



**UNIVERSIDADE FEDERAL DO TOCANTINS
CAMPUS UNIVERSITÁRIO DE PALMAS
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM AGROENERGIA DIGITAL**

NELIANE MARINHO QUEIROZ ORNELAS

**APROVEITAMENTO INTELIGENTE DE RESÍDUOS SECOS AGRÍCOLAS:
OTIMIZAÇÃO LOGÍSTICA PARA A PRODUÇÃO DE BIOCOMBUSTÍVEIS DE
SEGUNDA GERAÇÃO (2G)**

**Palmas (TO)
2025**

NELIANE MARINHO QUEIROZ ORNELAS

**APROVEITAMENTO INTELIGENTE DE RESÍDUOS SECOS AGRÍCOLAS:
OTIMIZAÇÃO LOGÍSTICA PARA A PRODUÇÃO DE BIOCOMBUSTÍVEIS DE
SEGUNDA GERAÇÃO (2G)**

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Agroenergia Digital (PPGAD) da Universidade Federal do Tocantins (UFT), como requisito à obtenção do grau de Mestre em Agroenergia Digital.

Orientador: Dr. David Gabriel de Barros Franco.

**Palmas (TO)
2025**

Dados Internacionais de Catalogação na Publicação (CIP)
Sistema de Bibliotecas da Universidade Federal do Tocantins

O74a Omelas, Neliane Marinho Queiroz.

Aproveitamento inteligente de resíduos secos agrícolas: otimização logística para a produção de biocombustíveis de segunda geração (2G). / Neliane Marinho Queiroz Omelas. – Palmas, TO, 2025.

114f.

Dissertação (Mestrado Acadêmico) - Universidade Federal do Tocantins – Câmpus Universitário de Palmas - Curso de Pós-Graduação (Mestrado) em Agroenergia, 2025.

Orientador: David Gabriel de Barros Franco

1. Problema de Localização de Instalações. 2. Modelagem Matemática. 3. Resíduos Agrícolas. 4. Sustentabilidade. I. Título

CDD 333.7

TODOS OS DIREITOS RESERVADOS – A reprodução total ou parcial, de qualquer forma ou por qualquer meio deste documento é autorizado desde que citada a fonte. A violação dos direitos do autor (Lei nº 9.610/98) é crime estabelecido pelo artigo 184 do Código Penal.

Elaborado pelo sistema de geração automática de ficha catalográfica da UFT com os dados fornecidos pelo(a) autor(a).

NELIANE MARINHO QUEIROZ ORNELAS

APROVEITAMENTO INTELIGENTE DE RESÍDUOS SECOS AGRÍCOLAS:
OTIMIZAÇÃO LOGÍSTICA PARA A PRODUÇÃO DE BIOCOMBUSTÍVEIS DE
SEGUNDA GERAÇÃO (2G)

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Agroenergia Digital (PPGAD). Foi avaliado para a obtenção do título de Mestra em Agroenergia Digital e aprovado em sua forma final pelo Orientador e pela Banca Examinadora.

Data de aprovação: ____ / ____ / ____

Banca Examinadora:

Prof. Dr. David Gabriel de Barros Franco, Orientador, UFT / UFNT

Prof. Dr. Joel Carlos Zukowski Junior, Examinador, UFT

Prof. Dra. Arlenes Buzatto Delabary Spada, Examinadora, UNITINS

Prof. Dr. Victor Fernandez Nascimento, Examinador, UFABC

A todos, minha gratidão eterna por estarem ao meu lado e por acreditarem que seria possível. Este trabalho é tanto de vocês quanto meu.

AGRADECIMENTOS

Deus, que em Sua infinita bondade e misericórdia, me capacitou e guiou até este momento tão importante.

Ao meu querido marido, Vinícius da Silva Ornelas, sua compreensão e incentivo me deram forças nos momentos mais difíceis, essa conquista é nossa, que possamos continuar conquistando nossos objetivos e fazendo a diferença um na vida do outro.

Aos meus amados filhos, Ester, Samuel e João Pedro Queiroz Ornelas, por serem a luz dos meus dias e por entenderem as ausências e horas dedicadas ao estudo. Vocês são a minha maior motivação e alegria, que vocês consigam ir ainda mais longe, espero de alguma forma ter incentivado vocês na conquista de seus sonhos, pois a jornada de vocês está apenas no começo.

Meu estimado pai, Jonas Lopes Queiroz e minha querida mãe, Miralice Brelaz Marinho, muito obrigada pelo amor, cuidado, carinho e ajuda que sempre externaram por mim.

Minha adorável irmã Josiane Marinho Queiroz Dutra e seu marido Carlos Eduardo Dutra, sem o incentivo de vocês e apoio nem teria tido a oportunidade de iniciar essa jornada.

Ao prezado orientador, Dr. David Gabriel de Barros Franco, por sua paciência e dedicação inabalável nesses dois anos que o senhor dispôs do seu tempo para me orientar e instruir da melhor maneira possível, gratidão pelo aprendizado. Sua sabedoria e apoio foram fundamentais para que eu pudesse superar os desafios ao longo desta jornada acadêmica.

Aos prezados professores Doutores e Doutoradas do mestrado em Agroenergia Digital Daiane Cecchin, Elaine Cristina Alves Martins Oliveira, Erich Collicchio, Flavia Lucila Tonani, Guilherme Benko De Siqueira, Joel Carlos Zukowski Junior, Joênes Mucci Peluzio, Juliana Lobo Paes, Michele Ribeiro Ramos, Solange Aparecida Ságio, Yolanda Vieira De Abreu, cada um de vocês foi fundamental nessa jornada. Gratidão a todos pela dedicação e o cuidado que sempre tiveram, muito orgulho em poder externar que foram meus professores, instruindo não apenas nas disciplinas, mas também para a vida, a conduta e postura de cada um é exemplo.

Aos amigos que fiz no decorrer do período e levarei sempre em meu coração, sem o suporte de vocês, sempre me socorrendo independente do dia ou da hora, tudo seria muito mais difícil, minha gratidão sempre, Benildes, Geane, Ivo, Rodolfo, Wellington Rangel, Suzelma e Thiago.

Aos amigos do mestrado Ana Paula, Anatólio, Beatriz, Carol, Cirlene, Dannyella, Davi, Joaquim, Lucas, Letícia, Lúcio, Luzêni, Patrício, Tallyrand e Vanessa, saibam que cada um de vocês fez parte de um momento especial, obrigada por tudo.

Meu professor de jiu-jitsu Alessandro B. Bogado, sempre atencioso e compreensivo quando muitas vezes necessitei ausentar dos treinos, devido aos compromissos com o mestrado.

Não poderia esquecer da CAPES pela bolsa de estudos, o apoio financeiro durante todo esse período foi fundamental.

RESUMO

A presente pesquisa investiga o uso de resíduos agrícolas na produção de biocombustíveis de segunda geração (2G) como uma solução viável para os desafios energéticos e ambientais contemporâneos. Os resíduos agrícolas, por serem abundantes e de baixo custo, oferecem uma oportunidade para a geração de energia renovável, contribuindo para a redução das emissões de gases de efeito estufa (GEE) e apresentando uma alternativa sustentável às fontes não renováveis. O estudo tem como objetivo analisar os desafios, estratégias, impactos e perspectivas da gestão logística desses resíduos na produção de biocombustíveis 2G, propondo um modelo operacional para otimização logística. A metodologia incluiu uma revisão da literatura sobre métodos de pré-tratamento, como moagem e pirólise, que são cruciais para aumentar a eficiência da conversão de biomassa. Além disso, foram coletados dados sobre a produção agrícola no Tocantins e desenvolvido um modelo para otimizar a localização das plantas produtivas no estado. A análise indicou que nove instalações de biocombustível 2G seriam ideais, com um custo total estimado em R\$ 18 bilhões, englobando construção e transporte ao longo da vida útil das unidades. Cenários alternativos foram elaborados para lidar com possíveis restrições nas localizações sugeridas pelo modelo matemático. Os resultados demonstram que a conversão de resíduos agrícolas em biocombustíveis 2G não apenas oferece benefícios ambientais, mas também pode criar oportunidades econômicas para agricultores e a sociedade. A formação de um mercado para esses biocombustíveis poderia gerar renda adicional para os produtores e impulsionar o desenvolvimento socioeconômico do estado. No entanto, a transição ainda enfrenta desafios significativos, como os altos custos de transporte e a necessidade de políticas públicas que incentivem o uso de biocombustíveis.

Palavras-chaves: Problema de Localização de Instalações. Modelagem Matemática. Resíduos Agrícolas. Sustentabilidade.

ABSTRACT

This research investigates the use of agricultural residues in the production of second-generation (2G) biofuels as a viable solution to contemporary energy and environmental challenges. Agricultural residues, being abundant and low-cost, offer an opportunity for the generation of renewable energy, contributing to the reduction of greenhouse gas (GHG) emissions and presenting a sustainable alternative to non-renewable sources. The study aims to analyze the challenges, strategies, impacts and perspectives of the logistics management of these residues in the production of 2G biofuels, proposing an operational model for logistics optimization. The methodology included a literature review on pretreatment methods, such as milling and pyrolysis, which are crucial to increase the efficiency of biomass conversion. In addition, data on agricultural production in Tocantins were collected and a model was developed to optimize the location of production plants in the state. The analysis indicated that nine 2G biofuel facilities would be ideal, with an estimated total cost of R\$ 18 billion, including construction and transportation throughout the useful life of the units. Alternative scenarios were developed to address potential constraints in the locations suggested by the mathematical model. The results demonstrate that the conversion of agricultural residues into 2G biofuels not only offers environmental benefits, but can also create economic opportunities for farmers and society. The creation of a market for these biofuels could generate additional income for producers and boost the socioeconomic development of the state. However, the transition still faces significant challenges, such as high transportation costs and the need for public policies to encourage the use of biofuels.

Keywords: Facility Location Problem. Mathematical Modelling. Agricultural Waste. Sustainability.

LISTA DE QUADROS

Quadro 1 – Análise SWOT.....	30
Quadro 2 – Produção média de etanol por cultura.	35
Quadro 3 - Desafios e Oportunidades	39
Quadro 4 – Resumo comparativo dos moldais.....	40
Quadro 5 – Resumo das formas de armazenagem de resíduos.....	42
Quadro 6 – Palavras-chave usadas com os operadores booleanos nas bases de dados.	44
Quadro 7 – Referenciais selecionados.....	46
Quadro 8 – Processo de seleção de material bibliográfico nas bases de dados.....	46
Quadro 9 – Resumo das Etapas Realizadas.....	51
Quadro 10 – Resumo dos documentos selecionados.....	84
Quadro 11 – Aplicação Prática dos Biocombustíveis de 2G.....	86
Quadro 12 – Incentivos Fiscais e Políticas Públicas.	88

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 – Custo por fonte geração de energia renovável.....	29
Tabela 2 – Busca inicial da literatura.	44
Tabela 3 – Resultados da busca nas bases de dados (operador booleano OR).....	45
Tabela 4 – Resultados da busca nas bases de dados. Operador booleano AND..	45
Tabela 5 – Dados Gerais de produção no Tocantins.	56
Tabela 6 – Municípios Destaque na Produção Agrícola no Tocantins.....	58
Tabela 7 – Tancagem disponível no estado.....	59
Tabela 8 – TRR no estado do Tocantins.....	60
Tabela 9 – Taxa de geração de resíduos	63
Tabela 10 – Solução ótima do PLF.	67
Tabela 11 – Comparativo de alternativas.	69
Tabela 12 – Produção híbrido de milho (em grão).....	103
Tabela 13 – Produção soja (em grão).	108
Tabela 14 – Produção de cana-de-açúcar.	111
Tabela 15 – Produção de sorgo (em grão).....	113

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 – Rota tecnológica E2G.	16
Figura 2 – Ambiental, Social e Governança.	21
Figura 3 - Evolução dos investimentos em PD&D.	22
Figura 4 – Linha do tempo das políticas de eficiência energética 1981 a 2005.	23
Figura 5 – Linha do tempo das políticas de eficiência energética 2007 a 2023.	23
Figura 6 – Visão da integração das políticas	24
Figura 7 – Consumo de Biodiesel: dados históricos e projeção.	25
Figura 8 – Divisão setorial de usuários.	26
Figura 9 – Evolução marcos legais e consumo biodiesel no Brasil.	26
Figura 10 – Participação das fontes energéticas na capacidade instalada.	27
Figura 11 – Classificação dos biocombustíveis.	32
Figura 12 – Matéria-prima para geração de biocombustível.	32
Figura 13 – Processo de produção em cada geração.	33
Figura 14 – Fluxo metodológico da pesquisa.	43
Figura 15 – Histórico de produção de milho no Tocantins.	53
Figura 16 – Histórico de produção de soja no Tocantins.	54
Figura 17 – Histórico de produção de cana-de-açúcar no Tocantins.	55
Figura 18 – Histórico da produção de sorgo no Tocantins.	56
Figura 19 – Área Plantada (ha).	57
Figura 20 – Rendimento Médio (kg/ha).	57
Figura 21 – Valor da Produção (mil R\$).	58
Figura 22 – Estimativa do custo fixo total e unitário de construção.	62
Figura 23 – Geração de resíduos por município do Estado.	64
Figura 24 – Comparação de custos da solução proposta.	65
Figura 25 – Proposta de novas instalações.	67
Figura 26 – Detalhamento da solução ótima.	68
Figura 27 – Produção de Etanol 2G.	89
Figura 28 – Pesagem da cana-de-açúcar através dos caminhões bi-trem.	90
Figura 29 – Descarregamento da matéria-prima nos hilos.	90
Figura 30 – Processo a extração via difusão.	91
Figura 31 – Transporte do bagaço gerado.	91
Figura 32 – Detalhes da pilha de bagaço e da bica de saída do bagaço para o local.	92
Figura 33 – Lavador de gases.	92
Figura 34 – Células de sedimentação.	93
Figura 35 – Forma de prensagem.	93
Figura 36 – Caminhão de transporte.	94
Figura 37 – Área de compostagem.	94
Figura 38 – Armazenagem de grãos 2006/2017.	95
Figura 39 – Armazenagem própria.	96
Figura 40 – Características Armazenagem.	97
Figura 41 – Logística Agropecuária.	98
Figura 42 – Infraestrutura portuária.	99
Figura 43 – Destino Commodities agrícolas.	100
Figura 44 – Infraestrutura regional.	101
Figura 45 – Corredores Logísticos.	102

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

1G	Primeira Geração de Biocombustível
2G	Segunda Geração de Biocombustível
3G	Terceira Geração de Biocombustível
4G	Quarta Geração de Biocombustível
ABNT	Associação Brasileira de Normas Técnicas,
ANEEL	Agência Nacional de Energia Elétrica
ASG	Ambiental, Social e Governança
BEN	Balanco Energético Nacional
CAPES	Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior
E2G	Etanol de Segunda Geração
EMBRAPA	Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária
ENCE	Etiqueta Nacional de Conservação de Energia
EPE	Empresa de Pesquisa Energética
ESG	<i>Environmental, Social and Governance</i>
GEE	Gases de Efeito Estufa
IBGE	Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística
INMETRO	Instituto Nacional de Metrologia, Qualidade e Tecnologia
NBR	Norma Técnica Brasileira
ONU	Organização das Nações Unidas
PBE	Programa Brasileiro de Etiquetagem
PLF	Problema de Localização de Facilidades
PNPB	Programa Nacional de Produção e uso de Biodiesel
PNRS	Política Nacional de Resíduos Sólidos
PPGAD	Programa de Pós-Graduação Agroenergia Digital
PROCEL	Programa Nacional de Conservação de Energia Elétrica
PROPEQ	Empresa Júnior de Engenharia Química do Brasil
PRV	Problema de Roteamento de Veículo
RN	Resolução Normativa
SENAR	Serviço Nacional de Aprendizagem Rural
SIDRA	Sistema IBGE de Recuperação Automática
SWOT	<i>Strengths, Weaknesses, Opportunities e Threats</i>
TRR	Transportador - Revendedor - Retalhista

UFT	Universidade Federal do Tocantins
UNICA	União da Indústria de Cana-de-Açúcar e Bioenergia
VLC	Vácuo de Leito Compressivo
WoS	<i>Web of Science</i>

SUMÁRIO

1. INTRODUÇÃO	15
1.1 Problema De Pesquisa	18
1.1.1 Hipótese	19
1.1.2 Delimitação Do Escopo	19
1.1.3 Justificativa	19
1.2 Objetivos.....	21
1.2.1 Objetivo Geral	21
1.2.2 Objetivos Específicos	21
2. REFERENCIAL TEÓRICO	22
2.1 Panorama Energético Nacional.....	22
2.2 Uso Estratégico Da Biomassa	28
2.3 Biocombustíveis E Bioenergia	31
2.3.1 Impactos Ambientais E Redução De Emissões De Gee.....	35
2.3.2 Economia Circular Na Cadeia De Produção	36
2.4 Desafios E Oportunidade	37
2.5 Otimização Logística	39
2.6 Métodos De Armazenagem	41
3. METODOLOGIA.....	43
3.1 Revisão Da Literatura	44
3.2 Modelagem Matemática.....	47
3.2.1 Seleção Do Modelo Matemático	47
3.2.2 Definição Das Variáveis	48
3.2.3 Definição Da Função Objetivo	48
3.2.4 Definição Das Restrições	48
3.2.5 Resolução Do Modelo Matemático	49
3.2.6 Validação Do Modelo.....	50
3.2.7 Implementação Da Solução	50
3.3 Modelagem Dos Custos	51
3.3.1 Custo De Construção	52
3.3.2 Custo De Transporte.....	52
4. RESULTADOS	53

4.1	Produção Agrícola No Estado Do Tocantins.....	53
4.2	Utilização De Resíduos Agrícolas No Tocantins	59
4.3	Estimativa De Custos E Geração De Resíduos	61
4.3.1	Custo De Construção	61
4.3.2	Custo De Transporte.....	63
4.4	Resultados Do Modelo De Otimização.....	64
4.5	Modelos Alternativos.....	69
4.6	Discussão	71
5.	CONCLUSÕES.....	73
	REFERÊNCIAS	75
	APÊNDICE 1 – BIBLIOGRAFIA SELECIONADA	84
	APÊNDICE 2 – APLICAÇÕES DE BIOCOMBUSTÍVEIS 2G.....	86
	APÊNDICE 3 – INCENTIVOS FISCAIS E POLÍTICAS PÚBLICAS	88
	ANEXO 1 – PROCESSO DE PRODUÇÃO BIOCOMBUSTÍVEL 2G.....	89
	ANEXO 2 – GERAÇÃO E DESTINAÇÃO DE RESÍDUOS SECOS.....	90
	ANEXO 3 – LOGÍSTICA E INFRAESTRUTURA	95
	ANEXO 4 – PRODUÇÃO DE CULTURAS SELECIONADAS	103

1. INTRODUÇÃO

A Biomassa para fins energéticos pode ser classificada nas categorias energéticas como florestal, agropecuária e ou de resíduos urbanos. Sua categoria florestal é derivada de florestas, sejam elas plantadas (florestas energéticas) ou resultado do desmatamento (EPE, 2022). A própria Norma Brasileira - NBR10004 (2024), define resíduos sólidos como os resíduos que resultam de atividades de origem industrial, doméstica, hospitalar, comercial, agrícola, de serviços e de varrição, além de lodos de sistemas de tratamento de água e equipamentos de controle de poluição.

No decorrer deste estudo, a temática abordada será a geração de biocombustíveis a partir de resíduos agrícolas, com as culturas de soja, cana-de-açúcar, milho e sorgo. Existem outros estudos que abordam os rejeitos urbanos que podem ser sólidos ou líquidos, sendo geralmente encontradas nos aterros sanitários, onde inclusive os gases derivados da combustão podem ser utilizados.

Há informações de estudos e pesquisadores indicando que o mundo enfrenta sérios problemas pela escassez de energia elétrica, em decorrência das constantes demandas globais de energia sendo atendidas por meio do uso de fontes de energia não renováveis, também indicadas como fósseis, observa-se a necessidade de mudança para as fontes renováveis de energia limpa, pois devido a queima excessiva de combustíveis não renováveis conduziram consequências com efeitos desastrosos, como as mudanças climáticas globais (Singh *et al.*, 2022).

Segundo a Empresa Júnior de Engenharia Química do Brasil – PROPEQ (2020), o etanol de segunda geração (E2G) é um biocombustível produzido a partir dos resíduos que são descartados do processo produtivo do etanol de primeira geração. Como principais, destacam-se a palha e o bagaço da cana-de-açúcar. Conforme Figura 1, apresenta a rota tecnológica do E2G. Ressalta-se que também podem ser utilizados resíduos de soja, sorgo ou milho, para a produção de biocombustível 2G.

Figura 1 – Rota tecnológica E2G.



Fonte: PROPEQ (2020).

A empresa de pesquisa também destaca que esse tipo de combustível atua de modo importantíssimo no âmbito da sustentabilidade industrial, pois permite aumentar os ciclos produtivos de culturas agrícolas como a cana-de-açúcar ao utilizar como matéria-prima resíduos do plantio e de outros processos produtivos. Dessa forma, a produção de etanol 2G amplia em até 250% a capacidade produtiva por hectare se comparada à produção do etanol de primeira geração (PROPEQ, 2020).

Segundo a associação União da Indústria de Cana-de-Açúcar e Bioenergia – ÚNICA (2024), no Brasil, a produção de etanol de milho se diferencia dos demais países pela utilização do milho de segunda safra, cultivado após a colheita de soja, garantindo que não haja competição entre a produção de biocombustíveis e alimentos, promovendo um uso eficiente dos recursos agrícolas. Ressalta ainda que na produção convencional de etanol a partir da cana-de-açúcar, apenas um terço da sacarose presente é aproveitado, concentrada principalmente no caldo e no melaço.

A produção de hidrogênio a partir de resíduos agrícolas tem sido amplamente estudada como uma alternativa sustentável para a diversificação das fontes energéticas renováveis. Esses resíduos, geralmente ricos em carboidratos e deficientes em nitrogênio, como os de amido, podem ser aproveitados por meio de tecnologias de bioprocessos adequadas, contribuindo para a sustentabilidade ambiental e econômica do setor energético (ACCIONA, 2024).

Singh *et al.* (2022) destacam que o bagaço da cana-de-açúcar, um material fibroso resultante da extração do suco da cana, apresenta alto teor de celulose, hemicelulose e lignina. Essas características tornam o bagaço um substrato viável para a produção de produtos químicos e combustíveis de valor agregado dentro de uma abordagem de biorrefinaria. No

entanto, a eficiência desse processo depende de métodos de pré-tratamento adequados para a melhor conversão da biomassa em produtos de interesse.

Dentre os métodos indicados para esse processo, a moagem se destaca como uma etapa essencial, sendo aplicada antes da hidrólise enzimática e de outros procedimentos de pré-tratamento, como abordagens químicas ou físico-químicas. A escolha do método de pré-tratamento deve levar em consideração o tipo de resíduo agrícola utilizado, que pode ser classificado como seco ou úmido. Dependendo da biomassa empregada, a moagem pode ser realizada por métodos químicos ou mecânicos, sendo essencial avaliar qual abordagem maximiza a eficiência do processo (Batista *et al.*, 2024).

A valorização total da biomassa residual agrícola tem se tornado uma estratégia fundamental para o desenvolvimento sustentável. Yang *et al.* (2022) ressaltam que a conversão desses resíduos em produtos de maior valor agregado é uma tendência crescente, especialmente no desenvolvimento de nanomateriais, como os pontos de carbono baseados em biomassa (C-dots). Esses nanomateriais apresentam aplicações promissoras em diversas áreas, incluindo análise de poluição ambiental, segurança alimentar, bioimagem, tinta fluorescente e fotocatalise. Além disso, a produção de bioetanol a partir de resíduos agrícolas também é uma alternativa viável. Behl *et al.* (2023) mencionam que materiais descartados, como o talo de milho, podem ser convertidos em bioetanol utilizando enzimas hidrolíticas e coquetéis de levedura fermentadora. Essa solução não apenas contribui para a mitigação da crise energética e a redução da poluição ambiental, mas também possibilita uma fonte adicional de renda para os agricultores, promovendo benefícios sociais e econômicos.

Dessa forma, o aproveitamento dos resíduos agrícolas para a produção de hidrogênio e outros produtos de valor agregado representa uma abordagem sustentável e inovadora. A escolha adequada dos métodos de pré-tratamento e conversão da biomassa é essencial para otimizar os processos e garantir a viabilidade econômica e ambiental dessas tecnologias emergentes.

A biomassa lignocelulósica, que é extraída dos resíduos agrícolas, é rica em polissacarídeos, que podem ser utilizados também na produção de biocombustíveis, de 2G, sem levantar a questão dos alimentos versus combustíveis (Behl *et al.*, 2023).

Investigações recentes mostraram sobre os benefícios energéticos da codigestão de resíduos agrícolas em biorrefinarias de cana-de-açúcar, indicando um aumento significativo para a produção de biogás em comparação com a monodigestão (Volpi *et al.*, 2023). Devido à falta de incentivos de políticas públicas direcionada para esse segmento, específico, pode-se pontuar como um dos principais desafios para a implantação de usinas de biogás no Brasil.

Estudos indicam que para a produção de biocombustíveis 2G, como o bioetanol produzido a partir de resíduos agrícolas, são ecologicamente corretos, econômicos e podem ajudar a atender à demanda de energia enquanto reduzem a poluição ambiental (Tiwari *et al.*, 2022). Assim, como a biomassa lignocelulósica, abundante e de baixo custo, é ideal para a produção de bioetanol (Elsagan *et al.*, 2023).

Tecnologias de conversão de biomassa, como a pirólise, é uma tecnologia que pode converter resíduos agrícolas em bio-óleo e biochar, com aplicações como combustível líquido e sequestro de carbono (Ji, 2024). O tratamento térmico de biomassa permite obter produtos de alta densidade energética, mas a variação durante a decomposição térmica deve ser considerada (Nenciu *et al.*, 2022). Trazendo benefícios tanto nas esferas econômicas como ambientais, pois o uso de resíduos agrícolas para produzir bioenergia pode reduzir a competição entre alimentos e combustíveis e aproveitar recursos que seriam tratados como resíduos (Crotman *et al.*, 2024).

Estudos indicam que a produção de bioenergia apoia a economia e protege o meio ambiente, reduzindo as emissões de carbono (Sarkar *et al.*, 2021). Mas, enfrentam desafios como nas operações de otimização logística de mobilidade de cargas. Nesse processo, há uma série de dificuldade que tendem a interferir diretamente no processo, com pontos de incerteza que elevam os custos, impossibilitando muito a produção de biocombustível de 2G, com altos custos de transporte e a necessidade de otimizar as cadeias de suprimentos (Crotman *et al.*, 2024).

O transporte e o armazenamento de biomassa podem ser inviabilizados por custos adicionais, mas são essenciais para a viabilidade do processo (Nunes *et al.*, 2021), tornando dessa forma, o processo pouco atrativo para os investidores mais conservadores devido a essas incertezas.

1.1 Problema de pesquisa

Até o presente, não há uma solução universalmente aceita para a gestão de resíduos secos agrícolas, com a comunidade acadêmica e os profissionais do setor buscando respostas e melhores práticas que viabilizem esse processo. Neste estudo, portanto, as perguntas de pesquisa que buscam-se responder são:

1. Quais são as formas mais eficientes de armazenamento de resíduos secos agrícolas?

2. Como otimizar a logística de transporte desses resíduos para reduzir custos e impactos ambientais?

1.1.1 Hipótese

As hipóteses de pesquisa formuladas para guiar este estudo são:

1. **Métodos de Armazenagem:** Com a adoção de sistemas de armazenagem específicos para resíduos secos agrícolas para a produção de biocombustível de 2G pode-se aumentar a eficiência no uso do espaço e reduzir os custos operacionais.
2. **Logística Otimizada:** A otimização da logística de transporte de resíduos agrícolas, incluindo mobilidade de cargas e rotas de transporte planejadas, minimizará os impactos ambientais e os custos associados ao transporte.

Estas hipóteses serão avaliadas através de um processo detalhado de pesquisa em artigos, seguindo o método científico. A expectativa é que os resultados deste estudo não apenas contribuam para a solução do problema identificado, mas também ofereçam informações valiosas para a formulação de políticas públicas e práticas agrícolas sustentáveis.

1.1.2 Delimitação do escopo

A pesquisa será limitada às *commodities* soja, milho, cana-de-açúcar e sorgo, devido à sua maior participação na produção do Estado do Tocantins, região à qual se limitará a pesquisa em termos de aplicabilidade, e também à sua maior utilização enquanto resíduos para geração energética.

1.1.3 Justificativa

A crescente demanda por fontes de energia limpa e sustentável tem impulsionado a busca por alternativas renováveis. Nesse contexto, os resíduos agrícolas representam uma

valiosa oportunidade na geração de energia. Segundo o Serviço Nacional de Aprendizagem Rural – SENAR (2024) entre as principais vantagens em seu aproveitamento estão:

Sustentabilidade Ambiental: Os resíduos agrícolas, como palha, cascas, bagaços e restos de culturas, são frequentemente descartados de maneira inadequada; a utilização desses resíduos para geração de energia reduz a pressão sobre aterros sanitários e minimiza a emissão de Gases de Efeito Estufa (GEE); contribuir para a sustentabilidade ambiental é uma responsabilidade de todos os setores, incluindo o agrícola.

Benefícios Econômicos: A geração de energia a partir de resíduos agrícolas pode ser economicamente viável; além de reduzir custos com descarte, a venda de energia excedente pode gerar receita para os produtores; muitas regiões agrícolas têm abundância de resíduos orgânicos; ao otimizar a logística e o armazenamento desses materiais, podemos aproveitar recursos locais para gerar energia, reduzindo a dependência de fontes não renováveis.

Diversificação da Matriz Energética: A diversificação é fundamental para a segurança energética de um país; incluir a biomassa agrícola como fonte de energia diversifica a matriz, tornando-a mais resiliente a flutuações em outras fontes.

Estímulo à Inovação Tecnológica: Projetos de otimização da logística e armazenagem exigem soluções tecnológicas avançadas, o que estimula a pesquisa e o desenvolvimento de novas tecnologias, beneficiando toda a cadeia produtiva.

Impacto Social e Regional: A geração de energia local a partir de resíduos agrícolas pode beneficiar comunidades rurais, criando empregos, desenvolvendo regiões agrícolas e melhorando a qualidade de vida de populações marginalizadas.

Ainda ressalta, sobre a importância da Biomassa na agricultura circular, pois considera o alimento que não será consumido, poderá ser perdido ou desperdiçado, gerando resíduos normalmente descartados, devem ser reutilizados no ciclo da produção, inserido na economia circular pois eliminar o desperdício e a poluição, maximiza a circulação dos produtos e regenera a natureza.

Outro diferencial a ser mencionado é atender o mercado com as exigências para adoção de práticas da agenda ESG, a sigla corresponde a três palavras da língua inglesa, *Environmental, Social and Governance*, que em português traduzimos como ambiental, social e governança, também chamado ASG, conforme SENAR (2024). Ressalta ainda que a agenda ESG vem impulsionando trilhões de dólares em investimentos com impacto social e ambiental positivo, trazendo benefícios e oportunidades para a sociedade e para as empresas de diversos setores, incluindo empresas inseridas na cadeia de valor das atividades do meio rural, como propriedades rurais, agroindústrias e outras indústrias que utilizam produtos do agro como

insumos. Na Figura 2, apresenta-se três pilares da agenda ESG onde o trabalho está inserido, agregando na cadeia de valor.

Figura 2 – Ambiental, Social e Governança.



Fonte: SENAR (2024).

A importância da inserção na agenda está na percepção sobre os riscos financeiros, relacionados à dependência da economia mundial, sobre os recursos naturais como, por exemplo, o clima, a água, o solo e a biodiversidade, os quais estão se tornando mais vulneráveis aos impactos das mudanças climáticas e dos eventos extremos (SENAR, 2024).

1.2 Objetivos

1.2.1 Objetivo geral

O objetivo geral deste estudo é analisar os desafios, estratégias, impactos e perspectivas relacionadas à gestão logística de resíduos agrícolas para a produção de biocombustível de 2G, visando contribuir para o desenvolvimento sustentável de diversos setores que podem ser beneficiados com maior oferta de abastecimento, com vista à implementação de um modelo de solução para o processo logístico operacional.

1.2.2 Objetivos específicos

- I. Identificar as formas mais eficientes de armazenagem de resíduos secos agrícolas direcionados para a produção de biocombustível de 2G;

- II. Analisar a logística de mobilidade de cargas dos resíduos secos agrícolas, visando a redução de custos e impactos ambientais;
- III. Contabilizar os custos associados ao transporte e processamento de resíduos visando a geração de biocombustível de 2G;
- IV. Propor soluções para a melhoria no processo logístico operacional sustentável.

2. REFERENCIAL TEÓRICO

2.1 Panorama Energético Nacional

De acordo com a Empresa de Pesquisas Energéticas (EPE, 2022), de 2013 a 2020, o Brasil investiu cerca de R\$ 2 bilhões em eficiência energética. A Figura 3 apresenta a evolução dos gastos nacionais com Pesquisas, Desenvolvimento e Demonstração (PD&D).

Figura 3 - Evolução dos investimentos em PD&D.

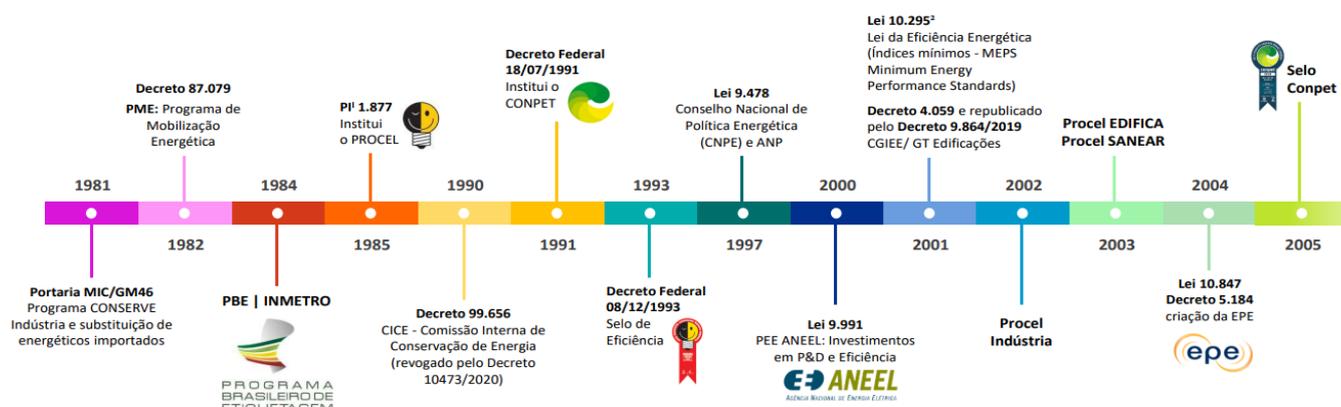


Fonte: EPE (2022).

