz de detectar possíveis processos de intensificação); (iv) desenvolvimento de um modelo teórico de uso da terra capaz de identificar a substituição entre usos (substituição complementar e elasticidade de expansão); (v) utilização de um Sistema de Informação Georreferenciada (SIG) para a área total agricultável por região e calibração das elasticidades consideradas na competição e na expansão²⁴; e, (vi) detalhamento regional do perfil tecnológico do setor sucroenergético e sua capacidade de incorporar rotas tecnológicas inovadoras (MOREIRA, 2016).

A área total alocada para agricultura e pecuária é calculada para seis regiões²⁵ do país, de acordo com padrões de produção agrícola, características de uso da terra, fronteiras políticas, biomas e legislação ambiental, como apresentada a partir da Figura 21. Vale destacar que a área de floresta comercial é exógena e não tem elasticidade. A área de vegetação natural é calculada de forma inversamente proporcional a área utilizada pela agricultura.

²⁴ Para maior detalhamento, ver Nassar et al. (2011).

²⁵ As regiões foram divididas a partir da homogeneidade da produção agrícola e da divisão dos biomas.

Figura 21 - Regiões BLUM



Fonte: MOREIRA (2016).

- Região 1: Sul, inclui estados do Paraná, Santa Catarina e Rio Grande do Sul.
- Região 2: Sudeste, inclui estados de São Paulo, Rio de Janeiro, Espírito Santo e Minas Gerais.
- Região 3: Centro-Oeste Cerrado, inclui estados de Mato Grosso do Sul, Goiás e parte do estado de Mato Grosso que contempla os biomas Cerrado e Pantanal.
- Região 4: Norte Amazônia, inclui parte do bioma Amazônia do estado de Mato Grosso, Amazonas, Pará, Acre, Amapá, Rondônia e Roraima.
- Região 5: Nordeste Litorâneo. Inclui Alagoas, Ceará, Paraíba, Pernambuco, Rio Grande do Norte e Sergipe.
- Região 6: Nordeste Cerrado inclui estados do Maranhão, Piauí, Tocantins e Bahia.

Dentro do módulo de oferta e demanda, a demanda total de uma atividade é projetada nacionalmente e é definida pela demanda doméstica, exportações líquidas (exportações menos importações) e estoques finais, que não são considerados para pecuária, carnes e cana-de-

açúcar. A demanda responde a preços e às principais variáveis exógenas como PIB, população, taxa de câmbio, preço do petróleo e inflação.

Pelo lado da oferta, é definida a partir da produção nacional, que é projetada regionalmente e pelos estoques iniciais, novamente considerados apenas para grãos e seus complexos, açúcar e etanol. Os dois parâmetros respondem às rentabilidades de cada commodity, que dependem de custos, preços e produtividades (MOREIRA, 2016). A área alocada para cada região no módulo de uso da terra é parte da oferta no módulo de oferta e demanda, que garante a interação entre esses dois módulos e a seguinte identidade é satisfeita:

$$\text{Estoque inicial} + \text{Produção} + \text{Importações} = \text{Estoque Final} + \text{Consumo} + \text{Exportações}$$

Ou, considerando que

$$\text{Exportações Líquidas} = \text{Exportações} - \text{Importações};$$

$$\text{Estoque inicial} + \text{Produção} = \text{Estoque final} + \text{Consumo} + \text{Exportações líquidas}$$

A oferta e demanda nacional, assim como o uso da terra regional, respondem a preços. O equilíbrio, para um dado ano, é obtido quando se encontra um vetor de preços que simultaneamente equilibra todos os mercados. Ano a ano uma sequência de vetores de preços é estimada, que permite avaliar a trajetória dos mercados ao longo do tempo. Os resultados do modelo são: uso da terra regional, produção nacional e regional, preços, consumo, exportações líquidas e emissões (MOREIRA, 2016).

Dentro do módulo de uso da terra são considerados os efeitos de competição e escala. O primeiro representa como as diferentes atividades agropecuárias competem por uma dada quantidade de terra arável e disponível. O segundo efeito, de escala, se refere à maneira pela qual a competição entre as diferentes atividades gera uma necessidade adicional por terra. Esta necessidade é acomodada pela expansão da área total da agropecuária sobre vegetação nativa.

O efeito competição consiste em um sistema de equações que aloca a participação da área agropecuária para cada lavoura e pastagem em cada região como função das rentabilidades (própria e das competidoras). Está estabelecido que para uma dada quantidade de terra para agropecuária, o aumento na rentabilidade relativa de uma atividade irá resultar em um aumento da participação da área dedicada a esta atividade e reduzir a participação de área de suas competidoras.

Para que haja coerência das condições acima mencionadas, a área de pastagem é regional e endogenamente determinada, mas considerada como sendo a diferença entre a área total alocada para a agropecuária e a área de lavouras. No contexto da agricultura brasileira, é

relevante projetar a área de pastagem tanto endogenamente quanto regionalmente, pois corresponde a, aproximadamente, 72% do total da área utilizada para agropecuária. Como dito anteriormente, vale ressaltar que a área de pastagem no *BLUM* é composta por três faixas de tecnologias da pecuária de corte, separadas por produtividade em ganho de peso vivo por hectare ano, estimadas endogenamente no modelo, como parte da competição por terra entre as diferentes atividades, desagregadas por região.

Os níveis tecnológicos são definidos regionalmente de acordo com a capacidade de suporte das pastagens, uso de insumos, investimentos (inclusive genética) e padrões de produção. Para maior detalhamento e demonstração do aprimoramento do *BLUM*, incorporando as tecnologias da pecuária de corte e de leite, consultar o estudo *Modelling Beef and Dairy sectors' productivities and their effects on land use change in Brazil* (HARFUCH et al. , 2016).

- “Baixa tecnologia”: produtividade de até 3 arrobas por hectare a cada ano (arroba/ha/ano), que equivale a até 45 kg/ha/ano;
- “Média tecnologia”: produtividade entre 3 arrobas/ha/ano e até 6 arrobas/ha/ano (de 45 a 90 kg/ha/ano);
- “Tecnologia crescente”: produtividade maior do que 6 arrobas/ha/anos (acima de 90 kg/ha/ano).

As condições de regularidade, homogeneidade, simetria e adicionalidade são impostas de forma que as matrizes de elasticidades e seus coeficientes associados são consistentes teoricamente. Para qualquer conjunto destes coeficientes são calculados os impactos e a competição entre as atividades. Assim, a partir desta estrutura, as simulações realizadas no *BLUM* permitem calcular não apenas alocação de terra, mas também mudanças no uso da terra. Em outras palavras, as condições de regularidade permitem identificar a substituição de área para cada atividade, considerando a quantidade total de área alocada para a agropecuária.

Apesar da representação da competição entre as atividades e regiões onde a área agrícola é estável e próxima ao potencial arável, esta análise acaba se tornando insuficiente para o Brasil. No caso brasileiro, também é necessário analisar a dinâmica das regiões de fronteira agrícola. Como visto em Nassar et al. (2010), a história recente da agropecuária mostra que lavouras, florestas comerciais e pastagens combinadas respondem a incentivos de mercado e contribuem para a expansão da área total alocada para a agropecuária (NASSAR et al., 2010). Isto é captado no efeito escala do *BLUM*. Este artifício metodológico é essencial para ajustar o modelo às realidades e especificidades da dinâmica do uso da terra brasileira.

O efeito escala se refere às equações que definem como as rentabilidades das atividades determinam a área total alocada para a produção agropecuária. A área total alocada para a

agropecuária é uma participação da área arável total disponível em cada região, e responde às mudanças na rentabilidade média da agropecuária. O efeito escala e competição não são independentes.

Os dois, em conjunto, são componentes das elasticidades-retorno próprias de cada atividade. Ao considerar a condição *ceteris paribus* (tudo o mais constante), o aumento na rentabilidade de uma atividade possui três efeitos: (i) aumento na área total alocada para a agropecuária, a partir do retorno médio; (ii) aumento na área alocada para esta atividade, ou seja, aumento de sua participação no total; e, (iii) redução na participação da área das outras atividades.

Paralelamente, a elasticidade regional do uso da terra (elasticidade-área-retorno-total) com relação à rentabilidade média é a soma das elasticidades escala de cada atividade. Com isso, as elasticidades competição podem ser calculadas diretamente após a elasticidade-área total, enquanto as elasticidades próprias (elasticidade-área com relação à rentabilidade da própria atividade) são obtidas a partir de análises econométricas e de revisão de literatura.

No módulo de uso da terra do *BLUM*, a área a da atividade i de uma região l ($l = 1, \dots, 6$) no ano t é definida pela seguinte equação (42):

$$a_{ilt} = A_l^T * m_{lt} * s_{ilt} \quad (42)$$

Sendo que A_l^T se refere à área arável total disponível para produção agropecuária na região l ; m_{lt} é a participação de A_l^T que está sendo utilizado para a produção agropecuária, de todas as lavouras e pastagens; e, s_{ilt} é a participação da área usada para agropecuária, dedicada à atividade i . A_l^T é uma variável exógena definida por técnicas de georreferenciamento (SIG). A variável m_{lt} é endógena no modelo e responde à rentabilidade média da agropecuária na região l (r_{lt}), sendo a participação da área alocada para agropecuária definida como:

$$m_{lt} = \frac{A_{lt}}{A_l^T} = k r_{lt}^{\alpha_{lt} \varepsilon_{rl}^{Al}} \quad (43)$$

Onde k é uma constante; ε_{rl}^{Al} é a elasticidade-oferta de terra (com respeito ao retorno médio) para a região l . O parâmetro α_{lt} é positivo, maior ou menor do que a unidade e pode ser definido como:

$$\alpha_{lt} = 1 - \frac{A_{lt} - A_{l0}}{A_l^T} \quad (44)$$

Onde A_{l0} se refere à área utilizada pela agropecuária no período definido como base (para este estudo, o ano 2016). Quando a área agropecuária do período t estiver próximo à área do período base, α_{lt} será próximo de 1 e não afeta $\varepsilon_{r_l}^{Al}$. Por outro lado, se a área da agropecuária no período t for maior do que àquela do período base, então o parâmetro α_{lt} será menor do que a unidade e reduzirá o efeito de $\varepsilon_{r_l}^{Al}$. O contrário ocorre quando a área alocada for menor do que A_{l0} , aumentando o efeito da elasticidade-oferta de terra.

A r_{lt} é calculada a partir de evidências que indicam quais atividades se expandem sobre a fronteira agrícola, definida como:

$$r_{lt} = \sum_{i=1}^n r_{it} * d_{li} \quad (45)$$

Sendo que d_{li} é um vetor de pesos da taxa de desmatamento causado por cada uma das atividades agropecuárias obtidos por imagens de satélite e SIG na região 1. O vetor d_{li} é calculado da seguinte forma, onde D pode ser definido como desmatamento total:

$$d_{li} = \frac{D_{li}}{D_l^T}; \text{ onde } D_l^T = \sum_{i=1}^n D_{li} \quad (46)$$

De acordo com Holt (1999), a elasticidade-área (cruzada) da atividade i com relação à rentabilidade das outras atividades j pode ser definida como:

$$\varepsilon_{r_{ij}}^{l,i} = \frac{\partial a_{ilt}}{\partial r_{jlt}} \frac{r_{jlt}}{a_{ilt}} = A_l^T \left(\frac{\partial m_l(r_{lt})}{\partial r_{lt}} \frac{\partial r_{lt}}{\partial r_{jlt}} s_{ilt}(r_{ilt}, r_{jlt}) + m_l(r_{lt}) \frac{\partial s_{ilt}(r_{ilt}, r_{jlt})}{\partial r_{jlt}} \right) \frac{r_{jlt}}{A_l^T m_l(r_{lt}) s_{ilt}(r_{ilt}, r_{jlt})} \quad (47)$$

Ao rearranjar esta equação, têm-se que:

$$\varepsilon_{r_{ij}}^{l,i} = \frac{\partial m_l(r_{lt})}{\partial r_{lt}} \frac{\partial r_{lt}}{\partial r_{jlt}} \frac{r_{jlt}}{m_l(r_{lt})} + \frac{\partial s_{ilt}(r_{ilt}, r_{jlt})}{\partial r_{jlt}} \frac{r_{jlt}}{s_{ilt}(r_{ilt}, r_{jlt})} \quad (48)$$

Sendo que o primeiro termo do lado direito da equação (47) pode ser definido como o efeito escala da elasticidade-área cruzada $\varepsilon_{r_{lj}}^{s_{l,i}}$:

$$\varepsilon_{r_{lj}}^{s_{l,i}} = \frac{\partial m_l(r_{lt})}{\partial r_{lt}} \frac{\partial r_{lt}}{\partial r_{jlt}} \frac{r_{jlt}}{m_l(r_{lt})} \quad (49)$$

O efeito competição da elasticidade-área cruzada $\varepsilon_{r_{lj}}^{c_{l,i}}$ se refere à última parte do lado direito da equação (47):

$$\varepsilon_{r_{lj}}^{c_{l,i}} = \frac{\partial s_{ilt}(r_{ilt}, r_{jlt})}{\partial r_{jlt}} \frac{r_{jlt}}{s_{ilt}(r_{ilt}, r_{jlt})} \quad (50)$$

A elasticidade-área da atividade i em relação à sua própria rentabilidade é também formada pelos efeitos escala e competição, podendo ser escrita como:

$$\varepsilon_{r_{li}}^{l,i} = \frac{\partial m_l(r_{lt})}{\partial r_{lt}} \frac{\partial r_{lt}}{\partial r_{ilt}} \frac{r_{ilt}}{m_l(r_{lt})} + \frac{\partial s_{ilt}(r_{ilt}, r_{jlt})}{\partial r_{ilt}} \frac{r_{ilt}}{s_{ilt}(r_{ilt}, r_{jlt})} = \varepsilon_{r_{li}}^{s_{l,i}} + \varepsilon_{r_{li}}^{c_{l,i}} \quad (51)$$

Onde $\varepsilon_{r_{li}}^{s_{l,i}}$ é o efeito escala e $\varepsilon_{r_{li}}^{c_{l,i}}$ é o componente de efeito competição da elasticidade-área da atividade i com relação a seu próprio retorno (NASSAR et al., 2009). O componente de competição por terra pode ser calculado como sendo:

$$\varepsilon_{r_{li}}^{c_{l,i}} = \varepsilon_{r_{li}}^{l,i} - \varepsilon_{r_{li}}^{s_{l,i}} \quad (52)$$

A partir das equações acima, pode-se observar a conexão entre a elasticidade-oferta de terra regional ($\varepsilon_{r_l}^{Al}$) e o efeito escala de cada atividade ($\varepsilon_{r_{li}}^{s_{l,i}}$). A elasticidade-oferta de terra pode ser definida como:

$$\varepsilon_{r_l}^{A_l} = \frac{\partial m_l}{\partial r_l} \frac{r_l}{m_l} \quad (53)$$

Ao rearranjar a equação (53), têm-se que:

$$\frac{\partial m_l}{\partial r_l} = \frac{\varepsilon_{r_l}^{A_l} m_l}{r_l} \quad (54)$$

A elasticidade em relação à variação do retorno para uma dada atividade i na região l é:

$$\varepsilon_{r_l}^{s_{l,j}} = \frac{\partial m_l}{\partial r_l} \frac{\partial r_l}{\partial r_{li}} \frac{r_{li}}{m_l} \quad (55)$$

A partir de alguns cálculos, a equação (55) pode ser escrita como:

$$\varepsilon_{r_{li}}^{s_{l,j}} = \varepsilon_{r_l}^{A_l} \frac{\partial r_l}{\partial r_{li}} \frac{r_l}{r_{li}} \quad (56)$$

Tendo a equação (49) como base, a equação (56) pode ser escrita como:

$$\varepsilon_{r_{li}}^{s_{l,i}} = \varepsilon_{r_l}^{A_l} d_{li} \frac{r_l}{r_{li}} \quad (57)$$

A partir da equação (56), se a elasticidade-oferta é conhecida, o efeito escala da atividade i pode ser facilmente calculado. Como resultado, o vetor contendo todas as elasticidades do componente de competição $\varepsilon_{r_{li}}^{c_{l,i}}$ representa a diagonal da matriz de competição²⁶, sendo uma para cada região l . Juntamente com outras restrições, como as condições de regularidade e elasticidades cruzadas negativas, os termos da diagonal são, então, utilizados para obter as elasticidades cruzadas na matriz competição, como representado na equação (52).

Por outro lado, a área e produção das lavouras de inverno e de segunda safra, tais como trigo, cevada, milho segunda safra e feijão possuem dinâmicas diferenciadas em relação às lavouras de primeira safra apresentadas acima. Considerando o fato de que estas lavouras não competem por terra por serem produzidas após uma safra principal, a área projetada para o milho segunda safra pode ser representada a partir da seguinte equação:

²⁶ Para maiores informação e detalhamento quanto a matriz de competição, ver seguintes publicações: (HARFUCH et al., 2017; NASSAR et al. , 2011).

$$a_{it}^l = \alpha_i^l + \beta_i^l a_{jt}^l + \delta_i^l r_{jt}^l + \varphi_i^l r_{it}^l + \phi_i^l a_{it-1}^l$$

(58)

Sendo i = milho e j = soja

r_{it}^l se refere à rentabilidade do milho segunda safra r_{jt}^l é o retorno esperado da soja, a_{jt}^l é a área de soja e a_{it-1}^l é a área alocada para milho segunda safra no ano anterior. Para os parâmetros, tem-se que: $\beta > 0$, $\delta > 0$, $\phi > 0$ e $\varphi > 0$.

Por outro lado, para o feijão segunda safra a dinâmica é mais simplificada comparado ao milho, sendo a área projetada dependente apenas de sua própria rentabilidade. No caso do trigo, as projeções de área dependem de seu próprio retorno esperado (positivamente) e negativamente em relação ao retorno da cevada, pois estes grãos competem entre si por área plantada de inverno. Para a cevada, as projeções dependem de seu próprio retorno e área plantada do ano anterior.

Na Figura 22 e de forma bastante simplificada, a dinâmica do modelo *BLUM* pode ser descrita a partir das inter-relações entre as variáveis macroeconômicas de entrada, os parâmetros e os setores do agro e o uso da terra, que afetam a decisão dos agentes. Como variáveis de entrada, são considerados os fatores macroeconômicos, como PIB mundial e Brasil (taxa de crescimento), taxa de câmbio, deflator implícito do PIB, Índice Nacional de Preços ao Consumidor (IPCA), preço do petróleo, população mundial e Brasil, além das projeções setoriais exógenas.

A desagregação das regiões e a incorporação de áreas de pastagens no modelo são diferenciais extremamente importantes em relação aos outros modelos econômicos de projeções existentes e pode melhorar significativamente a robustez e precisão das análises dos efeitos diretos e indiretos do uso da terra e, assim, cálculos de emissões de GEE.

Para responder à pergunta proposta nesta tese, foram realizados avanços e adaptações no modelo, que serão apresentados na seção a seguir. Até o momento, ainda não se tinha avaliado os impactos da mudança do uso da terra a partir da introdução de um novo setor etanol de milho no Brasil. Devido às especificidades do setor e diferenciais do *BLUM* descrito acima, este foi utilizado como ferramenta para atingir o objetivo final proposto. Na seção seguinte, foram apresentados os cenários, premissas e maiores informações relacionadas à adaptação e avanços no modelo.

4.5.1 Utilização do modelo, cenários e premissas para Mudança do Uso da Terra

A análise da mudança do uso da terra (MUT) inclui emissões induzidas (diretas e indiretas) a partir das alterações no estoque de carbono (da biomassa e do solo, ou seja, desmatamento e conversão de pastagens nas culturas anuais) e processos de combustão/decomposição, mas também remoções de carbono na atmosfera quando a mudança ocorre na direção reversa (isto é, em reflorestamento ou substituição por culturas com maiores estoques de carbono).

O modelo *BLUM* foi utilizado para analisar as interações de uso da terra, considerando um período de projeção entre 2017 e 2030. O *BLUM* é um modelo dinâmico capaz de simular a interdependência temporal. O modelo econômico – com uma estática comparativa – permite que os efeitos induzidos do uso da terra sejam atribuídos à quantidade marginal de biocombustíveis produzidos.

Na Tabela 13 abaixo, encontram-se os dados macroeconômicos (dados exógenos de projeção de crescimento da economia) considerados neste estudo, para o modelo *BLUM*. Como endógenas, etanol total, área, produção, emissões e todas as outras variáveis geradas como resultado pelo *BLUM*.

Tabela 13 - Dados macroeconômicos *BLUM*

	Fonte dados históricos (até 2016)	2016	Fontes dados projeção (após 2016)	2020	2025	2030
Crescimento do PIB Brasil (%)	IBGE (2017a)	-3,59	OCDE (2017)	2,02	2,59	2,74
Crescimento do PIB Mundial (%)	Banco Mundial (2017b)	3,93	OCDE (2017)	3,42	3,16	2,98
IPCA Brasil (%)	IPEA data (2017)	6,29	OCDE (2017)	4,45	4,57	4,55
Inflação EUA (%)	Banco Mundial (2017c)	1,40	OCDE (2017)	2,02	2,04	2,04
Taxa de câmbio (R\$/US\$)	IPEA data (2017)	3,49	Boletim Focus (2017) e OCDE (2017)	3,56	4,03	4,55
Preço petróleo (US\$/barril)	FMI (2017)	42,84	FMI (2017)	53,96	65,19	80
Pop. Brasil (em milhões)	IBGE (2017b)	201,1	OECD (2017)	206,9	213,1	217,8
Pop. Mundial (em milhões)	Banco Mundial (2017a)	7.331	OCDE (2017)	7.632	7.989	8.323

Fonte: Elaboração própria a partir de IPEA (2017); IBGE (2017a); IBGE (2017b); BANCO MUNDIAL (2017a); BANCO MUNDIAL (2017b); BANCO MUNDIAL (2017c); FMI (2017); OCDE (2017); BANCO CENTRAL (2017).

É importante deixar claro que neste estudo não foi construído um novo setor de etanol de milho no *BLUM*. Foram feitos choques para simular a introdução de um setor etanol de milho segunda safra na economia brasileira, com produção de 1 bilhão de litros. Adicionalmente, avaliar tais efeitos de MUT a partir de uma mudança marginal em relação a um cenário referência (ano base 2016)²⁷, e, para isso, foram dados “choques” em algumas equações e adicionadas variáveis para refletir a demanda por insumos e oferta de coprodutos, que serão explicados abaixo.