Na Figura 3 pode-se observar a progressão dos investimentos ao longo do tempo, evidenciando a tendência de crescimento no ano de 2020, com aporte de 329 milhões de reais, ou declínio no ano de 2015, com o valor investido de 174 milhões de reais, destinados a Pesquisa, Desenvolvimento e Demonstração.

Assim como políticas públicas de ajuste para adequação em programas de eficiência energética, nas Figuras 4 e 5, observa-se a linha do tempo da evolução dessas medidas adotadas pelo governo e entidades privadas de 1981 a 2023.

Figura 4 – Linha do tempo das políticas de eficiência energética 1981 a 2005.



Fonte: EPE (2024).

Figura 5 – Linha do tempo das políticas de eficiência energética 2007 a 2023.



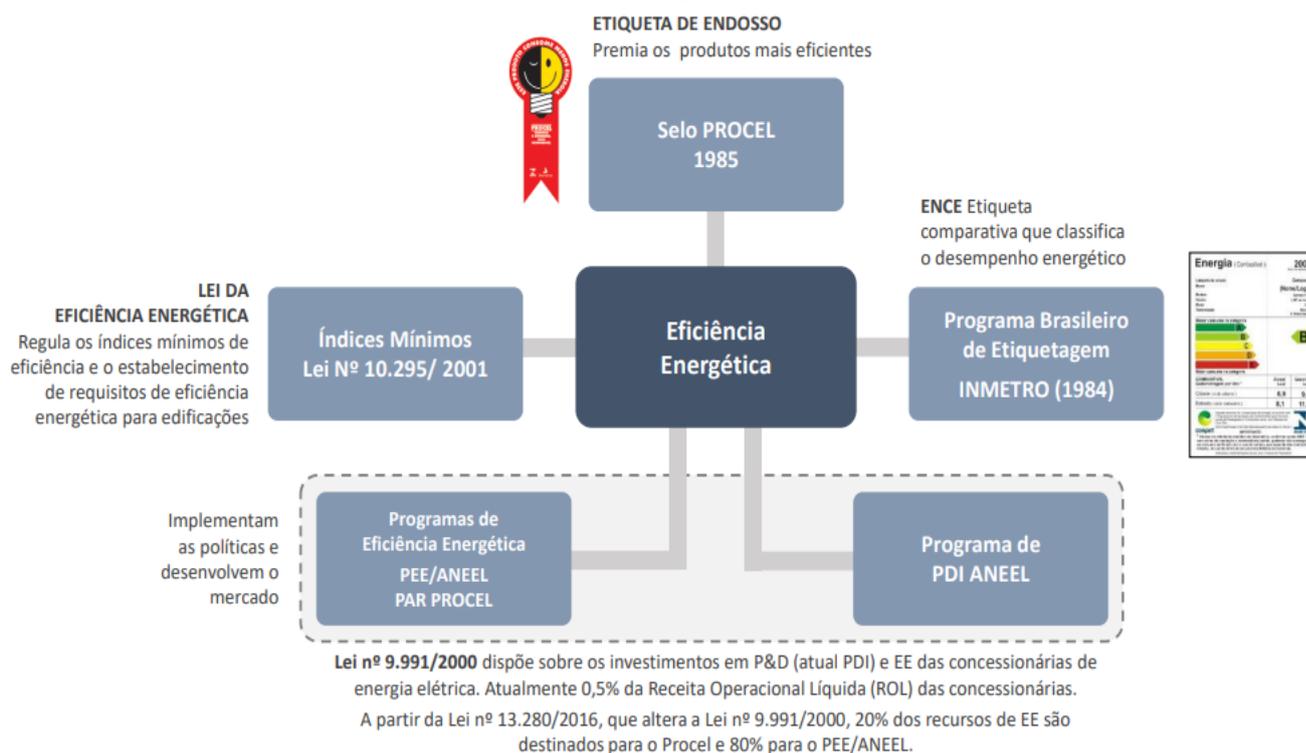
Fonte: EPE (2024).

Conforme mostram as Figuras 4 e 5, o Programa de Eficiência Energética no Brasil, iniciado em 1984 com a criação do Programa Nacional de Conservação de Energia Elétrica (PROCEL), visa promover o uso racional de energia. Desde então, foram implementadas diversas iniciativas, como o Selo PROCEL, lançado em 1993, que certifica produtos energeticamente eficientes. Leis como a 9.991/2000 e 10.295/2001 estabeleceram padrões e metas para eficiência, enquanto programas como o Programa Brasileiro de Etiquetagem (PBE) Edificações de 2009, e o Selo PROCEL Edifica de 2007, focam em edificações públicas e residenciais. Revisões periódicas, como as de 2018 e 2020, aprimoraram essas metas. Em 2023, foi lançado o Portal da Eficiência Energética, ampliando o acesso a informações.

Observa-se que as políticas de integração passam por uma evolução em seus diferentes pilares que sustentam as políticas de eficiência energética no Brasil. Com foco principalmente nas leis, programas e selos de certificação que incentivam a economia de energia tanto em produtos quanto em edificações. Na Figura 6 tem-se uma visão geral da integração dessas políticas.

Com a criação de incentivos que premiam os produtos mais eficientes, fazem com que as empresas busquem produzir com uma visão mais consciente, assim como os consumidores, que direcionam sua escolha para equipamentos que consomem menos energia, tendo início pelo Selo PROCEL, criado em 1985. Sendo a eficiência energética o conceito central, promovido por diversas iniciativas e programas que visam garantir que produtos e edificações consumam menos energia, contribuindo para a sustentabilidade.

Figura 6 – Visão da integração das políticas



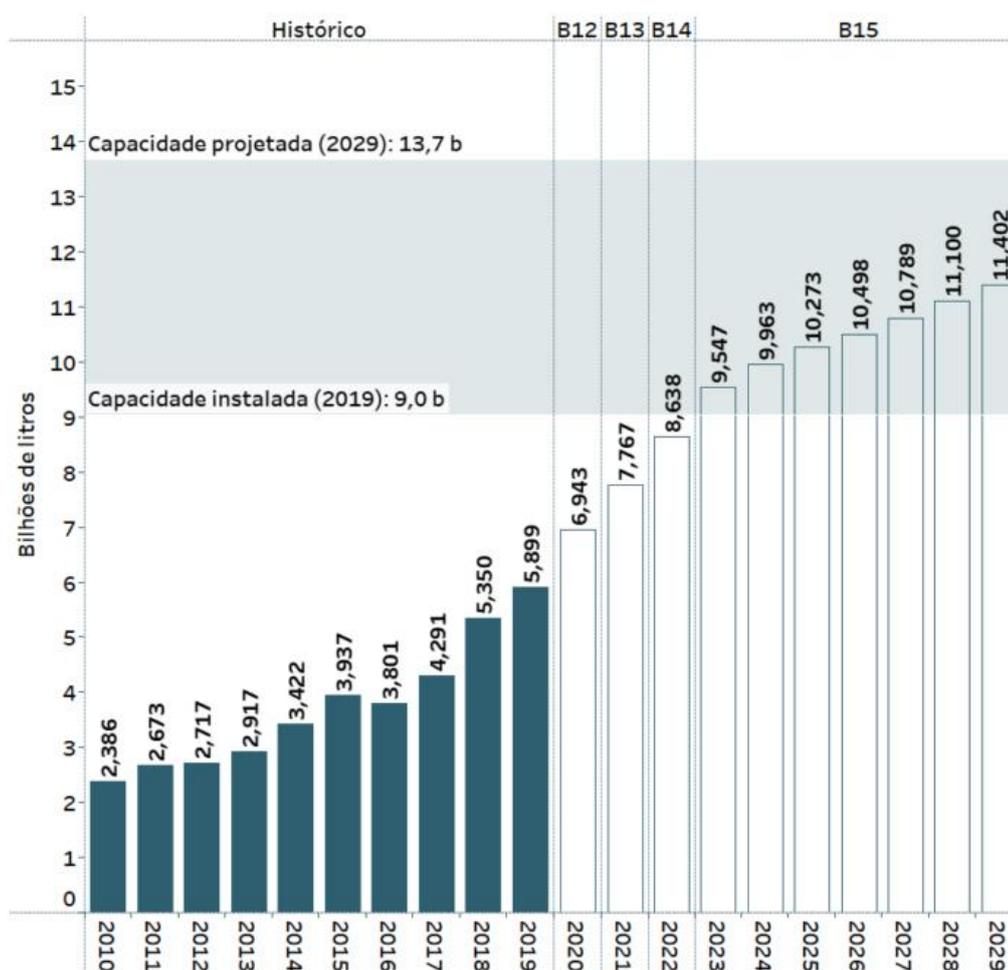
Fonte: EPE (2024).

A Etiqueta Nacional de Conservação de Energia (ENCE), criada pelo Instituto Nacional de Metrologia, Qualidade e Tecnologia (INMETRO), no PBE em 1984, é uma etiqueta comparativa que classifica o desempenho energético dos produtos. Ela fornece informações claras sobre consumo de energia e eficiência. Com criação da Lei nº 10.295/2001, foi estabelecido os índices mínimos obrigatórios de eficiência energética para diversos

equipamentos e edificações, promovendo o uso racional de energia no país. Assim como Programas de Eficiência Energética, responsáveis por implementar políticas de eficiência energética e desenvolver o mercado. O Programa de Eficiência Energética (PEE), administrado pela ANEEL e pelo PROCEL, é o principal mecanismo para a aplicação de políticas energéticas no Brasil. Com o Programa de Pesquisa e Desenvolvimento de Inovação (PDI), da ANEEL investe em soluções inovadoras para aumentar a eficiência energética no setor elétrico, promovendo avanços tecnológicos.

Esse panorama temporal é essencial para identificação dos períodos de maior atividade regulatória e os impactos dessas políticas no setor energético, como o aumento crescente no uso de biodiesel no setor de transporte, conforme apresentado na Figura 7, em bilhões de litros.

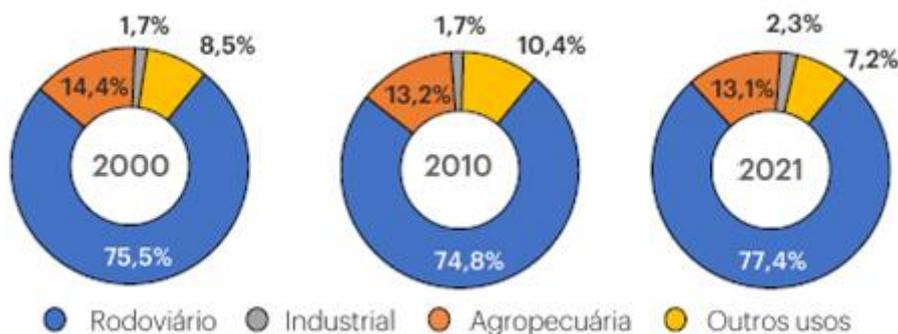
Figura 7 – Consumo de Biodiesel: dados históricos e projeção.



Fonte: EPE (2022).

O histórico de consumo permite uma melhor visualização das tendências relacionadas ao crescimento, identificado principalmente em 2018 e com projeção de crescimento constante até 2029, ou diminuição, em 2016. Isso é um reflexo da redução nos investimentos em PD&D no setor, e são indicativos sobre o uso crescente do biocombustível. A Figura 8 apresenta a divisão dos principais usuários dos produtos de óleo diesel no país.

Figura 8 – Divisão setorial de usuários.



Fonte: EPE (2022).

Essa distribuição dos usuários de energia por setores destaca quais segmentos são mais dependentes de determinadas fontes energéticas. Como podemos observar o setor rodoviário e agropecuário juntos dão responsáveis por mais de 89% dos principais consumidores de óleo diesel no Brasil.

Em outro estudo apresentado em 2022, o Balanço Energético Nacional (BEN), destaca a evolução dos marcos legais destinados ao biodiesel no país, assim como o aumento do consumo no período temporal de 2005 a 2022, conforme Figura 9.

Figura 9 – Evolução marcos legais e consumo biodiesel no Brasil.



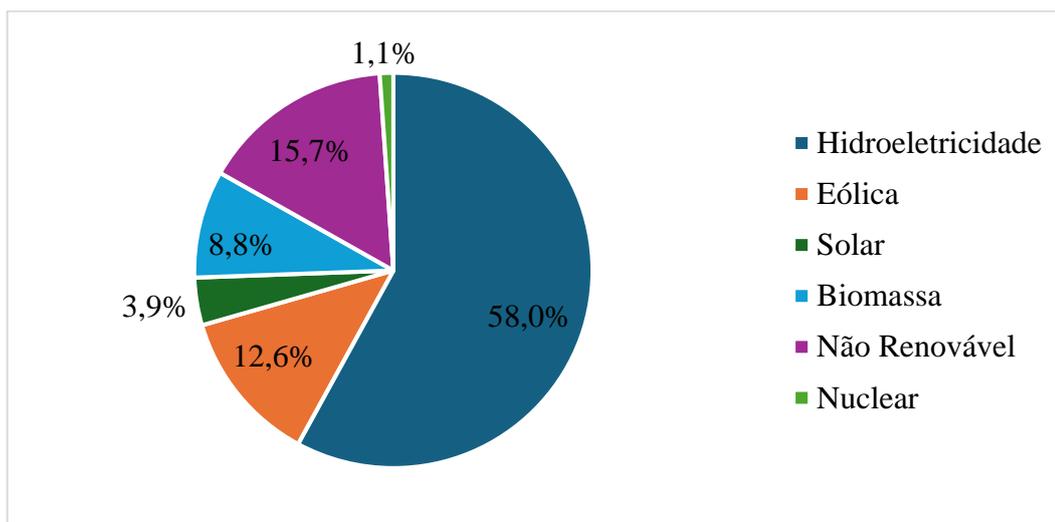
Fonte: BEN (2023).

É possível observar a evolução relacionada entre as mudanças na legislação e o consumo de biodiesel no Brasil. Com a criação de leis obtém-se uma visão integrada de como os marcos regulatórios influenciam na demanda do consumo anual deste combustível renovável. Em 2008, o percentual de consumo anual era em torno de 2 bilhões de litros ($2 \times 10^6 \text{m}^3$), com os incrementos da regulamentação no setor, em comparação a 2022 esse consumo passou para 10 bilhões de litros ($2 \times 10^6 \text{m}^3$).

Em estudo pela EPE, a produção de etanol de híbrido de milho e outras biomassas atingiu 4,4 milhões de m^3 (2,9 milhões de m^3 de etanol hidratado e 1,5 milhão de m^3 de etanol anidro) em 2022, representando 13,6% do total produzido no Brasil (BEN, 2023).

Em dados recentes de 2023, apresentados pelo BEN, a biomassa representa apenas 8,8% da participação de capacidade instalada, conforme apresentado na Figura 10.

Figura 10 – Participação das fontes energéticas na capacidade instalada.



Fonte: BEN (2023).

O gráfico demonstra a contribuição de diferentes fontes energéticas na capacidade de energia instalada total, evidenciando a diversidade das fontes energéticas renováveis, como hidrelétrica, eólica, solar, biomassa, assim como a não renováveis e a nuclear. Percebe-se que o Brasil possui com sua principal matriz energética as energias renováveis, que representam mais de 83% de total geração de energia, com concentração principalmente nas hidrelétricas (58%), em seguida as demais fontes de energia, como as não renováveis (15,7%), seguida pelas renováveis em destaque para eólica (12,6%) e a Biomassa (8,8%).

Embora a participação da biomassa na geração de energia no país ainda seja pequena, o Brasil tem muitas fontes à sua disposição. Com esse grande potencial disponível, as projeções de crescimento são otimistas para os próximos anos.

2.2 Uso Estratégico da Biomassa

Mas como todo processo de geração de energia renovável, o uso da biomassa apresenta os prós e contras. Segundo a EPE (2022), suas principais vantagens e desvantagem são:

Vantagens: a biomassa é uma energia renovável e está disponível. verifica-se o alcance em praticamente todos os locais do mundo; Muito útil nas comunidades isoladas ou em zonas rurais que ainda não estão interligadas a rede de distribuição de energia; É pouco poluente, não emitindo dióxido de carbono (de acordo com o ciclo natural de carbono neutro); É altamente viável e a resposta às variações de procura é elevada; A biomassa apresenta-se como mais econômica comparativamente aos combustíveis fósseis; Por usar resíduos Agropecuários e Florestais, que iriam apenas poluir, ajuda o meio ambiente; Verifica-se uma menor corrosão dos equipamentos (caldeiras, fornos, etc.); a utilização de biomassa permite a limpeza sustentável dos terrenos, principalmente nas comunidades rurais.

Desvantagens: Possui um menor poder calorífico quando comparado com outros combustíveis, ou seja, a energia da biomassa não é tão eficiente como outras fontes de energia; Dificuldades no transporte e no armazenamento de biomassa sólida; centrais de biomassa ocupam geralmente uma grande área, principalmente pelo espaço necessário ao armazenamento da biomassa.

Segundo especialistas da RAIZEN (2023), existem inúmeras vantagens no uso de biocombustíveis 2G, pois há baixa emissão de carbono; reaproveitamento de resíduos; aumento da produtividade; protagonismo e liderança brasileira, ocupando uma posição de destaque na produção do biocombustível com relação a outras nações, o que contribui para o desenvolvimento do país e o coloca como um dos representantes do mercado mundial de E2G.

Em estudos o SENAR (2024) ressalta que no Brasil sua matriz energética prioritariamente é fontes limpas, correspondendo a 82% da geração de energia, enquanto a produção de energia não renovável corresponde a apenas 18% do percentual.

Na Tabela 1, a Empresa de Pesquisa Energética (EPE, 2023) apresenta um comparativo de valores com e sem incentivos, relacionados a cada fonte de energia renovável em uso no Brasil, com destaque apenas nos principais, como caso da Biomassa que está representada apenas na produção de energia através dos resíduos gerados pelo bagaço de cana-de-açúcar e do cavaco de madeira.

Tabela 1 – Custo por fonte geração de energia renovável.

Fonte	Valor de Encargos	Valor de Encargos
	Original	Sem Incentivos
	R\$/kW.ano	R\$/kW.ano
PCH	180,00 a 300,00	270,00 a 400,00
Fotovoltaica	150,00	200,00
Fotovoltaica Flutuante	180,00	230,00
Eólica	180,00	230,00
Eólica <i>Offshore</i>	450,00	500,00
Biomassa (Bagaço de Cana)	190,00	235,00
Biomassa (Cavaco de Madeira)	250,00	300,00
Biogás	300,00	385,00
RSU (Resíduos Sólidos Urbanos)	750,00	845,00

Fonte: EPE (2023).

Na Tabela 1, a comparação dos custos com e sem incentivos fiscais, associados a geração de energia a partir de diversas fontes renováveis, como podemos mencionar pequenas centrais hidrelétricas (PCH), fotovoltaica (terrestre e flutuante), eólica (offshore), biomassa, biogás e resíduos sólidos urbanos, essa análise é crucial para avaliar a competitividade econômica da biomassa em relação a outras fontes de energia renovável no Brasil, especialmente no contexto da produção de biocombustíveis de segunda geração (2G).

Gerando uma perspectiva positiva para o uso da biomassa, representada pelo bagaço de cana-de-açúcar (R\$ 190–235/kW.ano) e cavaco de madeira (R\$ 250–300/kW.ano), apresenta custos competitivos em comparação a outras fontes, como a eólica (R\$ 180–230/kW.ano) e a fotovoltaica (R\$ 150–200/kW.ano). Entretanto, é importante ressaltar que o custo relativamente elevado do cavaco de madeira em comparação ao bagaço de cana-de-açúcar reflete os desafios logísticos e de processamento associados a esse material.

Outro ponto está ligado diretamente ao impacto dos incentivos fiscais, conforme observado na Tabela 1, são cruciais para a viabilidade econômica das fontes de energia renovável, sem esses incentivos, o custo da biomassa aumenta significativamente, tornando-a menos atrativa em relação a opções como as energias solar ou a eólica, reforçando a premissa de políticas públicas para incentivar o uso de resíduos agrícolas na geração de energia.

Diante do apresentado, ao observarmos o custo médio da biomassa (R\$ 190/kW.ano com incentivos) podemos indicar como viável a inserção de projetos regionais no Tocantins,

com ressalva de que a logística seja otimizada para minimizar os custos de transporte e armazenamento. Sem incentivos, o custo aumenta para R\$ 235/kW.ano, o que pode inviabilizar economicamente o projeto em comparação a outras fontes.

Conforme estudo realizado pelo Instituto Acende Brasil, divulgado em 2020, 47,3% da receita bruta operacional das empresas do setor elétrico em 2019 foi destinada ao pagamento de impostos e contas de fundos setoriais, o que correspondem em valores brutos a quantia de R\$ 93,7 bilhões de reais, com a carga tributos correspondendo a 36,5%, e encargos setoriais, 10,8% desse valor (Energia Livre, 2021).

Para análise inicial do potencial de uso de resíduos agrícolas, conforme Chiavenato (2011), a análise *Strengths, Weaknesses, Opportunities e Threats* (SWOT), uma padronização que direciona a melhor tomada de decisão. Conforme Quadro 1, definido para o ambiente Interno as Forças (S) e Fraqueza (W) e o ambiente Externo as Oportunidade (O) e Ameaças (T).

Quadro 1 – Análise SWOT.

Ambiente	SWOT	Descrição	Referências Teóricas
Interno	Forças (S)	<ol style="list-style-type: none"> 1. Utilização de resíduos agrícolas, reduzindo o desperdício. 2. Produção sustentável com menor impacto ambiental. 3. Diversificação das fontes de energia, reduzindo a dependência de combustíveis fósseis. 4. Potencial para criação de novos mercados e empregos. 	Embrapa (2022), Dias de Sá <i>et al.</i> (2022)
Interno	Fraquezas (W)	<ol style="list-style-type: none"> 1. Custos elevados devido a processos de produção complexos. 2. Necessidade de avanços tecnológicos para aumentar a eficiência. 3. Desafios na logística de coleta, transporte e armazenamento da biomassa. 4. Falta de políticas e incentivos governamentais claros. 	Dias de Sá <i>et al.</i> (2022), EPE (2020)
Externo	Oportunidades (O)	<ol style="list-style-type: none"> 1. Crescente demanda por soluções energéticas sustentáveis. 2. Desenvolvimento de novas tecnologias para produção de biocombustíveis. 3. Apoio internacional para projetos de energia limpa. 4. Possibilidade de políticas governamentais favoráveis no futuro. 	Embrapa (2022), EPE (2022)
Externo	Ameaças (T)	<ol style="list-style-type: none"> 1. Competição com outras fontes de energia renovável. 2. Incertezas econômicas e flutuações no mercado de energia. 3. Barreiras regulatórias e burocráticas. 4. Resistência à mudança por parte de indústrias tradicionais de energia. 	Dias de Sá <i>et al.</i> (2020), EPE (2022)

Fonte: a autora (2024).

Este processo de gestão tem por finalidade permitir a entidades alcançar os seus resultados dentro de um conjunto coordenado de diretrizes, para atingir as metas e objetivos explicitados na hierarquia do planejamento do negócio (Chiavenato, 2011).

Singh *et al.* (2022) ponderam que o mundo enfrenta desafios diante da crescente demanda por energia e do uso excessivo de fontes não renováveis, como os combustíveis fósseis, que contribuem significativamente para as mudanças climáticas. Nesse contexto, a utilização da biomassa para a produção de energia limpa torna-se uma alternativa de extrema relevância. Resíduos agrícolas, como o bagaço da cana-de-açúcar e o talo de milho, são recursos valiosos, pois podem ser aproveitados na produção de energia e na fabricação de produtos químicos por meio de biorrefinarias (Singh *et al.*, 2022; Zhiyong *et al.*, 2021). Além de fornecer uma fonte sustentável de energia, a conversão desses resíduos na produção de biocombustíveis de segunda geração também contribui para a destinação adequada dos resíduos agrícolas, reduzindo impactos ambientais.

2.3 Biocombustíveis e Bioenergia

A produção de biocombustíveis é uma solução sustentável para crises energéticas e problemas ambientais (Behl *et al.*, 2023; Tiwari *et al.*, 2022), pois auxilia na redução dos impactos causados como o descarte inadequado, assim como o não uso de recurso alimentares. A transformação de resíduos agrícolas em biocombustíveis 2G pode contribuir na redução da poluição e no desenvolvimento sustentável (Yang *et al.*, 2022; Tagne *et al.*, 2022).

Conforme Figura 11, os biocombustíveis podem ser classificados como de primeira, segunda, terceira e quarta geração, de acordo com o tipo de matéria-prima e o processo produtivo empregados (Agroadvance, 2024).

Figura 11 – Classificação dos biocombustíveis.



Fonte: AGROADVANCE (2024).

Essa categorização dos biocombustíveis, com base em suas características e processos de produção, fornece um panorama das diversas opções disponíveis e suas particularidades. Na Figura 12, os principais produtos utilizados em cada geração de biocombustível.

Figura 12 – Matéria-prima para geração de biocombustível.

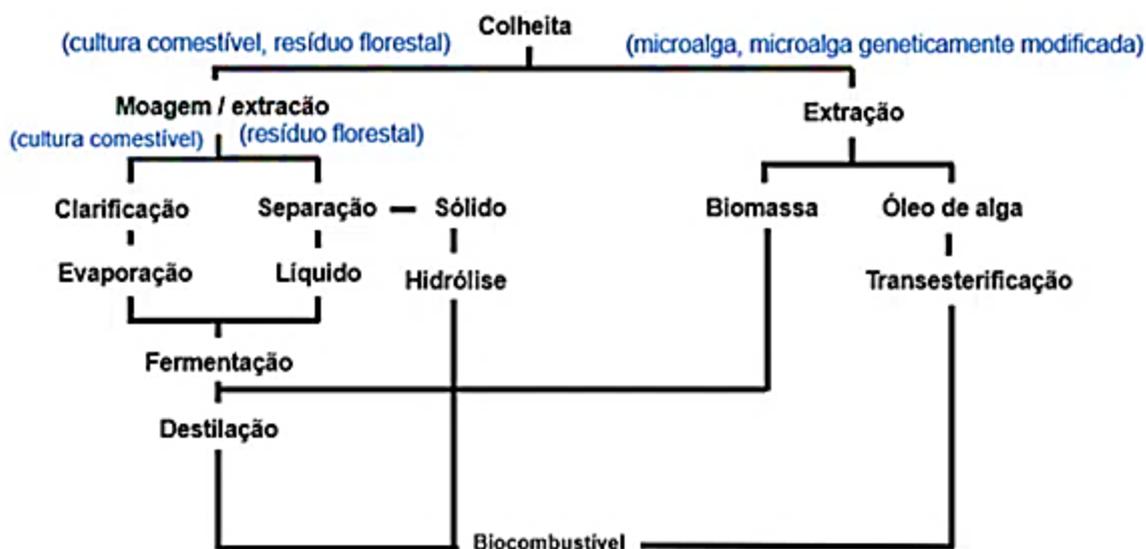


Fonte: AGROADVANCE (2024).

Essa mostra das diferentes matérias-primas utilizadas na produção de biocombustíveis destaca a diversidade de recursos que podem ser empregados na produção de energia renovável, com destaque para a segunda geração (2G), que é produzida a partir de culturas não comestíveis, evidenciando um dos principais pontos de questionamento sobre o uso de culturas comestíveis,

como na produção da primeira geração (1G), para a produção de energia renovável limpa. Na Figura 13 temos a representação do processo de produção de combustíveis de cada geração.

Figura 13 – Processo de produção em cada geração.



Fonte: AGROADVANCE (2024).

Os detalhes relativos aos processos de produção de biocombustíveis, divididos por gerações, no lado esquerdo a primeira (1G) e segunda geração (2G), e no outro extremo as de terceira (3G) e quarta geração (4G), apresentando as tecnologias como moagem e extração, assim como os métodos aplicados em cada etapa de desenvolvimento.

Segundo AGRO Inovadores (2024), o etanol de primeira geração é obtido a partir da cana-de-açúcar, o E2G é obtido a partir dos resíduos gerados na produção do etanol e do açúcar, como palha, folhas, bagaço e cavaco, ricos em biomassa vegetal lignocelulósica (lignina, celulose e hemicelulose). Utilizando esses subprodutos que de outra forma seriam descartados, o etanol 2G se coloca como um dos combustíveis com a menor pegada de carbono do mundo.

As demandas globais de energia têm sido atendidas principalmente por fontes não renováveis. A queima excessiva de combustíveis fósseis causou mudanças climáticas globais com efeitos desastrosos (Singh *et al.*, 2022). A busca por alternativas mais sustentáveis inclui o uso de resíduos sólidos ricos em carboidratos e deficientes em nitrogênio, como resíduos de amido, para a produção de hidrogênio através de tecnologias de bioprocessos adequadas.

Outro exemplo é o talo de milho, um resíduo agrícola rico em celulose, hemicelulose e lignina, que pode ser transformado em produtos de alto valor agregado, incluindo bioetanol, utilizando enzimas hidrolíticas e fermentação por leveduras. Essa abordagem não só ajuda a

mitigar a crise energética e a poluição ambiental, mas também oferece uma fonte extra de renda aos agricultores (Zhiyong *et al.*, 2021; Behl *et al.*, 2023).

A utilização de resíduos agrícolas para produzir gás de síntese, biocombustíveis como bioetanol e biomateriais como pontos de carbono fluorescentes demonstra a versatilidade e o potencial desses resíduos para contribuir para o desenvolvimento sustentável (Schubert, 2023; Yang *et al.*, 2022). No entanto, a falta de incentivos de políticas públicas ainda é um dos principais desafios para a implantação de usinas de biogás no Brasil (Volpi *et al.*, 2023).

O bagaço da cana-de-açúcar, um resíduo abundante da produção de açúcar, possui alto teor de celulose, hemicelulose e lignina, tornando-o um substrato adequado para a produção de produtos químicos e combustíveis de valor agregado via biorrefinaria. Para melhorar a hidrólise enzimática da celulose presente no bagaço, é necessário um pré-tratamento que pode incluir métodos como moagem química ou mecânica (Singh *et al.*, 2022).

A produção de biocombustíveis 2G a partir de biomassa lignocelulósica, como bagaço de cana-de-açúcar e palha de milho, oferece uma solução sustentável para a crise energética sem competir com a produção de alimentos. Esse processo inclui pré-tratamento e hidrólise enzimática para liberar açúcares fermentáveis, necessários para a produção de bioetanol (Ali *et al.*, 2024).

Além disso, a pirólise de resíduos agrícolas pode converter esses materiais em bio-óleo e biochar, contribuindo para o sequestro de carbono e a produção de combustíveis líquidos (Ji, 2024). A utilização de resíduos agrícolas é alinhada com os Objetivos de Desenvolvimento Sustentável (ODS) da ONU, promovendo uma economia circular e soluções de energia acessíveis e limpas (Tunio *et al.*, 2024).

No entanto, desafios logísticos e custos de transporte ainda representam barreiras significativas para a viabilidade econômica do uso de resíduos agrícolas para produção de energia, especialmente em áreas rurais e países em desenvolvimento (Nunes *et al.*, 2021; Crotman *et al.*, 2024).

A integração de tecnologias de bioenergia na agricultura pode proporcionar múltiplos benefícios, como geração de eletricidade, aquecimento, e melhor gestão de resíduos, contribuindo para a sustentabilidade ambiental e econômica (Nguyen *et al.*, 2024).

Estudos como a pirólise de resíduos agrícolas para produzir bio-óleo e biochar oferecem benefícios energéticos e ambientais, como sequestro de carbono (Ji, 2024), temática constante em trabalhos que buscam apresentar estratégias para a redução das emissões de GEE assim como nas mudanças climáticas.

Os resíduos agrícolas são motivos de preocupação por parte das autoridades governamentais, o que promoveu a criação da Política Nacional de Resíduos Sólidos (PNRS) (Lei nº 12.305/2010), que regula a gestão dos resíduos sólidos e dá diretrizes sobre o tema. Uma vez que o Brasil é um grande produtor agrícola, esse cenário crescente de produção exige que os empreendimentos cuidem melhor dos resíduos (SENAR, 2024).

Conforme o Quadro 2, cada cultura possui um rendimento médio para a produção de etanol, dependendo de qual o tratamento a média pode alterar, nessa abordagem usamos como referencial os autores Da Silva (2022); Vedovatto (2021); Nasidi *et al.* (2016); Harinikumar *et al.* (2017); Mesa *et al.* (2011); Berchem *et al.* (2017).

Quadro 2 – Produção média de etanol por cultura.

Cultura	Etanol Médio (L/ton. resíduos secos)	Referências
Soja	107,7	Da Silva (2022); Vedovatto (2021)
Sorgo	200	Nasidi <i>et al.</i> (2016); Harinikumar <i>et al.</i> (2017)
Bagaço de cana-de-açúcar	147,4	Harinikumar <i>et al.</i> (2017); Mesa <i>et al.</i> (2011)
Milho (sabugo)	104	Da Silva (2022); Berchem <i>et al.</i> (2017)
Milho (palha)	52	Berchem <i>et al.</i> (2017)

Fonte: a autora (2024).

No Quadro 2, a média de cálculo para soja, foi utilizada a média dos valores disponíveis (134,0, 128,0, 61,1 L/ton.). Na média de cálculo para o sorgo, foi utilizada a média do intervalo 170-230 L/ton. Para o bagaço de cana, foram considerados todos os valores disponíveis (27,5, 192, 172, 198 L/ton.). Para o milho, separamos sabugo e palha devido à diferença significativa nos valores.

2.3.1 Impactos Ambientais e Redução de Emissões de GEE

Em uma análise comparativa entre biocombustíveis e combustíveis fósseis, foram identificados benefícios ambientais significativos e uma redução nas emissões de GEE associadas ao uso de biocombustíveis (SENAR, 2024). É importante destacar o potencial dos biocombustíveis, especialmente do biodiesel, em mitigar as emissões de GEE em relação aos combustíveis fósseis convencionais. Essa comparação evidencia o papel crucial dos biocombustíveis na promoção de soluções sustentáveis para o setor energético.