Para responder às perguntas propostas nesta tese da melhor forma, foram estabelecidos valores para as variáveis que são exógenas ao *BLUM*. Com esse procedimento exógeno, foram

²⁷ O ano de 2016 foi utilizado como base principalmente devido ao período do estudo, que teve início em 2017. Adicionalmente, vale destacar que o modelo não é atualizado anualmente devido à disponibilidade de dados e não automatização do processo.

feitos choques em variáveis do *BLUM* que já existiam. Ao longo da elaboração do estudo, foram realizadas rodadas e simulações para avaliar os efeitos marginais, com o objetivo de identificar as alterações na economia e avaliar se os resultados estavam em linha com a realidade da dinâmica do mercado brasileiro. Em resumo, a quantidade de equações do modelo não mudou e foram incluídas novas variáveis de forma exógena.

No modelo *BLUM*, inicialmente, a equação de demanda total de milho (X_1) para todos os mercados é endógena e composta pela equação 59 abaixo (já existente no modelo):

$$X_1 = X_2 + X_3 + X_4 \quad (59)$$

Onde:

X_1 = Demanda total de milho

X_2 = Consumo doméstico de milho

X_3 = Estoques finais de milho

X_4 = Exportações líquidas de milho

Por conta do objetivo deste estudo, foi adicionado exogenamente na equação 59, que traz a demanda total de milho, uma variável relacionada à demanda adicional de milho para a produção de etanol (X_5), a partir da célula BP114, da *Aba Crops*, ano base 2016. Com isso, a equação de demanda total de milho (X_1) passa a ser composta pela seguinte equação 60 abaixo:

$$X_1 = X_2 + X_3 + X_4 + X_5 \quad (60)$$

Onde:

X_1 = Demanda total de milho

X_2 = Consumo doméstico de milho

X_3 = Estoques finais de milho

X_4 = Exportações líquidas de milho

X_5 = ***Demanda adicional de milho para a produção de etanol doméstica***

Essa demanda adicional de milho é justamente o balanço de massa da usina e suas produtividades para atender a produção de etanol de milho segunda safra. Para o valor dessa variável X_5 e das outras variáveis mencionadas a seguir, que para o *BLUM* são exógenas, foram criadas outras equações fora do modelo para determinar o valor de cada delas. A partir do ano 2018, ano a ano, foram feitos “choques” nessas variáveis incluídas no modelo. Esses “choques”

são as projeções da demanda por insumos e oferta de coprodutos para atender a produção de 1 bilhão de litros de etanol de milho (Tabela 14).

Para representar o *DDGS* no *BLUM*, assim como um aumento na oferta de ração animal no mercado brasileiro, foram incluídas duas variáveis em equações já existentes no *BLUM*, somadas tanto no lado da oferta de milho (a partir da célula BP4) quanto na oferta de farelo de soja (a partir da linha BP26). A equação (61) abaixo representa a oferta total de milho (Y_6) já incluída no modelo:

$$Y_6 = Y_7 + Y_8 \quad (61)$$

Onde:

Y_6 = *Oferta total de milho*

Y_7 = *Produção de milho*

Y_8 = *Estoque final de milho do ano anterior*

Para atender aos objetivos propostos neste estudo, foi adicionado a essa equação (61) a variável Y_9 , referente à substituição de milho para ração animal, a partir da introdução de *DDGS* no mercado. Com isso, a equação referente à oferta total de milho pode ser representada a partir da equação (62) abaixo:

$$Y_6 = Y_7 + Y_8 + (0,7 * Y_9) \quad (62)$$

Onde:

Y_6 = *Oferta total de milho*

Y_7 = *Produção de milho*

Y_8 = *Estoque final de milho do ano anterior*

Y_9 = ***Produção DDGS***

De forma exógena, foi acrescentada a variável Y_9 , que se refere a 70% da quantidade produzida de *DDGS*, introduzida na aba Cenários, célula BQ139. Como premissa e tendo como embasamento uma referência do mercado norte-americano²⁸ (HOFFMAN et al. , 2011), ficou estabelecido que o *DDGS* desloca majoritariamente milho. Por isso foi adicionado 70% da produção de *DDGS* na equação da oferta total de milho (Y_6). O detalhamento das substituições de milho e farelo de soja por *DDGS* encontra-se na Tabela 15. Ainda para representar o *DDGS*, originalmente no *BLUM*, a equação de oferta total de farelo de soja é representada por:

²⁸ Devido à não existência de informação específica para o *DDGS* produzido no Brasil, foram utilizados dados aproximados do *DDGS* produzido nos Estados Unidos. Por isso, foram feitas análises de sensibilidade para avaliar os diferentes impactos para maior e menor substituição da ração convencional por *DDGS*.

$$Y_{10} = Y_{11} + Y_{12} \quad (63)$$

Onde:

Y_{10} = Oferta total de farelo de soja

Y_{11} = Produção de farelo de soja

Y_{12} = Estoque final do ano anterior

Para este estudo, foi adicionada à equação 63 de forma exógena a variável Y_{13} , referente à produção de DDGS que substitui farelo de soja. Os 30% se referem ao deslocamento de farelo de soja, em substituição ao DDGS, embasado na referência descrita na Tabela 15. Dessa forma, a equação da oferta total de farelo de soja pode ser representada a partir da Equação 64:

$$Y_{10} = Y_{11} + Y_{12} + (0,3 * Y_{13}) \quad (64)$$

Onde:

Y_{10} = Oferta total de farelo de soja

Y_{11} = Produção de farelo de soja

Y_{12} = Estoque final do ano anterior

Y_{13} = **Produção DDGS**

Originalmente, a oferta total de óleo no *BLUM* é composta pela Equação (65):

$$Y_{14} = Y_{15} + Y_{16} \quad (65)$$

Onde:

Y_{14} = Oferta total de óleo de soja

Y_{15} = Produção de óleo de soja

Y_{16} = Estoque final do ano anterior

Para introduzir o óleo de milho no modelo, considerou-se que haverá um aumento da oferta total de óleo, por isso, foi somado junto à oferta de óleo de soja nacional (Equação 65). Com isso, a equação da oferta total de óleo passa a ser a soma entre:

$$Y_{14} = Y_{15} + Y_{16} + Y_{17} \quad (66)$$

Onde:

Y_{14} = Oferta de óleo de soja

Y_{15} = Produção de óleo de soja

Y_{16} = Estoque final do ano anterior

Y_{17} = **Produção de óleo de milho**

A área adicional de eucalipto (aproximadamente 29 mil hectares) foi introduzida na Aba Cenários, linhas 28 e 29, a partir de 2016. A área adicional foi desagregada entre as regiões 3 e 4 do *BLUM* e posteriormente, somada à área de floresta plantada. Vale ressaltar que a área total de floresta plantada foi incluída como exógena no modelo.

No modelo *BLUM*, diferente do modelo de insumo-produto, não existem todos os setores da economia brasileira, mas sim os principais setores agropecuários. Dessa forma, para identificar os impactos da introdução de uma usina de etanol de milho segunda safra na região Centro-Oeste (região 3 do *BLUM*), foram dados choques em algumas variáveis para refletir a demanda por insumos e oferta de coprodutos. As quantidades introduzidas no modelo e distribuídas ao longo do tempo, para milho destinado à produção de etanol, *DDGS*, óleo de milho e área de eucalipto, podem ser encontradas na Tabela 14.

Tabela 14 - "Choques" aplicados na demanda por insumos e oferta de coprodutos a partir da produção de 1 bilhão de litros de etanol de milho no Brasil

	20 16	20 17	20 18	20 19	20 20	20 25	20 30
Milho p/ etanol (em mil toneladas)	0	0	179	358	537	1.431	2.326
Milho deslocado por <i>DDG</i> (em mil toneladas)	0	0	53	105	158	421	684
Far. Soja deslocado por <i>DDG</i> (em mil toneladas)	0	0	22	44	67	178	289
Demanda Área Eucalipto (em mil hectares) (Reg.3)	0	0	1,32	2,63	3,95	10,53	17,14
Demanda Área Eucalipto (em mil hectares) (Reg.4)	0	0	0,91	1,83	2,74	7,32	11,89
Óleo de milho (em mil toneladas)	0	0	2,33	4,65	6,98	18,6	30,23

Na seção de resultados, pode ser observado que o impacto sobre o etanol só se dá pelo uso da terra (necessário mais área de milho de segunda safra, sem alterar a consumo nacional do biocombustível). Em resumo, como premissas, foram considerados:

- Aumento linear da demanda total de milho em 2,3 milhões de toneladas (sem predefinir se o milho vem de primeira ou segunda safra), para atender o aumento da produção de etanol de milho até 2030.

- Aumento linear de 844 mil toneladas de *DDGS*. No *BLUM*, isso se refletiu no aumento na oferta de farelo de soja e milho (aumento na oferta de ração animal no mercado brasileiro), considerando que a introdução de *DDGS* substitui 30% de farelo de soja e 70% milho, com equivalência de 1 kg para 1,15 kg. Ou seja, cada 1 quilo de *DDGS* substitui/desloca 1,15 quilo de milho e farelo de soja²⁹) (HOFFMAN et al. , 2011).

- Aumento linear de 30,2 mil litros da oferta de óleo de soja, caracterizando a entrada de óleo de milho no mercado.

- Aumento de 29 mil hectares da área de eucalipto (sendo aproximadamente 60% na região Centro-Oeste Cerrado e 40% na região Norte Amazônia do modelo *BLUM*³⁰). Cavaco de eucalipto utilizado como insumo para cogeração de energia e utilização no processo industrial.

Para esta seção do estudo foram analisados quatro cenários, sendo um Cenário S1 (descrito acima) e três alternativos, conforme descritos a seguir:

- Cenário S1 (cenário de choque completo): introduzidos demanda por insumos e coprodutos, para atingir a produção adicional de etanol de milho, (1 bilhão de litros em 2030³¹, sem alteração do consumo total de etanol na economia brasileira, substituindo o etanol de milho importado);
- Cenário S2: Similar ao Cenário S1, excluindo a expansão da área de eucalipto.
- Cenário S3: Semelhante ao Cenário S1, presumindo que 1 kg de *DDGS* desloca 1 kg de milho e farelo de soja (70% milho e 30% farelo de soja).
- Cenário S4: Semelhante ao Cenário S1, presumindo que 1 kg de *DDGS* substitui 1,3 kg de milho e farelo de soja (70% milho e 30% farelo de soja).

²⁹ Para chegar na equivalência de 1,15 kg, foi considerada a média simples da substituição de milho e farelo de soja por *DDGS*, para cada tipo de animal. Ou seja: Média = $(1,2 + 1,36 + 1 + 1,05)/4 = 1,15$. As participações de 30% e 70% também foram calculadas com base na média simples de cada produto e por tipo de animal. Ou seja, para o milho $(1,2 + 0,73 + 0,7 + 0,61)/4 = 0,81/1,15 = 0,70$ e para o farelo de soja $(0 + 0,63 + 0,3 + 0,44)/4 = 0,3425/1,15 = 0,30$. Ver Tabela 15.

³⁰ Essa distribuição da área de eucalipto foi feita por dois motivos principais: (i) localização da usina, e (ii) raio de 250 km para compra de cavaco de eucalipto. Através dos dados de georreferenciamento (software ArcGIS) foi criado um *buffer*, ou seja, foram calculadas as distâncias entre dois pontos em uma superfície e identificou-se que dentro daqueles 250 km, a demanda de área de eucalipto poderia vir, em partes, da região Norte Amazônia e não somente da Região do Cerrado.

³¹ Este choque é diferente da simulação feita na análise de insumo-produto, que considerou 500 milhões de litros de etanol de milho. O objetivo da análise de MIP foi verificar no curto prazo os impactos socioeconômicos da introdução de um novo setor na economia (até 2020). Por outro lado, a análise de MUT teve como objetivo verificar os impactos da expansão da produção de etanol de milho no Brasil no longo prazo (até 2030).

Especificamente para a ração animal, existe uma ampla discussão na literatura sobre os níveis de substituição nutricional entre milho/farelo de soja e *DDGS*, com foco no mercado norte-americano. Alguns estudos analisaram a adequação do *DDGS* como alimento substituto para gado de corte, vaca leiteira, suínos e aves nos Estados Unidos, porém chegaram a resultados diferentes (MUMM et al., 2014; SHURSON, 2009; HOFFMAN et al. , 2011).

No Brasil, por outro lado, a incerteza aumenta porque o *DDGS* ainda é um produto novo que enfrenta condições de mercado, incluindo a variação genética do gado local e as estratégias comerciais dos produtores de ração animal. Por isso, como destacado nos cenários apresentados acima, optou-se por realizar uma análise de sensibilidade com o objetivo de avaliar os impactos das diferentes substituições entre ração convencional (milho e farelo de soja) e *DDGS*. Para este estudo, foram utilizados os dados extraídos de Hoffman et al. (2011), observados na Tabela 15.

Tabela 15 - Substituição de milho/farelo de soja por *DDGS*, separado por tipo de animal

	Gado de corte	Vaca Leiteira	Suínos	Aves	Média Simples
Milho	1,2	0,73	0,7	0,61	0,81
Farelo de soja	0	0,63	0,3	0,44	0,34
Total	1,2	1,36	1	1,05	1,15

Fonte: Elaboração própria com base nos dados extraídos de Hoffman et al. (2011).

Em resumo, o Cenário S1 considera a expansão da produção de etanol de milho no estado de Mato Grosso, assumindo uma demanda adicional por milho, oferta de *DDGS* e óleo de milho, somado à área adicional para eucalipto. Os mercados agrícolas são governados por preços e vinculados por elasticidades de escala e competição. A demanda adicional por milho aumenta os preços, o que gera efeitos competitivos e sinérgicos na produção de soja.

Ao mesmo tempo, o *DDGS* (como coproduto do etanol de milho) aumenta a concorrência no mercado de alimentos para animais. O efeito líquido das mudanças na demanda de milho no preço é um pequeno aumento de cerca de 0,9%. De acordo com o modelo econômico, o efeito da competição entre milho e soja prevalece e a área de soja diminui. Ao introduzir os produtos e coprodutos da nova usina de etanol de milho, os outros produtos existentes no mercado são deslocados. Assumiu-se as seguintes proporções no Cenário S1: 1 kg de *DDGS* desloca 0,81 kg de milho e 0,34 kg de farelo de soja.

O segundo cenário (S2) é equivalente ao Cenário S1, mas exclui a expansão da área para eucalipto. Essa análise de sensibilidade foi considerada porque, embora haja uma demanda adicional por eucalipto, existe também a possibilidade do uso de área de eucalipto já existente (aumento de produtividade) ou uso de resíduos, sem demanda adicional. Os cenários S3 e S4 representam uma sensibilidade dos parâmetros de equivalência do *DDGS*, considerando taxas de substituição alternativas, de acordo com informações do mercado norte-americano.

Em relação às emissões de GEE, foram estimadas a partir de conversões de área em todo o Brasil, desagregadas em seis macrorregiões (Sul, Sudeste, Centro-Oeste Cerrado, Norte Amazônia, Nordeste Litorâneo e Nordeste Cerrado) e cinco tipos de uso da terra (culturas anuais, cana-de-açúcar, pastagem, vegetação nativa e florestadas plantadas).

Os fatores de emissão dependem de fitofisionomias, solo, clima, mudanças nos estoques de carbono do solo. Por isso, os fatores são diferentes para cada uma das regiões *BLUM* (HARFUCH et al., 2017) e, especificamente para eucalipto, foram complementados com os dados do terceiro inventário brasileiro de emissões e remoções antrópicas de gases de efeito estufa (BUSTAMANTE et al., 2015). Para este estudo, decidiu-se utilizar valores já conhecidos na literatura, porém podem ser aprimorados em trabalhos futuros.

Tabela 16 - Fatores de emissão para período de 30 anos (tCO₂eq/ha)

Região/ Cultura	Anual/ Perene	Pasto/ Perene	Pasto/ Anual	Pasto/ Eucalipto	Natural/ Anual	Natural/ Perene	Natural/ Pasto
Sul	-144	14	163	-138	214	60	45
Sudeste	-106	17	130	-138	175	59	39
Centro-Oeste Cerrado	-115	15	133	-138	196	74	55
Norte Amazônia	-118	19	143	-138	505	354	331
Nordeste Litorâneo	-97	18	116	-138	146	44	25
Nordeste Cerrado	-99	20	124	-138	187	79	58

Fonte: Elaboração própria, com base em BUSTAMANTE et al. (2015); HARFUCH et al. (2017).

Na Tabela 16 são apresentados os fatores de emissão para o período de 30 anos, em tCO₂eq/ha, para a mudança do uso da terra, desagregados por região e cultura. A dinâmica de uso da terra pode gerar emissões ou remoções de estoque de carbono. A expansão da área de

cultura anual em cima da área de eucalipto (natural) gera emissões de 505 tCO₂eq/ha na região Norte Amazônia. Por outro lado, a conversão de pastagem em área de eucalipto sequestra o carbono do solo (-138 tCO₂eq/ha).

Para efeitos comparativos, nas Tabelas 17 e 18 abaixo encontram-se os números de produção e área, das principais regiões e atividades agropecuárias brasileiras em 2030 (os dados de área e produção utilizados para o ano base encontram-se no ANEXO E). Esses números foram utilizados como base para as simulações e para realizar as comparações dos efeitos da introdução do setor etanol de milho segunda safra no *BLUM*. Vale lembrar que no cenário base não existe a produção etanol de milho.

Tabela 17 – Projeção da área total por tipo de atividade agropecuária e região em 2030 - Cenário Base (em mil hectares)

Região/ Cultura	Cana- de- açúcar	Soja	Milho 1ª safra	Outras Culturas	Pastagem	Floresta Plantada	Total	Milho 2ª safra
Sul	804	12.656	994	1.496	13.238	3.050	32.238	2.288
Sudeste	7.220	3.029	1.203	260	24.066	4.669	40.447	861
Centro- Oeste Cerrado	2.261	14.271	18	883	41.256	1.894	60.582	7.050
Norte Amazônia	146	7.894	138	562	47.106	462	56.307	2.686
Nordeste Litorâneo	988	-	1.441	695	9.875	115	13.114	-
Nordeste Cerrado	237	7.484	1.372	841	29.638	1.310	40.881	391
Total	11.654	45.334	5.165	4.737	165.180	11.500	243.570	13.277

Fonte: Dados extraídos do modelo *BLUM* (Agroicone).

Tabela 18 – Projeção da produção das principais atividades agropecuárias, por região em 2030 - Cenário Base (em milhões de toneladas)

Região/ Cultura	Cana-de- açúcar	Soja	Milho 1ª safra	Outras Culturas	Carne	Milho 2ª safra
Sul	62.134	43.417	9.154	11.025	12.331	13.334
Sudeste	624.460	10.755	9.291	640	6.064	3.022
Centro-Oeste Cerrado	196.780	49.390	178	3.882	7.493	50.083
Norte Amazônia	9.837	26.004	559	1.471	4.253	18.321
Nordeste Litorâneo	67.335	-	2.885	234	1.253	-
Nordeste Cerrado	16.052	28.550	6.420	1.700	1.990	1.003
Total	976.599	158.116	28.486	18.953	33.383	85.764

Fonte: Dados extraídos do modelo *BLUM* (Agroicone).

Na seção de resultados serão apresentadas as emissões de GEE calculadas neste estudo. O modelo *BLUM* estima a mudança do uso da terra para diferentes culturas (em hectares, apresentadas na Tabela 34) como consequência da nova oferta de 1 bilhão de litros de etanol de milho no Brasil (Cenário S1). Para estimar as emissões de MUT (apresentadas na Tabela 35), foram multiplicadas as matrizes: fatores de emissão para um período de 30 anos (Tabela 16) e variação de área estimada pelo modelo *BLUM* (Tabela 34), como observado na Equação (67).

$$MUT \text{ (tCO}_2\text{eq)} = \text{Fator emissão} \left(\frac{\text{tCO}_2\text{eq}}{\text{ha}} \right) \times \text{Variação área (ha)} \quad (67)$$

Nesta seção foram apresentados os ajustes feitos no modelo *BLUM*, assim como os cenários e premissas assumidos para esse estudo. O modelo *BLUM* é capaz de identificar a dinâmica de uso da terra e a conversão indireta de vegetação nativa a partir do aumento da demanda de insumos e oferta de coprodutos devido à produção de etanol de milho na região Centro-Oeste Cerrado do Brasil. Os resultados e discussões serão apresentados a seguir.

5 RESULTADOS E DISCUSSÕES

No presente capítulo são apresentados e discutidos os resultados das estimativas dos impactos socioeconômicos e da mudança do uso da terra a partir da introdução na região Centro-Oeste brasileira, de uma nova indústria etanol de milho segunda safra.

5.1 Resultados dos Impactos socioeconômicos

Com base em um modelo inter-regional de insumo-produto, desagregado entre Mato Grosso (MT) e Resto do Brasil (RB), foram avaliadas as seguintes variáveis: Valor da Produção Setorial³², PIB setorial³³, Emprego, Impostos Indiretos Líquidos de Subsídios (IIL) e Impostos e Subsídios Diretos sobre as atividades (ID). Os impactos socioeconômicos relacionados a introdução de uma usina de etanol de milho segunda safra com capacidade de processamento de 500 milhões de litros por ano, além dos coprodutos, 422 mil toneladas de *DDGS*, 175 mil MWh de bioeletricidade excedente e 15 mil toneladas de óleo, estão divididos entre as fases de investimento (Tabela 19) e de operação (Tabela 21), como apresentado abaixo.

Tabela 19 - Impactos socioeconômicos na fase de investimento

Região	Valor da produção setorial (R\$ milhões)	PIB setorial (R\$ milhões)	Emprego	Impostos ID e IIL (R\$ milhões)
Fase de investimento (agregado em um período de 2 anos)				
MT	185	92	1.627	5
RB	1.278	568	6.846	75
Brasil	1.463	660	8.473	80

Fonte: Elaboração própria. Nota: Atualização de valores pelo IPCA, R\$ 2011 para janeiro/2018. Valores aproximados.

³² Como dito anteriormente, a mudança do valor da produção setorial equivale dizer que houve uma mudança no nível da produção, em termos relativos (mudanças percentuais). Isso é verdade porque os preços relativos não estão mudando e sim, a quantidade produzida (volume).

³³ O PIB Setorial é igual ao valor adicionado bruto da atividade, somado com o pagamento de impostos indiretos líquidos de subsídios devido ao consumo de insumos de origem doméstica e importados (como exemplo para o etanol, os insumos utilizados para a produção do etanol pagam Imposto sobre Circulação de Mercadorias e Serviços - ICMS, Imposto sobre Produtos Industrializados - IPI, entre outros). O valor adicionado bruto são os gastos relacionados as remunerações (fator trabalho) + rendimento misto bruto (rendimento dos autônomos) + excedente operacional bruto (gasto relacionado a depreciação econômica + a remuneração sobre o fator capital) + impostos e subsídios diretos sobre a atividade.

Na fase de investimentos, a introdução de uma nova usina de etanol de milho (2ª safra) no estado de Mato Grosso gera aproximadamente 8,5 mil empregos diretos e indiretos em nível nacional, sendo 19% desses no estado de Mato Grosso. Além disso, pode ser observado considerável efeito de transbordamento para o Resto do Brasil, com geração de aproximadamente 6,8 mil empregos.

Vale ressaltar que esses valores se referem a todo o período no qual os investimentos ocorrem. Ou seja: ao assumir que o período de investimento tem a duração de 2 anos, seriam gerados em nível nacional, em média, aproximadamente 4,2 mil empregos a cada ano. O mesmo raciocínio da variável de emprego deve ser seguido para ter a avaliação da média anual das variáveis monetárias.

Nesta fase de investimento são movimentados em torno de R\$ 1,5 bilhão em toda a economia doméstica e maiores benefícios (87%) gerados para o Resto do Brasil devido à origem do material utilizado para a construção da usina (demanda bens de capital, construção civil e serviços correlatos). Além disso, pode ser observado aumento do PIB setorial em R\$ 660 milhões e grande efeito de transbordamento para as outras regiões brasileiras (86%). Os impostos indiretos líquidos (IIL) e impostos diretos (ID) somam R\$ 80 milhões em nível nacional, também com maior impacto no Resto do Brasil (aproximadamente 94%).

Os impactos socioeconômicos nesta fase se concentram majoritariamente no Resto do Brasil e o Mato Grosso contribui com 13%, 14% e 6% do valor da produção setorial, PIB setorial e impostos, respectivamente. Ou seja, embora a usina esteja localizada no estado de Mato Grosso, a partir dos resultados encontrados, fica evidente que muitos outros estados brasileiros se beneficiam devido aos efeitos de transbordamento (Tabela 20), com geração de empregos e impactos econômicos positivos.

Tabela 20 - Efeito de transbordamento dos impactos socioeconômicos na fase de investimento

Região	Valor da produção setorial	PIB setorial	Emprego	Impostos ID e ILL
MT	12,6%	14%	19,2%	6,3%
RB	87,4%	86%	80,8%	93,7%

Fonte: Elaboração própria.

Ao entrar em operação, diferentemente da fase de investimentos, os resultados das variáveis analisadas (valor da produção, empregos e outros) devem ser entendidos como valores

impactos permanentes que se repetem a cada ano de operação da usina e que são adicionais ao que ocorreria com a importação de etanol americano. Com isso, são adicionados anualmente um valor da produção total de R\$ 2,5 bilhões e um PIB setorial de R\$ 910 milhões em nível nacional (Tabela 21). Para as duas variáveis, cerca de 80% desses impactos ficam dentro do estado de Mato Grosso.

O aumento da arrecadação tributária, que não deve ser confundido com a arrecadação total, é de R\$ 73 milhões (56% permanecem no estado de MT). Esses são os impostos que acontecem diretamente sobre a produção (ID) e os indiretos (ILL), devido à aquisição de insumos para a realização da produção do etanol de milho, somado aos coprodutos.

Tabela 21 - Impactos socioeconômicos adicionais na fase de operação

Região	Valor da produção setorial (R\$ milhões)	PIB setorial (R\$ milhões)	Emprego	Impostos ID e ILL (R\$ milhões)
Fase de operação (anual)				
MT	2.024	716	2.919	41
RB	517	193	1.597	32
Brasil	2.541	910	4.516	73

Nota: Atualização de valores pelo IPCA, R\$ 2011 para janeiro/2018. Valores aproximados.

O total de empregos diretos e indiretos aumentam em aproximadamente 4,5 mil postos de trabalho, sendo 65% dentro do estado de Mato Grosso. Como será evidenciado a seguir, cerca da metade dos empregos diretos ocorrem na produção de milho e, em segundo lugar, na própria usina. Vale ressaltar que o número de empregos na produção de milho foi calculado tendo em conta a necessidade adicional de contratação de “horas-homem” e convertida em postos de trabalho, ainda que provavelmente tal mão-de-obra seja aproveitada na produção de soja, devido à rotação de culturas.

Diferente da fase de investimentos e construção da usina, os benefícios econômicos na fase de operação ocorrem principalmente no estado em que a usina está instalada, agregando valor dentro do estado e movimentando outros setores. Os resultados detalhados por setor econômico, região e variável encontram-se abaixo. A partir da Tabela 22 podem ser observados os 10 principais setores impactados positivamente no valor da produção setorial, que juntos correspondem a 83%.

Dentre os principais setores demandados, a indústria etanol de milho, milho, floresta plantada do estado de Mato Grosso e o setor de fertilizantes no Resto do Brasil possuem 45%,

23%, 4% e 3% de participações do aumento no valor da produção setorial, respectivamente. Os outros 25% estão distribuídos entre os setores restantes da economia em todo o Brasil. Na análise socioeconômica os impactos sobre a produção de milho foram modelados admitindo-se a primeira e a segunda safra juntas.

Tabela 22 - Setores com impacto positivo no valor da produção setorial

Região	Setor	Valor da produção setorial (R\$ milhão)	Participação
MT	Indústria etanol de milho	1.329	45%
MT	Milho	674	23%
MT	Floresta plantada	109	4%
RB	Fertilizantes	77	3%
RB	Diesel – biodiesel	54	2%
MT	Transporte rodoviário	48	2%
RB	Defensivos agrícolas	42	1%
RB	Intermediação financeira	42	1%
RB	Óleo bruto	35	1%
RB	Químicos inorgânicos	32	1%
Total	336 setores	2.947	

Nota: Atualização de valores pelo IPCA, R\$ 2011 para janeiro/2018. Valores aproximados.

Por outro lado, alguns setores nacionais foram impactados negativamente, principalmente por conta do deslocamento de produtos substitutos e coprodutos, devido às premissas consideradas. O setor de ração convencional no Mato Grosso sofreu maior impacto e responde por 46% ou redução de R\$ 188 milhões no valor da produção setorial, principalmente devido à substituição parcial do *DDGS* no mercado.

Em seguida, os setores de óleo de soja bruto (R\$ -51 milhões, com participação de 13% nos efeitos negativos) e geração de gás natural (R\$ -43 milhões, com participação de 11%) foram negativamente impactados quanto ao valor da produção setorial devido à introdução de óleo de milho e bioeletricidade na economia (Tabela 23), que também foram premissas assumidas neste estudo.

Com a redução no nível da produção do setor ração convencional, haverá uma queda na mesma proporção (devido à hipótese de o consumo de insumos ser proporcional ao valor da produção setorial nos modelos de insumo-produto) de seus insumos, entre eles, a soja. Ocorre

que uma parcela muito pequena da produção de soja no país é feita pelo setor da pecuária e, com isto, havendo a redução na produção de soja, haverá uma inexpressiva redução no nível da atividade (valor da produção) pecuária, resultado que foi capturado no modelo, como apresentado na Tabela 23.

Observa-se que a participação nos impactos é baixa, apenas 2%. A queda de R\$ 10 milhões é um valor inexpressivo, aproximadamente 0,05%, em termos do valor da produção total da pecuária do estado de Mato Grosso, que gerou R\$ 24,89 bilhões em valor bruto da produção em 2022 (SEDEC, 2023).

Tabela 23 – Setores com impacto negativo no valor da produção setorial

Região	Setor	Valor da produção setorial (R\$ milhão)	Participação
MT	Ração convencional	-188	46%
MT	Óleo de soja bruto	-51	13%
MT	Geração gás	-43	11%
RB	Ração convencional	-42	10%
RB	Geração gás	-19	5%
MT	Soja	-13	3%
RB	Óleo de soja bruto	-13	3%
MT	Pecuária	-10	2%
RB	Transporte oleoduto	-8	2%
RB	Soja	-4	1%
Total	39 setores	-406	

Nota: Atualização de valores pelo IPCA, R\$ 2011 para janeiro/2018. Valores aproximados.

Em relação ao PIB setorial, o setor de milho no Mato Grosso teve o maior aumento, com participação de 31% dos impactos positivos (R\$ 321 milhões), devido à demanda deste insumo para produzir etanol. O segundo setor mais impactado positivamente foi a própria usina de etanol de milho, com aumento de R\$ 282 milhões (participação de 28%) no PIB setorial. Esses dois setores juntos, somados ao setor de floresta plantada do Mato Grosso, são responsáveis por 67% dos impactos positivos no PIB setorial em nível nacional (Tabela 24).

Tabela 24 - Setores com impacto positivo no PIB setorial

Região	Setor	PIB setorial (R\$ milhão)	Participação
MT	Milho	321	31%
MT	Indústria etanol de milho	282	28%
MT	Floresta plantada	77	8%
RB	Intermediação financeira	26	3%
RB	Óleo bruto	22	2%
MT	Transporte rodoviário	19	2%
MT	Intermediação financeira	13	1%
MT	Comércio atacadista de combustíveis e lubrificantes	10	1%
RB	Fertilizantes	10	1%
RB	Logística para transporte rodoviário	10	1%
Total	350 setores	1.018	

Nota: Atualização de valores pelo IPCA, R\$ 2011 para janeiro/2018. Valores aproximados.

Por outro lado, outros setores foram impactados negativamente, entre eles o setor de ração convencional do Mato Grosso, com queda de R\$ 35 milhões no PIB setorial (participação de 33% dos impactos negativos no PIB setorial), seguido por outros setores deslocados pela introdução no mercado dos coprodutos da produção de etanol de milho, como óleo de soja bruto (R\$ -13 milhões, representando 12%), gás natural na região Resto do Brasil (R\$ -10 milhões, com participação de 10% nos impactos negativos desta variável) e geração de gás (R\$ -10 milhões).

Importante destacar que o setor ração convencional na região Resto do Brasil também reduz em R\$ 10 milhões o PIB setorial, que representa 8% dos impactos negativos desta variável. Ou seja, outros estados que forneciam ração convencional para o estado de Mato Grosso perderam mercado com a introdução do *DDGS*. Adicionalmente, o setor soja no estado de Mato Grosso reduz em R\$ 6 milhões a variável PIB setorial, com participação de 6% nos impactos negativos totais desta variável. Porém essa queda é pouco representativa considerando que o setor soja no estado de Mato Grosso é uma das principais atividades que compõem o PIB do estado, juntamente com a pecuária, milho e algodão (SEPLAG, 2022).

Assim como observado na variável valor da produção, o setor pecuário também é afetado negativamente no PIB setorial, tendo uma redução de R\$ 3 milhões, que representa 4% dos impactos negativos dessa variável. Essa queda está diretamente relacionada ao impacto negativo nos setores ração convencional e soja (insumos utilizados para alimentação animal), como evidenciado anteriormente.

Porém, apesar do impacto negativo no setor pecuário, este acaba sendo pouco representativo. Em 2020, a agropecuária teve 28,8% de participação relativa sobre o valor adicionado bruto (VAB) do estado de Mato Grosso, sendo 2,7% para pecuária, com valor nominal de R\$ 4,2 bilhões (SEPLAG, 2022). Entre os 10 principais setores afetados negativamente, 50% estão dentro do MT e 50% no Resto do Brasil. Isso ocorre porque os novos produtos são introduzidos na região em que são produzidos, mas também distribuídos para outras localidades em nível nacional (Tabela 25).

Tabela 25 - Setores com impacto negativo no PIB setorial

Região	Setor	PIB setorial (R\$ milhão)	Participação
MT	Ração convencional	-35	33%
MT	Óleo de soja bruto	-13	12%
RB	Gás natural	-10	10%
MT	Geração gás	-10	10%
RB	Ração convencional	-10	8%
MT	Soja	-6	6%
MT	Pecuária	-3	4%
RB	Óleo de soja bruto	-3	3%
RB	Transporte oleoduto	-3	3%
RB	Soja	-3	3%
Total	25 setores	-109	

Nota: Atualização de valores pelo IPCA, R\$ 2011 para janeiro/2018. Valores aproximados.

Em relação à geração de empregos, na fase operacional foram criados 340 empregos diretos líquidos e 4.176 indiretos, com um forte efeito de transbordamento para outros setores. Esse efeito se deve à alta participação de insumos agrícolas intensivos em fator trabalho. Somente o setor de milho gera 2.008 empregos, que corresponde a 44,5% do total de empregos gerados. Em segundo lugar, aparece o setor de transporte rodoviário do estado de Mato Grosso,

com criação de 347 novos empregos (participação de 6%), provavelmente devido a demanda por transporte de milho, *DDGS* e etanol na região (Tabela 26).

O setor de floresta plantada contribui com 308 empregos adicionais, com participação de 5% dos impactos positivos na variável de emprego. No balanço entre empregos gerados e perdidos (resultado líquido), os setores de milho e floresta plantada, juntamente com a usina de etanol de milho e o setor de transporte rodoviário, correspondem a 66,5% do aumento de emprego em nível nacional.

Tabela 26 - Principais setores com aumento na variável emprego

Região	Setor	Emprego	Participação
MT	Milho	2.008	32%
MT	Transporte rodoviário	347	6%
MT	Usina etanol de milho	340	5%
MT	Floresta plantada	308	5%
RB	Máquinas e equipamentos de manutenção	137	2%
MT	Serviços para edificações	129	2%
RB	Transporte ferroviário	124	2%
RB	Serviços jurídicos, contábeis e consultoria	124	2%
RB	Transporte rodoviário	115	2%
RB	Armazenamento para transporte de carga	114	2%
Total	347 setores	6.239	

Os setores ração convencional, pecuária e óleo de soja bruto, todos no estado de Mato Grosso, foram os mais impactados negativamente quanto a variável de emprego, com queda de 57% dos efeitos negativos, o que corresponde a uma perda de aproximadamente 980 empregos (Tabela 27). O efeito negativo na variável emprego do setor pecuário, no Resto do Brasil e estado de Mato Grosso, é reflexo da queda do nível de atividade pecuária (em seu valor da produção).

Como mencionado anteriormente, o setor pecuário também produz, de forma secundária, a soja. Devido à menor demanda por soja para a produção de ração convencional, o setor pecuário reduz o nível de produção e consequentemente demanda uma menor quantidade de emprego. Para o setor aves e ovos no Resto do Brasil e estado de Mato Grosso, observa-se uma

queda de 101 e 59 empregos, respectivamente. Estas reduções do emprego dos setores de pecuária e aves e ovos (atividades intensivas no fator trabalho) estão associadas à menor demanda por soja para a produção de ração convencional. Estes dois setores foram responsáveis por 3,05% da produção de soja no Brasil.

Além disso, interessante observar que apesar do aumento no número de empregos no setor milho do estado de Mato Grosso, este mesmo setor no Resto do Brasil obteve queda na quantidade de emprego (redução de aproximadamente 80 empregos e participação de 5%). Este resultado está associado à redução na variável valor da produção, que é impactada negativamente devido à queda no valor da produção do setor ração convencional, que utiliza soja e milho como insumos. Interessante observar que ao aumentar a demanda de milho para a produção de etanol no estado de Mato Grosso, a oferta deste insumo virá de dentro do próprio estado. Esta dinâmica é muito importante para a análise da mudança de uso da terra e será aprofundada nas seções seguintes.

Tabela 27 - Principais setores com queda na quantidade de emprego

Região	Setor	Emprego	Participação
MT	Ração convencional	-597	35%
MT	Pecuária	-213	12%
MT	Óleo de soja bruto	-171	10%
RB	Pecuária	-162	9%
RB	Ração convencional	-124	7%
RB	Aves e ovos	-101	6%
RB	Milho	-79	5%
MT	Aves e ovos	-59	3%
RB	Óleo de soja bruto	-41	2%
RB	Soja	-32	2%
Total	28 setores	-1.723	

Em relação aos impostos locais no Mato Grosso, a usina etanol de milho e a produção de milho contribuíram com 36% e 24% do aumento total de impostos, respectivamente, no valor de R\$ 44 milhões. Em 2020, o milho foi responsável por 20% do valor bruto arrecadado no estado de MT (SEDEC, 2022). Os setores de diesel/biodiesel, bem como fertilizantes e outros produtos do refino de petróleo do Resto do Brasil, representam 16% dos efeitos positivos na arrecadação de impostos em nível nacional, o que corresponde a R\$ 14,3 milhões (Tabela 28).

Tabela 28 - Principais setores com aumento na arrecadação de impostos

Região	Setor	Impostos (ID e ILL – R\$ milhões)	Participação
MT	Usina etanol de milho	26,3	29%
MT	Milho	17,6	20%
RB	Diesel – biodiesel	6,7	8%
RB	Fertilizantes	3,8	4%
RB	Outros produtos do refino de petróleo	3,8	4%
RB	Defensivos agrícolas	2,5	3%
RB	Químicos inorgânicos	2	2%
MT	Floresta plantada	2	2%
RB	Intermediação financeira	2	2%
RB	Outros produtos orgânicos	1,3	2%
Total	354 setores	89	

Nota: Atualização de valores pelo IPCA, R\$ 2011 para janeiro/2018. Valores aproximados.

O valor de R\$ 73 milhões é a soma entre os impactos positivos e negativos na variável impostos indiretos líquidos de subsídios sobre o consumo de insumos somado aos impostos diretos sobre as atividades econômicas no Brasil. De fato, em termos de impostos, o valor adicional na economia, são esses R\$ 73 milhões, adicionais ao que aconteceria se o etanol fosse importado. Necessário evidenciar que a tributação sobre os 500 milhões de litros de etanol de milho é maior do que R\$ 41 milhões (soma entre ID e ILL dos setores usina e milho) no estado de Mato Grosso³⁴.

Por outro lado, outros setores tiveram queda na arrecadação de impostos (Tabela 29), principalmente o setor de ração convencional, tanto no Mato Grosso quanto no Resto do Brasil, com queda total de R\$ 9 milhões, que representa 56% dos efeitos negativos na variável impostos (ID e ILL). Esse impacto na queda da arrecadação de impostos é reflexo da redução do nível das atividades (valor da produção setorial), nos setores impactados negativamente, como os setores ração convencional, óleo de soja bruto, geração de gás, soja e pecuária.

³⁴ Além desses, são gerados R\$ 130 milhões de impostos sobre as vendas dos produtos e coprodutos finais da usina.

Tabela 29 - Principais setores com queda na arrecadação de impostos

Região	Setor	Impostos (ID e ILL – R\$ milhões)	Participação
MT	Ração Convencional	-6,5	40%
RB	Ração Convencional	-2,5	16%
MT	Óleo de soja bruto	-2,0	13%
MT	Geração de gás	-1,3	9%
RB	Óleo de soja bruto	-1,0	6%
RB	Gás Natural	-0,6	4%
RB	Transporte Oleoduto	-0,6	3%
MT	Soja	-0,3	2%
MT	Pecuária	-0,3	2%
RB	Pecuária	-0,3	1%
Total	21 setores	-16	

Nota: Atualização de valores pelo IPCA, R\$ 2011 para janeiro/2018. Valores aproximados.

Após analisar os impactos socioeconômicos da introdução de um setor etanol de milho no estado de Mato Grosso, foi avaliada uma outra possibilidade. Devido ao elevado nível de oferta doméstica na região Centro-Oeste brasileira e às dificuldades em questões logísticas, os preços pagos aos agricultores tendem a ser inferiores nessa região. Porém, esse cenário tem mudado nos últimos anos, principalmente em função dos estímulos e condições criadas pelo aumento da produção do etanol de milho (NEVES et al., 2021).

Além disso, observa-se que 60% e 76% do milho na região Centro-Oeste e estado de Mato Grosso respectivamente, foram direcionados para exportação na safra 2019/20 (COMEX STAT, 2021). Por isso, um cenário alternativo foi avaliado com o objetivo de identificar os impactos socioeconômicos caso o milho, ao invés de ser direcionado para a produção de etanol fosse exportado para mercados internacionais. Os resultados estão representados na Tabela 30 abaixo.

Tabela 30 – Comparação entre os resultados: Cenário Alternativo e Cenário Usina Etanol de milho na fase de operação

Região	Valor da Produção Setorial (R\$ milhões)	PIB setorial (R\$ milhões)	Emprego	Impostos ID e ILL (R\$ milhões)
Fase de OPERAÇÃO				
MT	2.024	716	2.919	41
RB	517	193	1.597	32
Brasil	2.541	910	4.516	73
Cenário ALTERNATIVO				
MT	822	388	2.751	23
RB	530	196	2.155	32
Brasil	1.352	584	4.906	55

Nota: Atualização de valores pelo IPCA, R\$ 2011 para janeiro/2018. Valores aproximados.

Os resultados apontam para um valor da produção setorial de R\$ 1,3 bilhão em nível nacional (60% dentro do estado de Mato Grosso) e 584 milhões em relação ao PIB setorial. Quanto aos impostos (ID e ILL), pode ser observado um efeito de transbordamento para o Resto do Brasil, com participação de 58% nos impactos totais (R\$ 32 milhões). Para a variável emprego, são gerados 4,9 mil novos empregos, 9% maior quando comparado ao cenário com a indústria de etanol de milho, que gera 4,5 mil empregos. Essa diferença ocorre principalmente na região Resto do Brasil.

O aumento de empregos no cenário de exportação ocorre devido ao não deslocamento de empregos no setor de ração convencional e outras atividades econômicas, como também um aumento no nível da produção de todos os setores da economia, que demandam maior quantidade de mão-de-obra, quando comparado ao cenário com a indústria do etanol de milho. Adicionalmente, ressalta-se que apesar do maior número de empregos, majoritariamente nos setores agrícolas, são exigidos maior quantidade de mão-de-obra quando comparado à indústria, porém com menor qualificação.