Os biocombustíveis, em especial o biodiesel, demonstram um potencial significativo para a redução das emissões de GEE, com uma diminuição de até 78,86% quando produzidos

por processos enzimáticos, em comparação aos combustíveis fósseis convencionais (Pasha *et al.*, 2024). Avaliações do ciclo de vida indicam que os biocombustíveis tendem a ser geralmente neutros em carbono, apresentando emissões inferiores ao longo de suas fases de produção e uso (Jamil *et al.*, 2023).

A utilização de biodiesel como aditivo em motores a diesel tem se mostrado eficaz na redução das emissões de monóxido de carbono e dióxido de carbono, contribuindo para uma melhoria no desempenho ambiental geral (Bhutto *et al.*, 2023). Essa estratégia não apenas minimiza os impactos ambientais associados à produção de biocombustíveis, mas também sugere uma integração econômica viável dos biocombustíveis em sistemas de combustível existentes, especialmente sob metas de redução de GEE que variam de baixas a moderadas (Nordin *et al.*, 2024). A produção de biodiesel enzimático não só reduz as emissões, mas também proporciona economias significativas nos custos de produção, com reduções que variam entre 16,33% e 36,54%, dependendo das matérias-primas utilizadas (Pasha *et al.*, 2024).

Apesar do potencial promissor dos biocombustíveis como alternativa aos combustíveis fósseis, desafios persistem. Entre eles, destacam-se as restrições técnicas na mistura de biocombustíveis e a necessidade de metas de emissão mais rigorosas para maximizar seu impacto na redução das emissões de GEE (Nordin *et al.*, 2024). Isso levanta questões sobre os desafios econômicos associados à produção de biocombustível 2G.

Segundo a União da Indústria de Cana-de-Açúcar e Bioenergia (UNICA, 2024), a biomassa residual, anteriormente considerada desperdício, pode ser aproveitada para a produção de etanol celulósico (E2G) por meio do desenvolvimento de novas tecnologias. Essa inovação torna a produção de biocombustível potencialmente viável, podendo aumentar em até 50% a produção utilizando a mesma área cultivada.

2.3.2 Economia Circular na Cadeia de Produção

A integração dos princípios da economia circular na produção de biocombustíveis, especialmente através da utilização de resíduos secundários como o biochar (biocarvão), oferece uma abordagem sustentável para o gerenciamento de resíduos agrícolas (SENAR, 2024).

O biochar, gerado a partir de diversos materiais orgânicos residuais, não apenas melhora a qualidade do solo, mas também contribui para o sequestro de carbono e a remediação da

poluição. Sua produção e características são derivadas da pirólise de resíduos agrícolas, incluindo subprodutos do moinho de azeitona e outras biomassas (Leiva *et al.*, 2022).

Estudos realizados por Lustosa Filho *et al.* (2024) e Regkouzas *et al.* (2024) destacam que as condições de produção do biochar, como a temperatura de pirólise, influenciam significativamente suas propriedades físico-químicas, incluindo área de superfície e conteúdo de nutrientes.

Quando produzido em alta qualidade, o biochar pode melhorar a estrutura do solo, aumentar a retenção de água e fornecer nutrientes essenciais, resultando em um aumento da produtividade agrícola. A aplicação de biochar no solo não apenas fornece nutrientes, mas também desempenha um papel crucial no sequestro de carbono a longo prazo, mitigando os impactos das mudanças climáticas.

Apesar dos benefícios associados ao uso do biochar, sua viabilidade econômica ainda apresenta desafios significativos. É necessário um maior investimento em pesquisa e desenvolvimento para otimizar os processos de produção e facilitar sua integração no mercado (Sikiru *et al.*, 2024).

O apoio governamental e a adoção de tecnologias inovadoras são fundamentais para aumentar a eficiência na produção de biocombustíveis a partir de resíduos agrícolas, incluindo o uso do biochar como matriz energética (Latiza *et al.*, 2024).

Embora os aspectos promissores do biochar na economia circular sejam evidentes, desafios como a necessidade de estudos sobre viabilidade econômica e avanços tecnológicos na produção em larga escala permanecem cruciais para sua implementação efetiva.

2.4 Desafios e Oportunidade

Apesar de ainda haver ausência de políticas públicas de incentivo à valorização do biogás e biocombustíveis no Brasil, percebe-se que há necessidade de trabalhos mais direcionados nesse sentido para conscientização para o desenvolvimento de uma cadeia de economia circular desses resíduos que são descartados, muitas vezes em locais sem nenhum tipo de estrutura ou fiscalização (Volpi *et al.*, 2023).

Outro ponto que nos remete esse estudo é a necessidade de estudos que possibilitem uma análise de custos mais adequada para esse processo, pois atualmente o transporte de biomassa e biocombustíveis é um desafio devido aos custos e à logística envolvida (Nunes *et al.*, 2021).

A utilização de resíduos agrícolas secos, está de acordo com a necessidade de aproveitamento em todas as etapas da cadeia, pois a conversão de resíduos agrícolas em bioenergia e produtos químicos é alinhada com objetivos de desenvolvimento sustentável e economia circular (Tunio *et al.*, 2024; Vannucchi *et al.*, 2024).

Gerando uma economia circular, cujo conceito é priorizado no sentido do berço ao berço (*cradle to cradle*), onde ao final da vida útil de um produto, este mesmo é utilizado como recurso para desenvolvimento de um novo produto, sem a necessidade de busca por novas matérias primas (SENAR, 2024).

Na armazenagem de Biomassa autores como Singh *et al.* (2022), Tiwari *et al.* (2022) e Ji (2024), apresentam métodos mais eficientes de armazenamento de biomassa, onde incluem a compactação e a preservação adequada para evitar a degradação do material. Assim como tecnologias de pré-tratamento, com destaque para a moagem, além outros métodos que são essenciais para melhorar a eficiência do armazenamento e do processamento da biomassa. O armazenamento e uso de biochar como um subproduto da pirólise de resíduos agrícolas também são abordados.

Os custos na Logística de mobilidade de cargas são desafios que precisam destaque, autores como Nunes *et al.* (2021) e Crotman *et al.* (2024), apresentam a importância de estudos que possam reduzir os custos associados ao transporte de biomassa e biocombustíveis para que haja maior aceitação. Outro ponto apresentado pelos autores Volpi *et al.* (2023) e Tagne *et al.* (2022), é a infraestrutura de transporte, pois há necessidade de que haja uma melhor adequação para que o transporte seja mais eficiente, assim como a otimização de rotas e processos estratégicos para a logística de mobilidade dessas cargas de resíduos agrícolas, possibilitando uma redução de custos.

É de suma importância a participação de políticas públicas e incentivos fiscais, para o desenvolvimento de tecnologias e maior produção dessa fonte de energia renovável, autores com Volpi *et al.* (2023), Behl *et al.* (2023) e Sarkar *et al.* (2021), ressaltam que a análise da ausência e necessidade de políticas públicas para fomentar a valorização do biogás e biocombustíveis, assim como incentivos fiscais para a produção e utilização de biocombustíveis e biomassa, geram desafios que devem ser considerados, pois sem possibilidades de retorno financeiro, implementações e busca por soluções nesse sentido se tornam inviáveis.

Quadro 3 - Desafios e Oportunidades

Desafios	Oportunidades	Referencial Teórico
Altos custos logísticos de transporte e armazenamento.	Desenvolvimento de tecnologias para produção.	Nunes <i>et al.</i> (2021); Crotman <i>et al.</i> (2024)
Ausência de políticas públicas e incentivos fiscais.	Possibilidade de apoio internacional.	Volpi <i>et al.</i> (2023); Sarkar <i>et al.</i> (2021)
Resistência à mudança por indústrias tradicionais.	Crescente demanda por soluções sustentáveis.	Tunio <i>et al.</i> (2024); SENAR (2024)
Barreiras regulatórias e burocráticas.	Criação de novos mercados e empregos.	Behl <i>et al.</i> (2023); Vannucchi <i>et al.</i> (2024)
Complexidade na coleta de biomassa em grandes áreas.	Alinhamento com metas de economia circular.	Tagne <i>et al.</i> (2022); Ji (2024)

Fonte: a autora (2024).

Conforme Tabela 03, apresentamos um breve resumo dos Desafios como altos custos logísticos, falta de incentivos, resistência industrial, barreiras regulatórias e coleta complexa, assim como apresenta um resumo das Oportunidades, com destaque para as novas tecnologias, apoio internacional, demanda sustentável, novos mercados e economia circular. e oportunidade.

2.5 Otimização Logística

Ballou (2017) destaca que o Problema de Roteamento de Veículo (PRV) envolve a determinação da rota mais eficiente para uma frota de veículos que deve atender a um conjunto de clientes distribuídos geograficamente. O principal objetivo é minimizar o custo total de transporte, que abrange fatores como distância percorrida, tempo de viagem e consumo de combustível, enquanto se respeitam restrições como a capacidade dos veículos, janelas de tempo para atendimento e demanda dos clientes.

A literatura apresenta diversos métodos e algoritmos para a resolução do PRV, incluindo abordagens exatas, heurísticas e metaheurísticas. A eficiência na solução deste problema pode levar a uma redução significativa nos custos operacionais e a uma melhoria no nível de serviço oferecido aos clientes (Ballou, 2017).

Por outro lado, o Problema de Localização de Facilidades (PLF) concentra-se em identificar as melhores localizações para a instalação de facilidades, como armazéns, centros de distribuição ou unidades produtivas. O objetivo é otimizar critérios como custo de instalação, custo de transporte e tempo de resposta ao cliente. A solução do PLF é crucial para garantir uma rede logística eficiente e econômica que atenda à demanda de maneira eficaz, considerando restrições como capacidade das facilidades, cobertura da demanda e custos fixos e variáveis

associados às localizações. Métodos matemáticos e computacionais são amplamente utilizados para resolver o PLF, buscando a configuração ideal para a rede de instalações (Ballou, 2017).

Conforme Collicchio *et al.* (2022), o sistema de transportes do Tocantins abrange modalidades rodoviária, aeroviária e ferroviária, sendo o transporte hidroviário considerado um modal potencial ainda não implementado. Os autores enfatizam que a implementação da hidrovía Tocantins-Araguaia será estratégica para reduzir os custos de transporte no escoamento dos produtos agrícolas da região e das áreas Centro-Oeste e Norte do país, representando um grande potencial para reduzir os custos logísticos, pois permite o transporte de grandes volumes com menor custo por tonelada.

Barreto *et al.* (2020) descrevem o modal rodoviário como aquele que utiliza estradas e rodovias para movimentação de cargas e pessoas por meio de veículos automotores, geralmente pesados como caminhões e ônibus. No que diz respeito ao modal aeroviário, os mesmos autores afirmam que este é adequado tanto para passageiros quanto para cargas em distâncias variadas, destacando sua velocidade como uma grande vantagem em relação a outros modais; no entanto, suas desvantagens incluem limitações na carga transportada e altos custos operacionais, além da necessidade de infraestrutura aeroportuária. No modal ferroviário, as cargas são transportadas por trens em estradas de ferro, oferecendo alta eficiência no transporte de grandes volumes ao longo de longas distâncias (Barreto *et al.*, 2020).

No Quadro 4 estão relacionadas as principais vantagens e desvantagens dos modais rodoviário, ferroviário e aeroviário.

Quadro 4 – Resumo comparativo dos modais.

Modal	Vantagens	Desvantagens
Rodoviário	- Flexibilidade de rotas e horários - Capilaridade para acessar áreas remotas - Menor custo inicial	- Baixa capacidade de carga por unidade - Alto custo para longas distâncias - Grande impacto ambiental
Ferroviário	- Alta capacidade de carga - Eficiência energética - Custo menor em longas distâncias	- Baixa flexibilidade - Alto custo de implantação - Necessita de integração com outros modais
Aeroviário	- Maior rapidez - Ideal para produtos de alto valor - Cobertura internacional	- Custo elevado por tonelada - Baixa capacidade de carga - Dependência de infraestrutura aeroportuária

Fonte: Barreto, *et al.* (2020).

O modal rodoviário é amplamente utilizado no Brasil devido à sua flexibilidade e ampla cobertura geográfica, permitindo entregas “porta a porta” com menos burocracia. No entanto, enfrenta altos custos operacionais, menor capacidade de carga e riscos como furtos e acidentes.

O modal ferroviário, por sua vez, é ideal para o transporte de grandes volumes a longas distâncias, oferecendo custos operacionais mais baixos e maior segurança. Contudo, sua

inflexibilidade de rotas e dependência de outros modais para a entrega final limitam sua eficácia. Já o modal aeroviário se destaca pela velocidade, sendo o mais rápido para entregas urgentes e com menor movimentação de carga, o que reduz danos. Entretanto, suas limitações em termos de peso e volume, além dos altos custos, o tornam menos viável para cargas volumosas ou pesadas. Em resumo, a escolha do modal depende das necessidades específicas de cada operação logística, considerando fatores como custo, tempo e tipos de carga (Barreto *et al.*, 2020).

A infraestrutura de transporte e as limitações modais no Estado do Tocantins também exercem uma influência significativa sobre o desenvolvimento econômico e a conectividade regional. A melhoria das redes rodoviárias aumenta a acessibilidade, fator crucial para o crescimento econômico, especialmente em áreas rurais. Isso resulta em um maior acesso a mercados e serviços, o que gera empregos e beneficia particularmente as populações de menor renda (Iimi *et al.*, 2015).

A modernização das estradas tende a reduzir os custos de transporte, promovendo maior velocidade e eficiência na movimentação de mercadorias (Lykova, 2021). Além disso, uma infraestrutura adequada atende a necessidades sociais essenciais, permitindo o acesso a serviços fundamentais como educação e saúde, contribuindo para o desenvolvimento comunitário geral (Iimi *et al.*, 2015).

Entretanto, embora a infraestrutura rodoviária possa impulsionar o crescimento econômico, sua implementação deve ser gerida de forma sustentável para evitar degradação ambiental e deslocamento social (Kuncoro *et al.*, 2024). O desafio crítico para o Estado do Tocantins reside em equilibrar o desenvolvimento econômico com considerações ecológicas e sociais.

2.6 Métodos de Armazenagem

Os métodos de armazenagem são variados e devem ser escolhidos com base nas necessidades específicas de cada operação. Neste trabalho, destacamos a armazenagem do resíduo agrícola da palha, que é um aspecto comum entre as culturas de híbrido de milho, soja, cana-de-açúcar e sorgo.

O Quadro 5 apresenta um resumo de cada uma dessas culturas, abordando as melhores práticas para a armazenagem do resíduo seco. O objetivo é identificar as abordagens mais

eficientes que não apenas preservem o valor do produto, mas também mantenham os custos operacionais em níveis adequados.

Quadro 5 – Resumo das formas de armazenagem de resíduos.

Cultura	Resíduo Seco	Formas Eficientes de Armazenagem	Considerações	Adicionais	Referências
Soja	Palha	- Compactação em fardos	- Necessário controle da umidade para evitar degradação	Controle de Umidade: Fundamental para evitar a degradação dos resíduos, que pode ocorrer por conta de microrganismos quando o material está úmido.	Da Silva, 2022; Vedovatto, 2021.
Sorgo		- Ensilagem	- Reduzir ao máximo a umidade do material	Ensilagem: Técnica em que o material é armazenado com umidade controlada, sendo fermentado em condições anaeróbicas. Útil principalmente para resíduos com alto teor de umidade.	Nasidi <i>et al.</i> , 2016; Harinikumar <i>et al.</i> , 2017.
Milho		- Compactação em fardos	- Monitorar umidade para evitar decomposição	Controle de Umidade: Fundamental para evitar a degradação dos resíduos, que pode ocorrer por conta de microrganismos quando o material está úmido.	Da Silva, 2022; Berchem <i>et al.</i> , 2017.
Cana-de-açúcar		- Briquetagem ou peletização	- Armazenar em local seco para evitar fermentação	Briquetagem ou Peletização: Transformação dos resíduos em briquetes ou pellets compactos, o que facilita o transporte e reduz o volume armazenado.	Harinikumar <i>et al.</i> , 2017; Mesa <i>et al.</i> , 2011.

Fonte: a autora (2024).

De acordo com o Quadro 5, os autores Da Silva (2022), Vedonatto (2021) e Berchem *et al.* (2017) recomendam a armazenagem do resíduo de soja e milho por meio da compactação em fardos, enfatizando a importância do controle de umidade para a preservação da matéria. Para o sorgo, Nasidi *et al.* (2016) e Harinikumar *et al.* (2017) sugerem a técnica de ensilagem, que visa reduzir ao máximo a umidade do material. No que diz respeito à cana-de-açúcar, Harinikumar *et al.* (2017) e Mesa *et al.* (2011) indicam que as melhores práticas de armazenagem são a briquetagem ou peletização.

É relevante destacar que a briquetagem e a peletização estão alinhadas com a Lei 12.305/2010, que estabelece a PNRS, bem como com a Lei 9.605/1998, que trata dos Crimes Ambientais. Além disso, essas práticas seguem as diretrizes da Norma Brasileira NBR 14810/2013 e da NBR ISO 17225-2:2016, que regulamentam o uso desse tipo de suprimento no setor energético, contribuindo para iniciativas como o Programa Nacional de Produção e Uso de Biodiesel (PNPB) e Renovabio, além de estarem contempladas na Resolução Normativa RN482/20 da Agência Nacional de Energia Elétrica (ANEEL).

3. METODOLOGIA

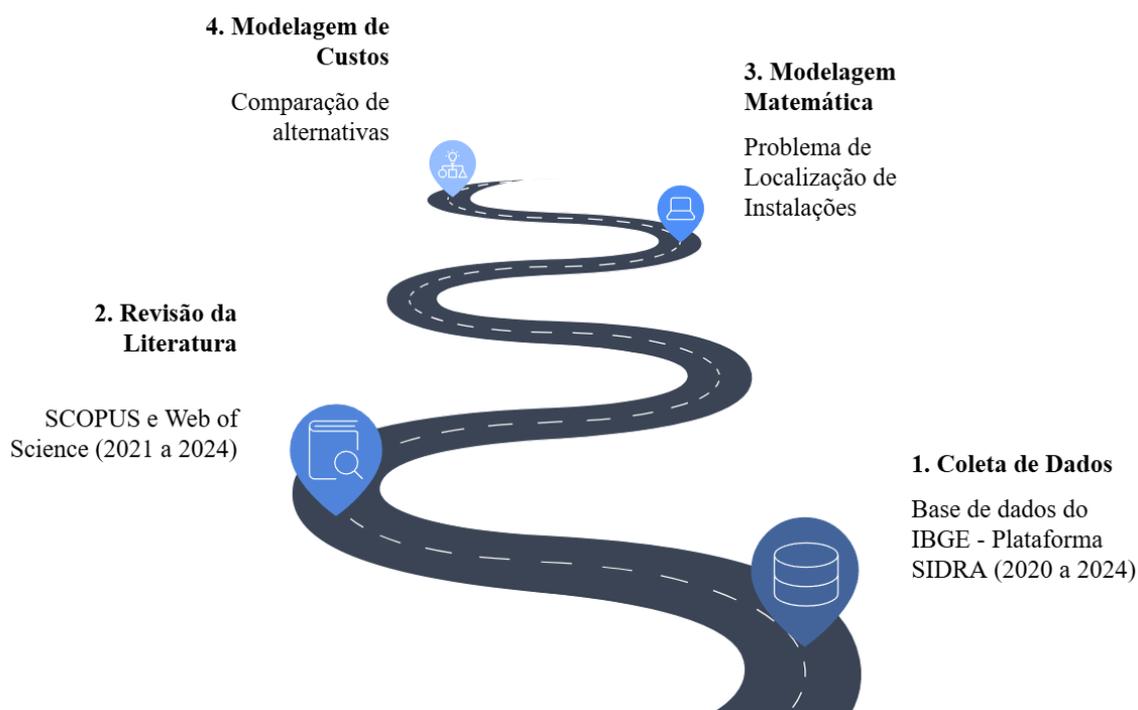
Na primeira etapa da pesquisa, foram coletados dados sobre a produção agrícola do Estado do Tocantins no Sistema IBGE de Recuperação Automática (SIDRA), do Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística (IBGE), abrangendo o período de janeiro de 2020 a julho de 2024. No entanto, para direcionamento do estudo, restringimos a análise ao ano de 2022. A variável considerada foi a quantidade produzida, por município, das culturas selecionadas para o estudo.

Na segunda etapa, realizamos uma revisão da literatura, em artigos científicos e periódicos relacionados ao tema, consultando as bases de dados *SCOPUS* e *Web of Science* (WoS).

Na terceira etapa, conduzimos uma pesquisa quantitativa utilizando modelagem matemática para identificar a melhor localização para armazenagem e processamento de resíduos agrícolas no Estado do Tocantins.

Por fim, na quarta etapa, empregamos modelagem de custos combinada com técnicas analíticas para apoiar a tomada de decisão e identificar alternativas viáveis para a instalação das plantas de E2G. Assim como na revisão da literatura, é fundamental explicitar as técnicas analíticas utilizadas nessa etapa para garantir maior transparência e rigor metodológico. A Figura 14 sintetiza o fluxo metodológico empregado na pesquisa.

Figura 14 – Fluxo metodológico da pesquisa.



Fonte: a autora (2024).

3.1 Revisão da Literatura

Foram coletados artigos e periódicos das bases de dados *SCOPUS* e a *Web of Science* (*WoS*) para obtenção de referenciais teóricos, com restrição documental para artigos e restrição temporal de 2021 a julho de 2024. A Tabela 2 apresenta o quantitativo dos resultados.

Tabela 2 – Busca inicial da literatura.

Base de dados	Resultados
<i>SCOPUS</i>	2.143,00
<i>Web of Science</i>	1.874,00

Fonte: a autora (2024).

Para as buscas foram utilizadas as palavras-chave, em inglês: *agricultural residues*; *agricultural waste*; *biofuel production*; *biomass logistics*; *dry agricultural residues*; *logistics*; *second-generation biofuel*; *second-generation biofuels*; *smart utilization*; *storage optimization*; *storage**; *supply chain*; *waste management*, empregando-se o operador booleano “OR” para incluir todos os documentos relacionados a qualquer um dos termos e em seguida o operador *AND* para restringir a pesquisa na busca de documentos mais específicos.

Em algumas palavras-chave utilizou-se o símbolo de truncamento (*), exercendo função multifuncional para os termos similares, plurais e acentos. Conforme o Quadro 6, os termos das palavras-chaves estão com as traduções em português e espanhol, sendo que somente os termos em inglês foram utilizados nesta pesquisa.

Quadro 6 – Palavras-chave usadas com os operadores booleanos nas bases de dados.

Inglês	Português	Espanhol
<i>agricultural residues</i>	resíduos agrícolas	<i>residuos agrícolas</i>
<i>agricultural waste</i>	resíduos agrícolas	<i>residuos agrícolas</i>
<i>biofuel production</i>	produção de biocombustíveis	<i>producción de biocombustibles</i>
<i>biofuels</i>	biocombustíveis	<i>biocombustibles</i>
<i>biomass</i>	biomassa	<i>biomasa</i>
<i>biomass logistics</i>	logística de biomassa	<i>logística de biomasa</i>
<i>efficiency</i>	eficiência	<i>eficiencia</i>
<i>logistics</i>	logística	<i>logística</i>
<i>logistics optimization</i>	otimização logística	<i>optimización logística</i>
<i>mobility</i>	mobilidade	<i>movilidad</i>
<i>optimization</i>	otimização	<i>mejoramiento</i>
<i>residue management</i>	gestão de resíduos	<i>gestión de residuos</i>
<i>residue utilization</i>	utilização de resíduos	<i>utilización</i>
<i>second-generation biofuels</i>	biocombustíveis de segunda geração	<i>biocombustibles de segunda generación</i>
<i>smart use</i>	uso inteligente	<i>uso inteligente</i>
<i>storage</i>	armazenar	<i>almacenamiento</i>
<i>supply chain</i>	cadeia de mantimentos	<i>cadena de suministro</i>
<i>supply chain optimization</i>	otimização da cadeia de suprimentos	<i>optimización de la cadena de suministro</i>
<i>transportation</i>	transporte	<i>transporte</i>
<i>waste management</i>	gestão de resíduos	<i>gestión de residuos</i>

Fonte: a autora (2024).

Na busca inicial utilizou-se o operador “OR” e não foram inseridas restrições temporais e documentais, obtendo-se os seguintes resultados, conforme apresentado na Tabela 3.

Tabela 3 – Resultados da busca nas bases de dados (operador booleano OR).

Termos de Pesquisa	SCOPUS	Web of Science
<i>agricultural waste OR agricultural residues</i>	32.292	42.508
<i>smart use OR smart utilization OR residue utilization</i>	31.443	92.723
<i>logistics OR logistics optimization OR supply chain</i>	24.336	238.143
<i>storage OR storage optimization</i>	95.427	250.415
<i>mobility OR transportation</i>	1.306.911	203.042
<i>biofuels OR biofuel production OR second-generation biofuels</i>	56.432	17.170
<i>biomass OR biomass logistics</i>	3.276	130.711
<i>waste management OR residue management</i>	251.482	48.076
<i>optimization OR efficiency</i>	5.597.318	990.878
<i>logistics OR supply chain optimization</i>	20.913	208.204

Fonte: a autora (2024)

Posteriormente, restringiu-se a pesquisa com o uso do operador booleano *AND*, permanecendo as mesmas inserções para a base de dados da *SCOPUS*, como acima especificado, para coleta das variações do termo pesquisado. O resultado obtido na busca em cada base de dados encontra-se apresentado na Tabela 4.

Tabela 4 – Resultados da busca nas bases de dados. Operador booleano *AND*..

Termos de Pesquisa	SCOPUS	Web of Science
<i>agricultural waste AND smart utilization</i>	58	56
<i>dry agricultural residues AND storage optimization</i>	1	7
<i>second-generation biofuels AND agricultural waste</i>	79	40
<i>biofuel production AND agricultural residues</i>	505	407
<i>biomass logistics AND agricultural waste</i>	41	52
<i>smart utilization AND dry agricultural residues</i>	0	3
<i>waste management AND agricultural residues</i>	988	868
<i>supply chain AND biofuel production</i>	360	294
<i>second-generation biofuel AND storage*</i>	23	10
<i>logistics AND agricultural residues</i>	88	137

Fonte: a autora (2024).

Nessa fase as palavras-chaves inseridas na pesquisa foram: *agricultural residues*; *agricultural waste*; *biofuel production*; *biomass logistics*; *dry agricultural residues*; *logistics*; *second-generation biofuel*; *second-generation biofuels*; *smart utilization*; *storage optimization*; *storage**; *supply chain*; *waste management*.

Em todos os termos acima descritos, usou-se as restrições documentais, com inserção apenas de artigos publicados a partir de 2021. Após isso, foram excluídos os artigos em duplicidade e não compatíveis com o tema, sendo selecionado o total de 29 artigos para

compõem o direcionamento teórico do estudo. O Quadro 7 apresenta os artigos selecionados para referenciar o estudo e as quantidades para cada pesquisa.

Quadro 7 – Referenciais selecionados.

Palavras-chave	Quantidade	Autores selecionados
<i>agricultural waste AND smart utilization</i>	3	Singh <i>et al.</i> , 2022; Yang <i>et al.</i> , 2022; Zhiyong <i>et al.</i> , 2021.
<i>dry agricultural residues AND storage optimization</i>	1	Schubert, 2023.
<i>second-generation biofuels AND agricultural waste</i>	7	Behl <i>et al.</i> , 2023; Volpi <i>et al.</i> , 2023; Tagne <i>et al.</i> , 2022; Tiwari <i>et al.</i> , 2022; Ali <i>et al.</i> , 2024; Nenciu <i>et al.</i> , 2022; Elsagan <i>et al.</i> , 2023.
<i>biofuel production AND agricultural residues</i>	3	Becerra-Pérez <i>et al.</i> , 2022; Ji, 2024; Tunio <i>et al.</i> , 2024.
<i>biomass logistics AND agricultural waste</i>	4	Nunes <i>et al.</i> , 2021; Crotman <i>et al.</i> , 2024; Nguyen <i>et al.</i> , 2024; Yetilmezsoy <i>et al.</i> , 2022.
<i>smart utilization AND dry agricultural residues</i>	1	Tuure <i>et al.</i> , 2021.
<i>waste management AND agricultural residues</i>	2	Vannucchi <i>et al.</i> , 2024; Doni <i>et al.</i> , 2024.
<i>supply chain AND biofuel production</i>	3	Sarkar <i>et al.</i> , 2021; Sarkar <i>et al.</i> , 2024; Løvenskiold <i>et al.</i> , 2022.
<i>second-generation biofuel AND storage*</i>	2	Taheri <i>et al.</i> , 2024; Jaspers <i>et al.</i> , 2021.
<i>logistics AND agricultural residues</i>	3	Jusakulvijit <i>et al.</i> , 2022; Ertuğrul <i>et al.</i> , 2024; Han <i>et al.</i> , 2021.

Fonte: a autora (2024).

No Quadro 8, apresenta-se o resumo do processo de seleção do material bibliográfico utilizado para seleção dos artigos nesta revisão, desde a busca inicial, sem restrição temporal ou documental, até o resultado final, de artigos científicos relacionados à temática do estudo.

Quadro 8 – Processo de seleção de material bibliográfico nas bases de dados.

Etapa	Ação	Crítérios de Seleção	Resultados
1	Buscas Iniciais	Palavras-chave: <i>agricultural residues; agricultural waste; biofuel production; biomass logistics; dry agricultural residues; logistics; second-generation biofuel; second-generation biofuels; smart utilization; storage optimization; storage*; supply chain; waste management</i> . Base de dados: SCOPUS e WoS	4.017
2	Restrição Temporal	Inclusão de documentos no período de 2021 a julho 2024.	4.017
3	Restrição tipo de documento	Excluir os documentos que não são artigos.	4.017
4	Análise do Resumo	Selecionar artigos relacionados ao objetivo da pesquisa.	50
5	Seleção Final	Incluir apenas artigos com informações sobre a temática deste estudo. Excluindo-se artigos que abordam outros tipos de direcionamentos.	29

Fonte: a autora (2024).

Ressalta-se que o quantitativo de artigos selecionado foi baseado na temática e no direcionamento específico deste trabalho. Embora outros autores e documentos se enquadrem no escopo geral da pesquisa, a escolha foi feita considerando a relevância direta ao tema abordado neste estudo.

3.2 Modelagem Matemática

Para otimizar a logística de transporte e armazenamento de resíduos agrícolas destinados à produção de biocombustíveis 2G, a literatura foca em dois problemas principais: o Problema de Roteamento de Veículos (PRV) e o Problema de Localização de Instalações (PLF). Esses problemas são cruciais para reduzir custos e melhorar a eficiência logística no setor de biocombustíveis 2G, abordando a necessidade de transporte eficiente e localização estratégica de unidades de armazenamento e processamento (Ballou, 2017; Franco e Steiner, 2022).

A integração desses algoritmos não apenas reduz os custos, mas também melhora a eficiência energética e a sustentabilidade do processo logístico, possibilitando simular diferentes cenários e ajustar periodicamente o modelo com novos dados de produção e demanda. A aplicação dessas técnicas contribui ainda para a redução das emissões de carbono e do consumo de combustível, promovendo uma cadeia logística mais sustentável e economicamente viável para a produção de biocombustíveis 2G (SENAR, 2024).

Segundo Ballou (2017), o modelo matemático de localização de instalações permite determinar a localização ótima de instalações produtivas e a alocação do transporte a essas instalações de maneira eficiente, minimizando os custos e garantindo que todas as demandas sejam atendidas dentro das capacidades dos armazéns. O PRV, por sua vez, é utilizado em cenários onde a capacidade dos veículos de transporte seja suficiente para atender vários clientes ao mesmo tempo, o que não ocorre na gestão de resíduos aqui abordada.

3.2.1 Seleção do modelo matemático

Nessa etapa o objetivo foi definir o problema a ser tratado e selecionar o modelo matemático mais adequado à sua solução. No caso específico desta pesquisa, qual a localização de municípios para a instalação de plantas de processamento de etanol 2G, verificando a mobilidade para o transporte de maneira eficiente dos resíduos agrícolas gerados no Estado,

minimizando os custos operacionais e garantindo que todas as demandas sejam devidamente atendidas dentro da capacidade média de produção estimada (Franco e Steiner, 2022).

3.2.2 Definição das Variáveis

O modelo de localização de instalações capacitado é composto pelos seguintes parâmetros:

d_{ij} : a distância da instalação i para o cliente j .

D_j : demanda do cliente j .

Q_i : capacidade da instalação i .

C_i : custo de construção da instalação i .

Além das variáveis de decisão:

x_{ij} : quantidade transportada da instalação i para o cliente j .

y_i : variável binária que assume o valor 1 caso a instalação i seja aberta.

3.2.3 Definição da função Objetivo

A função objetivo minimiza o custo de transporte e construção das instalações a serem abertas, considerando as alocações necessárias para atendimento da demanda, conforme apresentado na Equação 1.

$$\min Z = \sum_{i=1}^m y_i C_i + \sum_{i=1}^m \sum_{j=1}^n d_{ij} x_{ij} \quad (1)$$

3.2.4 Definição das restrições

As restrições dizem respeito à quantidade transportada x_{ij} ser menor ou igual à capacidade Q_i do armazém y_i (Equação 2); a quantidade transportada x_{ij} ser igual à demanda

D_j (Equação 3); a quantidade de armazéns y_i construída ser igual ao valor definido pelo usuário (Equação 4); e as variáveis de decisão serem binárias (Equação 5) e inteiras (Equação 6).

$$\sum_{j=1}^n x_{ij} \leq Q_i y_i \quad \forall i = 1, \dots, m \quad (2)$$

$$\sum_{i=1}^m x_{ij} = D_j \quad \forall j = 1, \dots, n \quad (3)$$

$$\sum_{i=1}^m y_i = A \quad (4)$$

$$y_i \in \{0,1\} \quad \forall i = 1, \dots, m \quad (5)$$

$$x_{ij} \geq 0 \quad \forall i = 1, \dots, m; \forall j = 1, \dots, n \quad (6)$$

As distâncias utilizadas serão as rodoviárias entre os municípios de origem e os de destino e os custos considerados serão proporcionais à produção de cada município.

Cada uma das restrições envolve uma decisão gerencial (Franco e Steiner, 2022):

- **Capacidade:** A quantidade total alocada a uma instalação não pode exceder sua capacidade;
- **Atendimento da Demanda:** A demanda de cada cliente deve ser completamente atendida;
- **Número de instalações:** O número de instalações a serem abertas é definida pelo pesquisador/tomador de decisão;
- **Não-Negatividade:** As quantidades transportadas devem ser positivas.

3.2.5 Resolução do Modelo Matemático

Para a implementação do modelo matemático foi utilizado o software LINGO 21, que é amplamente reconhecido na modelagem e resolução de problemas de otimização. Este programa abrange diversas abordagens, incluindo programação linear (PL), programação não linear (PNL) e programação inteira (PI). O LINGO 21 oferece um ambiente integrado que facilita a construção e edição de modelos de otimização, além de contar com *solvers* rápidos e eficientes para diferentes tipos de problemas (Lindo Systems, 2024).

As simulações foram realizadas em um computador pessoal composto de processador Intel Core i7-2600 de 3,40 GHz, com 16 GB de memória RAM e sistema operacional Windows 10, arquitetura de 64 bits.

3.2.6 Validação do Modelo

As soluções obtidas foram validadas seguindo os parâmetros especificados no modelo matemático, para garantir que todas as restrições foram devidamente respeitadas e que o custo total foi minimizado corretamente. Além disso, foi analisada a continuidade e compacidade dos agrupamentos criados, requisitos básicos de um modelo ótimo de alocação-localização (Franco e Steiner, 2022).

3.2.7 Implementação da solução

Após a validação, o modelo matemático foi implementado em cenários teóricos, ajustando os parâmetros conforme necessário para refletir as condições específicas de cada situação. No Modelo 1, foi utilizado o modelo matemático de localização de instalações para essa finalidade, analisamos a implantação nas localidades ótimas do Estado do Tocantins, considerando os resíduos gerados pelas culturas de soja, sorgo, milho e cana-de-açúcar.

Para o Modelo 2, incluímos a análise dos municípios mais próximos por via terrestre dos selecionados no Modelo 1, servindo como uma alternativa. O Quadro 9 apresenta as etapas seguidas.

Quadro 9 – Resumo das Etapas Realizadas

Etapa	Ação	Descrição
3.2.1	Seleção do modelo	Seleção do modelo de localização de instalações
3.2.2	Definição das variáveis	Seleção das variáveis a serem otimizadas pelo modelo matemático
3.2.3	Definição da função objetivo	Formulação da função objetivo que visa minimizar os custos de transporte e construção
3.2.4	Definição das restrições	Estabelecimento das restrições do modelo
3.2.5	Resolução do modelo matemático	Aplicação de técnicas de otimização para resolver o modelo.
3.2.6	Validação do modelo	Validação da solução e análise de sensibilidade para confirmar a robustez do modelo
3.2.7	Implementação da solução	Preparação para a implementação do modelo em situações reais

Fonte: a autora (2024).

A sequência apresentada permite o rigor metodológico necessário à correta aplicação do modelo a um problema real, garantindo que a solução proposta seja efetiva e eficiente, tanto do ponto de vista econômico como socioambiental. De acordo com estudos como os de Smith *et al.* (2020), metodologias estruturadas para modelagem logística de resíduos agrícolas aumentam a eficiência da cadeia produtiva e reduzem impactos ambientais. Exemplos práticos podem ser observados em projetos de bioenergia no Brasil e na União Europeia, onde o planejamento logístico e a otimização do armazenamento reduziram os custos operacionais e aumentaram a viabilidade econômica da produção de biocombustíveis.

3.3 Modelagem dos custos

A abordagem de modelagem de custo ideal para os custos fixos em projetos de construção de usinas de etanol 2G envolve a aplicação de técnicas analíticas avançadas. Essa abordagem multifacetada assegura uma estimativa precisa dos custos e uma alocação eficaz de recursos, fatores essenciais para a viabilidade do projeto. Embora essa metodologia ofereça uma estrutura robusta para a modelagem de custos, é crucial considerar a natureza dinâmica das condições de mercado e os avanços tecnológicos que podem impactar as estruturas de custos fixos no futuro (Franco e Steiner, 2022).

3.3.1 Custo de construção

Para a modelagem dos custos fixos de construção utilizaram-se dados da literatura, os quais foram generalizados a partir de um modelo de regressão não linear polinomial de segunda ordem. Para o custo de construção de usinas de etanol 2G utilizou-se como parâmetro de entrada a capacidade de processamento de resíduos anual da instalação. Sendo assim, na metodologia, considerou-se uma abordagem baseada na extrapolação de custos de projetos já existentes, adaptando-os ao contexto estudado. Foram analisadas referências que abordam diferentes escalas de plantas industriais e seus respectivos custos de implantação, levando em conta fatores como tecnologia empregada, infraestrutura necessária e custos operacionais estimados (Franco e Steiner, 2022).

3.3.2 Custo de transporte

O custo de transporte foi modelado com base em dados da literatura, considerando estudos como os de Silva *et al.* (2019) e Oliveira e Santos (2020), bem como a construção de um modelo próprio de custo variável, tendo como variáveis de entrada a distância rodoviária transportada, a quantidade de resíduos transportada, a capacidade do veículo de carga e o custo do transporte por quilômetro rodado (R\$ 10,00 sobre custos por km).

Além disso, para a estimativa do quantitativo de resíduos a ser transportado anualmente, utilizou-se dados da literatura referentes à taxa de geração de resíduos por cultura e a produção de cada uma das culturas selecionadas, que foram a cana-de-açúcar, o milho, a soja e o arroz. Optou-se por utilizar apenas 50% do resíduo disponível, uma vez que o restante é utilizado para adubação do solo (Farinelli, Mussi e Mancini, 2017).

4. RESULTADOS

4.1 Produção Agrícola no Estado do Tocantins

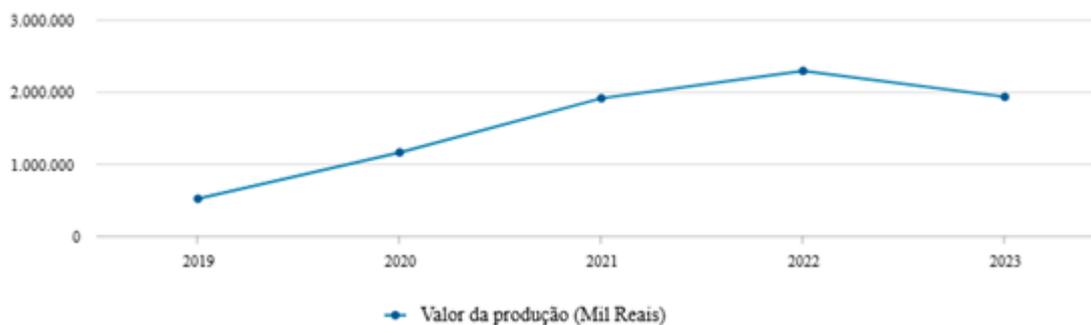
O estado do Tocantins possui produção significativa na cultura do milho, assim como a soja, distribuída principalmente nas regiões norte e central, também concentrada nas regiões centro-sul e sudoeste. Como os principais destaques para os dados do Estado do Tocantins, com área plantada de 422.261 hectares, área colhida de 421.847 hectares, quantidade produzida de 1.936.933 toneladas e um rendimento médio de aproximadamente 4.592 kg/ha, sendo o município de Esperantina o que apresentou um melhor rendimento médio de 8.000 kg/ha. O valor da produção ficou em R\$ 2.305.802,00.

Os municípios com maior área plantada são: Campos Lindos, com área plantada 58.612 hectares, produção média 354.944 toneladas, obtendo rendimento médio de 6.056 kg/ha, gerando um valor desta produção de R\$ 436.160.000; Caseara, com área plantada 24.000 hectares, gerando uma produção de 108.000 toneladas, com rendimento médio de aproximadamente 4.500 kg/ha, obtendo-se o valor da produção R\$ 126.000.000; e Araguacema, com área plantada 22.150 hectares, produção de 106.061 toneladas, rendimento médio de 4.788 kg/ha e o valor da produção R\$ 123.738.000.

Na Figura 15 observa-se o histórico crescente do valor em milhares de reais obtido através da produção dos híbridos de milho, somente em grãos.

Figura 15 – Histórico de produção de milho no Tocantins.

Série histórica (17) - Milho em grão - Valor da produção



Esses dados são cruciais para entender a distribuição da produção agrícola de milho no estado e para identificar os principais municípios e regiões produtivas. Refletem apenas os

quantitativos da produção de híbrido de milho em grão, considerada uma lavoura temporária, pois é plantada e colhida no mesmo ano agrícola, ou seja, seu ciclo de vida, desde o plantio até a colheita, é completado em um período de menos de um ano.

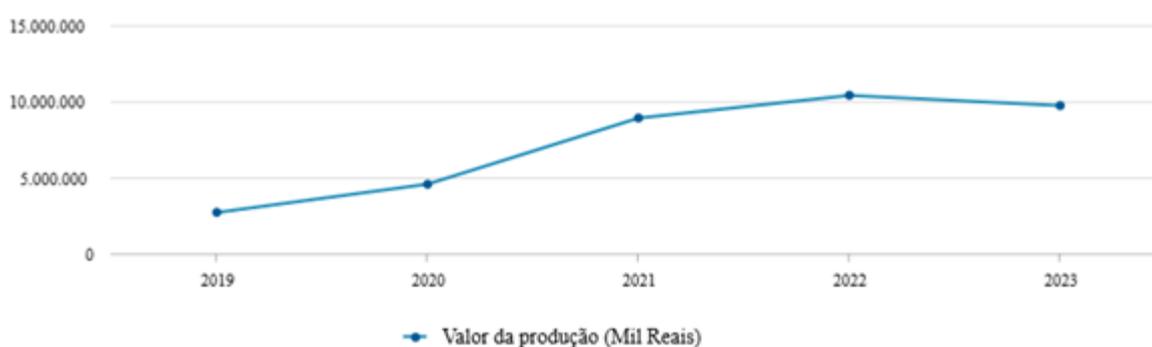
A soja plantada no estado totaliza 1.167.122 hectares plantados e 1.166.489 hectares colhidos. Com a quantidade total produzida de 3.785.386 toneladas, somente no ano de 2022. O estado do Tocantins apresentou um rendimento médio de 3.245 kg/ha, sendo o município de Paraíso do Tocantins o que apresentou o melhor rendimento médio de 3.900 kg/ha. Para o valor da produção total no Tocantins foi de R\$ 10.495.855.000.

Os municípios com maior área plantada são Campos Lindos, com área plantada 101.500 hectares, produção média 390.948 toneladas, obtendo rendimento médio de 3.852 kg/ha, gerando um valor desta produção de R\$ 1.151.909.000; Peixe, com área plantada 58.109 hectares, gerando uma produção de 170.049 toneladas, com rendimento médio de aproximadamente 2.926 kg/ha, obtendo-se o valor da produção R\$ 459.194.000; e Mateiros, com área plantada 51.500 hectares, produção de 157.590 toneladas, rendimento médio de 3.060 kg/ha e o valor da produção R\$ 449.525.000.

Na Figura 16 observa-se o histórico crescente dos valores gerados na produção de soja, em milhares de reais.

Figura 16 – Histórico de produção de soja no Tocantins.

Série histórica (17) - Soja - Valor da produção



Fonte: IBGE (2024).

É possível perceber o crescimento de mais de 100% entre os anos de 2018 e 2022, sendo a soja o principal produto agrícola do estado e principal produto de exportação. Esse potencial poderá ser aproveitado na geração de biomassa para produção de energia ou outros subprodutos.

A produção de cana-de-açúcar está concentrada, principalmente nas regiões centro-norte e nordeste do estado, em comparação com a produção do sorgo que atualmente é

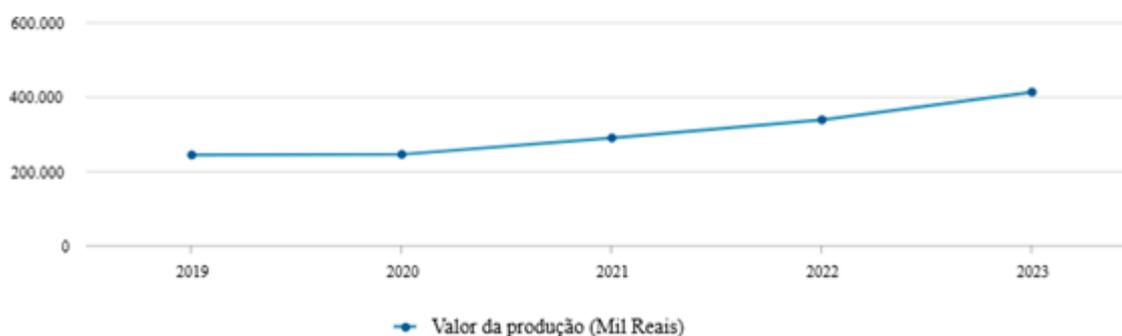
considerado um importante cultivar, principalmente no processo de rotação de plantios e também como forragem, sendo presente em quase todo o estado do Tocantins.

Com destaques para a produção geral de cana-de-açúcar, que apresentou uma área plantada de 29.918 hectares, gerando uma produção de 2.534.723 toneladas, com rendimento médio de 84.722 kg/ha, o valor obtido nessa produção ficou em R\$341.337.000,00. A produção do estado se concentra em Pedro Afonso, com 28.500 hectares plantados e 2.451.000 toneladas produzidas, ou seja, 96,7% da produção do estado. O rendimento médio no município é de 86.000 kg/ha, gerando um valor da produção de R\$318.630.000,00.

A evolução do valor da produção da cana-de-açúcar no Tocantins é apresentada na Figura 17, em milhares de reais.

Figura 17 – Histórico de produção de cana-de-açúcar no Tocantins.

Série histórica (17) - Cana-de-açúcar - Valor da produção



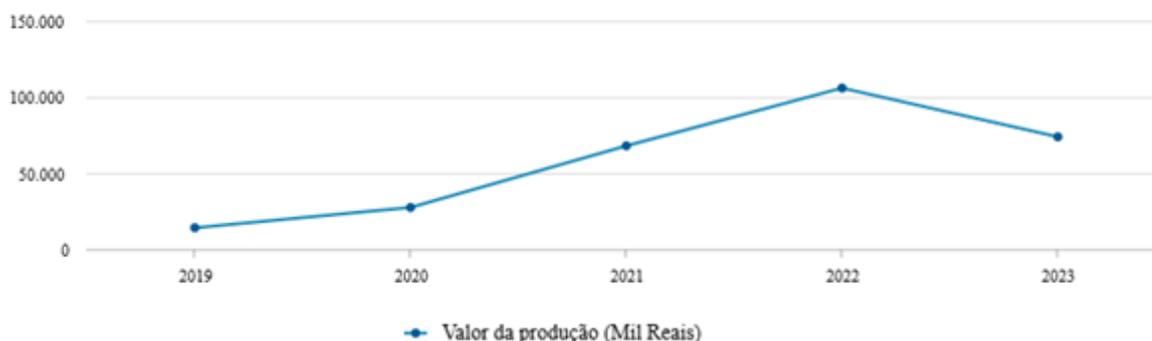
Fonte: IBGE (2024).

A cana-de-açúcar também apresentou evolução constante ao longo do período analisado, embora menor que a do milho e soja, por estar concentrada em um único município.

A produção de sorgo em grãos cultivados em diversas regiões do Tocantins, o estado apresenta uma área plantada de 55.490 hectares e quantidade produzida de 118.116 toneladas, com rendimento médio de 2.129 kg/ha e a geração de valor da produção de R\$106.932.000,00.

Alguns municípios são destaque como Alvorada, com 8.750 hectares plantados, 19.555 toneladas produzidas e rendimento médio de 2.235 kg/ha, com o valor da produção R\$ 17.609.000, seguido por Bom Jesus do Tocantins, com 4.700 hectares plantados e 7.520 toneladas produzidas, apresentando um rendimento médio de 1.600 kg/ha e valor da produção de R\$ 7.520.000. O maior rendimento médio registrado foi em Cariri do Tocantins, com 3.538 kg/ha. Na Figura 18 observa-se o histórico dos valores gerado na produção de sorgo, somente os grãos, em milhares de reais.

Figura 18 – Histórico da produção de sorgo no Tocantins.

Série histórica (17) - Sorgo - Valor da produção

Fonte: IBGE (2024).

A produção de sorgo em Tocantins também cresceu consideravelmente ao longo do período analisado, conforme dados apresentados, contribuindo significativamente para o valor total da produção do estado. O valor da produção e os rendimentos médios mostram a importância econômica da cultura do sorgo para a região, com destaque para os municípios produtores mencionados.

May *et al.* (2014) ponderam que é o sorgo sacarino que mais se adapta ao setor sucroalcooleiro, principalmente quando cultivado no verão, pois fornece matéria-prima de qualidade para abastecer o mercado na entressafra da cana-de-açúcar, reduzindo a instabilidade do mercado de etanol. Complementam ainda que o bagaço do sorgo sacarino apresenta poder calorífico equivalente ao bagaço de cana, sendo bastante eficiente na cogeração de energia.

A Tabela 5 apresenta o resumo das informações referente aos dados gerais do estado do Tocantins, nas respectivas culturas estudadas, para o ano de 2023, com as áreas plantadas, quantidade produzida, rendimento médio e os valores de produção.

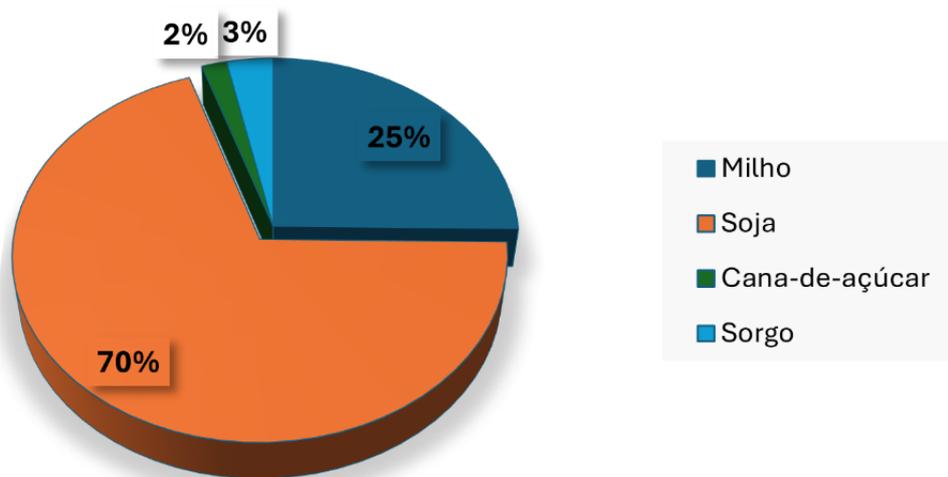
Tabela 5 – Dados Gerais de produção no Tocantins.

Cultura	Área Plantada (ha)	Área Colhida (ha)	Quantidade Produzida (ton.)	Rendimento Médio (kg/ha)	Valor da Produção (mil R\$)
Milho	422.261	421.847	1.936.933	4.592	2.305.802
Soja	1.167.122	1.166.489	3.785.386	3.244	10.495.855
Cana-de-açúcar	29.918	29.918	2.534.723	84.722	341.337
Sorgo	55.490	55.490	118.116	2.129	106.932

Fonte: IBGE (2024).

Os maiores valores são gerados pelas culturas de soja e milho que, juntos, representam 96,6% da produção do estado do Tocantins, na área plantada por hectare corresponde a 94,9%, conforme apresentado na Figura 19.

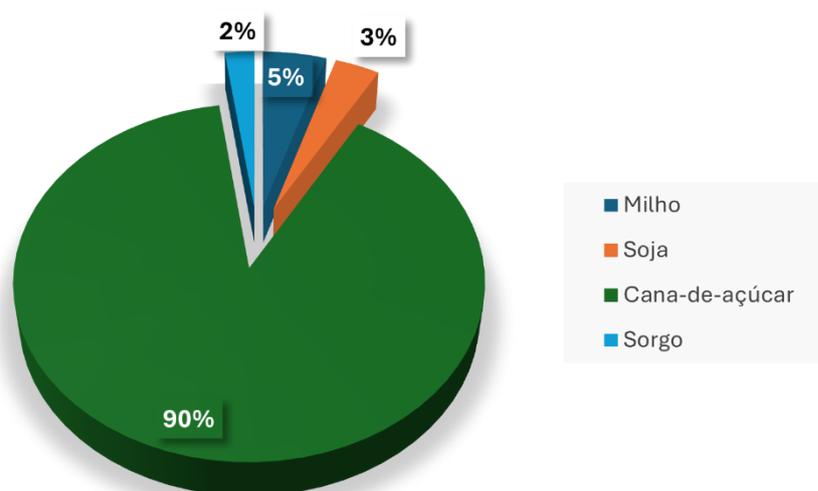
Figura 19 – Área Plantada (ha).



Fonte: IBGE (2024).

Na Figura 20 é apresentado um comparativo do valor da produção percentual das culturas abordadas neste estudo, no estado do Tocantins.

Figura 20 – Rendimento Médio (kg/ha).

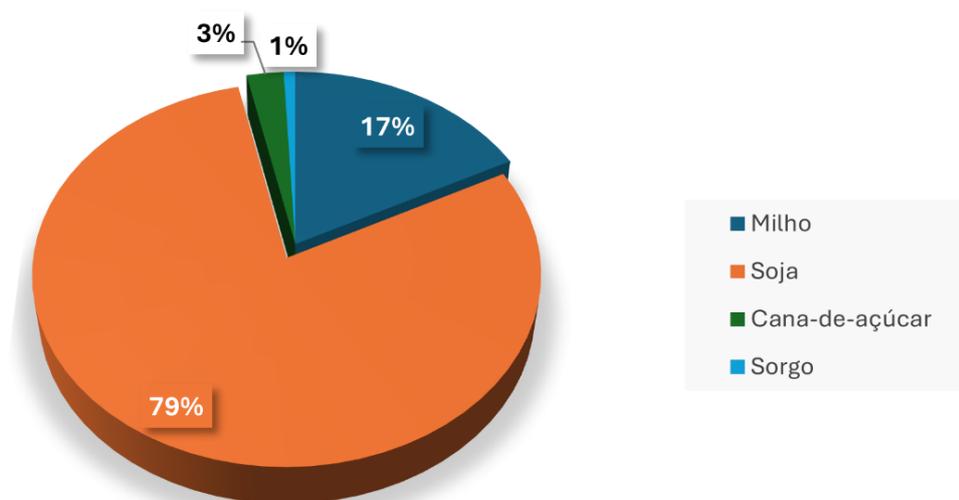


Fonte: IBGE (2024).

Na Figura 20, o rendimento médio das culturas agrícolas em quilogramas por hectare (kg/ha) é uma medida de produtividade, altos valores de rendimento médio significam maior eficiência e produtividade na agricultura, com destaque para a cana-de-açúcar com 90% do percentual médio de produtividade.

A Figura 21 apresenta o comparativo percentual sobre o valor da produção total do estado do Tocantins de cada cultura analisada.

Figura 21 – Valor da Produção (mil R\$).



Fonte: IBGE (2024).

O gráfico da Figura 21 reflete o valor monetário total das culturas agrícolas produzidas, fornecendo uma ideia do impacto econômico da produção agrícola. Ambos os gráficos são fundamentais para entender a eficiência e a contribuição econômica da agricultura, permitindo comparações entre diferentes regiões e culturas ao longo do tempo.

Na Tabela 6, que apresenta os principais municípios produtores das culturas analisadas, observamos o rendimento médio da produção e seu valor total.

Tabela 6 – Municípios Destaque na Produção Agrícola no Tocantins.

Cultura	Município	Rendimento Médio (kg/ha)	Valor da Produção (mil R\$)
Milho	Campos Lindos	6.056	436.160,00
	Caseara	4.500	126.000,00
	Araguacema	4.788	123.738,00
Soja	Campos Lindos	3.852	1.151.909,00
	Peixe	2.926	459.194,00
	Mateiros	3.060	449.525,00
Cana-de-açúcar	Pedro Afonso	86.000	318.630,00

Cultura	Município	Rendimento Médio (kg/ha)	Valor da Produção (mil R\$)
Sorgo	Alvorada	2.235	17.609,00
	Bom Jesus do Tocantins	1.600	7.520,00

Fonte: IBGE (2024).

Comparativamente à produção total, percebe-se que a produção de cana-de-açúcar representa 93% do valor produzido no estado, enquanto as outras produções, para os municípios selecionados, representam entre 20% (soja) a 30% (milho) da produção total do estado (o sorgo fica em 23%), em valor produzido.

4.2 Utilização de Resíduos Agrícolas no Tocantins

No Tocantins, existe uma planta de produção de etanol localizada no município de Pedro Afonso, com capacidade de 80.800 m³. Conforme matéria da BUNGE (2012), no processo de cogeração, que consiste na queima do bagaço da cana (resíduo da produção) para gerar energia elétrica, uma parte desta energia será utilizada internamente para operar a usina, ou seja, a unidade é autossuficiente energeticamente, e a outra parte poderá ser disponibilizada ao sistema elétrico nacional. Com a utilização dos resíduos agrícolas para a produção de energia a empresa promove a sustentabilidade e a eficiência energética.

A Tabela 7 apresenta um resumo do cenário atual no estado do Tocantins referente às instalações que trabalham com biocombustíveis e derivados.

Tabela 7 – Tancagem disponível no estado.

Segmento	Instalações	GLP (m ³)	Biocombustíveis e derivados (m ³)	Outros (m ³)	Tancagem total (m ³)
Instalação produtora de etanol	1		80.800		80.800
Bases do ramo de combustíveis	5		56.792		56.792
Instalação produtora de biodiesel	1		16.748	27.787	44.535
Terminal	2		21.842		21.842
Bases do ramo de TRR	8		601		601
Bases do Ramo de liquefeitos	1	365			365
Total	18	365	176.783		204.935

Fonte: ANP (2023).

Na Tabela 7, os dados são referentes aos diferentes segmentos de instalações, com a quantidade de instalações, bem como os volumes de armazenamento de GLP, derivados e

biocombustíveis, outros produtos e a tancagem total em metros cúbicos (m³). Sendo a Instalação Produtora de Etanol identificada com apenas 1, com armazenagem total de 80.800 m³ de tancagem.

Na Bases do Ramo de Combustíveis, obteve-se cinco instalações, com armazenagem de 56.792 m³ de tancagem. Na Instalação Produtora de Biodiesel, apresenta também 1 instalação, com dois tipos de armazenagem de Derivados e Biocombustíveis 16.748 m³ e outros 27.787 m³, juntos totalizam a armazenagem de 44.535 m³ de tancagem. Com 2 Terminais, sendo o de Derivados e Biocombustíveis com capacidade de 21.842 m³. Nas Bases do Ramo de Transportador-Revendedor-Retalhista (TRR), com 8 instalações, com capacidade para armazenagem de derivados e Biocombustíveis de 601 m³ tancagem. Com 1 instalação de liquefeitos, com capacidade de armazenagem de GLP de 365 m³ tancagem.

Segundo a Resolução nº 968/2024, que dispõe sobre a atividade de TRRs no Brasil, essas empresas especializadas são autorizadas pela Agência Nacional do Petróleo, Gás Natural e Biocombustíveis (ANP) no Brasil para atuar na distribuição e revenda de combustíveis em áreas onde não há atendimento direto das distribuidoras de combustíveis. Elas compram grandes volumes de combustíveis das distribuidoras e os revendem em menor escala para consumidores finais, como agricultores, transportadoras e outros pequenos comerciantes.

A Tabela 8 lista as empresas que atuam como TRRs no Estado do Tocantins, com informações sobre suas capacidades de armazenagem (tancagem, em m³) e localização.

Tabela 8 – TRR no estado do Tocantins.

EMPRESA	UF	MUNICÍPIO	DETALHE INSTALAÇÃO	TANCAGEM (m ³)
Décio Atacadista de Combustíveis Ltda	TO	Gurupi	Exclusiva	68
Décio Atacadista de Combustíveis Ltda	TO	Gurupi	Exclusiva	68
Gerais Diesel TRR Ltda	TO	Dianópolis	Exclusiva	15
Gerais Diesel TRR Ltda	TO	Dianópolis	Exclusiva	30
Gerais Diesel TRR Ltda	TO	Dianópolis	Exclusiva	30
Leobas e Antunes Ltda	TO	Porto Nacional	Exclusiva	60
Leobas e Antunes Ltda	TO	Porto Nacional	Exclusiva	60
Palmas derivados de Petróleo Ltda -ME	TO	Porto Nacional	Exclusiva	15
Palmas derivados de Petróleo Ltda -ME	TO	Porto Nacional	Exclusiva	30
Paraiso P. N. Comercio de Combustíveis Ltda	TO	Paraiso do Tocantins	Exclusiva	15
Paraiso P. N. Comercio de Combustíveis Ltda	TO	Paraiso do Tocantins	Exclusiva	30
Petrosolo Diesel Ltda	TO	Araguaína	Exclusiva	15
Petrosolo Diesel Ltda	TO	Araguaína	Exclusiva	15
Petrosolo Diesel Ltda	TO	Araguaína	Exclusiva	15

EMPRESA	UF	MUNICÍPIO	DETALHE INSTALAÇÃO	TANCAGEM (m ³)
Petrosolo Diesel Ltda	TO	Araguaína	Exclusiva	15
Petrosolo Diesel Ltda	TO	Araguaína	Exclusiva	30
Vale do Javaes Diesel e Lubrificantes Ltda – ME	TO	Formoso do Araguaia	Exclusiva	30
Vale do Javaes Diesel e Lubrificantes Ltda – ME	TO	Formoso do Araguaia	Exclusiva	30
Vale do Javaes Diesel e Lubrificantes Ltda – ME	TO	Formoso do Araguaia	Exclusiva	30

Fonte: ANP (2023).

Todas as empresas listadas são de uso exclusivo, ou seja, destinam-se apenas a operações específicas do setor e não são compartilhadas com outras finalidades. Elas estão distribuídas estrategicamente ao longo do Estado, com diferentes níveis de tancagem, variando de acordo com a demanda local e a infraestrutura disponível.

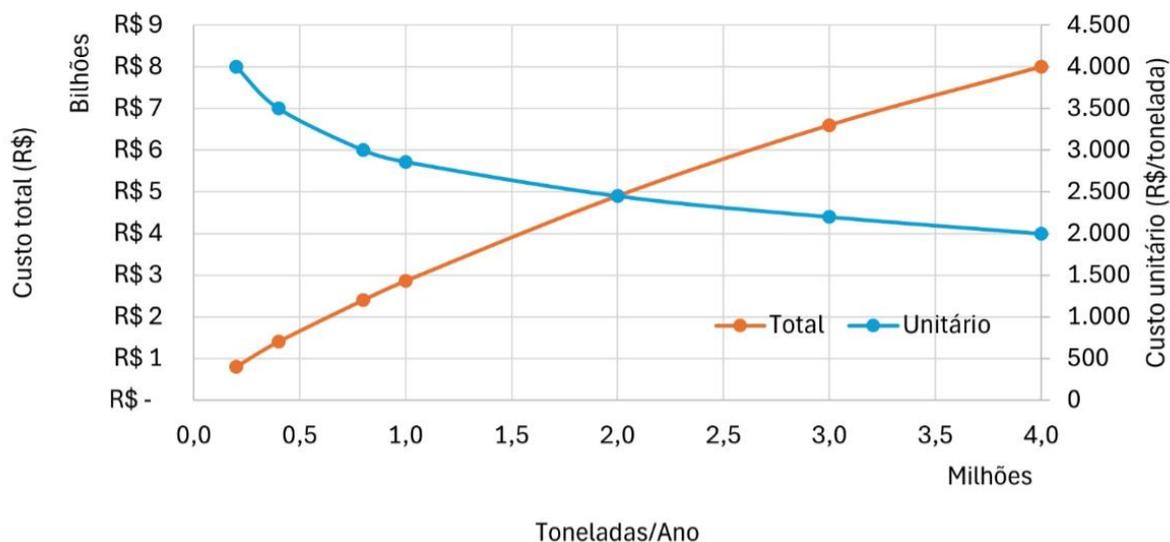
As empresas analisadas possuem diferentes capacidades de armazenamento e estão distribuídas ao longo do Estado, levando em consideração a proximidade com os principais polos produtivos e logísticos. Essa distribuição visa otimizar a eficiência da cadeia de suprimentos, reduzindo custos operacionais e facilitando o acesso aos resíduos agrícolas utilizados na produção de biocombustíveis.

4.3 Estimativa de Custos e Geração de Resíduos

4.3.1 Custo de Construção

Com base em dados extraídos da literatura (Guimarães, 2013; Santos, 2024; Taguchi, 2014) foi possível estimar uma curva de regressão não linear para o custo fixo de construção de plantas de etanol 2G, resultando na curva apresentada na Figura 22.

Figura 22 – Estimativa do custo fixo total e unitário de construção.



Fonte: a autora (2024).

A Figura 22 apresenta a economia de escala das instalações. Quanto maior o custo total menor o custo unitário, ou seja, se ganha na escala da produção, ou seja, conforme a capacidade de produção aumenta, o custo também aumenta, mas de forma não linear e decrescente. Isso significa que para valores mais altos de produção, o custo de construção apresenta a tendência de um aumento mais lento, resultando em um custo unitário menor.

A equação do custo fixo total (CF) resultante é função da capacidade (T) da usina em receber resíduos anualmente (toneladas), conforme a equação 7.

$$CF = -0,0002 * T^2 + 2.673,9822 * T + 338.933.350,0848 \quad (7)$$

O coeficiente de determinação (R^2) resultante foi de 0,9998, indicando um ajuste quase perfeito do modelo aos dados. O (R^2) é uma medida estatística que avalia a proporção da variabilidade da variável dependente explicada pelo modelo. Seu valor varia entre 0 e 1, sendo que quanto mais próximo de 1, melhor o ajuste do modelo aos dados observados. Isso significa que o modelo desenvolvido consegue representar com grande precisão os padrões dos dados analisados.

Ressalta-se que o ponto ideal do coeficiente de determinação é 1, indicando um ajuste perfeito, o que demonstra que a pesquisa realizada obteve um nível de precisão extremamente elevado. Esse resultado reforça a confiabilidade das análises e das previsões baseadas no modelo.

Além disso, a equação ajustada também evidencia efeitos de economia de escala, uma vez que o aumento total dos custos desacelera à medida que se amplia a capacidade de

processamento de resíduos. Esse comportamento sugere que a produção em maior escala pode reduzir os custos médios, tornando a operação mais eficiente e economicamente viável.