No cenário em que o milho é utilizado para a produção de etanol, o valor da produção setorial, PIB setorial e impostos (ID e ILL) são mais altos do que no cenário de exportação de milho devido ao maior valor agregado dos produtos (R\$ 2,5 bilhões, R\$ 910 milhões e R\$ 73 milhões, respectivamente). Contudo, o valor da produção, PIB setorial e impostos em nível nacional seriam mais baixos para o cenário de exportação do milho, em 47%, 36% e 26%, respectivamente. Essa diferença é encontrada principalmente na região de Mato Grosso, que

teria uma redução de R\$ 1,2 milhão no valor da produção setorial, R\$ 328 milhões no PIB setorial e R\$ 18 milhões na arrecadação de impostos (ID e ILL). Para o Resto do Brasil, essas variáveis (excluindo empregos) sofreram pouca ou nenhuma alteração (Tabela 30).

Em resumo, os impactos socioeconômicos no cenário no qual o milho é exportado (e não convertido em etanol), geraria marginalmente mais emprego, mas o PIB setorial, valor da produção setorial e arrecadação de impostos seriam significativamente mais baixos, também devido ao menor valor agregado do produto. Tendo em vista os resultados socioeconômicos obtidos neste estudo, o desenvolvimento da cadeia de valor do etanol de milho brasileiro revela-se uma opção interessante e vem acompanhado de impactos positivos.

A implementação de uma nova indústria de etanol de milho na região de Mato Grosso tem grande potencial para gerar muitos benefícios socioeconômicos e dinamismo para a economia local e nacional. Nesta análise não foram consideradas mudanças estruturais na economia, que podem vir a ocorrer no longo prazo.

5.2 Resultados na Mudança do Uso da Terra

No geral, ao comparar o cenário base (Tabela 17, sem etanol de milho) com outro onde há produção de 1 bilhão de litros de etanol de milho em 2030, no estado de Mato Grosso, observam-se efeitos diretos e indiretos na produção, área e dinâmica de uso da terra das principais atividades agropecuárias brasileiras.

A expansão acontece principalmente nas áreas de milho (primeira e segunda safra) e eucalipto (floresta plantada), no Centro-Oeste Cerrado e Norte da Amazônia (regiões *BLUM*), local onde a matéria-prima e a biomassa são provenientes. Quase toda a expansão da área de milho na região Centro-Oeste é segunda safra, mas com efeitos induzidos que geram impacto em outras regiões e no cultivo de soja (Tabela 31).

Adicionalmente, vale destacar que a maior disponibilidade de *DDGS* no mercado reduz a necessidade de área de cultivo para soja e milho destinados a produção de ração animal. De forma similar, mas em uma escala muito menor, o óleo de milho coproduzido com etanol reduz a necessidade de produção de óleo vegetal a partir da soja, por exemplo.

Tabela 31 - Variação da área agropecuária (em mil hectares), em 2030 – Cenário S1

Região/ Cultura	Cana- de- açúcar	Soja	Milho 1ª safra	Outras Culturas	Pastagem	Floresta Plantada	Total	Milho 2ª safra
Sul	(2)	(25)	31	0	(4)	-	-	15
Sudeste	(6)	(12)	18	(0)	1	-	0	1
Centro- Oeste Cerrado	(2)	(15)	0	(2)	20	17	19	73
Norte Amazônia	(0)	(12)	4	0	1	12	5	(3)
Nordeste Litorâneo	1	-	3	(0)	(2)	-	1	-
Nordeste Cerrado	0	(7)	7	(0)	4	-	4	1
Total	(8)	(71)	62	(2)	19	29	29	87

Em outras palavras, a menor área total de soja no Brasil para o cenário com etanol de milho (-71 mil hectares), em comparação com o Cenário base, pode estar relacionada à menor demanda por soja como matéria-prima para produção de farelo destinada à ração animal e óleo de soja bruto, destinado à produção de biodiesel ou alimentação animal, ambos substituídos por novos coprodutos gerados pela indústria etanol de milho.

Ao olhar especificamente para a área de pastagem, a partir do modelo *BLUM* é possível avaliar a dinâmica entre os três níveis tecnológicos da pecuária bovina e identificar a migração endógena entre os sistemas de baixa, média e alta tecnologia. Com isso, apesar da expansão de 20 mil hectares de pastagem na região Centro-Oeste Cerrado, o modelo é capaz de detectar um possível processo de intensificação na região.

Na Tabela 32, pode ser observado principalmente a partir da dinâmica no Centro-Oeste Cerrado entre a redução de 45 mil hectares e 19 mil hectares das áreas de pastagem de baixa e alta tecnologias respectivamente, acompanhado de aumento de 84 mil hectares da área de pastagem de média tecnologia. Esta transição de alta para média tecnologia é possível devido ao menor uso de ração na média tecnologia, menor custo e consequentemente maiores ganhos. A alta tecnologia tem um maior custo de ração, por isso acaba sendo mais vantajosa a migração para a média tecnologia, que faz maior uso de ração em comparação com a baixa tecnologia, porém menor quando comparada à alta tecnologia.

Tabela 32 - Variação da área de pastagem, por tipo tecnológico (em mil hectares), em 2030 – Cenário S1

Região/ Cultura	Baixa Tecnologia	Média Tecnologia	Alta Tecnologia
Sul	-2	-2	0
Sudeste	-2	5	-3
Centro-Oeste Cerrado	-45	84	-19
Norte Amazônia	1	0	0
Nordeste Litorâneo	-2	0	0
Nordeste Cerrado	2	3	-1
Total	-47	90	-24

Essa dinâmica dos níveis tecnológicos da pecuária bovina e aumento da intensificação da atividade está diretamente relacionada à entrada dos *DDGS* no mercado brasileiro. A pecuária de média tecnologia, diferente da atividade extensiva, faz maior uso de ração animal. Com isso, apesar da expansão de área da média tecnologia, pode-se dizer que esta dinâmica possivelmente carrega efeitos positivos para esta atividade produtiva na região Centro-Oeste Cerrado. A pecuária de alta tecnologia também faz uso da ração animal e *DDGS* na fase de confinamento (engorda), porém, devido ao maior custo de produção, o modelo identifica uma maior expansão e conversão para a média tecnologia.

Como exemplo, a intensificação da produção pecuária é fundamental para a expansão da agropecuária, redução do desmatamento e implementação do Código Florestal no longo prazo. Além disso, a pastagem de baixa produtividade pode ser substituída por lavouras e florestas plantadas tendo em vista a otimização dos retornos e a regularização ambiental. Em resumo, a intensificação da pecuária é necessária tanto para aumentar a competitividade da atividade quanto para alcançar os objetivos ambientais de longo prazo.

Em relação a produção das principais atividades agropecuárias brasileiras, observa-se que outras culturas em todo território nacional são afetadas indiretamente e com queda de área devido à introdução de uma nova indústria de etanol de milho segunda safra em Mato Grosso, principalmente a cana-de-açúcar na região sudeste (-448 mil toneladas) e a soja na região sul do Brasil, queda de 89 mil toneladas (Tabela 33).

Apesar de representar a maior queda na produção, a cana-de-açúcar, normalmente, tem maior flexibilidade pelo lado da demanda e como observado acima, a área de cana reduz apenas

6 mil hectares, que representa uma pequena queda considerando o total de área e produção desta cultura na região sudeste brasileira. Adicionalmente, vale ressaltar que essa redução não está associada à substituição do etanol de cana, já que o etanol de milho está substituindo o etanol importado.

Tabela 33 - Variação da produção agropecuária (em mil toneladas), em 2030 – Cenário S1

Região/ Cultura	Cana-de- açúcar	Soja	Milho 1ª safra	Outras Culturas	Carne¹	Milho 2ª safra
Sul	(116)	(89)	296	2	7	119
Sudeste	(448)	(44)	144	(0)	(6)	9
Centro-Oeste Cerrado	(120)	(55)	0	(7)	(4)	626
Norte Amazônia	(5)	(42)	17	1	(0)	(8)
Nordeste Litorâneo	60	-	6	0	(1)	-
Nordeste Cerrado	1	(29)	33	0	(0)	3
Total	(628)	(259)	496	(4)	(4)	749

¹Carne: produção de carne total, somatório entre gado de corte, aves e suínos.

No balanço, a produção total de carne se mantém praticamente igual ao Cenário base, com uma redução de 4 mil toneladas (majoritariamente frango). Essa dinâmica da produção de carne pode estar diretamente associada à oferta e demanda de ração e *DDGS*, assim como o maior ou menor uso em cada uma das regiões.

A partir da Tabela 34 podem ser observados os resultados do Cenário S1 para mudança do uso da terra em comparação com o Cenário base, desagregado por região *BLUM*. Leia-se que: nas regiões Centro-Oeste Cerrado e Norte Amazônia, houve expansão da área de eucalipto sobre área de pastagem, somando uma área adicional de 29 mil hectares. Por outro lado, observa-se que a mesma quantidade de conversão de pasto para eucalipto (11,9 mil hectares), ocorre entre vegetação natural e pasto na região Norte Amazônia. O mesmo movimento pode ser observado na região Centro-Oeste Cerrado. Ou seja, ao converter área de pasto em eucalipto para o uso no processo de cogeração de energia, efeitos indiretos parecem ser identificados a partir da expansão da área de pasto sobre vegetação natural.

Tabela 34 – Mudança no uso da terra, entre Cenário S1 e Cenário Base (em 1000 hectares)

Região/ Cultura	Anual/ Perene	Pasto/ Perene	Pasto/ Anual	Pasto/ Eucalipto	Natural/ Anual	Natural/ Perene	Natural/ Pasto
Sul	-1,5	0,0	4,3	0,0	0,0	0,0	0,0
Sudeste	-5,5	-0,2	0,0	0,0	0,0	0,0	0,4
Centro-Oeste Cerrado	0,0	-1,6	-16,5	17,1	0,0	0,0	19,3
Norte Amazônia	0,0	-0,1	-0,9	11,9	-7,3	0,0	11,9
Nordeste Litorâneo	0,0	0,7	1,2	0,0	1,3	0,0	0,0
Nordeste Cerrado	0,0	0,0	-0,2	0,0	0,0	0,0	3,6
Total	-7,0	-1,1	-12,0	29,0	-6,0	0,0	35,2

Embora o modelo identifique indiretamente a conversão de área natural, esse efeito é contrabalanceado (em termos de emissões de GEE) pela expansão de florestas plantadas e menor conversão de vegetação natural por culturas anuais na região Norte Amazônia, como apresentado abaixo na Tabela 35.

Porém, alguns cuidados precisam ser tomados ao identificar uma conversão de área natural em pastagem na região Norte Amazônia do BLUM. A importância da floresta não se limita aos estoques de carbono. As estratégias para conter o desmatamento incluem uma provável combinação de comando e controle, incentivos privados e o desenvolvimento de novas ferramentas de transparência. Literatura recente correlaciona o aumento do desmatamento à falta de políticas de comando e controle, incluindo redução de investimentos e autonomia nos órgãos ambientais, redução da fiscalização e das multas ambientais (FEARNSIDE, 2017; HANUSCH et al., 2022; ROVERE et al., 2020; SOUZA-RODRIGUES, 2019; FERREIRA FILHO et al., 2015).

Para reduzir as possibilidades de efeitos indiretos na região da Amazônia, alguns cuidados podem ser tomados, como: (i) solicitação de nota fiscal, para validação da origem; (ii) estimular a adoção de sistemas de integração, como lavoura-pecuária-floresta (ILPF); (iii) expandir a produção do eucalipto sobre áreas degradadas, marginais ou sem uso; (iv) fortalecer parceria público-privada local/regional; (v) aumentar a fiscalização; (vii) entre outros.

De maneira simplificada, as emissões negativas em uso da terra (sequestro de carbono), são explicadas pela expansão da área de eucalipto para alimentar o sistema de cogeração da usina e pelo uso de milho segunda safra, que coproduz *DDGS* e reduz a necessidade de áreas para lavouras anuais.

Ao substituir áreas de pastagens, o eucalipto forma uma base florestal com maior estoque de carbono do que o uso anterior (pasto). Observa-se que a expansão da área de eucalipto ocorre nas regiões caracterizadas no *BLUM* como Centro-Oeste Cerrado e Norte Amazônia. O aumento de demanda por milho gera uma expansão direta e indireta da área de milho; grande parte ocorre em sistema de segunda safra, que não requer área adicional.

Por sua vez, a coprodução de *DDGS* aumenta a oferta de ração, que reduz a necessidade de milho e soja. Ou seja, o *DDGS* desloca o uso de outros insumos utilizados para a produção de ração animal então existente, dentre eles a soja. Uma menor expansão da área de soja leva à manutenção de áreas de pastagens, que tem maiores estoques de carbono quando comparados com lavouras anuais. Esse balanço também reduz a área de soja e tem uma expansão marginal de área de milho primeira safra.

Ao retomar a Equação 67 e acoplar os resultados das variações das matrizes de áreas e emissões, constata-se uma remoção líquida total de aproximadamente 2,9 milhões tCO₂eq (linha inferior da Tabela 35). Embora 5,2 milhões tCO₂eq sejam emitidos devido à conversão de vegetação natural em pastagem, ocorre também uma remoção significativa de 4 milhões tCO₂eq.

Esta remoção é reflexo da conversão desta área de pastagem em áreas de eucalipto, sendo 2,3 milhões tCO₂eq somente na região Centro-Oeste Cerrado, este último com estoques de carbono mais altos. Além disso, devido ao menor nível de desmatamento em comparação com o *baseline*, ocorre uma remoção significativa de 3,5 milhões tCO₂eq em todo Brasil, concentrada na região Norte Amazônia (principal remoção via desmatamento evitado, alcançando 3,7 milhões tCO₂eq).

Tabela 35 - Emissões da mudança do uso da terra em 2030 (1.000 tCO₂eq) - Cenário S1

Região/ Cultura	Sul	Sudeste	Centro- Oeste Cerrado	Norte Amazônia	Nordeste Litorâneo	Nordeste Cerrado	Total
Anual/ Perene	223	582	0	0	0	-2	803
Pasto/ Perene	0	-4	-23	-1	13	0	-15
Pasto/ Anual	706	0	-2.190	-128	144	-25	-1.492
Pasto/ Eucalipto	0	0	-2.368	-1.643	0	0	-4.011
Natural/ Anual	0	0	0	-3.713	195	0	-3.517
Natural/ Perene	0	0	0	0	0	0	0
Natural/ Pasto	0	17	1.070	3.936	0	210	5.233
Total	930	595	-3.512	-1.549	353	183	-2.999

A queda da demanda por terras de algumas culturas, devido à produção de etanol de milho segunda safra, leva à manutenção de áreas de pastagem e vegetação natural, que possuem estoques de carbono mais altos quando comparados aos cultivos anuais. As emissões negativas surgem porque a área de cultura anual diminui e a área de pastagem aumenta em comparação com um cenário sem a introdução da indústria (como exemplo, -1,5 milhões de tCO₂eq no total e -2,2 milhões de tCO₂eq no Centro-Oeste Cerrado).

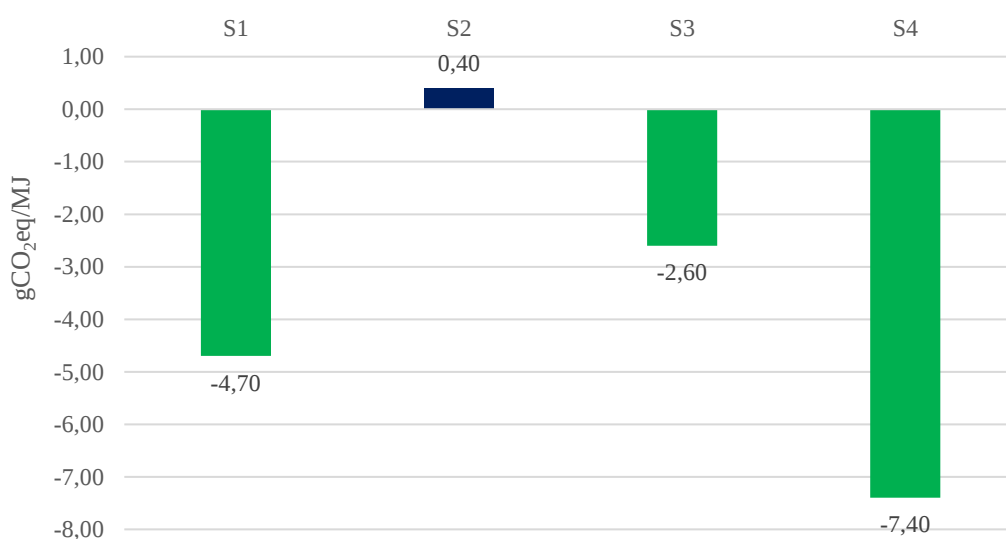
Para estimar as emissões de *ILUC* por megajoule (MJ) de etanol anidro, os valores apresentados na Tabela 35 foram divididos por 30 bilhões de litros (equivalente a demanda do mercado em 30 anos), em milhões de MJ (*Lower Heating Value* - *LHV* = 21,27 MJ/l). Os 30 anos estão alinhados com os regulamentos internacionais, *RFS2* e *LCFS*, que incluem explicitamente o *ILUC*. O período de integração de 30 anos está relacionado aos anos do denominador do *ILUC* (gCO₂e/MJ). O numerador gCO₂ é a variação de emissões entre o Cenário base e cenários com etanol de milho. O denominador se refere à quantidade de energia do etanol produzido durante o período de integração.

Embora o modelo identifique pequena conversão indireta da vegetação nativa, esse efeito é pequeno em termos de carbono. Por isso, no Cenário S1, o *ILUC* resultou em -4,7 gCO₂e/MJ de etanol anidro para o período de amortização de 30 anos (Figura 23). Para o Cenário S2,

assumindo que não há expansão da área de eucalipto, o *ILUC* resultou em uma emissão líquida de 0,4 gCO₂e/MJ, principalmente em resposta ao maior uso da terra para pastagem e menor área florestal quando comparado ao Cenário S1.

Para o Cenário S3, ao assumir a equivalência de 1:1 kg entre o composto milho/farelo de soja e *DDGS*, as emissões relacionadas ao *ILUC* foram de -2,6 gCO₂e/MJ, devido à maior conversão de áreas de pastagem em área de safra anual (principalmente soja). No Cenário S4, que assume uma maior taxa de substituição entre milho/farelo de soja e *DDGS*, considerando 1:1,3 kg, as emissões de *ILUC* resultaram em -7,4 gCO₂e/MJ, principalmente devido à redução de expansão do plantio de culturas anuais sobre pastagens. Os resultados para a produção, área e emissões dos cenários alternativos (S2, S3 e S4) encontram-se nos anexos B, C e D.

Figura 23 - Resultados *ILUC* para etanol de milho segunda safra



Apesar da identificação da conversão indireta da vegetação natural, esse efeito é mais do que contrabalanceado (em termos de emissões de GEE) pela expansão das florestas plantada e menor expansão da área de soja sobre pastagem. As emissões negativas enfatizam a importância de considerar – e potencialmente otimizar – as circunstâncias locais na análise e no planejamento relacionados a biocombustíveis e emissões de GEE.

Apesar de ainda existirem poucos estudos sobre etanol de milho no Brasil, as emissões negativas de *ILUC* foram recentemente relatadas por Fiorini et al. (2023), que estimaram *ILUC* para *Sustainable Aviation Fuels (SAF)* em diferentes contextos, usando o modelo *BLUES (Brazilian Land Use and Energy System)*. Este modelo é um *Integrated Assessment Model (IAM)* que assume uma previsão de longo prazo para 2050, com etapas de otimização de 5 anos.

O modelo representa as cinco macrorregiões do Brasil e detalha tecnologias convencionais e novas, de energia e sistemas de uso da terra.

O estudo avaliou *ILUC* para cinco tipos de matérias-primas, dois cenários para combate de desmatamento no Brasil e cinco diferentes metas para mistura de *SAF*. Como observado na Tabela 36 abaixo, a rota *Alcohol-to-jet (ATJ)* do milho destaca-se como a matéria-prima de melhor desempenho em quase todos os casos. É também a única rota que apresenta valores negativos de *ILUC* em todos os cenários, inclusive naqueles onde o manejo do desmatamento não é bem controlado no Brasil (FIORINI et al., 2023).

Tabela 36 - Emissões cumulativas de GEE para *ILUC* dos cenários avaliados (gCO₂e/MJ), em 2050

Mistura de SAF	Milho		Cana-de-açúcar		Palma		Macaw (baixa produtividade)		Macaw (alta produtividade)	
	Desm.	Zero Desm.	Desm.	Zero Desm.	Desm.	Zero Desm.	Desm.	Zero Desm.	Desm.	Zero Desm.
10%	-298,0	-286,8	-108,9	-186,9	-169,5	-125,0	-208,0	-170,7	-223,8	-196,8
20%	-74,5	-95,2	-13,7	-107,8	-22,0	-98,8	-3,8	-58,0	7,2	-43,1
30%	-48,9	-53,3	1,0	-36,6	5,4	-31,7	9,2	-34,0	12,5	-24,2
40%	-56,9	-64,0	-5,1	-33,7	3,8	-21,6	15,0	-18,8	10,3	-17,0
50%	-48,4	-37,4	0,2	-23,5	3,8	-13,7	10,4	-4,3	7,9	-13,6

Fonte: Adaptado de Fiorini et al. (2023).

Além dos resultados para mudança de uso da terra, produção e área apresentados acima, o modelo *BLUM* identifica como se comportam os preços dos diferentes produtos agropecuários no Brasil devido à introdução de uma nova indústria de etanol de milho. A Tabela 37 abaixo traz a variação de preço para cada um dos cenários (S1, S2, S3 e S4) em comparação com o Cenário Base, sem a indústria etanol de milho. Evidencia-se que para a maioria dos produtos agropecuários o preço se mantém praticamente igual entre os cenários com ou sem a indústria etanol de milho. O milho aumenta o preço em no máximo 1%, o que não parece ensejar maiores preocupações ou impactos. A principal variação ocorre no farelo de soja que reduz o preço em até 2%.