4.3.2 Custo de Transporte

A partir de estimativas de custos disponíveis na literatura foi possível criar o modelo de custo de transporte de resíduos agrícolas (*CV*), apresentado na equação 8. A Tabela 9 apresenta as taxas para cada uma das *commodities* analisadas

Tabela 9 – Taxa de geração de resíduos

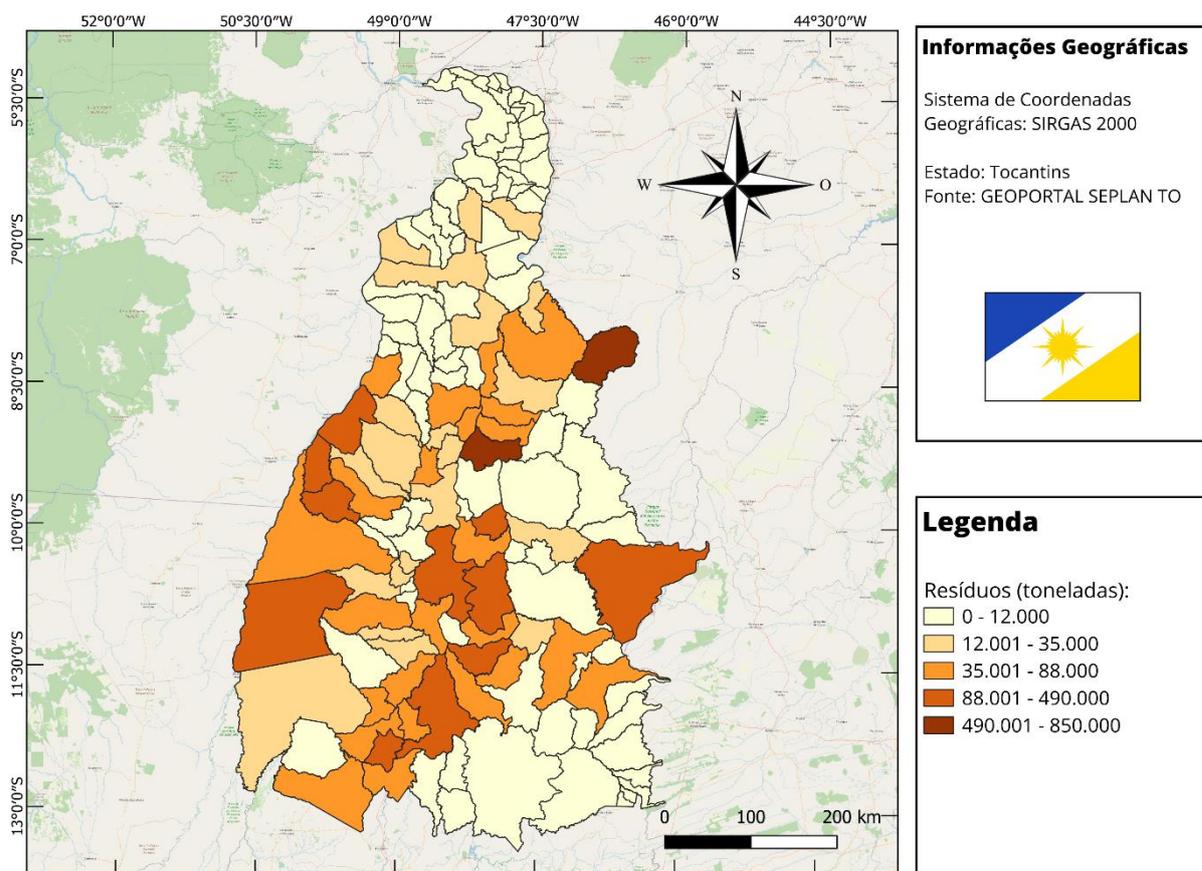
Cultura	Área plantada (ha)	Produção colhida (t)	Resíduos (t)	TXj	Geradores de resíduos
Cana-de-açúcar	8.756.576	671.394.957	201.418.497	30%	73,4%
Milho	14.144.321	50.745.996	29.432.678	58%	10,7%
Soja	21.761.782	57.345.382	41.862.129	73%	15,3%
Sorgo	1.043.480	2.923.318	1.753.991	60%	0,6%
			274.467.295		100%

Fonte: IBGE (2024) e IPEA (2012).

Percebe-se que os maiores geradores de resíduos, em termos absolutos, são a cana-de-açúcar (73%) e a soja (15%), seguidas pelo milho (11%) e pelo sorgo (1%). Já em termos percentuais (*txi*), a soja ocupa a primeira posição (73%), seguida pelo sorgo (60%), milho (58%) e cana-de-açúcar (30%).

A Tabela 9 apresenta a taxa de geração de resíduos para cada cultura analisada, considerando a área plantada, a produção colhida e a quantidade de resíduos gerada.

Figura 23 – Geração de resíduos por município do Estado.



Fonte: a autora (2024).

Conforme a Figura 23, as áreas com cor mais intensa (vermelho) são as regiões com maiores concentrações de resíduos, enquanto as áreas em amarelo e laranja representam regiões com menor acúmulo. Essa visualização permite a melhor compreensão sobre a distribuição espacial da geração de resíduos no Estado, auxiliando nas decisões de planejamento de logística, gerenciamento de resíduos ou na alocação de recursos para tratamento e coleta.

Diante do analisado, destacam-se os municípios com maior geração de resíduos Pedro Afonso, maior produtor de soja e milho do Estado (844.853 toneladas de resíduos anuais, ou 17,9% do total) e também, maior produtor de cana-de-açúcar do Estado (492.070 toneladas de resíduos anuais, ou 10,4% do total). Os demais municípios do Estados estão abaixo dos 4,0% em relação ao montante geral de 4.718.039 toneladas de resíduos anuais.

4.4 Resultados do Modelo de Otimização

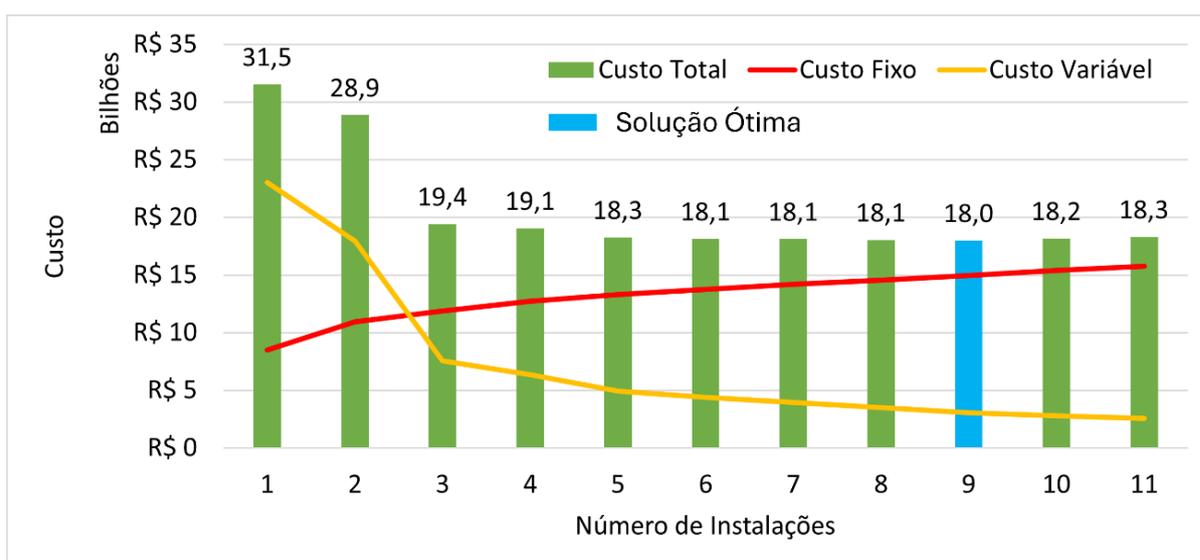
Por meio da modelagem matemática apresentada na Seção 3.2, foi possível determinar o número ótimo de instalações de processamento de etanol 2G a serem implementadas no

Estado do Tocantins. O modelo utilizado considera uma função objetivo e um conjunto de restrições que garantem a viabilidade técnica e econômica da solução.

A função objetivo busca minimizar o custo total de instalação e operação das plantas, levando em conta tanto os custos fixos quanto as variáveis. As restrições do modelo incluem fatores como disponibilidade de matéria-prima, capacidade de processamento, custos logísticos e limitações geográficas. Para alcançar a configuração mais eficiente, foram realizadas simulações comparando o custo total em diferentes cenários do modelo PLF. O objetivo foi identificar a configuração que resulta no menor custo total, garantindo ao mesmo tempo a viabilidade operacional das instalações.

A Figura 24 apresenta o gráfico dos custos fixos e variáveis, além do número de instalações correspondente a cada cenário analisado.

Figura 24 – Comparação de custos da solução proposta.



Fonte: a autora (2024).

À medida que o número de instalações aumenta, o custo variável (de transporte) diminui, uma vez que mais unidades estarão disponíveis, reduzindo as distâncias a serem percorridas. Isso se acentua a partir da abertura da terceira instalação, quando o custo variável total do transporte dos resíduos gerados em todo o Estado cai rapidamente. A partir desse ponto, o custo total se mantém relativamente constante, pois a redução no custo variável é compensada pelo aumento dos custos fixos de abertura de novas instalações.

Com relação ao custo fixo (de construção), observa-se um aumento gradual. No entanto, percebe-se também um efeito de economia de escala, pois, conforme ilustrado na Figura 24, quanto maior a capacidade de uma instalação, menor o custo proporcional por unidade de

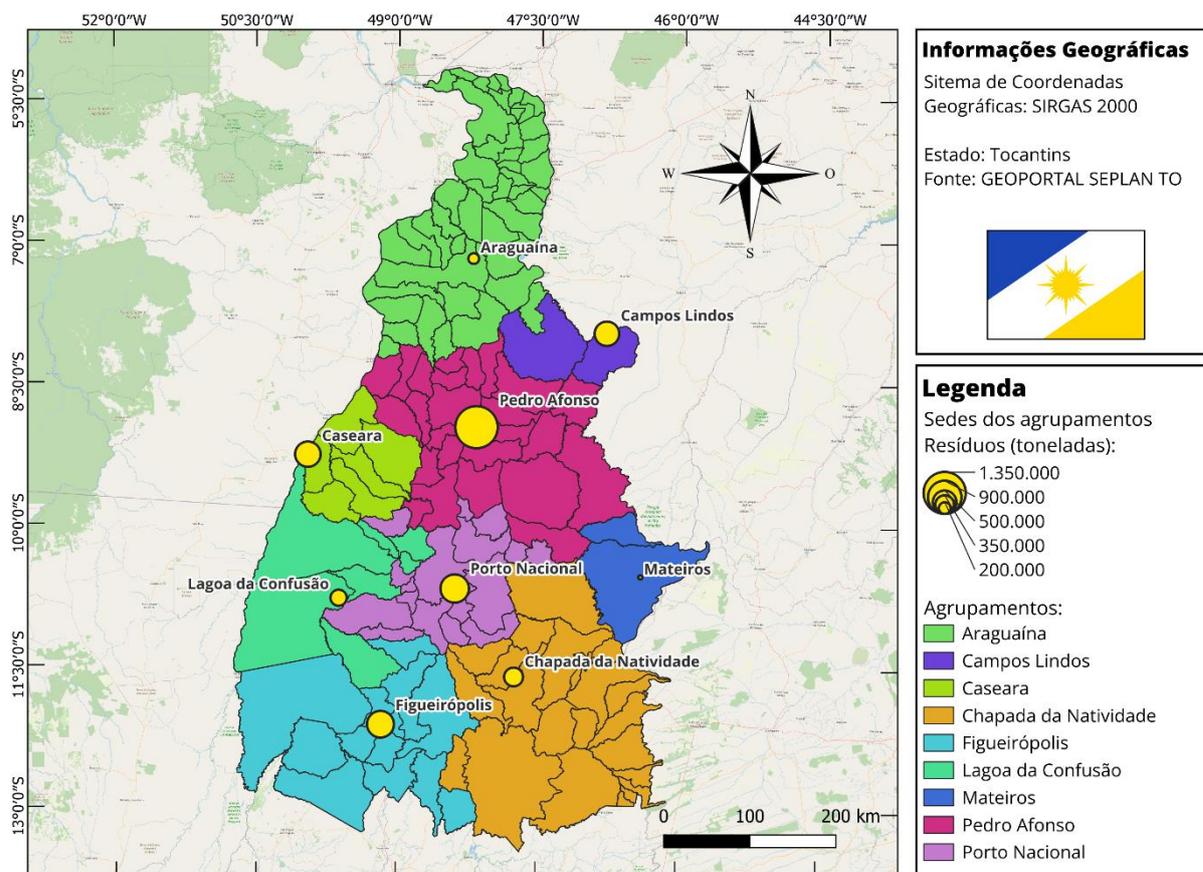
resíduo processado. Isso demonstra um limite na vantagem de aumentar o número de unidades, já que a eficiência operacional pode ser alcançada com um número ótimo de instalações.

A solução ótima foi aquela que apresentou o menor custo total (fixo + variável), ou seja, com a abertura de 9 usinas de processamento de etanol 2G seria possível obter o menor custo no longo prazo (25 anos do horizonte médio de funcionamento de usinas desse tipo), equivalente a aproximadamente R\$ 18 Bilhões (cerca de R\$ 15 Bilhões para construção e R\$ 3 Bilhões para as operações de transporte).

Isso sugere que um sistema disperso com aproximadamente 9 centros de processamento maximiza a eficiência, tendo o custo fixo um crescimento moderado, enquanto o custo variável cai acentuadamente até se estabilizar. Essa redução é típica ao otimizar a localização e quantidade de instalações, minimizando distâncias de transporte e melhorando a economia de escala. Recomendando-se o investimento em até 9 unidades estrategicamente localizadas para capturar essa otimização, balanceando custos fixos com as variações e diminuição do impacto do transporte nas operações de resíduos agrícolas.

A Figura 25 apresenta a distribuição das 9 instalações e os municípios que seriam atendidos por cada uma delas.

Figura 25 – Proposta de novas instalações.



Fonte: a autora (2024).

Percebe-se a contiguidade e compacidade dos agrupamentos formados, característica desejada em todo PLF (Franco e Steiner, 2022). Os 9 municípios selecionados, são do modelo matemático e representam a solução ótima, assim como os custos associados e o quantitativo de resíduos processados anualmente naquela instalação, são apresentados na Tabela 10.

Tabela 10 – Solução ótima do PLF.

Instalação	Sede	Tamanho do agrupamento	Resíduos (t)	Custo Fixo	Custo Variável
1	Pedro Afonso	26	1.356.977	R\$ 3.599.187.718	R\$ 506.210.118
2	Porto Nacional	16	680.990	R\$ 2.067.138.196	R\$ 209.980.373
3	Figueirópolis	13	619.889	R\$ 1.919.654.144	R\$ 553.906.159
4	Caseara	6	568.222	R\$ 1.793.773.836	R\$ 357.865.191
5	Campos Lindos	2	535.198	R\$ 1.712.754.961	R\$ 602.929.484
6	Chapada da Natividade	22	356.813	R\$ 1.267.581.655	R\$ 625.392.717

Instalação	Sede	Tamanho do agrupamento	Resíduos (t)	Custo Fixo	Custo Variável
7	Lagoa da Confusão	7	289.053	R\$ 1.095.144.627	R\$ 52.028.277
8	Araguaína	45	183.266	R\$ 822.265.723	R\$ 144.149.907
9	Mateiros	2	127.633	R\$ 676.962.372	R\$ 96.468
	Total	139	4.718.039	R\$ 14.954.463.231	R\$ 3.052.558.694

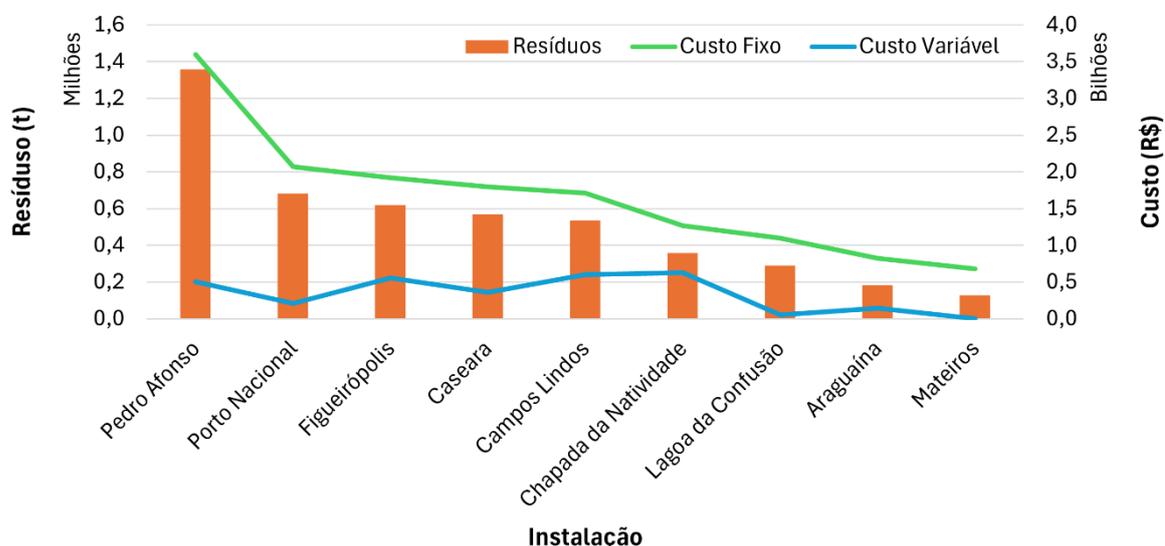
Fonte: a autora (2024).

O custo fixo total de cada instalação é proporcional à quantidade de resíduos que será recepcionada. Já o custo variável total depende da configuração de cada agrupamento e das distâncias que deverão ser percorridas. Por exemplo, o agrupamento sediado em Mateiros é o que possui o menor custo fixo e variável pois, além de ser o que receberá a menor quantidade de resíduos, também será o menor em termos de distância percorrida (agrupamento composto apenas por dois municípios, Mateiros e São Félix do Tocantins, distantes 78 km um do outro).

Por outro lado, o agrupamento sediado em Chapada da Natividade é o que possui o maior custo de transporte, pois além de ser composto por um número elevado de municípios, também possui uma grande produção a ser transportada (mais de 350 mil toneladas anualmente), o que impacta diretamente o custo do transporte em função do maior número de viagens que deverão ser realizadas para se transportar toda a carga.

A Figura 26 apresenta os custos fixos e variáveis associados a cada agrupamento, assim como o quantitativo de resíduos estimado para o total de municípios pertencentes a cada agrupamento.

Figura 26 – Detalhamento da solução ótima.



Fonte: a autora (2024).

Na Figura 26 destacam-se os municípios de Pedro Afonso, com aproximadamente 1,35 milhões de toneladas, e Porto Nacional, em torno de 0,68 milhão de toneladas. Esses dois agrupamentos juntos são responsáveis por 43,2% dos resíduos gerados no Estado. Na sequência estão os três agrupamentos intermediários: Figueirópolis, Caseara e Campos Lindos, responsáveis por 36,5% do total de resíduos. Por fim, estão os últimos quatro agrupamentos, em termos de resíduos gerados: Chapada da Natividade, Lagoa da Confusão, Araguaína e Mateiros, responsáveis por 20,3% dos resíduos gerados, embora tenham uma área de abrangência que engloba conjuntamente 139 municípios.

Essa proposta de otimização da localização de instalações produtoras de biocombustíveis 2G no Estado do Tocantins impacta positivamente a gestão e a eficiência econômica das empresas envolvidas em toda a cadeia produtiva. A escolha estratégica desses locais para essas instalações pode reduzir custos logísticos e melhorar a acessibilidade às matérias-primas, que são abundantes em todo o Estado. Essa eficiência na logística não apenas diminui os custos operacionais, mas também acelera o tempo de resposta ao mercado, permitindo que as empresas se adaptem rapidamente às demandas dos consumidores e às flutuações do mercado. Ressalta-se que a localização foi definida pelo modelo matemático que minimiza os custos totais.

No contexto do Tocantins, onde a infraestrutura ainda está em desenvolvimento, essa otimização é crucial para maximizar o potencial econômico da produção de biocombustíveis, contribuindo para o fortalecimento da economia local e para a sustentabilidade ambiental das operações produtivas no setor de biocombustíveis.

4.5 Modelos Alternativos

Partindo do pressuposto de que nem todos os municípios poderão aceitar a instalação de usinas de biocombustíveis em seu território, foram propostas algumas alternativas baseadas em distâncias mínimas em relação ao modelo ótimo. Para cada uma das nove instalações do modelo ótimo foram propostos quatro municípios alternativos, conforme apresentado na Tabela 11.

Tabela 11 – Comparativo de alternativas.

	Alternativa	1ª (Ótima)	2ª	3ª	4ª	5ª
Instalação 1	Município	Pedro Afonso	Bom Jesus do Tocantins	Tupirama	Fortaleza do Tabocão	Santa Maria do Tocantins

	Alternativa	1ª (Ótima)	2ª	3ª	4ª	5ª
	Custo de transporte	R\$ 3.052.558.694	R\$ 3.128.299.648	R\$ 3.133.165.789	R\$ 3.718.109.156	R\$ 3.838.193.727
	Diferença	-	2,48%	2,64%	21,80%	25,74%
Instalação 2	Município	Porto Nacional	Brejinho de Nazaré	Monte do Carmo	Palmas	Silvanópolis
	Custo de transporte	R\$ 3.052.558.694	R\$ 3.289.213.919	R\$ 3.347.062.086	R\$ 3.385.442.937	R\$ 3.445.935.053
	Diferença	-	7,75%	9,65%	10,91%	12,89%
Instalação 3	Município	Figueirópolis	Alvorada	Cariri do Tocantins	Gurupi	Sucupira
	Custo de transporte	R\$ 3.052.558.694	R\$ 3.097.405.566	R\$ 3.107.680.316	R\$ 3.128.805.061	R\$ 3.129.432.548
	Diferença	-	1,47%	1,81%	2,50%	2,52%
Instalação 4	Município	Caseara	Marianópolis do Tocantins	Araguacema	Divinópolis do Tocantins	Dois Irmãos do Tocantins
	Custo de transporte	R\$ 3.052.558.694	R\$ 3.187.208.483	R\$ 3.255.090.581	R\$ 3.336.749.838	R\$ 3.380.019.373
	Diferença	-	4,41%	6,63%	9,31%	10,73%
Instalação 5	Município	Campos Lindos	Goiatins	Barra do Ouro	Filadélfia	Itacajá
	Custo de transporte	R\$ 3.052.558.694	R\$ 3.608.775.613	R\$ 4.034.285.184	R\$ 4.239.992.644	R\$ 4.393.767.408
	Diferença	-	18,22%	32,16%	38,90%	43,94%
Instalação 6	Município	Chapada da Natividade	Natividade	Santa Rosa do Tocantins	Pindorama do Tocantins	São Valério da Natividade
	Custo de transporte	R\$ 3.052.558.694	R\$ 3.056.519.599	R\$ 3.140.431.811	R\$ 3.248.575.109	R\$ 3.299.261.673
	Diferença	-	0,13%	2,88%	6,42%	8,08%
Instalação 7	Município	Lagoa da Confusão	Pium	Cristalândia	Nova Rosalândia	Dueré
	Custo de transporte	R\$ 3.052.558.694	R\$ 3.117.228.944	R\$ 3.132.123.587	R\$ 3.188.128.518	R\$ 3.377.412.148
	Diferença	-	2,12%	2,61%	4,44%	10,64%
Instalação 8	Município	Araguaína	Wanderlândia	Aragominas	Carmolândia	Nova Olinda
	Custo de transporte	R\$ 3.052.558.694	R\$ 3.095.957.213	R\$ 3.109.177.246	R\$ 3.115.408.195	R\$ 3.150.993.605
	Diferença	-	1,42%	1,85%	2,06%	3,22%
Instalação 9	Município	Mateiros	São Félix do Tocantins	Ponte Alta do Tocantins	Dianópolis	Lagoa do Tocantins
	Custo de transporte	R\$ 3.052.558.694	R\$ 3.188.120.084	R\$ 3.329.268.314	R\$ 3.420.911.812	R\$ 3.422.475.266
	Diferença	-	4,44%	9,06%	12,07%	12,12%

Fonte: a autora (2024).

A coluna da 1ª alternativa diz respeito ao modelo ótimo proposto inicialmente e compara seus custos com as demais alternativas. É possível perceber que o município mais crítico da solução ótima é Campos Lindos (instalação 5), uma vez que, caso não seja aceito para implantação da instalação, acarretará um aumento de 18,22% no custo de transporte para a próxima possibilidade da lista, Goiatins. Em seguida Porto Nacional (instalação 2), cuja alternativa (Brejinho de Nazaré) à instalação geraria um custo extra de transporte de 7,75%.

À medida que se avança nas alternativas, também se avança no aumento dos custos de transporte, dependentes das distâncias percorridas, em relação à solução ótima (1ª alternativa).

Assim, quanto mais distante da solução ótima inicial maiores serão os custos variáveis associados ao projeto no quesito transporte.

Essa análise de cenários é importante pois aponta aos gestores públicos quais os municípios críticos para o projeto e até que ponto se poderiam oferecer compensações aos municípios que aceitassem a instalação em seus territórios, permitindo a máxima eficiência do empreendimento e os menores custos para o mesmo.

4.6 Discussão

A aplicação prática dos biocombustíveis 2G, baseada no reaproveitamento de resíduos agrícolas, é economicamente justificável, pois utiliza resíduos como palha, bagaço e cascas, reduzindo a dependência de matérias-primas primárias e promovendo a economia circular. Tecnologias de pré-tratamento e conversão aumentam a eficiência e adicionam valor a esses resíduos (Singh *et al.*, 2022; Tiwari *et al.*, 2022).

Ao compararmos com os resultados da pesquisa, observa-se que os custos estimados na modelagem matemática, incluindo construção (R\$ 18 bilhões para nove instalações) e transporte, são compatíveis com os custos associados para geração de energia, Tabela 1, reforçando a relevância dos resultados obtidos e a viabilidade técnica da proposta.

Além disso, a modelagem considera fatores que influenciam diretamente os custos, como a proximidade das instalações aos polos de produção agrícola, reduzindo o impacto do transporte na competitividade da biomassa.

Outro ponto em destaque é a sustentabilidade e os benefícios indiretos gerados pela biomassa, apesar de possuir um custo inicial elevado comparado com outras fontes, a sua utilização gera redução dos resíduos agrícolas, possibilitando a geração de renda adicional para agricultores, assim como sua integração com práticas de economia circular.

Com base nos dados apresentado, é possível propor três cenários que estimem a redução dos custos de transporte e armazenamento, conforme os resultados da pesquisa (Franco e Steiner, 2022):

Otimista: Implementação de incentivos fiscais e políticas públicas que reduzam o custo da biomassa para valores competitivos em relação à energia solar. Além disso, tem o aumento de áreas agrícolas no estado que podem gerar mais resíduos.

Intermediário: Parcerias público-privadas para desenvolver infraestrutura logística no Tocantins, reduzindo os custos de transporte.

Pessimista: Manutenção das condições atuais, com altos custos logísticos e ausência de incentivos, dificultando a expansão da biomassa como fonte de energia.

A otimização da logística e do transporte, através de tecnologias de localização e roteirização, proporciona economia em combustível e menor desgaste de frotas, impactando positivamente o custo final do biocombustível. A perspectiva de incentivos fiscais e regulamentações ambientais favoráveis reforça ainda mais a viabilidade econômica, uma vez que o mercado de biocombustíveis é impulsionado por políticas públicas voltadas à sustentabilidade (Nunes *et al.*, 2021; Crotman *et al.*, 2024).

Além disso, o mercado de biocombustíveis é impulsionado por incentivos governamentais e políticas públicas voltadas à sustentabilidade (Volpi *et al.*, 2023), o que reforça a viabilidade econômica e torna os biocombustíveis 2G uma alternativa sustentável e financeiramente atraente. Assim como a crescente demanda por energias renováveis e a necessidade de reduzir as emissões de carbono, o mercado dos biocombustíveis 2G se apresenta como uma opção, tanto para produtores quanto para investidores interessados em soluções energéticas sustentáveis.

5. CONCLUSÕES

O presente trabalho teve como objetivo principal analisar os desafios, estratégias, impactos e perspectivas relacionadas à gestão logística de resíduos agrícolas para a produção de biocombustível de 2G, visando contribuir para o desenvolvimento sustentável de diversos setores da economia Tocantinense. Além disso, um modelo de localização de instalações foi proposto para o contexto regional, apresentando a melhor configuração possível para uma futura infraestrutura de produção de biocombustíveis 2G.

A análise dos dados coletados demonstrou que a utilização de resíduos agrícolas pode representar uma alternativa econômica viável para os produtores rurais, reforçando o potencial desse aproveitamento. No entanto, para confirmar a viabilidade econômica, serão necessárias análises mais aprofundadas sobre os ganhos diretos para os produtores. Quanto à sustentabilidade ambiental, embora a prática pareça trazer benefícios evidentes, não foram realizados estudos específicos para quantificar esses impactos. Dessa forma, as hipóteses iniciais do estudo foram testadas e permitiram concluir que a gestão logística de resíduos agrícolas tem potencial de viabilidade, desde que fatores econômicos e ambientais sejam mais detalhadamente avaliados em estudos futuros.

Considerando os desafios enfrentados na gestão desses resíduos, duas questões de pesquisa se mostraram fundamentais para avançar no entendimento do tema: Quais são as formas mais eficientes de armazenamento de resíduos secos agrícolas? E como otimizar a logística de transporte desses resíduos para reduzir custos e impactos ambientais? A partir da análise realizada, conclui-se que o armazenamento eficiente pode ser influenciado pela escolha de técnicas adequadas de compactação e estocagem, enquanto a logística de transporte pode ser otimizada por meio da localização estratégica de unidades de processamento e pela adoção de modais de transporte mais sustentáveis.

A principal limitação da pesquisa refere-se à variabilidade das condições locais de produção e armazenamento, que podem influenciar os resultados obtidos. Assim, a análise foi focada no Estado do Tocantins, o que pode dificultar a generalização dos resultados para outras regiões com diferentes contextos agrícolas e logísticos, dado que a densidade na geração de resíduos é determinante na viabilidade econômica do modelo de localização.

A dependência de políticas públicas favoráveis à implementação de biocombustíveis também se mostrou um fator crítico. A falta de incentivos, como subsídios e fontes de financiamento, pode dificultar a adoção em larga escala de novas tecnologias, mesmo que, no longo prazo, apresentem resultados positivos e maior eficiência em relação às soluções atuais.

Para futuras pesquisas, sugere-se a ampliação do escopo geográfico do estudo, incluindo diferentes regiões do Brasil, com distintos perfis produtivos e de infraestrutura, a fim de comparar a eficácia das práticas de aproveitamento de resíduos em contextos diversos. Além disso, a escala de análise poderia ser revisada: em vez de modelar municípios, uma abordagem baseada em grades (*fishnet*) poderia ser mais precisa, pois permitiria captar a distribuição espacial real dos cultivos, evitando distorções causadas pela delimitação municipal. Por fim, recomenda-se a inclusão de análises econômicas mais detalhadas, considerando tanto os custos de produção e transporte quanto os potenciais benefícios sociais e ambientais associados à utilização dos biocombustíveis.

REFERÊNCIAS

- ABNT – **Associação Brasileira de Normas Técnicas**. (2024). NR 10.004: Resíduos Sólidos Classificação. Disponível em: <<https://supremoambiental.com.br/wp-content/uploads/2018/07/nbr-n-10-004-abnt-2004-residos-solidos.pdf>> Acesso em: 31 de jul. 2024.
- ACCIONA (2024). **Como o hidrogênio verde é produzido a partir de resíduos agrícolas (e com uma eficiência inédita)**. Disponível em: <<https://www.accionacom.br/novidades/artigos/como-o-hidrogenio-verde-e-produzido-a-partir-de-residuos-agricolas-e-com-uma-eficiencia-inedita/>> Acesso em: 02 de mar. 2025
- AGROADVANCE. (2024). **Biocombustíveis: conheça as 4 gerações que vão de etanol à biocombustíveis sintéticos**. Disponível em: <<https://agroadvance.com.br/blog-biocombustiveis-conheca-as-4-geracoes/>> Acesso em: 21 de jul. 2024.
- AGRO INOVADORES. (2024). **Etanol 1ª e 2ª geração: entenda as diferenças**. Disponível em: <<https://agro.genica.com.br/2024/03/08/etanol/>> Acesso em: 21 de jul. 2024.
- ANP – **Agência Nacional do Petróleo, Gás Natural e Biocombustíveis**. (2023). Painel Dinâmico: Tancagem detalhada. Disponível em: <<https://app.powerbi.com/view?r=eyJrljoiMjE5ZmM4ZjAtZjJlYi00MzkzLThjNWUtMzUxMjg1ZGYwY2FhIiwidCI6IjQ0OTlmNGZmLTl0YTtytNGI0Mi1iN2VmLTExNGFmY2FkYzkyxMyJ9>> Acesso em: 30 de jul. 2024.
- ALI, S.; RANA, Q. U. A; RIAZ, F.; HAQ, A.; SAJJAD, W.; GAUTTAM, R.; ALI, M.; BADSHAH, M. (2024). Gestão de Resíduos Agrícolas por Produção de Bioetanol de Segunda Geração a Partir de Bagaço de Cana-de-Açúcar Utilizando Cepa de Levedura Indígena. **Curr Microbiol** **81**, 161. Disponível em:< <https://doi.org/10.1007/s00284-024-03668-y>> Acessado em: 01 de out. 2024.
- BALLOU, R. H. (2007). **Gerenciamento da cadeia de suprimentos/logística empresarial**, 5ª ed., tradução: Raul Rubenich. Porto Alegre: Bookman.
- BARRETO, R. C. P.; RIBEIRO, A. J. M. (2020). Logística no Brasil: Uma Análise do Panorama dos Modais Rodoviários e Ferroviários do Cenário Nacional Demonstrando as Vantagens e Desvantagens das Referidas Modalidades. Revista Livre de Sustentabilidade e Empreendedorismo. v. 5 n. 3 (2020), **Open Journal Systems**. Disponível em: <<https://www.relise.eco.br/index.php/relise/article/view/355>> Acesso em: 01 de out. 2024.
- BATISTA, A.C.DE M.; FERREIRA, I.M.DE L.; ARAÚJO, A.M.DE M.; GONDIM, A.D. (2024). Pré-Tratamentos de Biomassa Lignocelulósica para Obtenção de Biocombustíveis: Revisão Bibliográfica. **Modelo E-Book**. Disponível em: https://www.editorarealize.com.br/editora/ebooks/conepetro/2021/TRABALHO_EV147_MD7_SA100_ID510_03052021230945.pdf?utm_source=chatgpt.com Acessado em: 03 de mar. 2025.
- BECERRA-PÉREZ, L.A.; RINCÓN, L.; POSADA-DUQUE, J.A. (2022). Logistics and Costs of Agricultural Residues for Cellulosic Ethanol Production. **Energias** **2022**, 15, 4480.