Tabela 37 - Variação de preço dos produtos agropecuários no Brasil, em 2030 nos diferentes cenários

	Milho	Soja	Arroz	Feijão	Far. de soja	Óleo de soja	Trigo	Cevada	Carne bovina	Carne suína	Carne frango	Ovos
Cen. S1	1,02%	-0,07%	0,05%	0,03%	-1,71%	0,36%	0,00%	0,00%	0,07%	0,02%	0,04%	0,02%
Cen. S2	1,01%	-0,08%	0,05%	0,03%	-1,73%	0,36%	0,00%	0,00%	0,07%	0,02%	0,03%	0,02%
Cen. S3	1,07%	-0,05%	0,06%	0,04%	-1,42%	0,27%	0,00%	0,00%	0,08%	0,03%	0,05%	0,02%
Cen. S4	0,96%	-0,09%	0,05%	0,03%	-2,09%	0,47%	0,00%	0,00%	0,06%	0,02%	0,02%	0,01%

Dessa forma, de acordo com as premissas assumidas, assim como a partir das simulações realizadas neste estudo, pode-se evidenciar que a produção de etanol de milho no Brasil não aumenta significativamente o preço dos produtos agropecuários brasileiros. Ou seja, existem formas de conciliar a produção de biocombustíveis e alimentos, sem que haja competição e disputa entre essas atividades quanto ao uso da terra e sem aumento dos preços dos alimentos, devido a maior demanda para produção de biocombustível.

6 CONCLUSÕES

Esta é a primeira tese que buscou avaliar os impactos socioeconômicos e da mudança do uso da terra, a partir da introdução e expansão de uma indústria de etanol de milho no Centro-oeste brasileiro, tendo como referência o caso concreto de uma usina autônoma instalada em Mato Grosso. A produção de etanol de milho no Brasil, intensificada nos últimos cinco anos, não somente garante um volume maior do biocombustível no mercado, mas tem potencial para dar mais estabilidade aos preços no longo prazo. Isso porque sua principal matéria-prima, o milho de segunda safra, pode ser armazenado e está disponível durante o ano todo, permitindo uma operação permanente das usinas, ao contrário do que ocorre com a cana-de-açúcar.

Para cumprir com um dos objetivos propostos neste estudo, utilizou-se a análise de insumo-produto para captar os efeitos diretos e indiretos ao longo das cadeias produtivas associadas à indústria etanol de milho, bem como os efeitos de transbordamentos para as regiões onde não foram aplicados os choques. A análise socioeconômica identifica a geração

de empregos, aumento do PIB setorial, valor da produção setorial e arrecadação de impostos (ID e ILL), tanto no estado de Mato Grosso como no Resto do Brasil.

Na fase de investimento (construção), grande parte da geração de valor ocorre fora do estado de Mato Grosso, com efeito de transbordamento significativo para outras regiões do Brasil: 87% dos impactos na variável valor da produção setorial são na região RB, 86% do PIB setorial, 81% empregos e 94% Impostos ID e ILL (Tabela 38). O efeito de transbordamento é muito relevante porque consegue identificar os impactos em outros estados. Esta avaliação só foi possível devido ao uso da análise de insumo-produto inter-regional.

Por outro lado, na fase de operação (efeito permanente dos investimentos a longo prazo), esta dinâmica se inverte, de tal modo que a geração de valor ocorre, principalmente, dentro do estado. Como pode ser visto na Tabela 38, praticamente 80% dos impactos na variável valor da produção ocorrem dentro da região de MT. O mesmo pode ser observado para as outras variáveis: 78% PIB setorial, 65% emprego e 56% impostos ID e ILL dos impactos ocorrem na região de Mato Grosso.

O cenário alternativo, no qual o milho é exportado (e não convertido em etanol), geraria marginalmente mais empregos do que o cenário de operação da indústria. Porém, o valor da produção setorial, PIB setorial e arrecadação de impostos seriam, respectivamente, 88%, 56% e 33% menores no cenário alternativo, também devido ao menor valor agregado do produto. Ou seja, os resultados da implantação de uma usina de etanol de milho segunda safra no Centro-Oeste vem acompanhada de impactos socioeconômicos positivos para as variáveis analisadas neste estudo.

Tabela 38 - Quadro-resumo dos principais resultados da análise socioeconômica

Região	Valor da Produção Setorial (R\$ milhões)	PIB setorial (R\$ milhões)	Emprego	Impostos ID e ILL (R\$ milhões)
Fase de INVESTIMENTO				
MT	185	92	1.627	5
RB	1.278	568	6.846	75
Brasil	1.463	660	8.473	80
Fase de OPERAÇÃO				
MT	2.024	716	2.919	41
RB	517	193	1.597	32
Brasil	2.541	910	4.516	73

Cenário ALTERNATIVO				
MT	822	388	2.751	23
RB	530	196	2.155	32
Brasil	1.352	584	4.906	55

Estes são os primeiros resultados encontrados para o setor. Por isso, como recomendação para trabalhos futuros, sugere-se ampliar a avaliação dos impactos sociais, analisando outros indicadores socioeconômicos relacionados e que permitam inferências quanto aos Objetivos de Desenvolvimento Sustentável (ODS), como fome zero e agricultura sustentável, trabalho decente e crescimento econômico, redução das desigualdades, entre outros. Tais inferências precisarão considerar variações de preço, capacidade de compra, idealmente por classes de renda. Essas inferências somente seriam possíveis com modelos mais complexos (tais como modelos de equilíbrio geral computável).

Adicionalmente, vale ressaltar que a comparação entre os cenários da análise socioeconômica não considera ou calcula o impacto dos subsídios. Mecanismos de precificação de carbono, por exemplo os CBIOS do Programa RenovaBio, favoreceriam a produção de etanol em detrimento da exportação. Para ter uma avaliação aprimorada, recomenda-se uma análise econômica de longo prazo em trabalhos futuros, considerando esses tipos de mecanismos.

Em relação à análise ambiental, este é o primeiro estudo que identifica emissões negativas de *ILUC* para o etanol de milho brasileiro, embora tenham sido antecipadas para os biocombustíveis celulósicos. As emissões negativas enfatizam a importância de considerar – e potencialmente otimizar – as circunstâncias locais na análise e no planejamento relacionados a biocombustíveis e emissões de GEE.

Recentemente, Fiorini et al. (2023) estimaram valores negativos de *ILUC* em todos os cenários para a rota *ATJ* do milho, com variação entre -298 gCO_{2e}/MJ e -37,4 gCO_{2e}/MJ, inclusive naqueles onde o desmatamento não é bem controlado no Brasil. O milho destaca-se como a matéria-prima de melhor desempenho em quase todos os cenários apresentados. Apesar da diferença entre os valores, corrobora com o resultado negativo encontrado neste estudo e com a narrativa de que uma cultura de segunda safra pode ter um baixo risco de *ILUC*.

No entanto, o cultivo de segunda safra não requer áreas adicionais além do *status quo* e utiliza, em rotação com a soja ao longo do ano, em áreas já existentes atualmente. Esta prática está alinhada com trabalhos internacionais de modelagem que reconhecem a importância da intensificação (CARRIQUIRY et al., 2019; LABORDE, 2011; TAHERIPOUR et al., 2017).

Tendo em vista os resultados obtidos, o desenvolvimento da cadeia de valor do etanol de milho brasileiro revela-se como uma opção interessante ao alinhar objetivos de redução das emissões de GEE, benefícios socioeconômicos e diversificação da matriz energética nacional. Há, portanto, evidências para recomendar o fomento da indústria de etanol de milho no estado de Mato Grosso, nas condições e premissas avaliadas neste estudo.

O tema diversificação da matriz energética não é uma discussão momentânea e se debruça sobre importantes pontos como o desenvolvimento econômico, social e sustentável da economia rural e regional e, em âmbito global, a mitigação dos GEE. Dentro desse contexto é necessário avançar ainda mais na seara dos biocombustíveis e se atentar aos desafios climáticos para os próximos anos.

Conciliar a produção de bioenergia, redução de emissões de GEE, segurança alimentar, transição energética, combate à pobreza, redução das desigualdades socioeconômicas e mudanças climáticas, com vários outros temas simultaneamente, é extremamente desafiador e importante para o desenvolvimento da humanidade. O atingimento desses desafios requer a busca e uso de diversas soluções, incluindo novas tecnologias, substituição de fontes renováveis e insumos, alteração de hábitos de consumo, mudanças do sistema de produção, investimento em Pesquisa e Desenvolvimento (P&D), entre outros. Atualmente não existe uma “bala de prata” que irá atender a todos os desafios, em todas as regiões e escalas, com a mesma magnitude.

Soluções genéricas, que não levam em consideração as especificidades e necessidades geográficas e regionais, não serão capazes de gerar resultados satisfatórios de longo prazo e, potencialmente podem comprometer outros desafios. Muitos estudos têm tido foco em soluções globais ou amplas, como fontes renováveis, bioenergia em escala, *Nature Based Solutions* (NBS), hidrogênio, eletrificação dos veículos, precificação global de carbono etc.

Contudo, soluções tecnológicas localmente consideradas podem ser mais adequadas, principalmente dadas as especificidades das condições de oferta e demanda locais e regionais, que podem trazer vantagens comparativas ao desenvolvimento. Por outro lado, a adoção de algumas soluções pode não ser adequada ou facilmente escalável a outros contextos geográficos. Fica, portanto, como recomendação a busca de viabilidade de sistemas parecidos (que não precisem de áreas adicionais) em outros contextos regionais.

O Brasil possui alternativas que podem otimizar a produção de energia renovável, fortalecendo sua economia, gerando emprego e, ao mesmo tempo, atingir os compromissos internacionais como o Acordo de Paris. A produção de etanol de milho segunda safra como é feito no Brasil pode ser vista como complementar e contribuir com as ações de expansão da

produção de biocombustíveis propostas na NDC brasileira, associada à mitigação de GEE e transição energética.

O país conta com a vantagem de um ambiente tropical, que possibilita a partir dos avanços em tecnologia, o plantio de soja de ciclo curto e milho de segunda safra, na mesma área, servindo de possível referência para regiões com condições agroclimáticas semelhantes. Em linhas gerais, o Brasil dispõe de um sistema de produção alinhado com a descarbonização e transição energética, que apoiará o desenvolvimento da produção de grãos e biocombustível globalmente. Dessa forma, recomenda-se a utilização do etanol de milho segunda safra como suplemento aos combustíveis já existentes, para ampliar a diversificação de fontes de energia.

Por fim, vale ressaltar que este estudo avança a fronteira do conhecimento quanto ao tema tratado, mas não deve ser avaliado de forma isolada para qualquer tomada de decisão. Estas análises dos impactos socioeconômicos e ambientais podem auxiliar e embasar estudos futuros com maior amplitude, direcionados para outras ações práticas e estudos de caso.

As análises elaboradas a partir desta tese buscaram abordar os principais fatores que determinam a sustentabilidade do etanol de milho brasileiro. Sobre esses fatores, conclui-se que a produção de etanol de milho, como é praticada no Brasil, está alinhada a resultados positivos. Contudo, outras dimensões da sustentabilidade social, ambiental e econômica devem ser analisadas em estudos futuros para ampliar e aprofundar a compreensão.

Para complementar a análise socioeconômica, sugere-se para trabalho futuros, a utilização da modelagem de equilíbrio geral, capaz de responder a preços, com o objetivo de analisar outras variáveis econômicas, não avaliadas neste estudo. O setor etanol de milho no Mato Grosso expandiu rapidamente nos últimos anos, por isso choques maiores podem ser aplicados. A análise realizada neste estudo ficou bem abaixo da produção praticada nos dias de hoje, que já alcançou uma produção de 4 bilhões de litros na safra 22/23. Sugere-se, para próximos estudos, atualizar e reavaliar esses impactos todos a luz do crescimento do setor e por conta das circunstâncias da estrutura produtiva.

Como possibilidade futura, avaliar os impactos socioeconômicos e ambientais da introdução de um setor produtor de etanol de milho em outras regiões, como Mato Grosso do Sul, Goiás, Paraná e São Paulo (*flex e full*) assumindo uma produção nacional entre 8 e 11 bilhões de litros, somado os coprodutos, em 2032. Com isso, as importações de etanol podem ser zeradas ou eliminar a importação de gasolina, de tal modo que o *mix* dos carros *flex* passassem a consumir mais etanol hidratado e menos gasolina.

Em relação ao *DDGS*, estudos futuros podem quantificar de forma mais precisa o deslocamento e substituição da ração convencional ao introduzir *DDGS* no mercado, buscando

identificar se a maior oferta de ração gera uma intensificação da pecuária e maior consumo de ração em outros setores (suínos, aves e peixes). Atualmente, devido ao avanço do setor etanol de milho no Brasil, existem mais informações disponíveis, que exigem um fechamento diferente do modelo utilizado e provavelmente as respostas não seriam iguais aquelas avaliadas neste estudo.

Assim como sugerido para a análise socioeconômica, existe também a necessidade de novos estudos que busquem avaliar os impactos de mudança do uso da terra (induzidos e diretos) a partir da introdução de maiores volumes de etanol de milho no Brasil e, especificamente avaliar a transição entre pastagem extensiva e média tecnologia, que está associada a uma melhoria da qualidade da pastagem, com aumento de COS (Carbono Orgânico do Solo, do inglês, *Soil Organic Carbon - SOC*), mas que não foi considerado neste estudo.

Dessa forma, as estratégias devem ser analisadas regionalmente e de acordo com as especificidades locais, buscando o sistema que melhor se adequa e adapta às condições. Para isso, políticas públicas devem ser direcionadas, buscando dar acesso e incentivar o desenvolvimento e investimento nesses sistemas sustentáveis, a partir da prática, por exemplo, de menores taxas de financiamento para projetos sustentáveis, como emitido pelo Banco Nacional do Desenvolvimento (BNDES), através das letras financeiras verdes, em 2020.

Adicionalmente, é necessário avançar na construção de uma legislação que tenha como base o princípio do desenvolvimento sustentável. Além de uma agenda de caráter institucional e legislativo, se faz necessário internalizar na gestão pública brasileira mecanismos econômicos como instrumentos complementares à gestão de comando-controle. De forma geral, deve-se articular planos em âmbito nacional, tendo como base o território e a visão de sustentabilidade no longo prazo.

Referências

- ABRAF. (2013). *Anuário estatístico da ABRAF: ano base 2012*. Fonte: Biblioteca Florestal Digital: <http://www.bibliotecaflorestal.ufv.br/handle/123456789/3910>
- AHLGREN, S., & LUCIA, D. (2014). *Indirect Land Use Changes of Biofuel Production: A Review of Modeling Efforts and Policy Developments in the European Union*. *Biotechnology for biofuels*, v. 7, n. 1, p. 35.
- AHMED et al. . (2021). Systematic review on effects of bioenergy from edible versus inedible feedstocks on food security. *npj Sci Food* 5, 9.
- ALKIMIM et al. (2015). Converting Brazil's pastures to cropland: An alternative way to meet sugarcane demand and to spare forestlands. *Applied Geography*, v.6, 75-84.
- ALLEE et al. (2021). Cross-national analysis of food security drivers : comparing results based on the Food Insecurity Experience Scale and Global Food Security Index. *Springer*.
- ANP. (2017). *Lei nº 13.576, Política Nacional de Biocombustíveis (RenovaBio) e dá outras providências*. Fonte: Legislação do RenovaBio: <http://legislacao.anp.gov.br/?path=legislacao-federal/leis/2017&item=lei-13.576--2017>
- ANP. (2018). *Oil, Natural Gas and Biofuels Statistical Yearbook*. Agência Nacional do Petróleo Gás Natural e Biocombustíveis.
- ANP. (February de 2020). *Consulta Pública de Proposta de Certificação RenovaBio*. Fonte: Agência Nacional do Petróleo, Gás Natural e Biocombustíveis: <http://www.anp.gov.br/producao-de-biocombustiveis/renovabio/consulta-publica-certificacao-producao>
- ANP. (18 de agosto de 2020). *Informações de mercado*. Fonte: Agência Nacional do Petróleo, Gás Natural e Biocombustíveis: <http://www.anp.gov.br/producao-de-biocombustiveis/etanol/informacoes-mercado-etanol>
- ANP. (20 de 7 de 2021). *DESPACHO ANP Nº 790, DE 20 DE JULHO DE 2021*. Fonte: Diário Oficial da União: <https://www.in.gov.br/en/web/dou/-/despacho-anp-n-790-de-20-de-julho-de-2021-333292763>
- ANP. (23 de 3 de 2022). *DESPACHO ANP Nº 374, DE 23 DE MARÇO DE 2022*. Fonte: Diário Oficial da União: <https://in.gov.br/en/web/dou/-/despacho-anp-n-374-de-23-de-marco-de-2022-388013843>
- ANP. (25 de maio de 2023). *Relatório Dinâmico de Autorizações*. Fonte: Produtores de etanol: <https://app.powerbi.com/view?r=eyJrIjoiZWZDI4YjEtOTliMi00NDY5LWJjZDktMTA0MTEzOGYzOGJlIiwidCI6IjQ0OTlmNGZmLTl0YTltNGI0Mi1iN2VmLTExNGFmY2FkYzIxMyJ9&pageName=ReportSection>
- ANP. (maio de 2023). *RenovaBio*. Fonte: Agência Nacional do Petróleo, Gás Natural e Biocombustíveis: <http://www.anp.gov.br/producao-de-biocombustiveis/renovabio>

- ARANTES, S. (2018). *Avaliação dos impactos socioeconômicos da intensificação e da integração da produção pecuária ao setor sucroenergético no estado de São Paulo*. Campinas: Dissertação Mestrado, UNICAMP.
- B3. (18 de agosto de 2020). *Renda Fixa*. Fonte: Brasil, Bolsa, Balcão: http://www.b3.com.br/pt_br/market-data-e-indices/servicos-de-dados/market-data/historico/renda-fixa/
- B3. (2023). *Renda fixa - Dados por ativo*. Fonte: CBIO - Crédito de descarbonização: http://www.b3.com.br/pt_br/market-data-e-indices/servicos-de-dados/market-data/historico/renda-fixa/
- BALDOS et al. (2014). Global food security in 2050: the role of agricultural productivity and climate change. *Australian Journal of Agricultural and Resource Economics*, pp. 554-570.
- BANCO CENTRAL. (2017). *FOCUS - Relatório de Mercado*. Fonte: Banco Central do Brasil: <https://www.bcb.gov.br/publicacoes/focus>
- BANCO MUNDIAL. (2017a). *Population, total*. Fonte: The World Bank data: <https://data.worldbank.org/indicador/SP.POP.TOTL>
- BANCO MUNDIAL. (2017b). *GDP growth (annual %)*. Fonte: The World Bank data: <https://data.worldbank.org/indicador/NY.GDP.MKTP.KD.ZG>
- BANCO MUNDIAL. (2017c). *Inflation, GDP deflator (annual %) - United States*. Fonte: The World Bank data: <https://data.worldbank.org/indicador/NY.GDP.DEFL.KD.ZG?locations=US>
- BERNDES et al. (2016). Bioenergy feedstock production on grasslands and pastures: Brazilian experiences and global outlook. *IEA Bioenergy*, 38.
- BOTHAST et al. (2005). Biotechnological processes for conversion of corn into ethanol. *Appl. Microbiol. Biotechnol*, 67, 19-25.
- BRANDÃO et al. (2021). The modelling approach determines the carbon footprint of biofuels: The role of LCA in informing decision makers in government and industry. *Cleaner Environmental Systems*, pp. 1-8.
- BRANDÃO et al. (2022). On quantifying sources of uncertainty in the carbon footprint of biofuels: crop/feedstock, LCA modelling approach, land-use change, and GHG metrics. *Biofuel Research Journal* 34, pp. 1608-1616.
- BRASIL. (2009). *Decreto nº 6.961, de 17 de setembro de 2009. Aprova o zoneamento agroecológico da cana-de-açúcar e determina ao Conselho Monetário Nacional o estabelecimento de normas para as operações de financiamento ao setor sucroalcooleiro, nos termos do zoneamentos*.
- BRASIL. (2010). *Decreto nº 7.172, de 7 de maio de 2010. Aprova o zoneamento agroecológico da cultura da palma de óleo e dispõe sobre o estabelecimento pelo Conselho Monetário Nacional de normas referentes às operações de financiamento ao segmento da palma de óleo, nos te.*
- BRASIL. (2012). *Lei nº 12.727, de 17 de outubro de 2012. Altera a Lei no 12.651, de 25 de maio de 2012, que dispõe sobre a proteção da vegetação nativa e dá outras providências.*

- BRASIL. (2015). *Pretendida Contribuição Nacionalmente Determinada para consecução do objetivo da Convenção-Quadro das Nações Unidas sobre Mudança do Clima*. Acesso em 14 de junho de 2016, disponível em [www.itamaraty.gov.br: http://www.itamaraty.gov.br/images/ed_desenvsust/BRASIL-iNDC-portugues.pdf](http://www.itamaraty.gov.br:www.itamaraty.gov.br/images/ed_desenvsust/BRASIL-iNDC-portugues.pdf)
- BRASIL. (2016a). *Fundamentos para a elaboração da Pretendida Contribuição Nacionalmente Determinada (iNDC) do Brasil no contexto do Acordo de Paris sob a UNFCCC*. Brasília.
- BRASIL. (2016b). *Implicações Econômicas e Sociais de Cenários de Mitigação de Gases de Efeito Estufa no Brasil até 2030*. Rio de Janeiro: Projeto IES-Brasil, Fórum Brasileiro de Mudanças Climáticas (FBMC).
- BRASIL. (2020). *Brazil's Nationally Determined Contribution (NDC)*. Fonte: https://www.gov.br/mre/pt-br/canais_atendimento/imprensa/notas-a-imprensa/2020/apresentacao-da-contribuicao-nacionalmente-determinada-do-brasil-perante-o-acordo-de-paris
- BRASIL. (30 de maio de 2022). *CONTRIBUIÇÃO NACIONALMENTE DETERMINADA - NDC*. Fonte: Acordo de Paris - Contribuição Nacionalmente Determinada (NDC): <https://www.gov.br/casacivil/pt-br/assuntos/comite-interministerial-sobre-mudanca-do-clima/arquivos-cimv/item-de-pauta-3-paris-agreement-brazil-ndc-final-1.pdf/view>
- BRASIL. (25 de 4 de 2023). *DECRETO Nº 11.499, DE 25 DE ABRIL DE 2023*. Fonte: Presidência da República: <https://www.gov.br/planalto/pt-br/acompanhe-o-planalto/noticias/2023/04/governo-retoma-o-renovabio-com-mudancas-para-fortalecer-o-programa>
- BRINKMAN et al. (2018). Interregional assessment of socio-economic effects of sugarcane ethanol. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 347–362.
- BROWN & LE FEUVRE. (2017). Technology Roadmap: Delivering Sustainable Bioenergy. *International Energy Agency (IEA)*, 94.
- BUSTAMANTE et al. (2015). *Terceiro Inventário Brasileiro de Emissões E Remoções Antrópicas de Gases de Efeito Estufa- Emissões no Setor uso da Terra, Mudança do uso da Terra e Florestas*. MCTI.
- CAFIERO, C. (2016). *Methods for estimating comparable prevalence rates of food insecurity experienced by adults throughout the world*. Rome: Food and Agriculture Organization of the United Nations.
- CARB. (2020). *California Air Resources Board*. Fonte: Low Carbon Fuel Standard: <https://ww2.arb.ca.gov/our-work/programs/low-carbon-fuel-standard>
- CARB. (2020b). *California Air Resources Board*. Fonte: LCFS Regulation: <https://ww2.arb.ca.gov/our-work/programs/low-carbon-fuel-standard/lcfs-regulation>
- CARRIQUIRY et al. (2019). *Incorporating sub-national Brazilian agricultural production and land-use into US biofuel policy evaluation*. Appl. Econ. Perspect. Policy.

- CARVALHO et al. (2020). How likely is Brazil to achieve its NDC commitments in the energy sector? A review on Brazilian low-carbon energy perspectives. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 13.
- CASPETA et al. (2013). The role of biofuels in the future energy supply. *Energy Environ. Sci*, 1077-1082.
- CASTANHEIRA et al. (2013). *Greenhouse gas assessment of soybean production: Implications of land use change and diferente cultivation systems*. *Journal of Cleaner Production*, 54, 49–60.
- CAVALETT et al. (2013). Comparative LCA of ethanol versus gasoline in Brazil using different LCIA methods. *International Journal of Life Cycle Assessment*, v. 18, n. 3, 647-658.
- CHADDAD, F;. (2016). *The Economics and Organization of Brazilian Agriculture*. Academic Press.
- CHIAVARI et al. (2017). *Forest and land use policies on private lands: an international comparison*. Climate Policy.
- CHUM et al. (2014). Understanding the evolution of environmental and energy performance of the US corn ethanol industry: evaluation of selected metrics. *Biofuels Bioprod. Biorefin*, 8, 224-240.
- COMEX STAT. (maio de 2021). *Ministério da Indústria, Comércio Exterior e Serviços*. Fonte: <http://comexstat.mdic.gov.br/pt/home>
- CONAB. (2018). A Cultura do Milho: Nos Anos-Safra 2007 a 2017: Companhia Nacional de Abastecimento. *Companhia Nacional de Abastecimento, Vol.12*.
- CONAB. (2020a). *Acompanhamento da safra brasileira de cana-de-açúcar. V.7 - SAFRA 2020/21 - N.2 - Segundo levantamento*. Brasília: CONAB.
- CONAB. (2020c). *Acompanhamento da safra brasileira: grãos. V. 7 - SAFRA 2019/20 - N. 11 - Décimo primeiro levantamento*. Brasília: CONAB.
- CONAB. (2023). *Serie histórica das safras*. Fonte: Companhia Nacional de Abastecimento: <https://www.conab.gov.br/info-agro/safras/serie-historica-das-safras/itemlist/category/893-cana-de-acucar-industria>
- CORTEZ et al. (2023). *The future role of biofuels in the new energy transition*. São Paulo: Editora Edgard Blücher Ltda.
- CRUZ et al. (2012). A evolução da produção de etanol no Brasil, no período de 1975 a 2009. Em *Documento técnico-científico*, vol. 43, n.4 (pp. 141-159).
- CUNHA, M. P. (2011). *Avaliação de impactos e indicadores socioeconômicos e ambientais de rota de produção de biodiesel no Brasil, baseada em análise insumo-produto*. Campinas: Tese Doutorado, UNICAMP.
- DAUVERGNE. (2010). Forests, food, and fuel in the tropics: the uneven social and ecological consequences of the emerging political economy of biofuels. *The Journal of Peasant Studies*, Vol. 37, No. 4, pp. 631–660.
- DONKE et al. (2017). Environmental and energy performance of ethanol production from the integration of sugarcane, corn, and grain sorghum in a multipurpose plant. *Resources*, 6.

- DUFFIELD et al. (2015). *US Ethanol: An Examination of Policy, Production, Use, Distribution, and Market Interactions*. US Department of Agriculture.
- EC. (2019). *EU agricultural outlook for markets and income, 2019-2030*. Brussels: European Commission, DG Agriculture and Rural Development.
- ECKERT et al. (2018). Maize ethanol production in Brazil: characteristics and perspectives. *Renew. Sustain. Energy Rev*, 3907-3912.
- ECOFYS, I. a. (2016). *ILUC Quantification Study of EU Biofuels*. Fonte: GLOBIOM: <http://www.globiom-iluc.eu/>
- EEA. (2020). *European Environment Agency*. Fonte: Still insufficient progress in making transport fuels more climate friendly, latest EEA data show: <https://www.eea.europa.eu/highlights/still-insufficient-progress-in-making>
- EGESKOG et al. (2014). Greenhouse gas balances and land use changes associated with the planned expansion (to 2020) of the sugarcane ethanol industry in Sao Paulo, Brazil. *Biomass and Bioenergy*, v.63, 280-290.
- EIA. (2019). *International Energy Outlook 2019 with projections to 2050*.
- EIA. (2020). *Biofuels explained*. Fonte: Data & Statistics: <https://www.eia.gov/energyexplained/biofuels/data-and-statistics.php>
- EIU. (2019). *The global food security index 2019: Strengthening foodsystems and the environment through innovation and investment*. Fonte: Economist Intelligence Unit: <https://impact.economist.com/sustainability/project/food-security-index/>
- ELBEHRI et al. (2013). *Biofuels and the sustainability challenge: A global assessment of sustainability issues, trends and policies for biofuels and related feedstocks*. Rome: FAO.
- EMBRAPA. (17 de fevereiro de 2020). *Agência Brasileira de Informação Tecnológica*. Fonte: Ageitec: <https://www.agencia.cnptia.embrapa.br/gestor/milho/arvore/CONT000fy779fnk02wx5ok0pvo4k3s932q7k.html>
- EPA. (2023). *Renewable Fuel Standard Program*. Fonte: United States Environmental Protection Agency: <https://www.epa.gov/renewable-fuel-standard-program>
- EPE. (2017). *Balanço Energético Nacional*. Empresa de Pesquisa Energética.
- EPE. (2017). *Plano Decenal de Expansão de Energia 2026*. Ministério de Minas e Energia, Empresa de Pesquisa Energética.
- EPE. (Dezembro de 2019). *Cenários de oferta de etanol e demanda de ciclo otto 2020-2030*. Fonte: Empresa de Pesquisa Energética: http://epe.gov.br/sites-pt/publicacoes-dados-abertos/publicacoes/PublicacoesArquivos/publicacao-255/topico-503/EPE_DPG_SDB_Bios_NT_02_2019_r0_Cenarios_de_Oferta_de_Etanol.pdf
- EPE. (2019a). *Empresa de Pesquisa Energética*. Fonte: Demanda de Energia dos veículos leves: 2020-2030: <http://www.epe.gov.br/sites-pt/publicacoes-dados->

abertos/publicacoes/PublicacoesArquivos/publicacao-331/topico-505/Demanda_Ve%C3%ADculos_Leves_2020_2030.pdf>.

- EPE. (2020). *Plano Decenal de Expansão de Energia 2029*. Ministério de Minas e Energia.
- EPE. (2020b). *Empresa de Pesquisa Energética*. Fonte: Balanço Energético Nacional 2020: Relatório síntese, ano base 2019: <https://www.epe.gov.br/pt/publicacoes-dados-abertos/publicacoes/balanco-energetico-nacional-2020>
- EPE. (2021). *Cenários de oferta de etanol e demanda de ciclo otto 2022-2031*. Rio de Janeiro.
- EPE. (2021b). *Análise de conjuntura dos biocombustíveis - ano 2020*. Brasília: MME.
- EPE. (2022). *Balanço Energético Nacional - BEN*. Empresa de Pesquisa Energética.
- EPE. (2022). *Plano Decenal de Expansão de Energia 2032*. Fonte: Empresa de Pesquisa Energética: https://www.epe.gov.br/sites-pt/publicacoes-dados-abertos/publicacoes/PublicacoesArquivos/publicacao-689/topico-640/PDE%202032%20-%20Oferta%20de%20Biocombustiveis_27dez2022_envio.pdf
- EPE. (2022b). *Cenários de oferta de etanol e demanda de ciclo otto 2023-2032*. Fonte: Empresa de Pesquisa Energética: https://www.epe.gov.br/sites-pt/publicacoes-dados-abertos/publicacoes/PublicacoesArquivos/publicacao-255/topico-653/NT-EPE-DPG-SDB-2022-06_Cenarios_de_oferta_de_etanol_2032.pdf
- FAO. (2017). *Chapter 9. Biofuels*. Fonte: OECD-FAO AGRICULTURAL OUTLOOK 2018-2027 © OECD/FAO 2018: http://www.fao.org/3/i9166e/i9166e_Chapter9_Biofuels.pdf
- FAO. (2022). *Literature Review of the Linkages Between Bioenergy and Nutrition*.
- FARGIONE et al. (2008). Land clearing and the biofuel carbon debt. *Science*, 319, 1235-1238.
- FEARNSIDE. (2017). Deforestation of the Brazilian Amazon. *Oxford Research Encyclopedia of Environmental Science*.
- FERREIRA FILHO et al. (2015). Deforestation Control and Agricultural Supply in Brazil. *American Journal of Agricultural Economics*, 97 (2), pp. 589-601.
- FEYEREISEN et al. (2013). Cellulosic biofuel potential of a winter rye double crop across the US corn-soybean belt. *Agron. J*, 105, 631-642.
- FGVces. (2017). Soluções baseadas na Natureza. *P 22 ON*, 23.
- FILIP et al. (2019). *Food versus fuel: An updated and expanded evidence*. Energy Economics.
- FIORINI et al. (2023). Sustainable Aviation Fuels must control induced land use change: an integrated assessment modelling exercise for Brazil. *Environ. Res. Lett.* 18 014036.
- FLEGG et al. (2016). Evaluating the FLQ and AFLQ formulae for estimating regional input coefficients: empirical evidence for the province of Córdoba, Argentina. *Economic Systems Research*. v. 18, n. 1, 21-37.

- FMI. (2017). *Primary Commodity Price System*. Fonte: IMF Data Access to Macroeconomic & Financial data : <https://data.imf.org/?sk=471dddf8-d8a7-499a-81ba-5b332c01f8b9>
- FORBES. (2023). *Um dos maiores produtores de etanol de milho do país quer triplicar e chegar a 5 bilhões de litros*. Fonte: Forbes Agro: <https://forbes.com.br/forbesagro/2023/03/maior-produtor-de-etanol-de-milho-do-pais-quer-ir-a-5-bilhoes-de-litros/>
- FS . (2017). *Fueling Sustainability*. Fonte: Inaugura 1a Indústria Brasileira de Etanol e Coprodutos 100% a Partir do Milho.
- FS. (15 de julho de 2018). Dados primários da indústria. (F. Sustainability, Entrevistador)
- FS. (31 de maio de 2022). *Relatório Anual de sustentabilidade*. Fonte: Fueling Sustainability: <https://www.fs.agr.br/sustentabilidade/relatorios-de-sustentabilidade/>
- FS. (2022). *Relatório de Sustentabilidade 21/22*.
- FS. (2023). *Fueling Sustainability* . Fonte: <https://www.fs.agr.br/>
- FULTON et al. (2015). The need for biofuels as part of a low carbon energy future. *Biofuel. Bioprod. Biorefin*, 9, 476-483.
- GANDOUR et al. (2013). DETERRing Deforestation in the Amazon: Environmental Monitoring and Law Enforcement. *Climate Policy Initiative*, 48.
- GILIO et al. (2016). Sugarcane industry's socioeconomic impact in São Paulo, Brazil: A spatial dynamic panel approach. *Energy Economics*, 27–37.
- GODFRAY et al. (2010). *Food security: The challenge of feeding 9 billion people*. Science.
- GOLDEMBERG. (2007). Ethanol for a sustainable energy future. *Science*, v. 315, 808-810.
- GOLDEMBERG et al. (2008). The sustainability of ethanol production from sugarcane. *Energy Policy*, v. 36, n. 6, 2086-2097.
- GONÇALVES et al. (2023). Strategies to Ensure Fuel Security in Brazil Considering a Forecast of Ethanol Production. *Biomass*, pp. 1-17.
- GRASSI et al. (2019). Energy-cane and RenovaBio: Brazilian vectors to boost the development of Biofuels. *Ind. Crops Prod*, 129, 201-205.
- GREET. (2016). GREET Model. *Argonne National Laboratory*.
- GRISCOM et al. (2017). Natural Climate Solutions. *PNAS*, vol. 114, nº44.
- GROTTERA et al. (2022). Energy policy implications of carbon pricing scenarios for the Brazilian NDC implementation. *Energy Policy*.
- GUILHOTO et al. (2010). Matriz de Insumo-Produto do Nordeste e Estados: Metodologia e Resultados. *Fortaleza: Banco do Nordeste do Brasil*. 289.
- GUILHOTO et al. (2017). *Construção da Matriz Inter-Regional de Insumo-Produto para o Brasil: Uma Aplicação do Tupi*. São Paulo: Working Paper TD NEREUS, Univ. of São Paulo.

- GUILHOTO, J. M. (2011). *Análise de insumo-produto: Teoria, fundamentos e aplicações*. São Paulo: Departamento de Economia. FEA - USP.
- GUILHOTO, J., & SESSO FILHO, U. (2005). Estimação da Matriz Insumo-Produto a Partir de Dados Preliminares das Contas Nacionais. *Economia Aplicada*. Vol. 9. n. 2. Abril-Junho., 277-299.
- GUILHOTO, J., & SESSO FILHO, U. (2010). Estimação da Matriz Insumo-Produto Utilizando Dados Preliminares das Contas Nacionais: Aplicação e Análise de Indicadores Econômicos para o Brasil em 2005. *Economia & Tecnologia. UFPR/TECPAR*. Ano 6, Vol 23, Out./Dez.
- HADDAD et al. (2016). Interregional Input-Output Matriz for Colombia. *Borradores de Economia*, n. 923, Banco de La Republica, Bogotá.
- HADDAD et al. (2017). Matriz Interestadual De Insumo-Produto Para, O. Brasil: uma aplicação do método IIOAS. *Rev. Bras. Estud. Reg. Urbanos*, 11, pp. 424-446.
- HAMELINCK. (2013). *Biofuels and food security*. Ecofys.
- HANUSCH et al. (2022). An Economic Memorandum for Brazil's Amazônia. *ongoing publication*.
- HARFUCH et al. . (2016). Modelling Beef and Dairy Sectors' Productivities and their Effects on Land Use Change in Brazil. <https://www.revistasober.org/article/doi/10.1590/1234.56781806-947900540205>, resr, vol.54, n2, p.281-304.
- HARFUCH et al. (2016). *Intensificação da pecuária como peça chave para a expansão sustentável da produção agropecuária no brasil*. São Paulo: Agroicone, INPUT.
- HARFUCH et al. (2017). Empirical Findings from Agricultural Expansion and Land Use Change in Brazil. Em M. Z. Khanna, *Handbook of Bioenergy Economics and Policy: Volume II* . New York, NY: Natural Resource Management and Policy, vol 40. Springer.
- HARFUCH et al. (2017). Modeling Land Use and Greenhouse Gas Implications. Em M. S. Khanna, *Handbook of Bioenergy Economics and Policy Vol. 2* (pp. 273-302). Springer.
- HASEGAWA et al. (2015). Consequence of Climate Mitigation on the Risk of Hunger. *Environ. Sci. Technol.*, pp. 7245–7253.
- HENRY et al. (2018). Food supply and bioenergy production within the global cropland planetary boundary. *PLoS ONE* 13(3):e0194695.
- HOFFMAN et al. . (2011). *Estimating the Substitution of Distillers' Grains for Corn and Soybean Meal in the US Feed Complex*. US Department of Agriculture.
- IBGE. (2011). *Matriz de Insumo-Produto, Tabela Recursos e Usos*. IBGE - Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística.
- IBGE. (2017a). *SCNT - Sistema de Contas Nacionais Trimestrais*. Fonte: Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística: https://www.ibge.gov.br/estatisticas/economicas/contas-nacionais/9300-contas-nacionais-trimestrais.html?=&t=series-historicas&utm_source=landing&utm_medium=explica&utm_campaign=pib#evolucao-taxa
- IBGE. (2017b). *Sistema IBGE de Recuperação Automática - SIDRA*. Fonte: Estimativas de População - Tabela 6579 - População residente estimada: <https://sidra.ibge.gov.br/tabela/6579>

- ICAO. (2020). *ICAO Environment*. Fonte: CORSIA Implementation: <https://www.icao.int/environmental-protection/CORSIA/Pages/default.aspx>
- ICONE. (2013). *Modelo de Uso da Terra para a Agricultura Brasileira (Brazilian Land Use Model) – BLUM*. Instituto de Estudos do Comércio e Negociações Internacionais.
- IEA. (2017). *Technology Roadmap: Delivering Sustainable Bioenergy*. Fonte: International Energy Agency and IEA Bioenergy TCP: http://www.iea.org/publications/freepublications/publication/Technology_Roadmap_Delivering_Sustainable_Bioenergy.pdf.
- IEA. (2019). *World Energy Outlook 2019*. Fonte: <https://www.iea.org/reports/world-energy-outlook-2019>
- IEA. (2020). *World Energy Outlook 2020*.
- IEA. (2022). *World Energy Outlook*. Fonte: <https://iea.blob.core.windows.net/assets/830fe099-5530-48f2-a7c1-11f35d510983/WorldEnergyOutlook2022.pdf>
- IMEA. (2015). *Entendendo o Mercado do Milho*. Instituto Matogrossense de Economia Agropecuária - IMEA.
- IMEA. (2017). *Clusters de Etanol de Milho em Mato Grosso*. IMEA - Instituto Matogrossense de Economia Agropecuária.
- IMEA. (2023). *Relatório Mensal de Mercado do etanol*. Mato Grosso.
- INPASA. (2023). *INPASA*. Fonte: Notícias: <https://www.inpasa.com.br/#>
- INPE. (2023). *PRODES Amazônia - Monitoramento do Desmatamento da Floresta Amazônica Brasileira por Satélite*. Fonte: <http://www.obt.inpe.br/OBT/assuntos/programas/amazonia/prodes>
- INPE. (2023b). *Monitoramento do Desmatamento no Cerrado Brasileiro por Satélite*. Fonte: <http://cerrado.obt.inpe.br/>
- IPCC. (2006). *Guidelines for national greenhouse gas inventories*. Geneva: Intergovernmental Panel on Climate Change.
- IPCC. (2018). *Mitigation Pathways Compatible with 1.5°C in the context of Sustainable Development*. An IPCC Special Report on the impacts of global warming of 1.5°C above pre-industrial levels and related global greenhouse gas emission pathways.
- IPCC. (2022). *Climate Change 2022 - Impacts, Adaptation and Vulnerability - Summary For Policymakers*. IPCC_AR6_WGII.
- IPCC. (2022). *Summary for Policymakers. Climate Change 2022. Working Group II - Impacts, Adaptation and Vulnerability*.
- IPCC. (2022). *Summary for Policymakers. In: Climate Change 2022: Mitigation of Climate Change. Contribution of Working Group III to the Sixth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change*. Cambridge University Press, Cambridge, UK and New York, NY, USA.