<https://doi.org/10.3390/en15124480>. Disponível em: <<https://doi.org/10.3390/en15124480>> Acessado em: 10 de out. 2024.

BEHL, M.; DAHIYA, P.; KUMARI, D.; THAKUR, K.; DEVI, M.; RATHOUR, R. K.; BHATT, A. K.; BHATIA, R. K. (2023). Development of tailored bioprocess for pretreatment and saccharification of corn stalk into bioethanol using hydrolytic enzymes cocktail and fermentative yeasts. **Biocatalysis and Agricultural Biotechnology**, Volume 53, 2023, 102896, ISSN 1878-8181, <https://doi.org/10.1016/j.bcab.2023.102896> Disponível em: <<https://doi.org/10.1016/j.bcab.2023.102896>> Acessado em: 15 de out. 2024.

BEN – **Balanco Energético Nacional**. (2023). Balanço Energético Nacional. Disponível em: <<https://www.epe.gov.br/pt/publicacoes-dados-abertos/publicacoes/balanco-energetico-nacional-ben>> Acesso em: 21 de jul. 2024.

BERCHEM, T.; ROISEUX, O.; VANDERGHEM, C.; BOISDENGHIEN, A.; FOUCART, G. & RICHEL, A. (2017). Palha de milho como matéria-prima para a produção de etanol: composição química de diferentes frações anatômicas e variedades. **Biocombustíveis, Bioprod. Bioref.**, 11: 430-440. Disponível em: <<https://doi.org/10.1002/bbb.1755>> Acessado em: 30 de ago. 2024.

BHUTTO, A.R.; HUSSAIN, T; KUMAR, L.; BHANGWAR, S.; SHAH, A.H. (2023). **Comparative Investigation of Performance Analysis & Carbon Emission of Biodiesel and Conventional Fuel**. Disponível em: <<https://doi.org/10.55447/jaet.07.02.118>> Acessado em: 20 de jul. 2024.

BUNGE. (2012). **Bunge inaugura usina em Pedro Afonso (TO)**. Disponível em: <<https://bunge.com.br/Press-Releases/Bunge-inaugura-usina-em-Pedro-Afonso-TO>>. Acesso em: 30 de jul. 2024.

CHIAVENATO, I. (2011). **Administração: Teoria, processo e prática**. 4ª Edição, Rio de Janeiro-RJ, Editora Elsevier.

COLLICCHIO, E.; ROCHA, H. R. (2022). Agricultura e mudanças do clima no Estado do Tocantins [livro eletrônico]: vulnerabilidades, projeções e desenvolvimento/organização Erich Collicchio, Humberto Ribeiro da Rocha. Palmas, TO: Editora Universitária – Ed. **UFT**, 2022. 438 p. PDF. Bibliografia. ISBN 978-65-5390-006-6. Artigo 1: Aspectos Gerais, Uso da Terra e Potencialidades do Tocantins para a Produção Agrícola.

CROTMAN, B.; BARROS, M. O.; OLIVEIRA, L. B. (2024). Assessing the feasibility of electric energy generation from agricultural waste in Brazil, **Sustainable Energy Technologies and Assessments**, Volume 68, 2024, 103853, ISSN 2213-1388, <https://doi.org/10.1016/j.seta.2024.103853> Disponível em: <<https://doi.org/10.1016/j.seta.2024.103853>> Acessado em: 09 de set. 2024.

DA SILVA, M. D. (2022). **Produção de etanol de segunda geração por co-cultura de Saccharomyces cerevisiae ATCC 26602 e Pachysolen tannophilus CCT 1891 a partir da hidrólise ácida de sabugo de milho, sisal e resíduos de mandioca utilizados como substratos**. São José do Rio Preto. Disponível em: <<https://repositorio.unesp.br/server/api/core/bitstreams/119daae6-1d37-41ec-862e-54df7c89be1a/content>>. Acesso em: 09 de set. 2024.

DIAS DE SÁ, C; KÖNIG, C. C. (2022). **INSPER**. Notícias: Carbono No Solo: O Enorme Potencial De Mitigação Que O Brasil Ainda Não Aproveita. Disponível em: <<https://insper.edu.br/noticias/carbono-no-solo-o-enorme-potencial-de-mitigacao-que-o-brasil-ainda-nao-aproveita/>>. Acesso em: 19 de mai. 2024.

DONI, S.; MASCIANDARO, G.; MACCI, C.; MANZI, D.; MATTII, GB; CATALDO, E.; GISPERT, M.; VANNUCCHI, F.; PERUZZI, E. (2024). Zeolite and Winery Waste as Innovative By - Product for Vineyard Soil Management. **Ambientes** 2024, 11, 29. Disponível em:<<https://doi.org/10.3390/environments11020029>> Acessado em: 10 de jul. 2024.

ELSAGAN, Z. A.; ALI, R. M.; EL-NAGGAR, M. A.; EL-ASHTOUKHY, E.-S.Z.; ABDELHAFEZ, S.E. (2023). New perspectives for maximizing sustainable bioethanol production from corn stover. **Renewable Energy**, Volume 209, 2023, Pages 608-618, ISSN 0960-1481, <https://doi.org/10.1016/j.renene.2023.03.138> Disponível em:<<https://doi.org/10.1016/j.renene.2023.03.138>> Acessado em: 19 de mai. 2024.

EMBRAPA – **Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária**. (2022). Notícias: Mapas trazem novas informações sobre estoque de carbono nos solos brasileiros. Disponível em: <<https://embrapa.br/busca-de-noticias/-/noticia/66040634/mapas-trazem-novas-informacoes-sobre-estoque-de-carbono-nos-solos-brasileiros>> Acesso em: 19 de mai. 2024.

ENERGIA LIVRE. (2021). **O peso dos encargos e tributos no setor elétrico**. Disponível em: <<https://www.enelenergialivre.com.br/conteudos/o-peso-dos-encargos-e-tributos-no-setor-eletrico/>> Acesso em: 23 de jul. 2024.

ERTUĞRUL, Ö.; DAHER, B.; ÖZGÜNALYAY ERTUĞRUL, G.; MOHTAR, R. (2024). De resíduos agrícolas à energia: avaliando o potencial de bioenergia do centro-sul do Texas. **Energias** 2024, 17, 802. Disponível em:<<https://doi.org/10.3390/en17040802>> Acessado em: 20 de nov. 2024.

EPE – **Empresa de Pesquisa Energética**. (2022). Balanço Energético Nacional. Disponível em: <<https://www.epe.gov.br/pt/publicacoes-dados-abertos/publicacoes/balanco-energetico-nacional-2022>> Acesso em: 02 de mai. 2024.

_____. (2024). **Balanço Energético Nacional**. Disponível em: <https://www.epe.gov.br/sites-pt/publicacoes-dados-abertos/publicacoes/PublicacoesArquivos/publicacao-788/Atlas_Brasil_2023_PT_rev_set2024.pdf> Acesso em: 25 de out. 2024.

FARINELLI, R.; MUSSI, I. E.; MANCINI, R. T. A. (2017). Uso de resíduos agroindustriais de cana-de-açúcar na adubação da cultura do milho. **Ciência e Cultura**, v. 13, n. 2, pp. 65-73.

FRANCO, D. G. de B.; & STEINER, M. T. A. (2022). Otimização do transporte de resíduos sólidos urbanos no Estado do Paraná: repensando a localização de aterros sanitários com base em modelagem matemática. **Engenharia Sanitária e Ambiental**, 27(5), 987–993. Disponível em:<<https://doi.org/10.1590/S1413-415220210282>> Acessado em: 01 de ago. 2024.

FRANÇOSO, R. F.; BIGATON, A.; SILVA, H. J. T.; MARQUES, P. V. (2017). Relação do custo de transporte da cana-de-açúcar em função da distância. **Revista iPecege**, v. 3, n. 1, pp. 100-105.

BRASIL. (2024). **Agência Nacional do Petróleo: Distribuição e Revenda**. Disponível em: <<https://www.gov.br/anp/pt-br/servicos/legislacao-da-anp/distribuicao-e-revenda>> Acesso em: 01 de ago. 2024.

GUIMARÃES, M. A. S. (2013). Primeira usina de etanol 2G comercial do mundo é inaugurada na Itália. **Brasil Energia**. Disponível em: <<https://brasilenergia.com.br/energia/primeira-usina-de-etanol-2g-comercial-do-mundo-e-inaugurada-na-italia/>>. Acesso em: 23 out. 2024.

HAN, T.; ZHANG, B.; LI, H.; ZHANG, H.; YANG, Y.; HU, L.; REN, X.; WANG, S.; ZHENG, L.; HAN, X.; LIU, G.; ZHANG, J.; FEI, Q.; TANG, Y.; YANG, S.; BAO, X.; BAO, J. (2021). Year-Round Storage Operation of Three Major Agricultural Crop Residue Biomasses by Performing Dry Acid Pretreatment at Regional Collection Depots. **ACS Química e Engenharia Sustentável** 2021, 9 (13), 4722-4734. Disponível em: <<https://doi.org/10.1021/acssuschemeng.0c08739>> Acessado em: 17 de jul. 2024.

HARINIKUMAR, K.M.; KUDAHETTIGE-NILSSON, R.L.; DEVADAS, A.; HOLMGREN, M.; & SELLSTEDT, A. (2017). Produção de bioetanol a partir de quatro resíduos agrícolas abundantes na Índia. **Biocombustíveis**, 11 (5), 607–613. Disponível em: <<https://doi.org/10.1080/17597269.2017.1387744>> Acessado em: 17 de ago. 2024.

IBGE – Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística. (2023). Logística no Agronegócio. Imagens Anexo 2. Disponível em: <<https://www.ibge.gov.br/apps/atlasrural/#/home>> Acesso em: 17 de jul. 2024.

_____. (2024). Tabela 1612: Área plantada, área colhida, quantidade produzida, rendimento médio e valor da produção das lavouras temporárias. Brasília: IBGE. Disponível em: <<https://sidra.ibge.gov.br/pesquisa/pam/tabelas>>. Acesso em: 24 de out. 2024.

IIMI, A.; LANCELOT, E.; MANELICI, I.; OGITA, S. (2015). Impactos sociais e econômicos de melhorias em estradas rurais no estado do Tocantins, Brasil (23 de abril de 2015). **World Bank Policy Research Working Paper** No. 7249, Disponível em: <https://papers.ssrn.com/sol3/papers.cfm?abstract_id=2598360>. Acesso em: 05 de nov.2024.

IPEA – Instituto de Pesquisa Econômica Aplicada. (2012). **Diagnóstico dos Resíduos Orgânicos do Setor Agrossilvopastoril e Agroindústrias Associadas**. Brasília, DF: IPEA. Disponível em: <https://repositorio.ipea.gov.br/bitstream/11058/7687/1/RP_Diagn%c3%b3stico_2012.pdf>. Acesso em: 24 de out. 2024.

JASPERS, B. C.; KUO, P. C.; AMLADI, A.; VAN NEERBOS, W.; ARAVIND, P.V. (2021). Negative CO2 Emissions for Transportation. **Energy Res.**, 19 de abril de 2021. Sec. Captura, Utilização e Armazenamento de Carbono. Volume 9 – 2021. Disponível em: <<https://doi.org/10.3389/fenrg.2021.626538>> Acessado em: 24 de out. 2024.

JAMIL, F.; MUHAMMAD, H.; HUSSAIN, M.; AKHTER, P.; SARWER, A.; INAYAT, A.; JOHARI, K.; SHEZAD, N.; LEE, S.H.; PARK, H-K. (2023). Life cycle assessment with the transition from lignocellulose- to microalgae-based biofuels: A review. **The Journal of industrial and chemical engineering**. Disponível em: <<https://doi.org/10.1016/j.jiec.2023.12.011>> Acessado em: 26 de out. 2024.

- JI, L.Q. (2024) Insight into Energy Production and Consumption, Carbon Emissions and Agricultural Residues Resources Available for Energy and Environmental Benefits in China. **Waste Biomass Valor** 15, 3679–3690 (2024). Disponível em: < <https://doi.org/10.1007/s12649-023-02406-y> > Acessado em: 20 de out. 2024.
- JUSAKULVIJIT, P.; BEZAMA, A.; THRÄN, D. (2022). An Integrated Assessment of GIS-MCA with Logistics Analysis for an Assessment of a Potential Decentralized Bioethanol Production System Using Distributed Agricultural Residues in Thailand. **Sustainability** 2022, 14, 9885. <https://doi.org/10.3390/su14169885> Disponível em: <<https://doi.org/10.3390/su14169885>> Acessado em: 10 de ago. 2024.
- KUNCORO, E.; WURARAH, R.N.; ERARI, I. E. (2024). The impact of road infrastructure development on ecosystems and communities. *Social, Ecology, Economy for Sustainable Development Goals Journal*, 1(2), 78-90. Disponível em: <<https://doi.org/10.61511/seesdgj.v1i2.2024.336>> Acessado em: 28 de nov. 2024.
- LATIZA, R.J.P.; MUSTAFA, A.; DELOS REYES, K.; NEBRES, K.L.; RUBI, R.V.C. (2024). Plant-derived adsorbents for caffeine removal: current research and future perspectives. **Eng. Proc.** 2024, 67, 15. Disponível em: <<https://doi.org/10.3390/engproc2024067015>> Acessado em: 28 de nov. 2024.
- LEIVA, A.M.; PIÑA, B.; VIDAL, G. (2022). Risks associated with the circular economy: Treated sewage reuse in agriculture, Editor(s): Alexandros Stefanakis, Ioannis Nikolaou, *Circular Economy and Sustainability*, Elsevier, 2022, Pages 37-48. Disponível em: <<https://doi.org/10.1016/B978-0-12-821664-4.00011-X>> Acessado em: 11 de set. 2024.
- LYKOVA, O. (2021). The road infrastructure development impact on the economy of the region. **E3S Web Conference**. Volume 281, 2021. IV International Scientific Conference “Construction and Architecture: Theory and Practice of Innovative Development” (CATPID-2021 Part 1). Disponível em: <<https://doi.org/10.1051/E3SCONF/202128108012>> Acessado em: 11 de set. 2024.
- LINDO SYSTEMS, INC. (2024). **LINGO 21** - Software de modelagem de otimização para programação linear, não linear e inteira. Disponível em: < <https://lindo.com/index.php/ls-downloads/try-lingo> > Acesso em: 11 de setembro de 2024.
- LOVENSKIOLD, A. C.; HU, X.; ZHAO, W.; CHERUBINI, F. (2022). Comparing the climate change mitigation potentials of alternative land uses: Crops for biofuels or biochar vs. natural regrowth. **Geography and Sustainability**, Volume 3, Issue 4, 2022, Pages 347-357. Disponível em: <<https://doi.org/10.1016/j.geosus.2022.11.004>> Acessado em: 11 de set. 2024.
- LUSTOSA FILHO, J. F.; SILVA, A.P.F. DA; COSTA, S.T.; GOMES, H.; FIGUEIREDO, T. DE; HERNANDEZ, Z. (2024). Biochars Derived from Olive Mill Byproducts: Typology, Characterization, and Eco-Efficient Application in Agriculture - A Systematic Review. **Sustainability**, 16:12, p. 1-31. Disponível em: <<https://bibliotecadigital.ipb.pt/handle/10198/30183>> Acesso em: 05 de nov. 2024.
- MAY, A.; PARRELLA, R. A. DA C.; DAMASCENO, C. M. B.; SIMEONE, M. L. F. (2014). Sorgo como matéria-prima para produção de bioenergia: etanol e cogeração. Informe Agropecuário. **Sorgo: inovações tecnológicas**, Belo Horizonte, v. 35, n. 278, p. 14-20, jan./fev. 2014.

- MESA, L.; GONZÁLEZ, E.; ROMERO, I.; RUIZ, E.; CARA, C.; CASTRO, E. (2011). Comparison of process configurations for ethanol production from two-step pretreated sugarcane bagasse, **Chemical Engineering Journal**, Volume 175, 2011, Pages 185-191. Disponível em: <<https://doi.org/10.1016/j.cej.2011.09.092>> Acessado em 11 de set. 2024.
- NASIDI, M., AGU, R., DEENI, Y. E WALKER, G. (2016). Utilização de resíduos de culturas de sorgo inteiro para produção de bioetanol. **J. Inst. Brew.**, 122: 268 – 277. Disponível em: <<https://doi.org/10.1002/jib.324>> Acessado em: 11 de set. 2024.
- NENCIU, F.; PARASCHIV, M.; KUNCSEK, R.; STAN, C.; COCARTA, D.; VLADUT, V.N. (2022). High-Grade Chemicals and Biofuels Produced from Marginal Lands Using an Integrated Approach of Alcoholic Fermentation and Pyrolysis of Sweet Sorghum Biomass Residues. **Sustainability**, 14, 402. <https://doi.org/10.3390/su14010402> Disponível em: <<https://doi.org/10.3390/su14010402>> Acessado em: 10 de nov. 2024.
- NGUYEN, T. K. C.; TOAN, N. Q. (2024). Developing biomass energy from agricultural by-products in the context of trade development, **Energy Strategy Reviews**, Volume 54, 2024, 101417. <https://doi.org/10.1016/j.esr.2024.101417> Disponível em: <<https://doi.org/10.1016/j.esr.2024.101417>> Acessado em: 08 de set. 2024.
- NORDIN, I.; ELOFSSON, K.; JANSSON, T. (2024). 4. Cost-effective reductions in greenhouse gas emissions: Reducing fuel consumption or replacing fossil fuels with biofuels. **Energy Policy**, Disponível em: <<https://doi.org/10.1016/j.enpol.2024.114138>> Acessado em: 28 de nov. 2024.
- NUNES, L. J. R.; MATIAS, J. C. O.; LOUREIRO, L. M. E. F.; SÁ, L. C. R.; SILVA, H. F. C.; RODRIGUES, A. M.; CAUSER, T. P.; DEVALLANCE, D. B.; CIOLKOSZ, D. E. (2021). Evaluation of the Potential of Agricultural Waste Recovery: Energy Densification as a Factor for Residual Biomass Logistics Optimization. **Appl. Sci.** 2021, 11, 20. Disponível em: <<https://doi.org/10.3390/app11010020>> Acessado em: 15 de jul. 2024.
- OLIVEIRA, V. H. de; LIMA, J. R.; NASSU, R. T.; BASTOS, M. do S. R.; OSTER, A. H.; OLIVEIRA, L. M. de S. (2007). **Sistemas de gestão da qualidade no campo**. Disponível em: <<https://embrapa.br/busca-de-publicacoes/-/publicacao/48085/sistemas-de-gestao-da-qualidade-no-campo>> Acesso em: 15 de jun. 2024.
- PASHA, M.K.; RAHIM, M.; DAI, L.; LIU, D.; DU, W; GUO, M. (2024). Comparative study of a two-step enzymatic process and conventional chemical methods for biodiesel production: Economic and environmental perspectives. **Chemical Engineering Journal**, Disponível em: <<https://doi.org/10.1016/j.cej.2024.151254>> Acessado em: 21 de jul. 2024
- PROPEQ – **Empresa Júnior de Engenharia Química do Brasil**. (2020). Etanol de segunda geração: o combustível do futuro? Disponível em: <<https://propeq.com/etanol-de-segunda-geracao/>> Acesso em: 21 de jul. 2024
- RAÍZEN. (2023). **Etanol de segunda geração: potencial e oportunidades**. Disponível em: <<https://www.raizen.com.br/blog/etanol-de-segunda-geracao>> Acesso em: 21 de jul. 2024.
- REGKOUZAS, P., ASIMAKOULAS, I., ATHANASIADOU, E., KOUKOURAKI, E., E STEFANAKIS, A. (2024). O papel do biochar em uma economia circular: da agricultura às aplicações de tratamento de água e esgoto, **Assembleia Geral da EGU 2024**, Viena, Áustria,

14–19 de abril de 2024. Disponível em: < <https://doi.org/10.5194/egusphere-egu24-6788>> Acessado em: 23 de out. 2024.

SANTOS, P. (2024). Raízen inaugura usina de etanol 2G para produzir 82 milhões de litros por ano. **Globo Rural**, 2024. Disponível em: <https://globo.com/negocios/noticia/2024/05/raizen-inaugura-usina-de-etanol-2g-para-produzir-82-milhoes-de-litros-por-ano.ghtml>. Acesso em: 23 out. 2024.

SARKAR, B.; FAN, S.-K. S.; PAREEK, S.; MRIDHA, B. (2024). Sustainable multi-biofuel production with stochastic lead time and optimum energy utilization under flexible manufacturing. **Computers & Industrial Engineering**, Volume 193, 2024, 110223, ISSN 0360-8352, <https://doi.org/10.1016/j.cie.2024.110223> Disponível em: <<https://doi.org/10.1016/j.cie.2024.110223>> Acessado em: 15 de dez. 2024.

SARKAR, B.; MRIDHA, B.; PAREEK, S.; SARKAR, M.; THANGAVELU, L. (2021). A flexible biofuel and bioenergy production system with transportation disruption under a sustainable supply chain network. **Journal of Cleaner Production**, Volume 317, 2021, 128079, ISSN 0959-6526, <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2021.128079> Disponível em: <<https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2021.128079>> Acessado em: 10 de set. 2024.

SCHUBERT, P. (2023). Solving all the world's energy problems for once and forever. **Energy Syst (2023)**. Disponível em: <<https://doi.org/10.1007/s12667-023-00598-9>> Acessado em: 15 de jul. 2024.

SENAR – **Serviço Nacional de Aprendizagem Rural**. (2024). Práticas ESG no meio rural. Disponível em: <<https://senarfic.studionmx.com/classroom/cf16a1fd-c779-4014-bedb-8407a7c4f919/lessons/class/31600>> Acesso em: 29 de jul. 2024.

SIKIRU, S.; ABIOYE, K.J.; ADEDAYO, H.B.; ADEBUKOLA, S.Y.; SOLEIMANI, H.; ANAR, M. (2024). Technology projection in biofuel production using agricultural waste materials as a source of energy sustainability: A comprehensive review, **Renewable and Sustainable Energy Reviews**, Volume 200, 2024, 114535, ISSN 1364-0321, Disponível em: <<https://doi.org/10.1016/j.rser.2024.114535>> Acessado em: 21 de set. 2024.

SINGH, H.; TOMAR, S.; QURESHI, KA; JAREMKO, M.; RAI, PK. (2022). Recent Advances in Biomass Pretreatment Technologies for Biohydrogen Production. **Energies** 2022, 15, 999. Disponível em: <<https://doi.org/10.3390/en15030999>> Acessado em: 21 de set. 2024.

TAGNE, R. F. T.; SANTAGATA, R.; TCHUIFON, D. R. T.; ATANGANA, J. A. K.; ATEBA, F. R.; VINTILA, T.; NDIFOR-ANGWAGOR, N. G.; ANAGHO, S. G.; ULGIATI, S. (2022). Environmental impact of second-generation biofuels production from agricultural residues in Cameroon: A life-cycle assessment study, **Journal of Cleaner Production**, Volume 378, 2022, 134630, ISSN 0959-6526, <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2022.134630> Disponível em: <<https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2022.134630>> Acessado em: 23 de out. 2024.

TAGUCHI, V. (2014). Etanol 2G já está sendo produzido no Brasil. **Globo Rural**. Disponível em: <https://globo.com/Noticias/Agricultura/Cana/noticia/2014/09/etanol-2g-ja-esta-sendo-produzido-no-brasil.html>. Acesso em: 23 de out. 2024.

TAHERI, N.; JAHANI, H.; PISHVAEE, M. S. (2024). Modeling sustainable bioethanol supply chain in Australia: A system dynamics approach. **Renewable Energy**, Volume 227, 2024, 120481, ISSN 0960-1481, <https://doi.org/10.1016/j.renene.2024.120481> Disponível em:<<https://doi.org/10.1016/j.renene.2024.120481>> Acessado em: 23 de out. 2024.

TIWARI, S.; BELIYA, E.; VASWANI, M. (2022). Rice Husk: A Potent Lignocellulosic Biomass for Second Generation Bioethanol Production from *Klebsiella oxytoca* ATCC 13182. **Waste Biomass Valor** **13**, 2749–2767 (2022). Disponível em:<<https://doi.org/10.1007/s12649-022-01681-5>> Acessado em: 23 de out. 2024.

TUNIO, A. A.; NAQVI, M.; KHUSHK, A. S. Q. I.; JATT, A. N.; NIZAMI, A.-S.; NAQVI, H. A.; CHARAN, T. R.; BHUTTO, M. A.; QAMER-U-NISA, N. A. T. (2024). Multi enzyme production from mixed untreated agricultural residues applied in enzymatic saccharification of lignocellulosic biomass for biofuel, **Process Safety and Environmental Protection**, Volume 186, 2024, Pages 540-551, ISSN 0957-5820, <https://doi.org/10.1016/j.psep.2024.04.039> Disponível em:<<https://doi.org/10.1016/j.psep.2024.04.039>> Acessado em: 23 de nov. 2024.

TUURE, J.; RÄSÄNEN, M.; HAUTALA, M.; PELLIKKA, P.; MÄKELÄ, P. S. A.; ALAKUKKU, L. (2021). Plant residue mulch increases measured and modelled soil moisture content in the effective root zone of maize in semi-arid Kenya, **Soil and Tillage Research**, Volume 209, 2021, 104945, ISSN 0167-1987, <https://doi.org/10.1016/j.still.2021.104945> Disponível em:<<https://doi.org/10.1016/j.still.2021.104945>> Acessado em: 23 de nov. 2024.

ÚNICA – **União da Indústria de Cana-de-Açúcar e Bioenergia**. (2024). ETANOL: Combustível do Presente e Futuro da Mobilidade Sustentável. Disponível em:<<https://unica.com.br/setor-sucroenergetico/etanol/>> Acesso em: 07 de nov. 2024.

VANNUCCHI, F.; BONDI, G.; TRAVERSARI, S.; PERUZZI, E.; DONI, S.; MASCIANDRO, G.; CARPI, J.; CALCAPRINA, M.; MACCI, C. (2024). Vermicomposting Nursery Green Waste: A Circular Economy Approach. **Waste Biomass Valor** **15**, 3803–3810 (2024). Disponível em:<<https://doi.org/10.1007/s12649-024-02444-0>> Acessado em: 17 de nov. 2024.

VEDOVATTO, F. (2021). **Produção de Etanol 2G e Biogás utilizando Resíduos da Cultura da Soja**. Disponível em:<https://repositorio.ufsm.br/bitstream/handle/1/23342/TES_PPGEA_2021_VEDOVATTO_FELIPE.pdf?sequence=1&isAllowed=y> Acesso em: 09 de set. 2024.

VITAL, A. (2024). Custo do CTT na safra 2023/24 na região Centro-Sul fica em R\$ 39,51. **JornalCana**, 2024. Disponível em:<<https://jornalcana.com.br/agricultura/custo-do-ctt-na-safra-2023-24-na-regiao-centro-sul-fica-em-r-3951>>. Acesso em: 24 de out. 2024.

VOLPI, M. P. C.; FUESS, L. T.; MORAES, B. S. (2023). Economic performance of biogas production and use from residues co-digestion in integrated 1G2G sugarcane biorefineries: Better electricity or biomethane? **Energy Conversion and Management**, Volume 277, 2023, 116673, ISSN 0196-8904, <https://doi.org/10.1016/j.enconman.2023.116673> Disponível em:<<https://doi.org/10.1016/j.enconman.2023.116673>> Acessado em: 24 de out. 2024.

YANG, H.; WEI, Y.; YAN, X.; NIE, C.; SUN, Z.; HAO, L.; SU, X. (2022). Effects of Biochar and Compost Application on Soil Properties and on the Growth and Yield of Hot

Pepper (*Capsicum annuum* L.). **Nanomaterials** **2022**, 12, 3241.
<https://doi.org/10.3390/nano12183241> Disponível
em:<<https://doi.org/10.3390/nano12183241>> Acessado em: 17 de out. 2024.

YETILMEZSOY, K.; ÇETINKAYA, A. Y.; BILGILI, L. (2022). A Synergistic Assessment of Bio-kinetics and Life Cycle Environmental Impacts of Different Agricultural Biomass Sources in Turkey. **Waste Biomass Valor** **13**, 2651–2671 (2022). Disponível em:<<https://doi.org/10.1007/s12649-021-01674-w>> Acessado em: 11 de out. 2024.

ZHIYONG, L; QINGHUI, W.; ZHENGXIN, Z.; SHENGNAN, Z.; SHUANGLING, Z.; LIFENG, X.; YAN, G.; XUEJUN, C. (2021). Green synthesis of carbon quantum dots from corn stalk shell by hydrothermal approach in near-critical water and applications in detecting and bioimaging, **Microchemical Journal**, Volume 166, 2021, 106250, ISSN 0026-265X, <https://doi.org/10.1016/j.microc.2021.106250> Disponível em:<<https://doi.org/10.1016/j.microc.2021.106250>> Acessado em: 11 de nov. 2024.

APÊNDICE 1 – BIBLIOGRAFIA SELECIONADA

O Quadro 10 sintetiza os principais temas e autores selecionados no processo de busca nas bases de dados *SCOPUS* e *WoS*.

Quadro 10 – Resumo dos documentos selecionados.

Tema	Autor	Resumo
Problemas de Energia e Uso de Biomassa	Singh <i>et al.</i> , 2022	O mundo enfrenta sérios problemas de energia devido ao uso de fontes não renováveis, causando mudanças climáticas desastrosas. Resíduos como bagaço de cana e amido podem ser usados para produção de hidrogênio e produtos químicos de valor agregado. O pré-tratamento da biomassa é necessário para melhorar a hidrólise enzimática.
Conversão de Biomassa em Produtos Valiosos	Yang <i>et al.</i> , 2022	Uso de biomassa residual para produzir C-dots, um nanomaterial fluorescente com várias aplicações devido às suas propriedades únicas. O talo de híbrido de milho é um resíduo agrícola abundante e adequado para a produção de produtos químicos úteis.
Conversão de Resíduos Agrícolas em Energia	Schubert, 2023	Resíduos agrícolas podem ser convertidos em gás de síntese rico em hidrogênio, usado para extração de hidrogênio ou como combustível para geradores elétricos, fornecendo energia para áreas rurais e fora da rede.
Aproveitamento de Resíduos Agrícolas	Behl <i>et al.</i> , 2023	Resíduos agrícolas, como talo de milho, podem ser usados para produzir bioetanol. Essa abordagem ajuda a superar a crise energética, reduz a poluição ambiental e oferece uma fonte de renda adicional para os agricultores.
Codigestão em Biorrefinarias de Cana-de-Açúcar	Volpi <i>et al.</i> , 2023	Codigestão de resíduos em biorrefinarias de cana-de-açúcar aumenta a produção de biogás. No entanto, a falta de incentivos de políticas públicas é um gargalo para a implementação de usinas de biogás no Brasil.
Reutilização de Resíduos em Biocombustíveis	Tagne <i>et al.</i> , 2022	Resíduos não alimentares são usados para produzir biocombustíveis, como bioetanol e biodiesel, contribuindo para a neutralidade de carbono e segurança energética, além de prevenir a poluição.
Bioetanol de Segunda Geração	Tiwari <i>et al.</i> , 2022	Produção de bioetanol a partir de resíduos agrícolas é uma solução sustentável para a crise energética e redução da poluição ambiental. O bioetanol é ecológico, econômico e pode ser produzido a partir de resíduos baratos e abundantes.
Biocombustíveis de Primeira e Segunda Geração	Ali <i>et al.</i> , 2024	Biocombustíveis de primeira geração, derivados de culturas comestíveis, têm desafios de longo prazo. A segunda geração, usando biomassa lignocelulósica, oferece uma solução mais sustentável e eficiente para a produção de biocombustíveis.
Uso de Terras Degradadas para Biocombustíveis	Nenciu <i>et al.</i> , 2022	Utilização de terras marginais para produzir bioetanol e bio-óleo a partir de sorgo sacarino é uma direção importante para proteção ambiental e transição para combustíveis renováveis.
Polímeros de Base Biológica	Nenciu <i>et al.</i> , 2022	Transformação de biomassa em elementos químicos fundamentais para produtos comuns depende da disponibilidade de matéria-prima e avanços simultâneos em várias áreas de pesquisa.

Tema	Autor	Resumo
Disponibilidade de Biomassa Lignocelulósica	Elsagan <i>et al.</i> , 2023	Biomassa lignocelulósica, como palha de híbrido de milho e palha de trigo, é abundante e econômica para produção de bioetanol, proporcionando benefícios ambientais e econômicos.
Tipos de Biocombustíveis	Becerra-Pérez <i>et al.</i> , 2022	Biocombustíveis são classificados em quatro categorias: primeira geração (amido, açúcar, óleo vegetal), segunda geração (biomassa lignocelulósica), terceira geração (algas), e quarta geração (microalgas, cianobactérias).
Resíduos Agrícolas e Bioetanol Celulósico	Becerra-Pérez <i>et al.</i> , 2022	Resíduos agrícolas, como palha de híbrido de milho e bagaço de cana, são usados para produzir etanol celulósico, ajudando a resolver crises energéticas e ambientais.
Pirólise de Resíduos Agrícolas	Ji, 2024	Pirólise converte resíduos agrícolas em bio-óleo e biochar, usados como combustível e para sequestro de carbono, respectivamente, trazendo benefícios energéticos e ambientais.
Utilização de Resíduos Agrícolas	Tunio <i>et al.</i> , 2024	Resíduos agrícolas são renováveis e ambientalmente benéficos, usados para biocombustíveis e produção de enzimas, contribuindo para a economia circular e energia sustentável.
Desafios na Produção de Bioenergia	Nunes <i>et al.</i> , 2021	Biomassa residual é produzida longe dos centros urbanos, e os custos de transporte e logística são desafios para a viabilidade e sustentabilidade da produção de bioenergia.
Geração de Eletricidade a partir de Cana-de-Açúcar	Crotman <i>et al.</i> , 2024	Produção de eletricidade a partir da cana-de-açúcar é comum no Brasil, e o uso de resíduos de outras culturas para energia pode diminuir a competição entre combustível e alimentos.
Otimização da Cadeia de Suprimentos	Crotman <i>et al.</i> , 2024	Custos de transporte são um fator importante na produção de bioenergia, e otimizar a cadeia de suprimentos é essencial devido à colheita dispersa e instalações de conversão imaturas.
Energias Renováveis na Agricultura	Nguyen <i>et al.</i> , 2024	Energias renováveis na agricultura incluem geração de eletricidade para tarefas agrícolas e uso de biomassa para produção de energia, aceitas se forem de qualidade e custo acessíveis.
Desperdício de Alimentos e Biogás	Yetilmezsoy <i>et al.</i> , 2022	Desperdício de alimentos é um substrato adequado para digestão anaeróbica, aumentando a produção de biogás e contribuindo para o gerenciamento de resíduos urbanos.
Erosão do Solo e Resíduos Agrícolas	Tuure <i>et al.</i> , 2021	Manejo intensivo de solos requer controle da erosão e retorno de resíduos ao solo como cobertura morta para produzir grandes quantidades de biomassa disponível.
Transformação de Resíduos Verdes	Vannucchi <i>et al.</i> , 2024	Transformação de resíduos verdes em produtos úteis é prioridade devido à sua alta variabilidade e presença de material lignocelulósico recalcitrante à biodegradação.
Subprodutos da Produção de Vinho	Doni <i>et al.</i> , 2024	Subprodutos da produção de vinho, como bagaço de uva, são recursos valiosos e subutilizados na Itália, com potencial de cerca de 2,4 milhões de toneladas disponíveis.
Transporte e Produção de Bioenergia	Sarkar <i>et al.</i> , 2021 e 2024	Transporte de biomassa de áreas agrícolas para plantas de bioenergia é um desafio, e uso de multimodalidades de transporte pode ser necessário para superar interrupções logísticas.