- IPCC. (2022). *Summary for Policymakers. In: Climate Change 2023: Synthesis Report*. A Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change. Contribution of Working Groups I, II and III to the Sixth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change.
- IPEA. (2016). *Quarenta anos de etanol em larga escala no Brasil : desafios, crises e perspectivas*. Brasília .
- IPEA. (2017). *Taxa de câmbio comercial para compra: real (R\$) / dólar americano (US\$) - média*.
Fonte: IPEA data: <http://www.ipeadata.gov.br/ExibeSerie.aspx?serid=38590&module=M>
- IRENA. (2017). *Renewable Energy Statistics*. Abu Dhabi: International Renewable Energy Agency.
- IRENA. (2020). *Reaching zero with renewables: Eliminating CO2 emissions from industry and transport in line with the 1.5°C climate goal*.
- IRENA. (2020b). *Global Renewables Outlook: Energy transformation 2050*. International Renewable Energy Agency.
- IRENA. (2021). *Reaching Zero with Renewables: Biojet fuels*. Fonte: International Renewable Energy Agency:
https://www.irena.org/-/media/Files/IRENA/Agency/Publication/2021/Jul/IRENA_Reaching_Zero_Biojet_Fuels_2021.pdf
- ISARD et al. (1998). *Methods of Regional and Inter-regional Analysis*. Aldershot: Ashgate Publishing.
- ISARD, W. (1951). Inter-regional and regional input-output analysis: a model of a space- economy. *The Review of Economics and Statistics, Cambridge*, v. 33, n.4, 319-328.
- ISO. (2006a). *ISO 14040: Environmental Management—Life Cycle Assessment—Principles and Framework*.
- ISO. (2006b). *ISO 14044: Environmental Management—Life Cycle Assessment—Requirements and Guidelines*.
- ISO. (2013). *14067:2013. Greenhouse Gases—Carbon Footprint of Products—Requirements Quantification and Communication*. Geneva, Switzerland: 1st ed.; ISO Central Secretariat.
- IZRAELOV et al. (2019). An assessment of the global food security index. *Food Security*, 11, 1135-1152.
- JUDIT et al. (December de 2017). The role of biofuels in food commodity prices volatility and land use. *Journal of Competitiveness, Vol. 9, Issue 4*, pp. 81-93.
- KLINE et al. (2017). Reconciling food security and bioenergy: priorities for action. *GCB Bioenergy*, 557-576.
- LABORDE, D. (2011). *Assessing the Land Use Change Consequences of European Biofuel Policies*. International Food Policy Research Institute.
- LANE, J. (2018). *Biofuels Mandates Around the World 2018*. Fonte: <https://www.biofuelsdigest.com/bdigest/2018/01/01/biofuels-mandates-around-the-world-2018/39/>

- LAPOLA et al. (2010). Indirect land-use changes can overcome carbon savings from biofuels in Brazil. *PNAS*, V. 107, n.8, 3388-3393.
- LARK et al. (2022). Environmental outcomes of the US Renewable Fuel Standard . *PNAS*, pp. 1-8.
- LCFS. (18 de agosto de 2020). *California Air Resources Board*. Fonte: Monthly LCFS Credit Transfer Activity Reports: <https://ww3.arb.ca.gov/fuels/lcfs/credit/lrtmonthlycreditreports.htm>
- LEAL et al. (2010). Sustainability of the production of ethanol from sugarcane: The Brazilian experience. *International Sugar Journal*, v.112, 390-396.
- LEONTIEF et al. (1953). Studies in the Structure of the American Economy. *White Plains, NY: International Arts and Science Press* . LEONTIEF, W. (1951). The structure of the american economy. 2. ed. ampl. *New York: Oxford University*.
- LEONTIEF, W. (1986). Input-Output Economics. *Oxford University Press. 2nd Edition, New York*.
- LEONTIEF, W. (1987). Input-Output Analysis. Em M. M. J., *The New Palgrave. A Dictionary of Economics*, vol. 2 (pp. 64-860).
- LEONTIEF, W., & DUCHIN, F. (1986). The future of automation workers. *New York: Oxford*.
- LYND et al. (2015). Bioenergy and African transformation. *Biotechnol. Biofuels*, 8, 18.
- MACEDO et al. (2008). Green house gases emissions in the production and use of ethanol from sugarcane in Brazil: The 2005/2006 averages and a prediction for 2020. *Biomass and Bioenergy*, v. 32, n. 7, 582-595.
- MACHADO et al. (2015). The use of socioeconomic indicators to assess the impacts of sugarcane production in Brazil. *Renewable and Sustainable Energy Reviews* 52, 1519–1526.
- MAGALHÃES et al. . (2020). *Desenvolvimento do milho segunda safra: fatores genético-fisiológicos, plataforma de conhecimento e práticas de manejo de cultivo e uso, visando sustentabilidade de produção e produtividade no binômio soja/milho*. Sete Lagoas, MG: Embrapa Milho e Sorgo.
- MANO et al. (11 de agosto de 2017). *Brazil launches first corn-only ethanol plant, hope for more*. Fonte: Reuters: <https://www.reuters.com/article/us-brazil-ethanol/brazil-launches-first-corn-only-ethanol-plant-hopes-for-more-idUSKBN1AR2AU>
- MANOCHIO et al. (2017). Ethanol from biomass: a comparative overview. *Renew. Sustain. Energy Rev.* 80, 743-755.
- MARTÍNEZ et al. (2013). Analysis of socio-economic impacts of sustainable sugarcane–ethanol production by means of inter-regional Input–Output analysis: Demonstrated for Northeast Brazil. *Renewable and Sustainable Energy Reviews* 28, 290–316.
- MATSUURA et al. (2018). *RenovaCalcMD: Método e ferramenta para a contabilidade da Intensidade de Carbono de Biocombustíveis no Programa RenovaBio*. Fonte: NOTA TÉCNICA - RenovaCalcMD - Portal Gov.br: https://www.gov.br/anp/pt-br/assuntos/consultas-e-audiencias-publicas/consulta-audiencia-publica/arquivos-consultas-e-audiencias-publicas-2018/cap-10-2018/cp10-2018_nota-tecnica-renova-calc.pdf

- MILANEZ et al. (2014). Produção de etanol pela integração do milho-safrinha às usinas de cana-de-açúcar: avaliação ambiental, econômica e sugestões de política. *Rev. do BNDES*, 41, 147-208.
- MILLER e BLAIR. (2009). *Input-output analysis: Foundations and Extensions*. New York: Cambridge University Press.
- MMA. (2017). *Sumário Executivo - Discussões para implementação da NDC do Brasil*. Fonte: Ministério do Meio Ambiente : <http://www.mma.gov.br/clima/ndc-do-brasil>
- MMA. (2021). *Diretrizes para uma estratégia nacional para neutralidade climática*.
- MME. (22 de maio de 2018b). *Consulta Pública nº 46 de 04/05/2018*. Fonte: Proposta de metas compulsórias anuais de redução de emissões de gases causadores do efeito estufa para a comercialização de combustíveis: http://antigo.mme.gov.br/c/document_library/get_file?uuid=40d35ad0-582d-82e3-1de0-61979c5905ae&groupId=36224
- MME. (14 de 10 de 2021). *Metas individuais compulsórias definitivas para 2020, de redução de emissões de gases causadores do efeito estufa*. Fonte: Agência Nacional do Petróleo, Gás Natural e Biocombustíveis: <https://www.gov.br/anp/pt-br/assuntos/renovabio/metas-individuais-compulsorias-definitivas-para-2020-de-reducao-de-emissoes-de-gases-causadores-do-efeito-estufa>
- MME. (8 de 12 de 2022). *CNPE aprova metas de redução de emissões do RenovaBio para o decênio 2023-2032*. Fonte: <https://www.gov.br/mme/pt-br/assuntos/noticias/cnpe-aprova-metas-de-reducao-de-emissoes-do-renovabio-para-o-decenio-2023-2032#:~:text=Ap%C3%B3s%20considerar%20as%20contribui%C3%A7%C3%B5es%20da,toneladas%20de%20g%C3%A1s%20carb%C3%B4nico%20equivalente>.
- MORAES et al. (2015). Socio-economic impacts of Brazilian sugarcane industry. *Environmental Development* 16, 31–43.
- MORAES et al. (2016). Accelerated growth of the sugarcane, sugar, and ethanol sectors in Brazil (2000–2008): effects on municipal gross domestic product per capita in the south-central region. *Biomass Bioenergy*, 91, 116-125.
- MOREIRA et al. (2018). *Proposta de contabilização da mudança de uso da terra na política nacional de biocombustíveis*. Brasília: VI Congresso Brasileiro Sobre Gestão do Ciclo de Vida.
- MOREIRA et al. (2020). Socio-environmental and land-use impacts of double-cropped maize ethanol in Brazil. *Nature Sustainability*, 8.
- MOREIRA, M. (2016). *Estratégias para Expansão do Setor Sucroenergético e suas Contribuições para a NDC Brasileira*. Campinas: Tese Doutorado, UNICAMP.
- MOREIRA, M., & ARANTES, S. (2018b). *Análise socioeconômica e ambiental da produção de etanol de milho no Centro Oeste brasileiro*. São Paulo: Agroicone.
- MUMM et al. (2014). *Land usage attributed to corn ethanol production in the United States: sensitivity to technological advances in corn grain yield, ethanol conversion, and co-product utilization*. *Biotechnol. Biofuels* 7, 61.

- NASSAR et al. . (9 de 2 de 2011). *PROGRAMA BIOEN*. Fonte: Simulating Land Use and Agriculture Expansion in Brazil: Food, Energy, Agro-industrial and Environmental Impacts: http://www.iconebrasil.com.br/datafiles/publicacoes/artigos/2002/simulating_land_use_and_agriculture_expansion_in_brazil_0902.pdf
- NASSAR et al. (2009). *FAPESP BIOENERGY PROGRAM*. Fonte: https://fapesp.br/bioen/bioen_nassar.pdf
- NASSAR et al. (2010). *An Allocation Methodology to Assess GHG Emissions Associated with Land Use Change*. Fonte: Final Report, ICONE: <http://www.iconebrasil.org.br/arquivos/noticia/2107.pdf>
- NEPSTAD et al. . (2014). *Slowing Amazon deforestation through public policy and interventions in beef and soy supply chains*. *Science*, 344, 1118–1123.
- NEVES et al. (2020). Bioenergy from sugarcane.
- NEVES et al. (2021). *Etanol de milho - Cenário atual e perspectivas para a cadeia no Brasil*.
- NOVELLI et al. . (2023). Diversified crop sequences to reduce soil nitrogen mining in agroecosystems. *Agriculture, Ecosystems and Environment*.
- OCDE. (2017). *OECD Stat*. Fonte: Economic Outlook - Long-term baseline projections: https://stats.oecd.org/Index.aspx?DataSetCode=EO109_LTB
- OCDE/FAO. (2020). *Agricultural Outlook 2020-2029*. Fonte: OCDE Publications: <https://www.oecd.org/publications/oecd-fao-agricultural-outlook-19991142.htm>
- OECD/FAO. (2022). *OECD-FAO Agricultural Outlook 2022-2031*.
- ONU. (11 de novembro de 2015). *Conferência das Nações Unidas sobre Mudanças Climáticas (COP21)*. Fonte: ORGANIZAÇÃO DAS NAÇÕES UNIDAS (ONU): <https://nacoesunidas.org/wp-content/uploads/2016/04/Acordo-de-Paris.pdf>
- ONU. (27 de Setembro de 2021). *Indicadores Brasileiros para os Objetivos de Desenvolvimento Sustentável*. Fonte: Objetivos de Desenvolvimento Sustentável (ODS): <https://odsbrasil.gov.br/>
- PAWLAK et al. (2020). *The role of agriculture in ensuring food security in developing countries: Considerations in the context of the problem of sustainable food production*. Sustainability.
- PEREIRA et al. (2019). Comparison of biofuel life-cycle GHG emissions assessment tools: the case studies of ethanol produced from sugarcane, corn, and wheat. *Renew. Sustain. Energy Rev.* 110, 1-12.
- PETROBRAS. (8 de março de 2022). *Petrobras*. Fonte: 10 respostas para suas dúvidas sobre preço da gasolina: <https://duvidasgasolina.petrobras.com.br/por-que-e-adicionado-etanol-na-gasolina/>
- PICOLI, J. (2017). *Perfil ambiental da produção integrada de etanol e pecuária de corte*. Campinas: Dissertação de mestrado, UNICAMP.
- PLEVIN et al. (2014). *Using attributional life cycle assessment to estimate climate-change mitigation benefits misleads policy makers*. *Journal of Industrial Ecology*, 18(1), 73-83.

- PURDUE. (2022). *GTAP - Global Trade Analysis Project*. Fonte: GTAP - Global Trade Analysis Project: <https://www.gtap.agecon.purdue.edu/>
- RFA. (2023). *Annual Fuel Ethanol Production*. Fonte: Markets & Statistics: <https://ethanolrfa.org/markets-and-statistics/annual-ethanol-production>
- RFA. (2023). *Ethanol Industry Outlook*. Renewable fuels association.
- RIGHELATO & SPRACKLEN. (2007). *Carbon mitigation by biofuels or by saving and restoring forests?* Science.
- RIGHELATO et al. (2007). *Carbon mitigation by biofuels or by saving and restoring forests?* Science.
- ROMAN et al. (2020). The Linkages between Crude Oil and Food Prices. *Energies*, 13, pp. 1-18.
- ROSA et al. (2016). *A comparison of Land Use Change models: Challenges and future developments*. Journal of Cleaner Production, 113, 183–193.
- ROTHMAN, H., GREENSHIELDS, R., & ROSILLO-CALLE, F. (1983). *The alcohol economy: Fuel ethanol the Brazilian experience*. Lexington, USA: Frances Pinter and Kentucky University Press.
- ROVERE et al. (2020). *PMR Brasil - Produto 4 - Resultados e análise: Preparação de Modelagem para Estimar os Impactos Socioeconômicos da Adoção de um Instrumento de Precificação de Carbono como parte do Pacote de Implementação da NDC Brasileira – Componente 2a (Modelagem)*. Fonte: <https://www.gov.br/produtividade-e-comercio-exterior/pt-br/assuntos/competitividade-industrial/pmr/componente-2/produto-4-resultados-e-analise.pdf/view>
- RUNGE et al. (2012). Assessing the comparative productivity advantage of bioenergy feedstocks at different latitudes. *Environ. Res. Lett.* 7.
- SAINT VILLE et al. . (2019). Food security and the food insecurity experience scale(FIES): Ensuring progress by 2030. *Food Security*, 11(3), 483–491.
- SCARLAT et al. (2011). Recent developments of biofuels/bioenergy sustainability certification: A global overview. *Energy Policy*, v. 39, n. 3, 1630-1646.
- SCHULTE et al. (2021). Meeting global challenges with regenerative agriculture producing food and energy. *Nature Sustainability*, pp. 1-5.
- SCOT CONSULTORIA. (18 de agosto de 2020). *Preços e mercado de DDG e WDG*. Fonte: Carta Insumos: <https://www.scotconsultoria.com.br/noticias/cartas/51926/carta-insumos---precos-e-mercado-de-ddg-e-wdg.htm>
- SCOT CONSULTORIA. (abril de 2023). *DDG e WDG: Análise conjuntural do mercado em abril de 2023*. Fonte: INFORMATIVO QUINZENAL; Vol.3; número 62: https://www.scotconsultoria.com.br/Relatorio_DDG/230503_Rel_DDG_62_def.pdf
- SCULLY et al. (2021). Carbon intensity of corn ethanol in the United States: State of the science. *Environmental Research Letters*, 20.

- SEABRA et al. (2011). Life cycle assessment of Brazilian sugarcane products: GHG emissions and energy use. *Biofuels. Bioproducts and Biorefining*, v.5, 519-532.
- SEARCHINGER et al. (2008). Use of US croplands for biofuels increases greenhouse gases through emissions from land-use change. *Science*, 319, 1238-1240.
- SEDEC. (19 de Janeiro de 2022). *Secretaria de Estado de Desenvolvimento Econômico*. Fonte: Governo de Mato Grosso: <https://www.sedec.mt.gov.br/-/18778693-mato-grosso-lidera-producao-agropecuaria-brasileira-por-4-anos-consecutivos>
- SEDEC. (20 de Março de 2023). *Secretaria de Estado de Desenvolvimento Econômico - SEDEC*. Fonte: Receita representa mais de 16% do VBP nacional, estimado em R\$ 1,2 trilhão: <https://www.sedec.mt.gov.br/-/valor-bruto-da-produ%C3%A7%C3%A3o-agropecu%C3%A1ria-de-mato-grosso-%C3%A9-estimado-em-r-204-bilh%C3%B5es-para-2023>
- SEEG. (2020). *SEEG 8 - Análise das emissões brasileiras de gases de efeito estufa e suas implicações para as metas de clima do brasil 1970-2019*. Fonte: http://plataforma.seeg.eco.br/total_emission#
- SEPLAG. (novembro de 2022). *Secretaria de Estado de Planejamento e Gestão*. Fonte: Governo de Mato Grosso: http://www.seplag.mt.gov.br/images/files/responsive/Planejamento/INFORMACOES_SOCIOECONOMICAS/PIB/contas_regionais_2020.pdf
- SHRESTHA et al. (2019). Biofuel impact on food prices index and land use change. *Biomass and Bioenergy*, 43-53.
- SHURSON, J. (2009). *Analysis of Current Feeding Practices of Distiller's Grains with Solubles in Livestock and Poultry Feed Relative to Land Use Credits Associated with Determining the Low Carbon Fuel Standard for Ethanol*. Univ. Minnesota.
- SILVA et al. (January de 2021). Macro-environment analysis of the corn ethanol fuel development in Brazil. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, pp. 1-14.
- SINDIPEÇAS. (2023). *Relatório da Frota Circulante*. Fonte: SINDIPEÇAS: https://www.sindipecas.org.br/sindinews/Economia/2023/RelatorioFrotaCirculante_2023.pdf
- SLADE et al. (2014). Global bioenergy resources. *Nat. Clim. Change*, 99-105.
- SMITH et al. (2014). Climate Change. *Mitigation of Climate Change*.
- SOLOMON, S. (2014). Sugarcane Agriculture and Sugar Industry in India: At a Glance. *Sugar Tech*, 113-124.
- SOLOMON, S. (2016). Sugarcane Production and Development of Sugar Industry in India. *Sugar Tech*, 588-602.
- SOUZA et al. (2016). Potential of sugarcane in modern energy development in Southern Africa. *Frontiers in Energy Research*, 1-11.

- SOUZA-RODRIGUES. (2019). Deforestation in the Amazon: A Unified Framework for Estimation and Policy Analysis. *The Review of Economic Studies*, 86(6), pp. 2713-2744.
- TAHERIPOUR et al. . (2017). *The impact of considering land intensification and updated data on biofuels land use change and emissions estimates*. *Biotechnol. Biofuels* 10, 191.
- TALAMINI et al. (2022). *Viabilidade do uso de DDGS e DDG de milho na alimentação de frangos e suínos em Santa Catarina*. Concórdia, Santa Catarina: Embrapa.
- TENENBAUM. (2008). Food vs. Fuel: Diversion of Crops Could Cause More Hunger. *Environ Health Perspect.*, pp. A254–A257.
- THOMAS et al. (2017). *The use of the Global Food Security Index to inform the situation in food insecure countries (technical report no. EUR28885 en)*. Ispra: Joint Research Centre.
- THUROW. (2009). Enough: Why the world's poorest starve in an age of plenty.
- TO et al. (2015). Oil prices, biofuels production and food security: past trends and future challenges. *Food Sec.*, pp. 323-336.
- TOMEI, H. (2016). Food versus fuel? Going beyond biofuels: a viewpoint paper.
- TRINDADE et al. (2019). Relevance of LACAf biofuels for global sustainability. *Biofuels*, 1-11.
- UNEM. (31 de Janeiro de 2020). Relatório Usinas de etanol de milho. Cuiabá, Mato Grosso, Brasil.
- UNEM. (2023). *União Nacional do Etanol de Milho*. Fonte: DDG/WDG: <https://etanoldemilho.com.br/home/produtos/ddg-ddgs-wdg/>
- UNEM. (s.d.). *Demanda aquecida e sustentabilidade vão nortear investimentos em etanol de milho*. Fonte: União Nacional do etanol de milho: <https://etanoldemilho.com.br/2021/11/19/demanda-aquecida-e-sustentabilidade-vaio-nortear-investimentos-em-etanol-de-milho/>
- UNFCCC. (2020). *United Nations Climate Change*. Fonte: Land Use, Land Use Change and Forestry: <https://unfccc.int/topics/land-use/workstreams/land-use--land-use-change-and-forestry-lulucf>
- UNIÃO EUROPEIA. (2008). *DIRECTIVA 2009/28/CE DO PARLAMENTO EUROPEU E DO CONSELHO*. Jornal Oficial da União Europeia.
- UNIÃO EUROPEIA. (2020). *Comissão Europeia*. Fonte: Pacto Ecológico Europeu: https://ec.europa.eu/info/strategy/priorities-2019-2024/european-green-deal_pt
- UNICA. (2017). *União da Indústria de cana-de-açúcar*. Fonte: Relatório Final da safra: 2016/2017: <http://www.unicadata.com.br/listagem.php?idMn=95>
- UNICA. (02 de fevereiro de 2020). *União da Indústria de cana-de-açúcar*. Fonte: Unicadata: <http://www.unicadata.com.br/>
- UNICA. (2022). Comunicação pessoal.
- USDA. (2019b). EU Biofuels Annual 2019. *Gain Report*, 52.
- USDA. (2022). Biofuels Annual India 2022. *GAIN Report Number: IN2022-0056, United States Department of Agriculture*, 1-24.

- USDA. (24 de maio de 2022). *National Agricultural Statistics Service*. Fonte: Quick Stats: <https://quickstats.nass.usda.gov/results/E15ACE56-B7DF-3CE4-9821-8249D5B2FD85>
- USDA. (2022b). China - Peoples Republic of Biofuels Annual. *Gain Report*, 20.
- USDA. (2022c). Biofuels Annual - Japan. *Global agricultural information Network*, 1-25.
- USDA. (7 de 6 de 2023). *U.S. Bioenergy Statistics*. Fonte: Economic Research Service U.S. Department of Agriculture: <https://www.ers.usda.gov/data-products/u-s-bioenergy-statistics/>
- USDA. (22 de 2 de 2023). *United States Department of Agriculture (USDA)*. Fonte: Translation of Japan's Proposed Biofuel Standards for 2023-: https://apps.fas.usda.gov/newgainapi/api/Report/DownloadReportByFileName?fileName=Translation%20of%20Japan%27s%20Proposed%20Biofuel%20Standards%20for%202023-2027_Tokyo_Japan_JA2023-0014.pdf
- USDA. (2023). *World Agricultural Production*. United States Department of Agriculture .
- USEPA. (2010). *Renewable Fuel Standard Program (RFS2) Regulatory Impact Analysis*.
- USMANI. (2023). Biofuel consumption and global climate change: Solutions and challenges. Em *Environmental Sustainability of Biofuels* (pp. 183-200). Elsevier.
- VANWEY et al. . (2013). Socioeconomic development and agricultural intensification in Mato Grosso. *Phil Trans R Soc B* 368: 20120168.
- WALTER et al. (2014). Brazilian Sugarcane Ethanol: Developments so far and Challenges for the Future. *WIREs Energy Environ*, v.3, 70-92.
- WOODS et al. (2015). Bioenergy & Sustainability: Bridging the Gaps (eds Glaucia, S. et al). *Scientific Committee on Problems of the Environment - SCOPE*, 258-300.
- WORLD BANK. (2010). *Brazil low-carbon country case study*. Fonte: World Bank - Sustainable Development Department of the Latin America and Caribbean Region: <http://documents.worldbank.org/curated/en/322451468021257141/pdf/630290PUB0REPL00Box369273B00PUBLIC0.pdf>.
- WRI. (2020). *4 Charts Explain Greenhouse Gas Emissions by Countries and Sectors*. Fonte: <https://www.wri.org/blog/2020/02/greenhouse-gas-emissions-by-country-sector>
- XU et al. (4 de 2021). Double cropping and cropland expansion boost grain production in Brazil. *Nature food*, vol 2, pp. 264-273.
- YAN et al. (2010). Biofuels and synthetic fuels in the US and China: a review of well-to-wheel energy use and greenhouse gas emissions with the impact of land-use change. *Energy Environ. Sci*, 3, 190-197.
- ZIERO et al. . (2021). Foresight for corn-to-ethanol mills in the Southern Brazilian Amazon: Energy, economic and environmental analysis . *Journal of Environmental Chemical Engineering* , pp. 1-13.

ANEXO A

Tabela A1 - Setores adotados no modelo de Insumo-Produto e desagregações

Setor - Região Mato Grosso	Setor - Região Resto do Brasil
Ind. etanol de milho	Não existe
Etanol Convencional	Etanol Convencional
Rações Convencionais	Rações Convencionais
Geração de Gás Natural	Geração de Gás Natural
Óleo Vegetal Convencional	Óleo Vegetal Convencional
Etanol total	Etanol total
Rações totais	Rações totais
Geração El. Total	Geração El. Total
Óleo Vegetal total	Óleo Vegetal total
Arroz (em casca)	Arroz (em casca)
Trigo em grão e outros cereais	Trigo em grão e outros cereais
Milho em grão	Milho em grão
Algodão herbáceo, outras fibras da lav. temporária	Algodão herbáceo, outras fibras da lav. temporária
Cana-de-açúcar	Cana-de-açúcar
Soja em grão	Soja em grão
Fumo em folha	Fumo em folha
Girassol (em grão)	Girassol (em grão)
Feijão (em grão)	Feijão (em grão)
Mandioca	Mandioca
Produtos da fruticultura de lavoura temporária	Produtos da fruticultura de lavoura temporária
Outros produtos e serviços da lavoura temporária	Outros produtos e serviços da lavoura temporária
Laranja	Laranja
Café em grão	Café em grão
Uva	Uva
Outros produtos da fruticultura de lavoura permanente	Outros produtos da fruticultura de lavoura permanente
Outros produtos da lavoura permanente	Outros produtos da lavoura permanente
Bovino	Bovino
Caprino	Caprino
Ovino	Ovino
Outros animais vivos, prods. animal, caça e serv.	Outros animais vivos, prods. animal, caça e serv.
Leite de vaca	Leite de vaca
Leite de outros animais	Leite de outros animais
Suínos	Suínos
Aves e ovos	Aves e ovos
Produtos da produção florestal - florestas plantadas	Produtos da produção florestal - florestas plantadas
Produtos da produção florestal - florestas nativas	Produtos da produção florestal - florestas nativas

Pesca e aquicultura (peixe, crustáceos e moluscos)	Pesca e aquicultura (peixe, crustáceos e moluscos)
Carvão mineral	Carvão mineral
Pedra, areia e argila	Pedra, areia e argila
Outros minerais não-metálicos	Outros minerais não-metálicos
Petróleo	Petróleo
Gás natural	Gás natural
Minério de ferro	Minério de ferro
Minério de alumínio	Minério de alumínio
Minério de cobre	Minério de cobre
Outros minerais metálicos não-ferrosos	Outros minerais metálicos não-ferrosos
Carne de bovinos e outros prod. de carne	Carne de bovinos e outros prod. de carne
Carne de suíno	Carne de suíno
Carne de aves	Carne de aves
Pescado industrializado	Pescado industrializado
Leite resfriado, esterilizado e pasteurizado	Leite resfriado, esterilizado e pasteurizado
Outros produtos do laticínio	Outros produtos do laticínio
Açúcar	Açúcar
Suco de laranja	Suco de laranja
Outras conservas de frutas, legumes, outros vegetais e sucos de frutas	Outras conservas de frutas, legumes, outros vegetais e sucos de frutas
Óleo de soja refinado	Óleo de soja refinado
Outros óleos e gordura vegetal e animal exclusive milho	Outros óleos e gordura vegetal e animal exclusive milho
Café beneficiado	Café beneficiado
Arroz beneficiado e produtos derivados do arroz	Arroz beneficiado e produtos derivados do arroz
Produtos derivados do trigo, mandioca ou milho	Produtos derivados do trigo, mandioca ou milho
Outros produtos alimentares	Outros produtos alimentares
Bebidas alcoólicas	Bebidas alcoólicas
Bebidas não alcoólicas	Bebidas não alcoólicas
Produtos do fumo	Produtos do fumo
Fios e fibras têxteis beneficiados	Fios e fibras têxteis beneficiados
Tecidos	Tecidos
Art. têxteis de uso doméstico e outros têxteis	Art. têxteis de uso doméstico e outros têxteis
Artigos do vestuário e acessórios	Artigos do vestuário e acessórios
Calçados e artefatos de couro	Calçados e artefatos de couro
Produtos de madeira, exclusive móveis	Produtos de madeira, exclusive móveis
Celulose	Celulose
Papel, papelão, embalagens e artefatos de papel	Papel, papelão, embalagens e artefatos de papel
Serviços de impressão e reprodução	Serviços de impressão e reprodução
Combustíveis para aviação	Combustíveis para aviação
Gasoálcool	Gasoálcool
Naftas para petroquímica	Naftas para petroquímica
Óleo combustível	Óleo combustível
Diesel - biodiesel	Diesel - biodiesel
Outros produtos do refino do petróleo	Outros produtos do refino do petróleo

Biodiesel B100 e outros biocombustíveis	Biodiesel B100 e outros biocombustíveis
Produtos químicos inorgânicos	Produtos químicos inorgânicos
Adubos e fertilizantes	Adubos e fertilizantes
Petroquímicos básicos	Petroquímicos básicos
Outros produtos químicos orgânicos	Outros produtos químicos orgânicos
Resinas, elastômeros e fibras artif. e sintéticas	Resinas, elastômeros e fibras artif. e sintéticas
Defensivos agrícolas e desinfetantes domissanitários	Defensivos agrícolas e desinfetantes domissanitários
Produtos químicos diversos	Produtos químicos diversos
Tintas, vernizes, esmaltes e lacas	Tintas, vernizes, esmaltes e lacas
Sabões, detergentes, produtos de limpeza e polimento	Sabões, detergentes, produtos de limpeza e polimento
Cosméticos, produtos de perfumaria e de higiene pessoal	Cosméticos, produtos de perfumaria e de higiene pessoal
Medicamentos para uso veterinário	Medicamentos para uso veterinário
Farmoquímicos, preparações farmacêuticas e medicamentos para uso humano	Farmoquímicos, preparações farmacêuticas e medicamentos para uso humano
Artigos de borracha	Artigos de borracha
Artigos de plástico	Artigos de plástico
Cimento	Cimento
Artefatos de cimento, gesso e semelhantes	Artefatos de cimento, gesso e semelhantes
Vidro e produtos de vidro	Vidro e produtos de vidro
Cerâmicos	Cerâmicos
Outros prod. de minerais não-metálicos	Outros prod. de minerais não-metálicos
Ferro-gusa e ferroligas	Ferro-gusa e ferroligas
Semiacabados, laminados planos, longos e tubos de aço	Semiacabados, laminados planos, longos e tubos de aço
Produtos da metalurgia do alumínio	Produtos da metalurgia do alumínio
Produtos da metalurgia do cobre	Produtos da metalurgia do cobre
Outros produtos da metalurgia de metais não-ferrosos	Outros produtos da metalurgia de metais não-ferrosos
Peças fundidas de aço e de metais não ferrosos	Peças fundidas de aço e de metais não ferrosos
Produtos de metal, excl. máquinas e equipamentos	Produtos de metal, excl. máquinas e equipamentos
Componentes eletrônicos	Componentes eletrônicos
Máquinas para escritório e equip. de informática	Máquinas para escritório e equip. de informática
Material eletrônico	Material eletrônico
Equip. de comunicações	Equip. de comunicações
Equip. de medida, teste e controle e eletromédicos	Equip. de medida, teste e controle e eletromédicos
Equip. e instrumentos ópticos, fotográficos e cinematográficos	Equip. e instrumentos ópticos, fotográficos e cinematográficos
Máquinas, aparelhos e materiais elétricos	Máquinas, aparelhos e materiais elétricos
Eletrodomésticos	Eletrodomésticos
Tratores e outras máquinas agrícolas	Tratores e outras máquinas agrícolas

Máquinas para a extração mineral e a construção	Máquinas para a extração mineral e a construção
Outras máquinas e equipamentos mecânicos	Outras máquinas e equipamentos mecânicos
Automóveis, camionetas e utilitários	Automóveis, camionetas e utilitários
Caminhões e ônibus, incl. cabines, carrocerias e reboques	Caminhões e ônibus, incl. cabines, carrocerias e reboques
Peças e acessórios para veículos automotores	Peças e acessórios para veículos automotores
Aeronaves, embarcações e outros equipamentos de transporte	Aeronaves, embarcações e outros equipamentos de transporte
Móveis	Móveis
Produtos de indústrias diversas	Produtos de indústrias diversas
Manutenção, reparação e instalação de máquinas e equipamentos	Manutenção, reparação e instalação de máquinas e equipamentos
Geração de energia elétrica (hidráulica)	Geração de energia elétrica (hidráulica)
Geração de energia elétrica (cana)	Geração de energia elétrica (cana)
Geração de energia elétrica (óleo combustível)	Geração de energia elétrica (óleo combustível)
Geração de energia elétrica (óleo diesel)	Geração de energia elétrica (óleo diesel)
Geração de energia elétrica (outras fontes)	Geração de energia elétrica (outras fontes)
Transmissão e distribuição de energia elétrica	Transmissão e distribuição de energia elétrica
Gás natural e outras utilidades	Gás natural e outras utilidades
Água e esgoto	Água e esgoto
Reciclagem e gestão de resíduos	Reciclagem e gestão de resíduos
Edificações	Edificações
Obras de infraestrutura	Obras de infraestrutura
Serviços especializados para construção	Serviços especializados para construção
Comércio e reparação de veículos	Comércio e reparação de veículos
Comércio atacadista de matérias-primas agrícolas e animais vivos	Comércio atacadista de matérias-primas agrícolas e animais vivos
Comércio atacadista especializado em produtos alimentícios, bebidas e fumo	Comércio atacadista especializado em produtos alimentícios, bebidas e fumo
Comércio atacadista de produtos farmacêuticos, médicos, ortopédicos, odontológicos e veterinários	Comércio atacadista de produtos farmacêuticos, médicos, ortopédicos, odontológicos e veterinários
Comércio atacadista de outros equipamentos e artigos de uso pessoal e doméstico	Comércio atacadista de outros equipamentos e artigos de uso pessoal e doméstico
Comércio atacadista de combustíveis e lubrificantes	Comércio atacadista de combustíveis e lubrificantes
Comércio atacadista de equipamentos e produtos de tecnologia de informação e comunicação	Comércio atacadista de equipamentos e produtos de tecnologia de informação e comunicação
Comércio atacadista de máquinas, aparelhos e equipamentos	Comércio atacadista de máquinas, aparelhos e equipamentos
Comércio atacadista de outros produtos não especificados	Comércio atacadista de outros produtos não especificados
Hipermercados e supermercados	Hipermercados e supermercados

Comércio varejista de tecidos, artigos de armarinho, vestuário e calçados	Comércio varejista de tecidos, artigos de armarinho, vestuário e calçados
Comércio varejista de combustíveis e lubrificantes	Comércio varejista de combustíveis e lubrificantes
Comércio varejista de móveis, eletrodomésticos, equip. de áudio e vídeo e equip. de informática	Comércio varejista de móveis, eletrodomésticos, equip. de áudio e vídeo e equip. de informática
Comércio varejista de produtos farmacêuticos, perfumaria e cosméticos e artigos médicos, ópticos e ortopédicos	Comércio varejista de produtos farmacêuticos, perfumaria e cosméticos e artigos médicos, ópticos e ortopédicos
Comércio varejista de outros produtos não especificados	Comércio varejista de outros produtos não especificados
Transporte rodoviário de carga	Transporte rodoviário de carga
Transporte ferroviário de carga	Transporte ferroviário de carga
Transporte dutoviário de carga	Transporte dutoviário de carga
Transporte rodoviário de passageiros	Transporte rodoviário de passageiros
Transporte ferroviário de passageiros	Transporte ferroviário de passageiros
Transporte aquaviário de carga	Transporte aquaviário de carga
Transporte aquaviário de passageiros	Transporte aquaviário de passageiros
Transporte aéreo de carga	Transporte aéreo de carga
Transporte aéreo de passageiros	Transporte aéreo de passageiros
Armazenamento e serviços auxiliares aos transportes de carga	Armazenamento e serviços auxiliares aos transportes de carga
Armazenamento e serviços auxiliares aos transportes de passageiros	Armazenamento e serviços auxiliares aos transportes de passageiros
Correio e outros serviços de entrega	Correio e outros serviços de entrega
Serviços de alojamento em hotéis e similares	Serviços de alojamento em hotéis e similares
Serviços de alimentação	Serviços de alimentação
Livros, jornais e revistas	Livros, jornais e revistas
Serviços cinematográficos, música, rádio e televisão	Serviços cinematográficos, música, rádio e televisão
Telecomunicações, TV por assinatura e outros serv. relacionados	Telecomunicações, TV por assinatura e outros serv. relacionados
Desenvolvimento de sistemas e outros serviços de informação	Desenvolvimento de sistemas e outros serviços de informação
Intermediação financeira, seguros e previdência complementar	Intermediação financeira, seguros e previdência complementar
Aluguel efetivo e serviços imobiliários	Aluguel efetivo e serviços imobiliários
Aluguel imputado	Aluguel imputado
Serviços jurídicos, contabilidade e consultoria	Serviços jurídicos, contabilidade e consultoria
Pesquisa e desenvolvimento	Pesquisa e desenvolvimento
Serviços de arquitetura e engenharia	Serviços de arquitetura e engenharia
Publicidade e outros serviços técnicos	Publicidade e outros serviços técnicos
Aluguéis não-imob. e gestão de ativos de propriedade intelectual	Aluguéis não-imob. e gestão de ativos de propriedade intelectual
Condomínios e serviços para edifícios	Condomínios e serviços para edifícios
Outros serviços administrativos	Outros serviços administrativos

Serviços de vigilância, segurança e investigação	Serviços de vigilância, segurança e investigação
Segurança pública	Segurança pública
Outros serviços coletivos da administração pública	Outros serviços coletivos da administração pública
Serviços de previdência e assistência social	Serviços de previdência e assistência social
Educação pública	Educação pública
Educação privada	Educação privada
Saúde pública	Saúde pública
Saúde privada	Saúde privada
Serviços de artes, cultura, esporte e recreação	Serviços de artes, cultura, esporte e recreação
Organizações patronais, sindicais e outros serviços associativos	Organizações patronais, sindicais e outros serviços associativos
Manutenção de computadores, telefones e objetos domésticos	Manutenção de computadores, telefones e objetos domésticos
Serviços pessoais	Serviços pessoais
Serviços domésticos	Serviços domésticos

Fonte: Elaboração própria.

ANEXO B - Resultados Cenário S2

Tabela B1 - Variação marginal da área (em mil hectares) - Cenário S2

Região/ Cultura	Cana-de- açúcar	Soja	Milho 1ª safra	Outras Culturas	Pastagem	Floresta	Total	Milho 2ª safra
Sul	(2)	(25)	31	0	(4)	-	-	15
Sudeste	(6)	(12)	18	(0)	1	-	0	1
Centro- Oeste Cerrado	(1)	(12)	0	(2)	31	-	17	73
Norte Amazônia	(0)	(12)	4	0	9	-	1	(3)
Nordeste Litorâneo	1	-	3	(0)	(2)	-	1	-
Nordeste Cerrado	0	(7)	7	(0)	4	-	3	1
Total	(8)	(69)	62	(1)	38	-	23	87

Tabela B2 - Variação marginal da produção (em 1000 toneladas) - Cenário S2

Região/ Cultura	Cana-de- açúcar	Soja	Milho 1ª safra	Outras Culturas	Carne	Milho 2ª safra
Sul	(116)	(90)	296	2	7	118
Sudeste	(466)	(44)	144	(0)	(6)	9
Centro-Oeste Cerrado	(58)	(46)	0	(6)	(4)	629
Norte Amazônia	(4)	(41)	17	1	0	(7)
Nordeste Litorâneo	53	-	6	0	(1)	-
Nordeste Cerrado	1	(31)	33	0	(0)	3
Total	(590)	(253)	497	(4)	(4)	752

Tabela B3 - Variação marginal das emissões (1.000 tCO₂eq) - Cenário S2

Região/ Cultura	Sul	Sudeste	Centro- Oeste Cerrado	Norte Amazônia	Nordeste Litorâneo	Nordeste Cerrado	Total
Anual/ Perene	223	564	0	0	0	-2	785
Pasto/ Perene	0	-10	-12	-1	12	0	-11
Pasto/ Anual	659	0	-1.777	-1.104	153	-93	-2.162
Pasto/ Eucalipto	0	0	0	0	0	0	0
Natural/ Anual	-0.06	0	0	0	188	0	188
Natural/ Perene	0	0	0	0	0	0	0
Natural/ Pasto	0	16	919	343	0	192	1.469
Total	882	570	-870	-763	354	97	270

ANEXO C - Resultados Cenário S3

Tabela C1 - Variação marginal da área (em mil hectares) - Cenário S3

Região/ Cultura	Cana-de- açúcar	Soja	Milho 1ª safra	Outras Culturas	Pastagem	Floresta	Total	Milho 2ª safra
Sul	(2)	(25)	32	0	(5)	-	-	16
Sudeste	(6)	(12)	18	(0)	0	-	1	1
Centro- Oeste Cerrado	(2)	(13)	0	(2)	20	17	20	77
Norte Amazônia	(0)	(11)	4	0	0	12	6	(2)
Nordeste Litorâneo	1	-	3	(0)	(2)	-	1	-
Nordeste Cerrado	0	(5)	7	(0)	3	-	4	1
Total	(9)	(66)	64	(2)	16	29	32	93

Tabela C2 - Variação marginal da produção (em mil toneladas) - Cenário S3

Região/ Cultura	Cana-de- açúcar	Soja	Milho 1ª safra	Outras Culturas	Carne	Milho 2ª safra
Sul	(127)	(89)	306	2	4	126
Sudeste	(463)	(43)	150	(0)	(6)	10
Centro-Oeste Cerrado	(166)	(48)	0	(7)	(3)	665
Norte Amazônia	(5)	(36)	17	1	(0)	(4)
Nordeste Litorâneo	68	-	7	0	(1)	-
Nordeste Cerrado	1	(24)	34	0	(0)	3
Total	(693)	(240)	514	(5)	(7)	799

Tabela C3 - Variação marginal das emissões (1.000 tCO₂eq) - Cenário S3

Região/ Cultura	Sul	Sudeste	Centro- Oeste Cerrado	Norte Amazônia	Nordeste Litorâneo	Nordeste Cerrado	Total
Anual/ Perene	246	631	0	0	0	0	876
Pasto/ Perene	0	0	-31	-2	15	0	-17
Pasto/ Anual	831	0	-1.946	-40	141	0	-1015
Pasto/ Eucalipto	0	0	-2.368	-1.643	0	0	-4.011
Natural/ Anual	-0.06	57	0	-3.191	212	203	-2.718
Natural/ Perene	0	0	0	0	0	2	2
Natural/ Pasto	0	7	1.134	3.936	0	174	5.251
Total	1.077	695	-3.212	-938	368	379	-1.632

ANEXO D – Resultados Cenário S4

Tabela D1 - Variação marginal da área (em mil hectares) - Cenário S4

Região/ Cultura	Cana-de- açúcar	Soja	Milho 1ª safra	Outras Culturas	Pastagem	Floresta	Total	Milho 2ª safra
Sul	(1)	(25)	30	0	(3)	-	-	14
Sudeste	(5)	(12)	17	(0)	1	-	0	1
Centro- Oeste Cerrado	(1)	(17)	0	(2)	21	17	18	67
Norte Amazônia	(0)	(15)	4	0	2	12	3	(3)
Nordeste Litorâneo	1	-	3	(0)	(2)	-	1	-
Nordeste Cerrado	0	(8)	6	(0)	5	-	3	1
Total	(7)	(77)	60	(1)	23	29	26	80

Tabela D2 - Variação marginal da produção (em mil toneladas) - Cenário S4

Região/ Cultura	Cana-de- açúcar	Soja	Milho 1ª safra	Outras Culturas	Carne	Milho 2ª safra
Sul	(102)	(90)	285	2	11	112
Sudeste	(434)	(45)	137	(0)	(6)	8
Centro-Oeste Cerrado	(63)	(65)	0	(6)	(5)	583
Norte Amazônia	(4)	(50)	17	1	(0)	(12)
Nordeste Litorâneo	50	-	6	0	(1)	-
Nordeste Cerrado	1	(35)	32	0	(0)	2
Total	(553)	(285)	478	(4)	(0)	693

Tabela D3 - Variação marginal das emissões (1.000 tCO₂eq) - Cenário S4

Região/ Cultura	Sul	Sudeste	Centro- Oeste Cerrado	Norte Amazônia	Nordeste Litorâneo	Nordeste Cerrado	Total
Anual/ Perene	197	483	0	0	0	-2	678
Pasto/ Perene	0	-16	-13	-1	11	0	-20
Pasto/ Anual	557	0	-2.509	-248	150	-224	-2.274
Pasto/ Eucalipto	0	0	-2.368	-1.643	0	0	-4.011
Natural/ Anual	-0.06	0	0	-4.364	177	0	-4.187
Natural/ Perene	0	0	0	0	0	0	0
Natural/ Pasto	0	13	997	3.936	0	178	5.124
Total	753	480	-3.894	-2.319	337	-48	-4.690

ANEXO E

Tabela E1 - Área total por tipo de atividade agropecuária e região em 2016 - Cenário Base (em mil hectares)

Região/ Cultura	Cana- de- açúcar	Soja	Milho 1ª safra	Outras Culturas	Pastagem	Floresta	Total	Milho 2ª safra
Sul	756	11.545	1.607	1.521	14.429	2.486	32.344	2.198
Sudeste	6.896	2.327	1.237	243	26.459	3.480	40.642	814
Centro- Oeste Cerrado	1.731	10.950	309	690	45.285	986	59.951	4.976
Norte Amazônia	138	4.680	297	526	49.279	308	55.228	1.889
Nordeste Litorâneo	844	-	959	748	10.224	88	12.863	-
Nordeste Cerrado	192	3.749	1.182	1.105	31.934	1.038	39.200	450
Total	10.556	33.252	5.593	4.836	177.609	8.385	240.231	10.330

Fonte: Dados extraídos do modelo *BLUM* (Agroicone).

Tabela E2 - Produção das principais atividades agropecuárias, por região em 2016 - Cenário Base (em milhões de toneladas)

Região/ Cultura	Cana-de- açúcar	Soja	Milho 1ª safra	Outras Culturas	Carne	Milho 2ª safra
Sul	49.502	35.181	11.898	8.986	10.744	11.191
Sudeste	499.239	7.575	7.520	451	5.107	2.274
Centro-Oeste Cerrado	122.050	32.435	2.415	2.416	4.907	18.718
Norte Amazônia	9.158	13.449	906	1.298	2.880	7.631
Nordeste Litorâneo	49.765	-	373	194	972	-
Nordeste Cerrado	10.520	6.793	2.900	1.789	1.581	701,7
Total	740.234	95.434	26.013	15.135	26.474	40.517

Fonte: Dados extraídos do modelo *BLUM* (Agroicone).