Fonte: Dados da Pesquisa (2024).

APÊNDICE 2 – APLICAÇÕES DE BIOCOMBUSTÍVEIS 2G

No Quadro 11 está apresentado um resumo dos autores referenciados, com destaque para a projeção do custo-benefício dos processos e tecnologias discutidos na dissertação, considerando a aplicação prática dos biocombustíveis de segunda geração (2G) produzidos a partir de resíduos agrícolas.

Quadro 11 – Aplicação Prática dos Biocombustíveis de 2G.

Processo/Tecnologia	Descrição	Custos	Benefícios	Referenciais
Pré-tratamento (Moagem e Pirólise)	Preparação dos resíduos secos agrícolas (ex.: moagem para melhor hidrólise enzimática e pirólise para produção de bio-óleo e biochar).	Investimento inicial: Equipamentos de moagem e pirólise são de alto custo. Manutenção: Gastos recorrentes com manutenção de maquinário.	Aumento de Eficiência: Reduz a degradação e aumenta o rendimento de biocombustíveis por tonelada de resíduo processado. Valorização de Subprodutos: Biochar pode ser vendido como sequestro de carbono ou fertilizante, gerando renda extra.	Ji,2024; Singh <i>et al.</i> , 2022; Tiwari <i>et al.</i> , 2022.
Armazenagem (Compactação e Briquetagem)	Métodos de armazenamento de resíduos para conservar qualidade e reduzir volume de transporte.	Custo com equipamentos de compactação e briquetagem. Infraestrutura: Necessidade de áreas de armazenamento específicas.	Redução de Perda: Minimiza degradação por umidade, preservando qualidade e aumentando o rendimento. Facilidade de Transporte: Menor volume reduz custos de transporte e facilita manuseio.	Nasidi <i>et al.</i> , 2016; Mesa <i>et al.</i> , 2011; Harinikumar <i>et al.</i> , 2017.
Transporte e Logística	Implementação de rotas otimizadas para o transporte de biomassa.	Combustível e transporte: Altos custos devido à necessidade de transporte frequente. Infraestrutura: Investimento em manutenção de estradas e frotas.	Economia com Roteirização: Redução de custos logísticos com otimização de rotas (uso de algoritmos PRV). Redução de Emissões: Menor consumo de combustível devido à otimização.	Nunes <i>et al.</i> , 2021; Crotman <i>et al.</i> , 2024.

Processo/Tecnologia	Descrição	Custos	Benefícios	Referenciais
Conversão em Etanol 2G	Processo que transforma resíduos secos em etanol por fermentação de lignocelulose (técnica de hidrólise enzimática).	Processo de Hidrólise Enzimática: Custos elevados para enzimas e manutenção do sistema. Investimento em P&D: Necessário para adaptar tecnologia às diferentes biomassas.	Sustentabilidade Econômica: Produção de energia limpa com menor pegada de carbono. Potencial Econômico: Mercado de biocombustíveis crescente com incentivos governamentais, e possibilidade de retorno a médio/longo prazo.	Elsagan <i>et al.</i> , 2023; Schubert, 2023; Volpi <i>et al.</i> , 2023.
Gestão e Implementação de Economia Circular	Uso de resíduos residuais (ex.: biochar, resíduos de fermentação) para criação de novos produtos.	Custo de implementação: Necessidade de estrutura para coleta e reaproveitamento de subprodutos. Capacitação: Treinamento para uso eficiente da economia circular.	Redução de Resíduos: Minimiza o descarte inadequado e reduz custos de descarte. Valor Agregado: Potencial para venda de subprodutos em mercados de carbono e fertilizantes.	Yang <i>et al.</i> , 2022; SENAR, 2024.

Fonte: Dados da Pesquisa (2024)

APÊNDICE 3 – INCENTIVOS FISCAIS E POLÍTICAS PÚBLICAS

No Quadro 12 estão apresentados alguns incentivos fiscais e políticas públicas para a viabilização do projeto de biocombustíveis 2G, além de exemplos específicos de incentivos.

Quadro 12 – Incentivos Fiscais e Políticas Públicas.

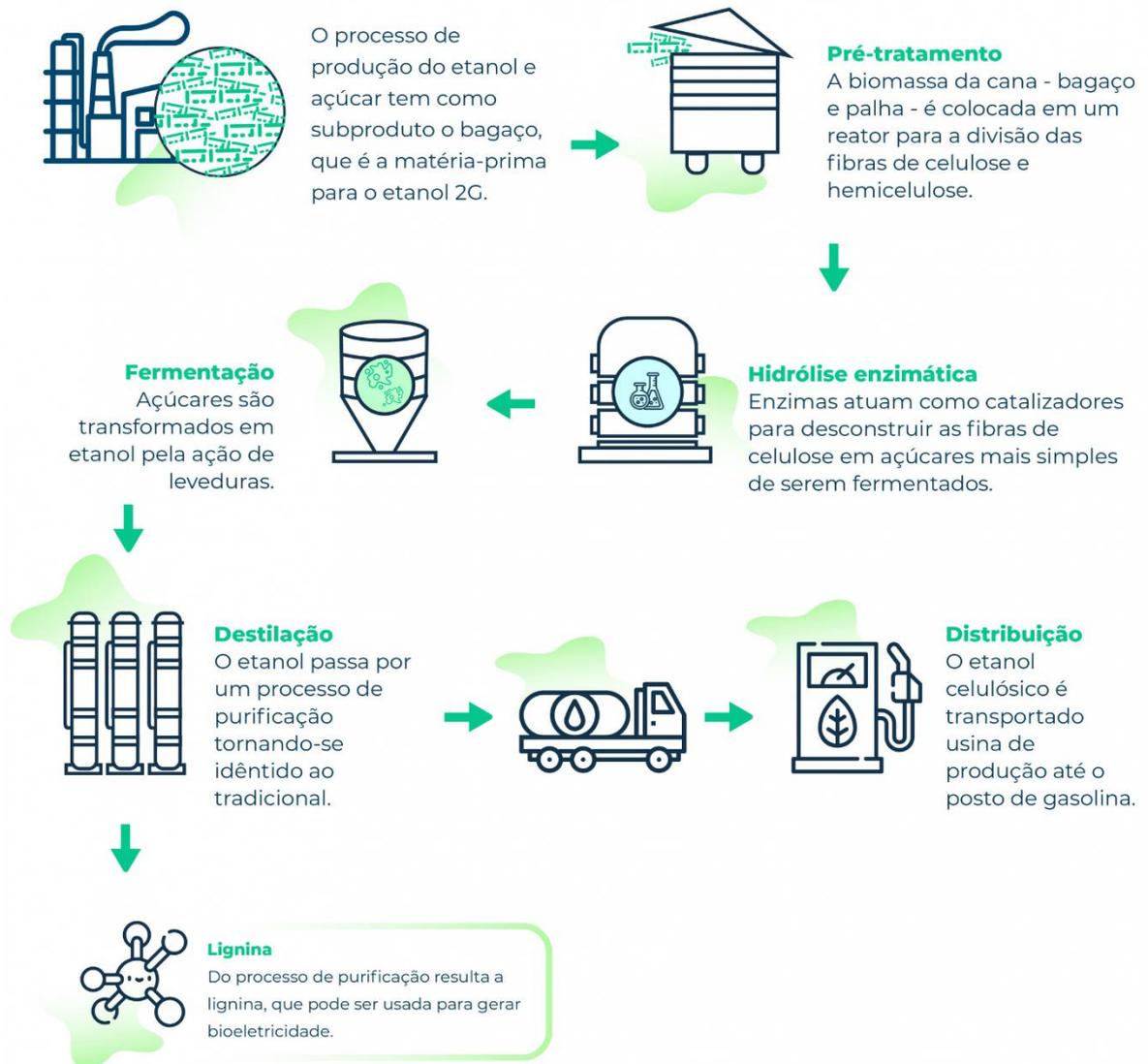
Objetivo do Incentivo	Descrição	Exemplos de Incentivos Fiscais e Políticas Públicas	Impacto Esperado	Autores de Referência
Redução de Custos de Produção	Diminuição dos altos custos iniciais, especialmente em maquinário e manutenção.	- Isenção de ICMS e IPI para máquinas e insumos específicos. - Redução de alíquotas sobre equipamentos e tecnologias de conversão de biomassa.	Redução nos custos operacionais e aumento do investimento inicial no setor.	Nunes <i>et al.</i> , 2021; Volpi <i>et al.</i> , 2023.
Promoção da Economia Circular e Redução de Resíduos	Incentivo ao uso de resíduos agrícolas para geração de energia, contribuindo para uma economia circular.	- Créditos fiscais para empresas que reutilizam resíduos agrícolas. - Expansão da Política Nacional de Resíduos Sólidos para incluir o reaproveitamento agrícola com benefícios fiscais.	Sustentabilidade e redução de desperdício com maior utilização de resíduos como matéria-prima para biocombustíveis.	SENAR, 2024; Ji, 2024.
Apoio à Infraestrutura e Logística	Facilitação no transporte e armazenagem de biomassa através de melhorias na infraestrutura.	- Linhas de crédito para manutenção e desenvolvimento de estradas, ferrovias e hidrovias para transporte de biomassa. - Subvenções para empresas que investem em tecnologias de logística otimizada.	Menor custo logístico e maior eficiência no transporte, ampliando a viabilidade econômica do projeto.	Crotman <i>et al.</i> , 2024; Collicchio <i>et al.</i> , 2022.
Fomento à Pesquisa e Desenvolvimento (P&D)	Estímulo à inovação e desenvolvimento de tecnologias mais eficientes para conversão de resíduos em biocombustíveis.	- Concessão de bolsas e financiamento para P&D em biocombustíveis de 2G. - Incentivos para parcerias com instituições de pesquisa e universidades.	Desenvolvimento de novas tecnologias e aumento da eficiência produtiva, com benefícios econômicos a longo prazo.	Tiwari <i>et al.</i> , 2022; Elsagan <i>et al.</i> , 2023
Incentivo ao Mercado de Carbono e Sustentabilidade	Redução de emissões de carbono, promovendo práticas sustentáveis no setor energético.	- Comercialização de créditos de carbono para empresas que produzem biocombustíveis 2G. - Incentivos fiscais para empresas certificadas em práticas de baixo carbono.	Atração de novos investidores focados em ESG, aumento da competitividade no mercado de energia sustentável.	Schubert, 2023; SENAR, 2024

Fonte: Dados da Pesquisa (2024).

ANEXO 1 – PROCESSO DE PRODUÇÃO BIOCOMBUSTÍVEL 2G

A Figura 27, elaborada pela União da Indústria de Cana-de-Açúcar e Bioenergia (UNICA), ressalta que o etanol de segunda geração, ou etanol celulósico, é gerado a partir dos subprodutos da produção de etanol e açúcar (palha e bagaço) e possibilita um incremento da produção do biocombustível, sem aumento da área cultivada (UNICA, 2024).

Figura 27 – Produção de Etanol 2G.



Fonte: ÚNICA (2024).

ANEXO 2 – GERAÇÃO E DESTINAÇÃO DE RESÍDUOS SECOS

As Figuras 28 a 37, são referentes a Geração e destinação de resíduos secos agrícolas, gerados pelo setor sucroenergético do estado de Minas Gerais, nos anos de 2022 e 2023, ambos no período de julho.

Figura 28 – Pesagem da cana-de-açúcar através dos caminhões bi-trem.



Fonte: Coelho, R. R. F. I.(2023).

Figura 29 – Descarregamento da matéria-prima nos hilos.



Fonte: Coelho, R. R. F. I. (2023).

Figura 30 – Processo a extração via difusão.



Fonte: Coelho, R. R. F. I. (2023).

Figura 31 – Transporte do bagaço gerado.



Fonte: Coelho, R. R. F. I. (2023).

Figura 32 – Detalhes da pilha de bagaço e da bica de saída do bagaço para o local.



Fonte: Coelho, R. R. F. I. (2022).

Como a queima da biomassa gera gases/poluentes, os gases são submetidos a um lavador de gases de maneira a manter padrões nas emissões atmosféricas. A lavagem retém as cinzas (cinzas de caldeira), sendo este efluente destinado para células de sedimentação, para reter os sólidos e destiná-los para as áreas de cultivo de cana-de-açúcar como adubo. Após a sedimentação, a parte sólida é retirada das células por meio de tratores e dispostos em caminhões basculante.

Figura 33 – Lavador de gases.



Fonte: Coelho, R. R. F. I. (2022).

Figura 34 – Células de sedimentação.



Fonte: Coelho, R. R. F. I. (2023).

Outro processo utilizado é o de Vácuo de Leito Compressivo (VLC), que consiste em uma forma de prensagem para separação líquido-sólido, direcionando a parte sólida por meio de caminhões basculante para a área agrícola.

Figura 35 – Forma de prensagem.



Fonte: Coelho, R. R. F. I. (2022).

A torta de filtro é um resíduo proveniente da filtração do caldo extraído das moendas, produzida na ordem de 2,5 a 3,5% de cana moída e apresenta elevada umidade, teor de matéria orgânica, fósforo, cálcio, magnésio e nitrogênio.

A torta de filtro é direcionando por meio de caminhões basculante para área de compostagem ou secagem e posterior destino à área agrícola.

Figura 36 – Caminhão de transporte.



Fonte: Coelho, R. R. F. I. (2022).

Figura 37 – Área de compostagem.



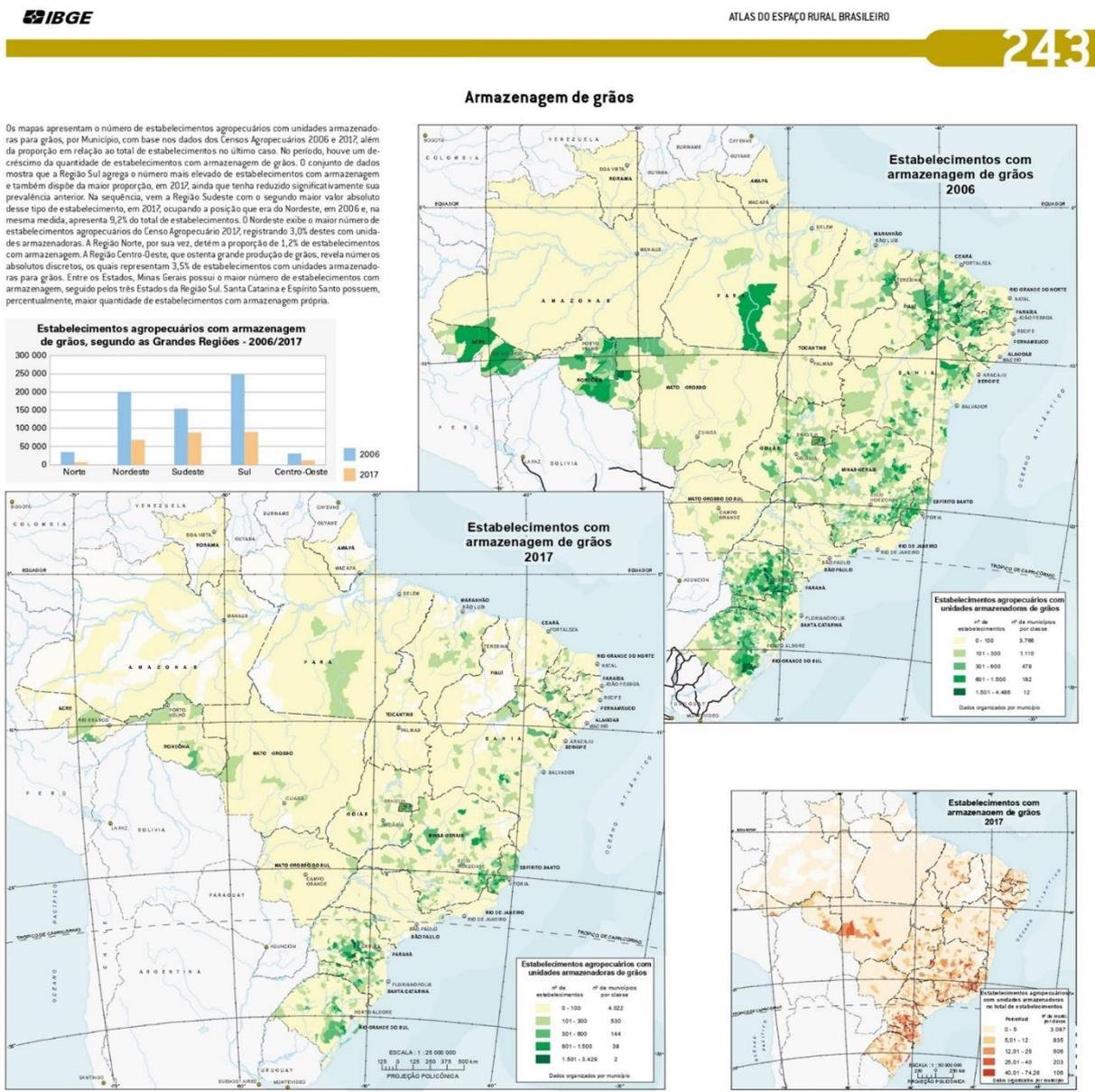
Fonte: Coelho, R. R. F. I. (2022).

ANEXO 3 – LOGÍSTICA E INFRAESTRUTURA

Os mapas apresentados a seguir, têm grande relevância para a análise da cadeia produtiva e da distribuição da produção agrícola no Brasil. São essenciais para entender a dinâmica do setor agropecuário brasileiro, identificar gargalos logísticos, planejar investimentos e subsidiar políticas públicas para melhorar a competitividade do agronegócio.

Cada figura contribui para o entendimento da logística agropecuária, desde o armazenamento até o escoamento dos produtos. Na Figura 38, observa-se a evolução da capacidade de armazenamento de grãos ao longo do período, permitindo identificar tendências de crescimento, gargalos logísticos e possíveis déficits na infraestrutura.

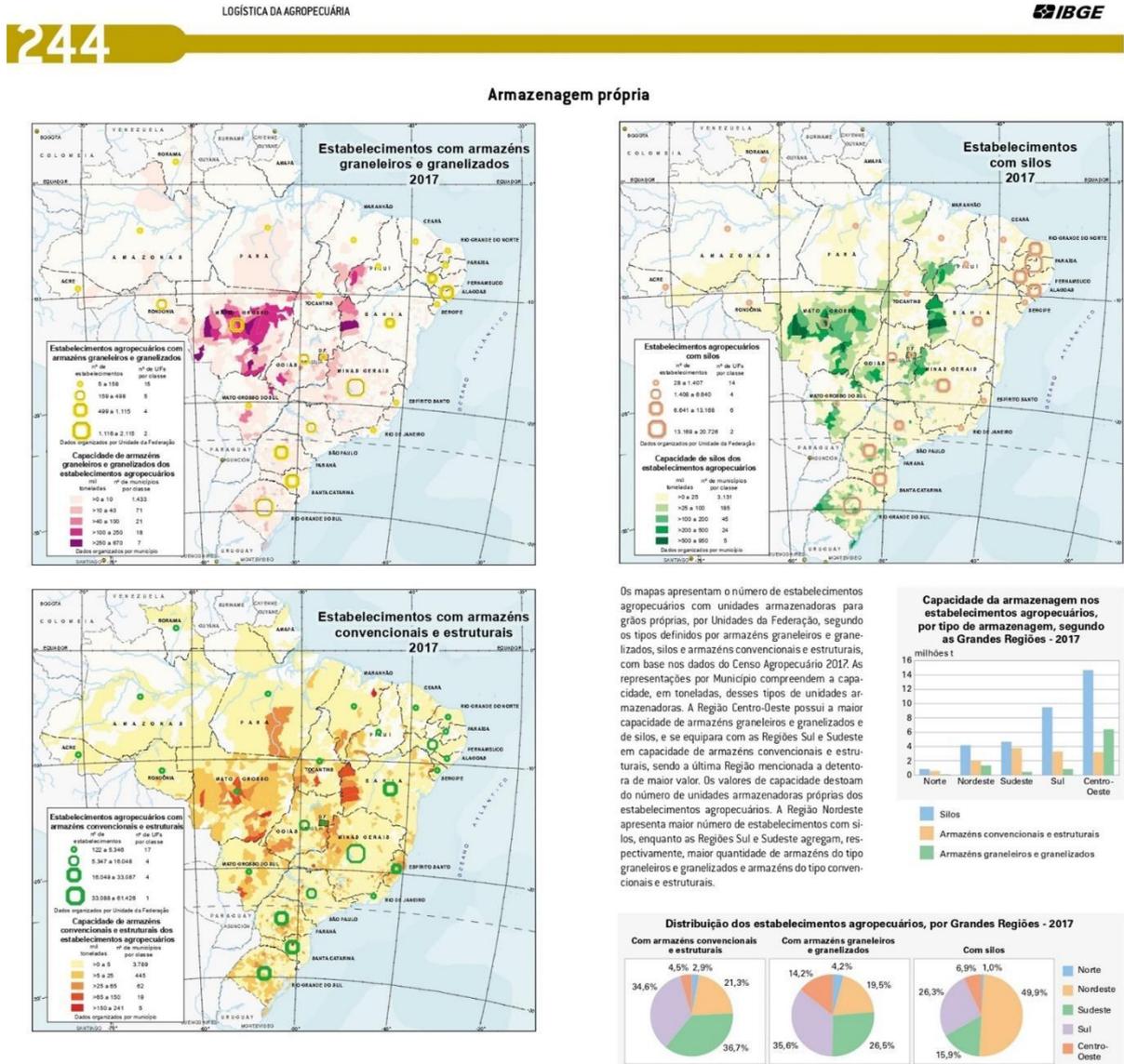
Figura 38 – Armazenagem de grãos 2006/2017



Fonte: IBGE (2023)

Na Figura 39, evidencia a capacidade de armazenamento dos próprios produtores, o que influencia diretamente na gestão da produção e na dependência de estruturas públicas ou privadas.

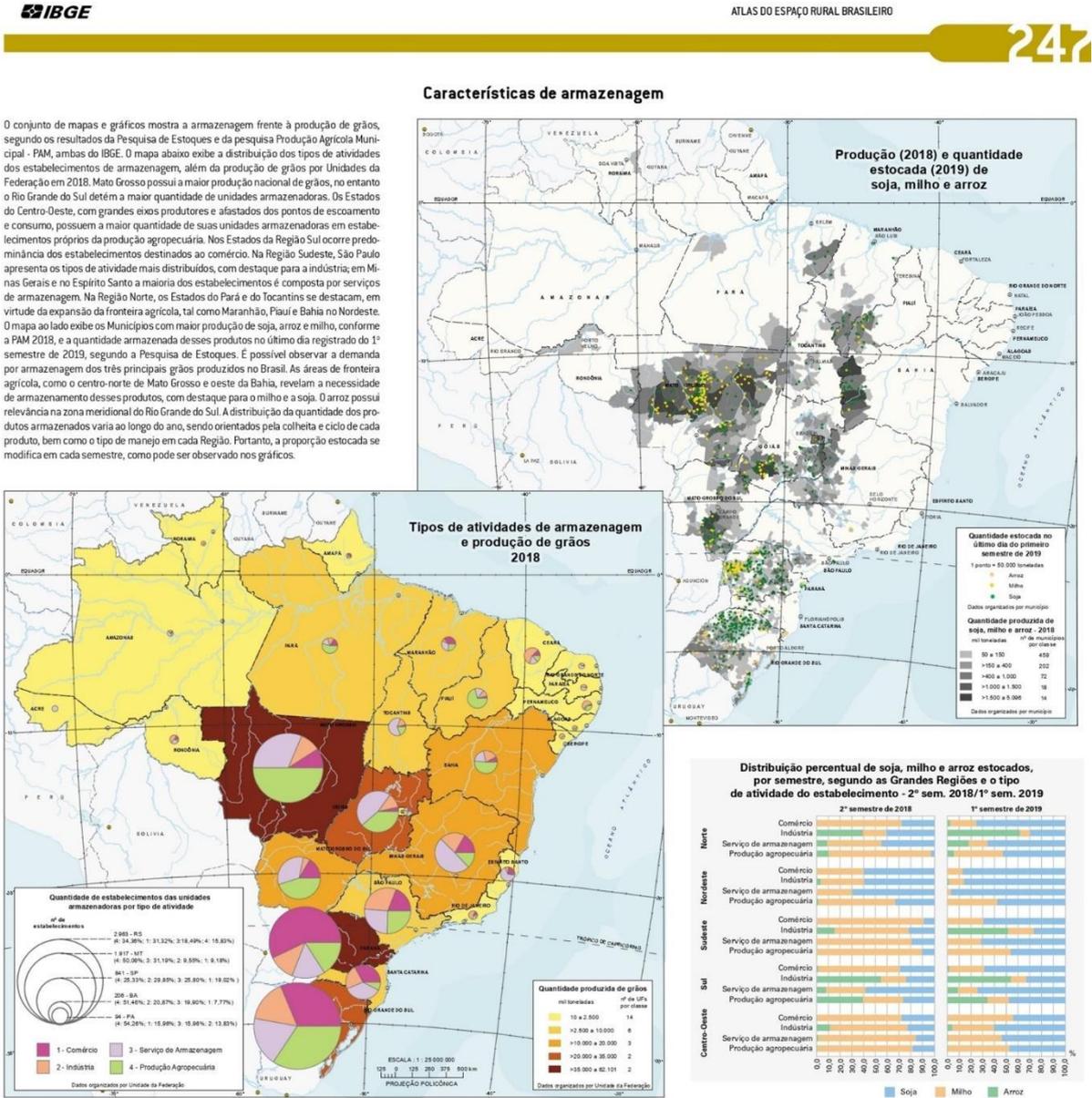
Figura 39 – Armazenagem própria



Fonte: IBGE (2023)

Na Figura 40, detalha aspectos específicos das estruturas de armazenagem, como tipos de silos, capacidade e distribuição geográfica, ajudando na avaliação da eficiência do setor.

Figura 40 – Características Armazenagem.



Na Figura 41, apresenta os principais meios e rotas de transporte utilizados para o escoamento da produção agrícola, permitindo identificar os principais desafios e oportunidades de melhoria.

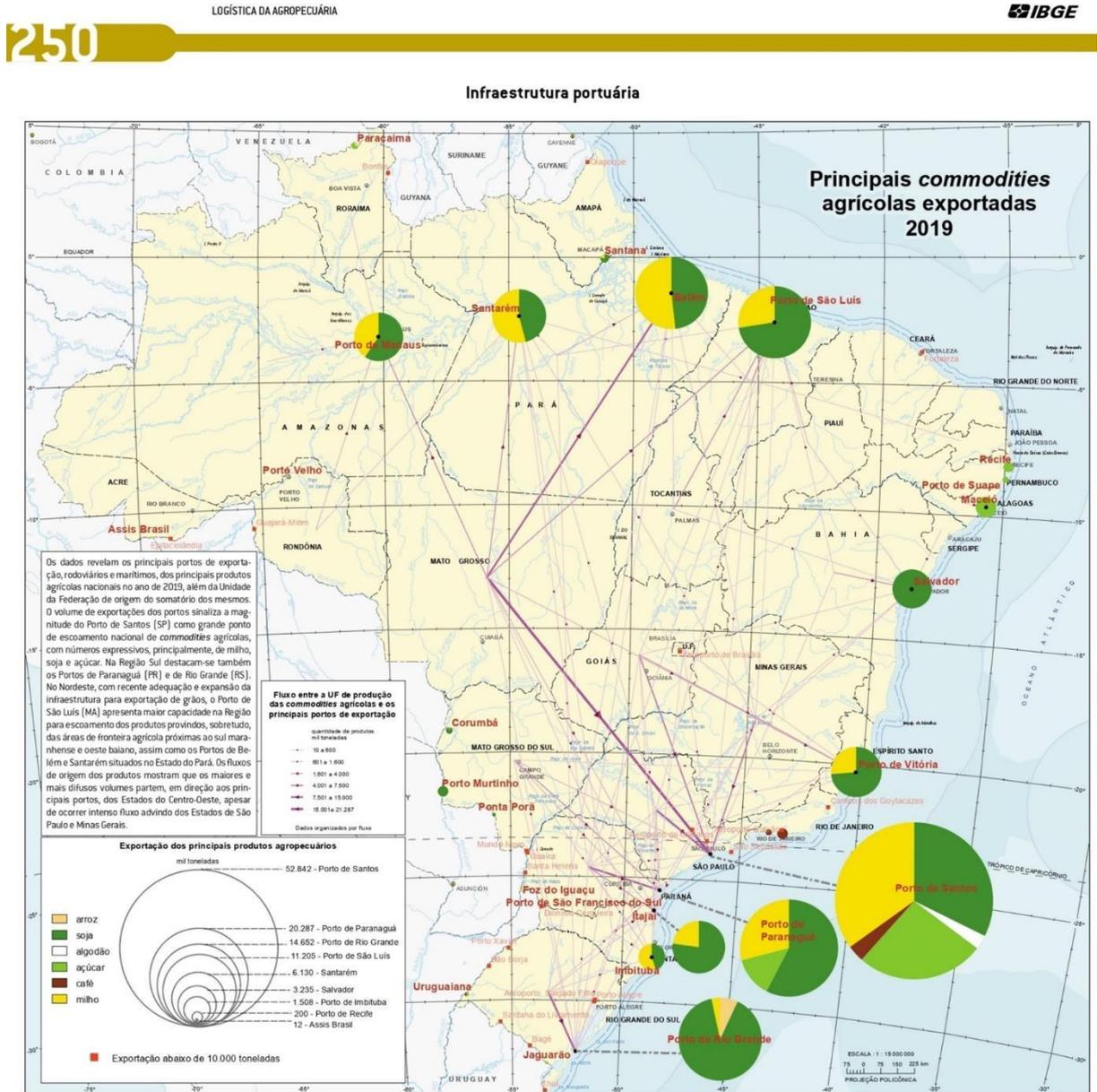
Figura 41 – Logística Agropecuária



Fonte: IBGE (2023)

Na Figura 42, destaca a capacidade e a distribuição dos portos utilizados para exportação de commodities agrícolas, essencial para avaliar gargalos logísticos e a eficiência do comércio exterior.

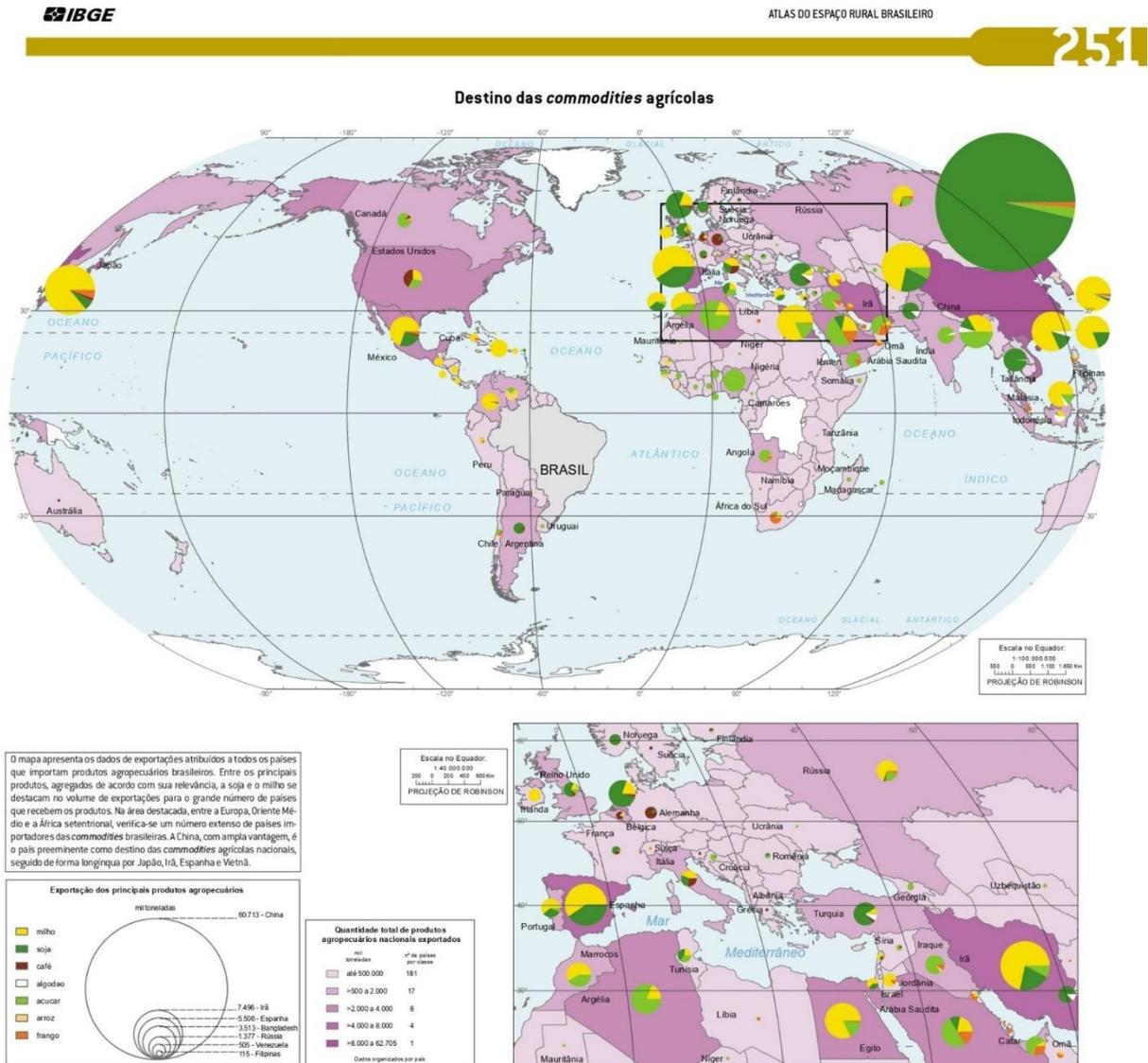
Figura 42 – Infraestrutura portuária.



Fonte: IBGE (2023)

Na Figura 43, identifica os mercados consumidores dos produtos agropecuários brasileiros, auxiliando na análise de tendências comerciais e dependência de determinados destinos.

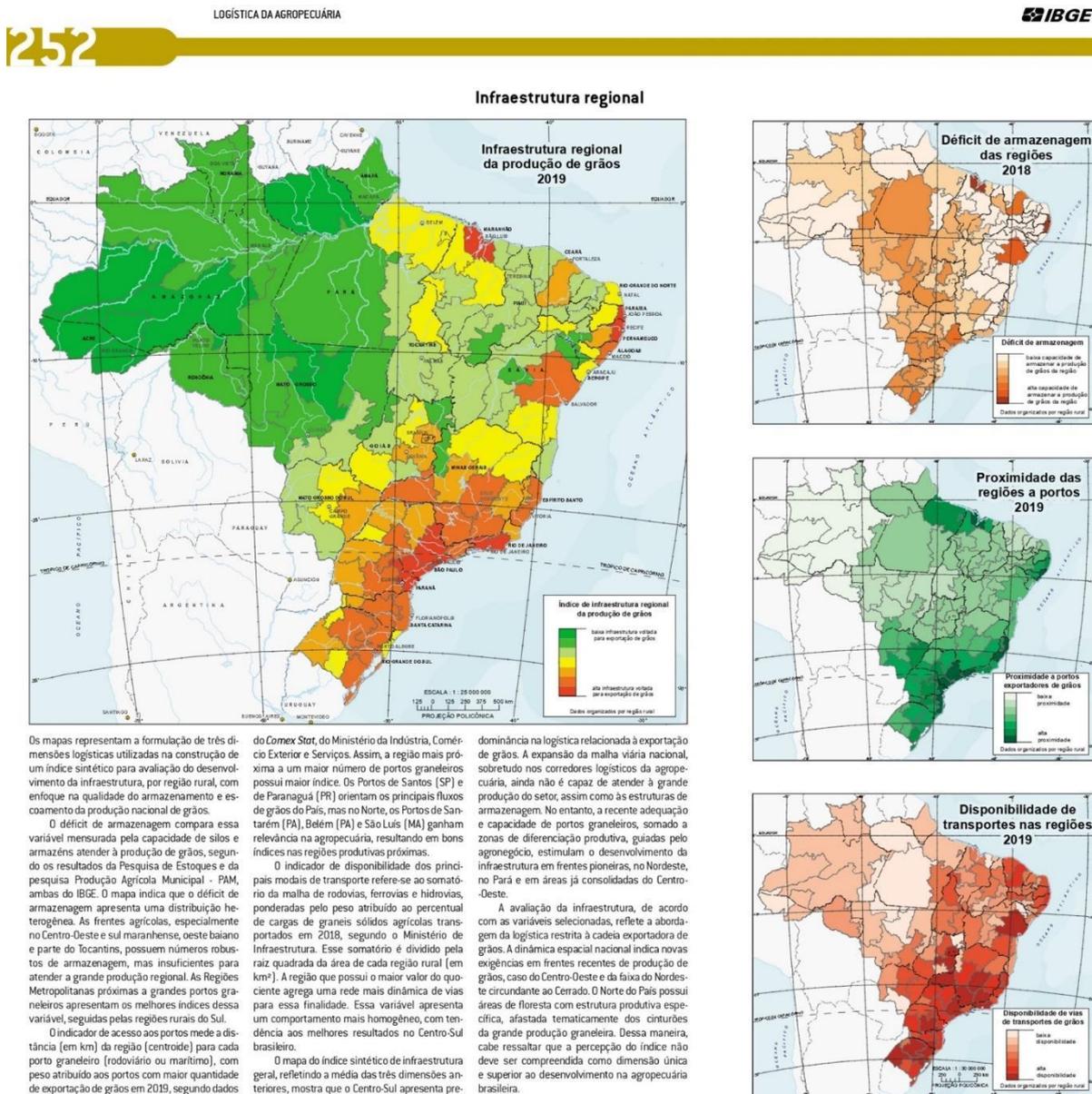
Figura 43 – Destino Commodities agrícolas.



Fonte: IBGE (2023)

Na Figura 44, permite visualizar a distribuição da infraestrutura logística em diferentes regiões do país, destacando desigualdades e potenciais áreas de investimento.

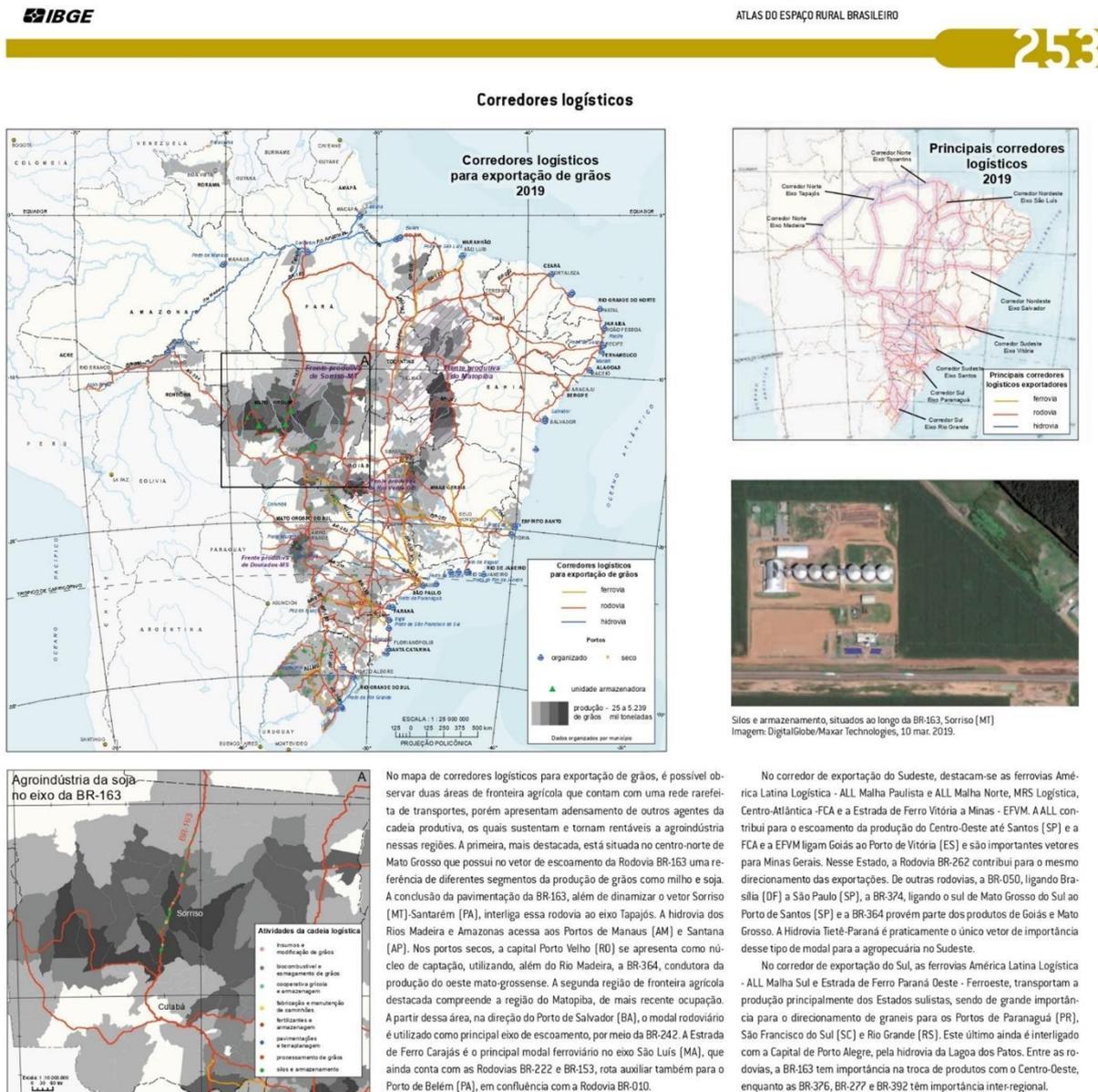
Figura 44 – Infraestrutura regional.



Fonte: IBGE (2023)

Na Figura 45, aponta os principais corredores de transporte da produção agropecuária, fundamentais para a competitividade do setor e o planejamento de políticas públicas voltadas para a logística.

Figura 45 – Corredores Logísticos.



Fonte: IBGE (2023)

ANEXO 4 – PRODUÇÃO DE CULTURAS SELECIONADAS

Nas tabelas 12, 13 e 14, a seguir, os dados foram obtidos no Sistema IBGE de Recuperação Automática - SIBRA, no período temporal de 2022, onde estão identificados nesta seleção apenas os municípios produtores de híbrido de milho, soja, cana-de-açúcar e sorgo. Destacas as variáveis como Área plantada (em hectares), Área colhida (em hectares), Quantidade produzida (em toneladas), Rendimento médio da produção (em quilogramas por hectare) e o Valor da produção (em mil reais).

Tabela 12 – Produção híbrido de milho (em grão).

Ano - 2022					
Produto das lavouras temporárias - Milho (em grão)					
UF, Mesorregião, Microrregião e Município, em ordem de código de Meso e Micro, e nome de Município - TO	Variável				
	Área plantada (Hectares)	Área colhida (Hectares)	Quantidade produzida (Toneladas)	Rendimento médio da produção (Quilogramas por Hectare)	Valor da produção (Mil Reais)
Tocantins	422261	421847	1936933	4592	2305802
Ocidental do Tocantins	210908	210594	923349	4384	1092184
Bico do Papagaio	7248	7234	26441	3655	27610
Aguiarnópolis	65	65	104	1600	104
Ananás	189	189	400	2116	380
Angico	300	300	484	1613	484
Araguatins	220	220	380	1727	684
Augustinópolis	80	80	160	2000	272
Axixá do Tocantins	60	60	200	3333	320
Buriti do Tocantins	31	30	50	1667	80
Cachoeirinha	50	50	90	1800	90
Carrasco Bonito	25	25	50	2000	80
Darcinópolis	4000	4000	19200	4800	19200
Esperantina	10	10	80	8000	136
Itaguatins	70	70	130	1857	234
Luzinópolis	206	206	371	1801	371
Maurilândia do Tocantins	200	200	360	1800	306
Nazaré	74	74	163	2203	155
Palmeiras do Tocantins	171	171	320	1871	320
Praia Norte	50	50	80	1600	128
Riachinho	90	90	135	1500	135
Sampaio	160	160	360	2250	576
Santa Terezinha do Tocantins	90	80	300	3750	285
São Bento do Tocantins	735	735	2250	3061	2250
São Miguel do Tocantins	85	82	150	1829	240

Ano - 2022

Produto das lavouras temporárias - Milho (em grão)

UF, Mesorregião, Microrregião e Município, em ordem de código de Meso e Micro, e nome de Município - TO	Variável				
	Área plantada (Hectares)	Área colhida (Hectares)	Quantidade produzida (Toneladas)	Rendimento médio da produção (Quilogramas por Hectare)	Valor da produção (Mil Reais)
São Sebastião do Tocantins	35	35	80	2286	128
Sítio Novo do Tocantins	80	80	200	2500	360
Tocantinópolis	172	172	344	2000	292
Araguaína	15796	15796	48664	3081	60537
Aragominas	850	850	2012	2367	2340
Araguaína	1040	1040	3063	2945	3889
Araguanã	350	350	945	2700	1214
Arapoema	800	800	2484	3105	3074
Babaçulândia	413	413	1073	2598	1338
Bandeirantes do Tocantins	50	50	90	1800	90
Carmolândia	148	148	216	1459	280
Colinas do Tocantins	50	50	100	2000	160
Filadélfia	240	240	637	2654	800
Muricilândia	210	210	638	3038	786
Nova Olinda	160	160	288	1800	342
Palmeirante	1240	1240	2610	2105	3210
Pau D'Arco	25	25	45	1800	58
Piraquê	2100	2100	4148	1975	5131
Santa Fé do Araguaia	6600	6600	24540	3718	30353
Wanderlândia	820	820	3783	4613	5050
Xambioá	700	700	1992	2846	2422
Miracema do Tocantins	113671	113671	474987	4179	559564
Abreulândia	3300	3300	10890	3300	12705
Araguacema	22150	22150	106061	4788	123738
Barrolândia	300	300	1310	4367	1603
Bernardo Sayão	1050	1050	4725	4500	6426
Brasilândia do Tocantins	500	500	2250	4500	3263
Caseara	24000	24000	108000	4500	126000
Colméia	60	60	212	3533	297
Couto Magalhães	2800	2800	8160	2914	11880
Divinópolis do Tocantins	5500	5500	21440	3898	25013
Dois Irmãos do Tocantins	5460	5460	16058	2941	18734
Tabocão	2870	2870	10170	3544	12393
Goianorte	6300	6300	15609	2478	17414
Guaraí	2400	2400	11908	4962	14533
Itaporã do Tocantins	5	5	25	5000	34
Juarina	420	420	1478	3519	1868
Marianópolis do Tocantins	15700	15700	70645	4500	82419

Ano - 2022

Produto das lavouras temporárias - Milho (em grão)

UF, Mesorregião, Microrregião e Município, em ordem de código de Meso e Micro, e nome de Município - TO	Variável				
	Área plantada (Hectares)	Área colhida (Hectares)	Quantidade produzida (Toneladas)	Rendimento médio da produção (Quilogramas por Hectare)	Valor da produção (Mil Reais)
Miracema do Tocantins	2400	2400	7080	2950	8477
Miranorte	7550	7550	35715	4730	41704
Monte Santo do Tocantins	150	150	495	3300	606
Pequizeiro	1600	1600	4800	3000	5760
Presidente Kennedy	13	13	31	2385	45
Rio dos Bois	5150	5150	24120	4683	28170
Tupirama	3320	3320	12594	3793	14692
Tupiratins	673	673	1211	1799	1792
Rio Formoso	32220	31920	173141	5424	211888
Araguaçu	4150	4150	19420	4680	23592
Chapada de Areia	30	30	74	2467	91
Cristalândia	1876	1876	8367	4460	10236
Dueré	600	600	3878	6463	4664
Fátima	730	730	2624	3595	2998
Formoso do Araguaia	700	700	3955	5650	5471
Lagoa da Confusão	10000	9700	62856	6480	76894
Nova Rosalândia	5256	5256	22068	4199	26996
Oliveira de Fátima	85	85	250	2941	286
Paraíso do Tocantins	940	940	3988	4243	4879
Pium	5340	5340	31428	5885	38447
Pugmil	2148	2148	11803	5495	14439
Sandolândia	365	365	2430	6658	2896
Gurupi	41973	41973	200116	4768	232585
Aliança do Tocantins	2700	2700	12960	4800	14075
Alvorada	7000	7000	36500	5214	44680
Brejinho de Nazaré	3710	3710	15954	4300	18234
Cariri do Tocantins	6090	6090	26850	4409	31196
Crixás do Tocantins	1100	1100	4918	4471	6121
Figueirópolis	3580	3580	18099	5056	21261
Gurupi	2870	2870	13509	4707	15466
Jaú do Tocantins	475	475	2400	5053	3320
Palmeirópolis	350	350	1750	5000	2421
Peixe	6405	6405	33122	5171	36181
Santa Rita do Tocantins	3430	3430	12367	3606	14162
São Salvador do Tocantins	63	63	252	4000	349
Sucupira	1100	1100	6435	5850	7744
Talismã	3100	3100	15000	4839	17375
Oriental do Tocantins	211353	211253	1013584	4798	1213618

Ano - 2022

Produto das lavouras temporárias - Milho (em grão)

UF, Mesorregião, Microrregião e Município, em ordem de código de Meso e Micro, e nome de Município - TO	Variável				
	Área plantada (Hectares)	Área colhida (Hectares)	Quantidade produzida (Toneladas)	Rendimento médio da produção (Quilogramas por Hectare)	Valor da produção (Mil Reais)
Porto Nacional	82716	82716	383087	4631	446828
Aparecida do Rio Negro	15400	15400	69700	4526	81500
Bom Jesus do Tocantins	3404	3404	12793	3758	14308
Ipueiras	500	500	1763	3526	2014
Lajeado	300	300	540	1800	675
Monte do Carmo	12595	12595	46975	3730	53320
Palmas	6412	6412	27235	4248	32012
Pedro Afonso	17500	17500	108300	6189	127878
Porto Nacional	13700	13700	56172	4100	64256
Santa Maria do Tocantins	7500	7500	37938	5058	45973
Silvanópolis	5240	5240	21374	4079	24520
Tocantínia	165	165	297	1800	371
Jalapão	92584	92484	480090	5191	585556
Barra do Ouro	350	350	1023	2923	1376
Campos Lindos	58612	58612	354944	6056	436160
Centenário	3150	3150	10950	3476	13208
Goiatins	5800	5700	18627	3268	24472
Itacajá	2675	2675	6820	2550	8564
Itapiratins	12000	12000	43755	3646	50749
Lizarda	2550	2550	12778	5011	14931
Mateiros	4460	4460	21542	4830	24838
Novo Acordo	1030	1030	3013	2925	3436
Ponte Alta do Tocantins	125	125	338	2704	392
Recursolândia	150	150	270	1800	378
Rio Sono	1570	1570	5686	3622	6655
Santa Tereza do Tocantins	60	60	176	2933	203
São Félix do Tocantins	52	52	168	3231	195
Dianópolis	36053	36053	150407	4172	181235
Almas	4200	4200	17413	4146	21467
Arraias	600	600	1860	3100	2284
Aurora do Tocantins	140	140	490	3500	603
Chapada da Natividade	4900	4900	22620	4616	27918
Combinado	90	90	342	3800	421
Conceição do Tocantins	150	150	450	3000	554
Dianópolis	9900	9900	43210	4365	53350
Lavandeira	70	70	203	2900	249
Natividade	1150	1150	3875	3370	4781
Novo Alegre	70	70	203	2900	250

Ano - 2022

Produto das lavouras temporárias - Milho (em grão)

UF, Mesorregião, Microrregião e Município, em ordem de código de Meso e Micro, e nome de Município - TO	Variável				
	Área plantada (Hectares)	Área colhida (Hectares)	Quantidade produzida (Toneladas)	Rendimento médio da produção (Quilogramas por Hectare)	Valor da produção (Mil Reais)
Novo Jardim	120	120	360	3000	442
Paraná	150	150	593	3953	771
Pindorama do Tocantins	3000	3000	11064	3688	13082
Ponte Alta do Bom Jesus	160	160	480	3000	590
Porto Alegre do Tocantins	480	480	1600	3333	1971
Rio da Conceição	40	40	102	2550	125
Santa Rosa do Tocantins	8730	8730	35557	4073	40589
São Valério	1678	1678	8662	5162	10162
Taguatinga	350	350	1120	3200	1378
Taipas do Tocantins	75	75	203	2707	250

Fonte: IBGE (2024).

Tabela 13 – Produção soja (em grão).

Ano - 2022					
Produto das lavouras temporárias - Soja (em grão)					
UF, Mesorregião, Microrregião e Município, em ordem de código de Meso e Micro, e nome de Município - TO	Variável				
	Área plantada (Hectares)	Área colhida (Hectares)	Quantidade produzida (Toneladas)	Rendimento médio da produção (Quilogramas por Hectare)	Valor da produção (Mil Reais)
Tocantins	1167122	1166489	3785386	3245	10495855
Ocidental do Tocantins	642321	641688	2059044	3209	5585902
Bico do Papagaio	9710	9709	32193	3316	80500
Ananás	10	9	27	3000	85
Darcinópolis	9000	9000	30186	3354	75465
Luzinópolis	400	400	1080	2700	2700
Palmeiras do Tocantins	300	300	900	3000	2250
Araguaína	43080	43080	104386	2423	303612
Aragominas	400	400	1200	3000	3545
Araguaína	7064	7064	15979	2262	46672
Arapoema	540	540	1339	2480	4017
Babaçulândia	2200	2200	5986	2721	17559
Muricilândia	800	800	2016	2520	5947
Nova Olinda	370	370	1011	2732	2939
Palmeirante	11133	11133	26886	2415	80658
Piraquê	8600	8600	22532	2620	61276
Santa Fé do Araguaia	10923	10923	24570	2249	72482
Wanderlândia	550	550	1607	2922	4789
Xambioá	500	500	1260	2520	3730
Miracema do Tocantins	227241	226909	784471	3457	2112737
Abreulândia	8449	8449	27000	3196	74250
Araguacema	31570	31570	113652	3600	303072
Barrolândia	300	300	936	3120	2625
Bernardo Sayão	3650	3650	11388	3120	30360
Caseara	48248	48248	173693	3600	463182
Couto Magalhães	12000	12000	41760	3480	101894
Divinópolis do Tocantins	16002	16002	52807	3300	143019
Dois Irmãos do Tocantins	7924	7924	28526	3600	76069
Tabocão	3717	3715	13374	3600	38116
Goianorte	8461	8320	30368	3650	86549
Guaraí	12183	12000	43200	3600	123120
Juarina	570	570	2041	3581	5817
Marianópolis do Tocantins	29692	29692	106891	3600	293950
Miracema do Tocantins	10000	10000	27400	2740	71050
Miranorte	11550	11550	38115	3300	98835
Monte Santo do Tocantins	2480	2480	8303	3348	23287

Ano - 2022

Produto das lavouras temporárias - Soja (em grão)

UF, Mesorregião, Microrregião e Município, em ordem de código de Meso e Micro, e nome de Município - TO	Variável				
	Área plantada (Hectares)	Área colhida (Hectares)	Quantidade produzida (Toneladas)	Rendimento médio da produção (Quilogramas por Hectare)	Valor da produção (Mil Reais)
Pequizeiro	1666	1660	5993	3610	17080
Rio dos Bois	6730	6730	20715	3078	53716
Tupirama	11429	11429	36573	3200	102404
Tupiratins	620	620	1736	2800	4340
Rio Formoso	124950	124650	404804	3248	1117929
Araguaçu	15636	15636	52285	3344	143748
Chapada de Areia	1437	1437	4656	3240	13058
Cristalândia	7573	7573	24453	3229	68582
Dueré	4114	4114	12548	3050	32625
Fátima	2400	2400	7056	2940	20127
Formoso do Araguaia	5206	5206	16149	3102	41987
Lagoa da Confusão	48559	48559	160245	3300	440674
Nova Rosalândia	7501	7501	27004	3600	75737
Oliveira de Fátima	1870	1870	5498	2940	15449
Paraíso do Tocantins	1276	1276	4976	3900	13956
Pium	24836	24536	73608	3000	206445
Pugmil	3572	3572	13074	3660	36668
Sandolândia	970	970	3252	3353	8871
Gurupi	237340	237340	733190	3089	1971123
Aliança do Tocantins	8124	8124	28328	3487	70820
Alvorada	24994	24994	75732	3030	189330
Brejinho de Nazaré	24200	24200	76956	3180	219761
Cariri do Tocantins	20926	20926	65077	3110	163436
Crixás do Tocantins	7105	7105	21883	3080	56896
Figueirópolis	24741	24741	81406	3290	219753
Gurupi	16960	16960	54629	3221	150230
Jaú do Tocantins	1582	1582	4904	3100	12750
Palmeirópolis	3532	3532	11000	3114	29700
Peixe	58109	58109	170049	2926	459194
Santa Rita do Tocantins	17500	17500	51450	2940	146890
São Salvador do Tocantins	150	150	405	2700	1094
Sucupira	16628	16628	50638	3045	139255
Talismã	12789	12789	40733	3185	112016
Oriental do Tocantins	524801	524801	1726342	3290	4909953
Porto Nacional	202816	202816	645432	3182	1787505
Aparecida do Rio Negro	31750	31750	100573	3168	260794
Bom Jesus do Tocantins	16256	16256	55270	3400	151993
Ipueiras	3200	3200	9408	2940	26836
Monte do Carmo	37000	37000	108780	2940	310023

Ano - 2022

Produto das lavouras temporárias - Soja (em grão)

UF, Mesorregião, Microrregião e Município, em ordem de código de Meso e Micro, e nome de Município - TO	Variável				
	Área plantada (Hectares)	Área colhida (Hectares)	Quantidade produzida (Toneladas)	Rendimento médio da produção (Quilogramas por Hectare)	Valor da produção (Mil Reais)
Palmas	13830	13830	47200	3413	121958
Pedro Afonso	18000	18000	61560	3420	171613
Porto Nacional	47500	47500	156275	3290	445065
Santa Maria do Tocantins	9002	9002	25206	2800	70577
Silvanópolis	23000	23000	69460	3020	198308
Tocantínia	3278	3278	11700	3569	30339
Jalapão	214430	214430	728822	3399	2111719
Barra do Ouro	10065	10065	33818	3360	100002
Campos Lindos	101500	101500	390948	3852	1151909
Centenário	3054	3054	6998	2291	19245
Goiatins	14700	14700	44280	3012	130626
Itacajá	6435	6435	16345	2540	45112
Itapiratins	12151	12151	35845	2950	96782
Lagoa do Tocantins	3250	3250	8970	2760	25565
Lizarda	1905	1905	5715	3000	14819
Mateiros	51500	51500	157590	3060	449525
Novo Acordo	5900	5900	17594	2982	50112
Ponte Alta do Tocantins	270	270	729	2700	2118
Rio Sono	3700	3700	9990	2700	25905
Dianópolis	107555	107555	352088	3274	1010728
Almas	12690	12690	44415	3500	132084
Chapada da Natividade	12800	12800	43776	3420	129210
Conceição do Tocantins	306	306	918	3000	2717
Dianópolis	16510	16510	57455	3480	168120
Natividade	3000	3000	10080	3360	28877
Novo Jardim	730	730	2497	3421	7293
Paraná	700	700	1260	1800	3213
Pindorama do Tocantins	4600	4600	14260	3100	40553
Ponte Alta do Bom Jesus	50	50	165	3300	473
Porto Alegre do Tocantins	1000	1000	3480	3480	10055
Santa Rosa do Tocantins	38600	38600	120432	3120	343833
São Valério	16269	16269	52360	3218	141439
Taguatinga	300	300	990	3300	2861

Fonte: IBGE (2024).

Tabela 14 – Produção de cana-de-açúcar.

Ano - 2022					
Produto das lavouras temporárias - Cana-de-açúcar					
UF, Mesorregião, Microrregião e Município, em ordem de código de Meso e Micro, e nome de Município - TO	Variável				
	Área plantada (Hectares)	Área colhida (Hectares)	Quantidade produzida (Toneladas)	Rendimento médio da produção (Quilogramas por Hectare)	Valor da produção (Mil Reais)
Tocantins	29918	29918	2534723	84722	341337
Ocidental do Tocantins	990	990	62146	62774	12395
Bico do Papagaio	12	12	457	38083	320
Araguatins	3	3	45	15000	20
Augustinópolis	1	1	7	7000	3
São Miguel do Tocantins	1	1	20	20000	8
Tocantinópolis	7	7	385	55000	289
Araguaína	63	63	2206	35016	871
Aragominas	5	5	144	28800	57
Araguaína	5	5	201	40200	76
Babaçulândia	40	40	1541	38525	616
Piraquê	13	13	320	24615	122
Miracema do Tocantins	681	681	50219	73743	6573
Abreulândia	10	10	652	65200	104
Bernardo Sayão	10	10	600	60000	78
Colméia	3	3	90	30000	12
Couto Magalhães	11	11	121	11000	15
Divinópolis do Tocantins	20	20	250	12500	38
Juarina	9	9	500	55556	58
Marianópolis do Tocantins	10	10	700	70000	105
Monte Santo do Tocantins	25	25	750	30000	113
Pequizeiro	2	2	80	40000	9
Tupirama	581	581	46476	79993	6042
Rio Formoso	154	154	5849	37981	2766
Araguaçu	20	20	800	40000	480
Dueré	40	40	1653	41325	992
Formoso do Araguaia	32	32	1333	41656	800
Nova Rosalândia	5	5	167	33400	25
Paraíso do Tocantins	12	12	360	30000	54
Pium	35	35	1124	32114	169
Sandolândia	10	10	412	41200	247
Gurupi	80	80	3415	42688	1865
Gurupi	50	50	2187	43740	1312
Peixe	30	30	1228	40933	553
Oriental do Tocantins	28928	28928	2472577	85473	328942

Ano - 2022

Produto das lavouras temporárias - Cana-de-açúcar

UF, Mesorregião, Microrregião e Município, em ordem de código de Meso e Micro, e nome de Município - TO	Variável				
	Área plantada (Hectares)	Área colhida (Hectares)	Quantidade produzida (Toneladas)	Rendimento médio da produção (Quilogramas por Hectare)	Valor da produção (Mil Reais)
Porto Nacional	28604	28604	2456265	85871	319408
Ipueiras	15	15	701	46733	105
Monte do Carmo	15	15	420	28000	63
Palmas	19	19	801	42158	89
Pedro Afonso	28500	28500	2451000	86000	318630
Porto Nacional	50	50	3125	62500	488
Silvanópolis	5	5	218	43600	35
Jalapão	21	21	502	23905	96
Campos Lindos	10	10	100	10000	38
Novo Acordo	6	6	252	42000	39
Recursolândia	5	5	150	30000	20
Dianópolis	303	303	15810	52178	9437
Arraias	25	25	1314	52560	788
Aurora do Tocantins	20	20	1182	59100	697
Chapada da Natividade	14	14	761	54357	472
Combinado	15	15	951	63400	618
Conceição do Tocantins	8	8	422	52750	295
Dianópolis	40	40	2028	50700	1115
Lavandeira	14	14	755	53929	513
Natividade	8	8	512	64000	282
Novo Alegre	5	5	318	63600	156
Novo Jardim	16	16	827	51688	455
Paraná	23	23	945	41087	567
Ponte Alta do Bom Jesus	35	35	1756	50171	966
Porto Alegre do Tocantins	4	4	255	63750	140
Rio da Conceição	4	4	255	63750	179
Santa Rosa do Tocantins	4	4	116	29000	18
São Valério	30	30	1223	40767	734
Taguatinga	20	20	1280	64000	768
Taipas do Tocantins	18	18	910	50556	673

Fonte: IBGE (2024).

Tabela 15 – Produção de sorgo (em grão).

Ano - 2022					
Produto das lavouras temporárias - Sorgo (em grão)					
UF, Mesorregião, Microrregião e Município, em ordem de código de Meso e Micro, e nome de Município - TO	Variável				
	Área plantada (Hectares)	Área colhida (Hectares)	Quantidade produzida (Toneladas)	Rendimento médio da produção (Quilogramas por Hectare)	Valor da produção (Mil Reais)
Tocantins	55490	55490	118116	2129	106932
Ocidental do Tocantins	36946	36946	84305	2282	75897
Araguaína	10	10	23	2300	22
Nova Olinda	10	10	23	2300	22
Miracema do Tocantins	14765	14765	28925	1959	27192
Abreulândia	800	800	1506	1883	1305
Araguacema	2000	2000	4560	2280	3952
Bernardo Sayão	75	75	225	3000	244
Couto Magalhães	50	50	120	2400	162
Goianorte	110	110	132	1200	139
Guaraí	1000	1000	1400	1400	1400
Juarina	30	30	72	2400	79
Marianópolis do Tocantins	3000	3000	6720	2240	5824
Rio dos Bois	4400	4400	5280	1200	4731
Tupirama	3300	3300	8910	2700	9356
Rio Formoso	4623	4623	11280	2440	10050
Araguaçu	2300	2300	5840	2539	5258
Cristalândia	813	813	1951	2400	1723
Fátima	135	135	266	1970	226
Lagoa da Confusão	50	50	120	2400	106
Oliveira de Fátima	80	80	142	1775	117
Paraíso do Tocantins	200	200	520	2600	459
Pium	920	920	2116	2300	1868
Sandolândia	125	125	325	2600	293
Gurupi	17548	17548	44077	2512	38633
Aliança do Tocantins	150	150	285	1900	237
Alvorada	8750	8750	19555	2235	17609
Brejinho de Nazaré	245	245	541	2208	446
Cariri do Tocantins	2250	2250	7960	3538	7078
Crixás do Tocantins	500	500	1250	2500	1125
Figueirópolis	300	300	705	2350	658
Gurupi	760	760	2645	3480	2204
Palmeirópolis	60	60	180	3000	150
Peixe	4000	4000	10000	2500	8333
Santa Rita do Tocantins	145	145	219	1510	177

Ano - 2022

Produto das lavouras temporárias - Sorgo (em grão)

UF, Mesorregião, Microrregião e Município, em ordem de código de Meso e Micro, e nome de Município - TO	Variável				
	Área plantada (Hectares)	Área colhida (Hectares)	Quantidade produzida (Toneladas)	Rendimento médio da produção (Quilogramas por Hectare)	Valor da produção (Mil Reais)
Talismã	388	388	737	1899	614
Oriental do Tocantins	18544	18544	33811	1823	31035
Porto Nacional	10801	10801	17852	1653	17001
Aparecida do Rio Negro	1000	1000	1706	1706	1529
Bom Jesus do Tocantins	4700	4700	7520	1600	7520
Ipueiras	135	135	321	2378	271
Palmas	266	266	718	2699	643
Pedro Afonso	2000	2000	3000	1500	3000
Porto Nacional	1850	1850	3312	1790	2699
Santa Maria do Tocantins	850	850	1275	1500	1339
Jalapão	2453	2453	4893	1995	4892
Campos Lindos	500	500	1300	2600	1257
Centenário	600	600	510	850	536
Itacajá	220	220	192	873	202
Itapiratins	800	800	2000	2500	2100
Rio Sono	333	333	891	2676	798
Dianópolis	5290	5290	11066	2092	9142
Pindorama do Tocantins	1150	1150	2451	2131	2034
Santa Rosa do Tocantins	3700	3700	7511	2030	6084
São Valério	440	440	1104	2509	1024

Fonte: IBGE (2024).