

UNIVERSIDADE FEDERAL DO RIO DE JANEIRO  
ESCOLA POLITÉCNICA  
CURSO DE ENGENHARIA AMBIENTAL

AVALIAÇÃO DO CICLO DE VIDA DA PRODUÇÃO DE BIOCOMBUSTÍVEL DE  
AVIAÇÃO A PARTIR DE MILHO NO CENTRO-OESTE BRASILEIRO

Jessica dos Santos Cugula

Rio de Janeiro – RJ  
Setembro de 2024

JESSICA DOS SANTOS CUGULA

AVALIAÇÃO DO CICLO DE VIDA DA PRODUÇÃO DE BIOCOMBUSTÍVEL DE  
AVIAÇÃO A PARTIR DE MILHO NO CENTRO-OESTE BRASILEIRO

Projeto de Graduação apresentado ao curso de Engenharia Ambiental da Escola Politécnica, Universidade Federal do Rio de Janeiro, como parte dos requisitos necessários à obtenção do título de Engenheiro Ambiental.

Orientadora: Claudia do Rosário Vaz Morgado

Co-orientadora: Elisa Maria Mano Esteves

Rio de Janeiro – RJ

Setembro de 2024

Jessica dos Santos Cugula

AVALIAÇÃO DO CICLO DE VIDA DA PRODUÇÃO DE BIOCOMBUSTÍVEL DE  
AVIAÇÃO A PARTIR DE MILHO NO CENTRO-OESTE BRASILEIRO

Projeto de Graduação apresentado ao curso de  
Engenharia Ambiental da Escola Politécnica,  
Universidade Federal do Rio de Janeiro, como  
parte dos requisitos necessários à obtenção do  
título de Engenheiro Ambiental.

Aprovado em 09 de setembro de 2024

---

Cláudia do Rosário Vaz Morgado, D.Sc., UFRJ

---

Elisa Maria Mano Esteves, D.Sc., UFRJ

---

Suzana Borschiver, D.Sc, UFRJ

---

Ana Maria Naranjo Herrera, M.Sc, UFRJ

Rio de Janeiro  
2024

d58a dos Santos Cugula, Jessica  
AVALIAÇÃO DO CICLO DE VIDA DA PRODUÇÃO DE  
BIOCOMBUSTÍVEL DE AVIAÇÃO A PARTIR DE MILHO NO  
CENTRO-OESTE BRASILEIRO / Jessica dos Santos  
Cugula. -- Rio de Janeiro, 2024.  
115 f.

Orientadora: Cláudia do Rosário Vaz Morgado.  
Coorientadora: Elisa Maria Mano Esteves.  
Trabalho de conclusão de curso (graduação) -  
Universidade Federal do Rio de Janeiro, Escola  
Politécnica, Bacharel em Engenharia Ambiental,  
2024.

1. Bioquerosene. 2. Milho. 3. Análise Espacial.  
4. Análise do Ciclo de Vida. 5. Centro-Oeste. I. do  
Rosário Vaz Morgado, Cláudia, orient. II. Maria  
Mano Esteves, Elisa, coorient. III. Título.

*Dedico este trabalho à minha tia  
Maria das Neves e à minha avó Suely,  
que acreditaram incondicionalmente  
em mim e nas minhas conquistas.*

## **AGRADECIMENTOS**

Agradeço, em primeiro lugar, a Deus, que sempre me lembrou dos Seus planos para a minha vida.

Agradeço à minha mãe, que é a pessoa que mais acredita nos meus sonhos e sempre foi minha força, suporte e melhor amiga. Agradeço também ao meu padrasto, que sempre transformou o pouco em muito e nunca mediu esforços para me ajudar. Agradeço ao meu irmão, que é a pessoa que eu procuro constantemente para rir e perturbar. Agradeço ao meu pai por me apoiar sempre e acreditar em mim.

Agradeço aos meus avós, que sempre serão fonte de inspiração e conforto. Agradeço às minhas tias e tios por comemorarem minhas conquistas. Agradeço à minha madrinha por me lembrar constantemente do seu amor e carinho. Agradeço aos meus primos e primas por todos os momentos de descontração e por serem parceiros de vida. Agradeço à Laura, por ser uma criança tão fofa, cuja simples foto é suficiente para me deixar feliz.

Agradeço às minhas amigas, que estão comigo desde o ensino médio e ficarão para a vida toda, por acompanharem cada passo dessa jornada. Agradeço também às amizades que a UFRJ me proporcionou, que compartilharam sofrimentos, dúvidas e conquistas comigo e foram fundamentais para tornar essa jornada agradável. Agradeço especialmente à Raissa, por ter me adotado no primeiro período e ter sido uma luz para mim durante toda a graduação.

Agradeço aos professores que me apoiaram e acreditaram em mim durante a graduação. Agradeço ao PRH 17.1 pela bolsa de ênfase e pelo apoio na realização da pesquisa deste trabalho. Por fim, agradeço às minhas orientadoras, que estão comigo desde o início da faculdade, pelo suporte desde a concepção até a escrita deste trabalho.

Resumo do Projeto de Graduação apresentado à Escola Politécnica/ UFRJ como parte dos requisitos necessários para a obtenção do grau de Engenharia Ambiental

Avaliação do Ciclo de Vida da Produção de Biocombustível de Aviação a partir de Milho no Centro-Oeste Brasileiro

Jessica dos Santos Cugula

Setembro de 2024

Orientadora: Cláudia do Rosário Vaz Morgado

Co-orientadora: Elisa Maria Mano Esteves

Curso: Engenharia Ambiental

O Brasil deve cumprir metas de redução de emissões de gases de efeito estufa no setor de aviação a partir de 2027. Este objetivo poderá ser alcançado através da produção de bioquerosene de aviação (BioQAV). Este estudo visa avaliar o potencial da produção de BioQAV a partir de milho na região Centro-Oeste, em duas etapas: análise espacial para determinar a viabilidade de alocar uma biorrefinaria e análise do ciclo de vida para comparar os impactos ambientais das rotas de produção Alcohol-to-jet (ATJ) e Hydroprocessed Esters and Fatty Acids (HEFA), aprovadas pelo CORSIA. A análise mostra que a região Centro-Oeste é adequada para a implementação de biorrefinaria de BioQAV, destacando microrregiões como Alto Teles Pires (MT), Dourados (MS) e Sudoeste de Goiás (GO) devido à alta produção de milho e infraestrutura favorável. Em termos da comparação das rotas, a rota HEFA é menos impactante ambientalmente em comparação com a ATJ, que exige mais milho e utiliza uma biomassa de alto impacto na etapa de produção de etanol, resultando em maior valor nas categorias de impacto, exceto mudanças climáticas e depleção de combustíveis fósseis, onde a HEFA é mais prejudicial devido ao uso de hidrogênio fóssil e gás natural. Estudos nessa área devem ser incentivados para apoiar o crescimento da indústria de BioQAV no Brasil, especialmente com a iminente obrigatoriedade do uso de biocombustíveis de aviação. Este trabalho apresentou uma metodologia prática e eficiente que pode ser replicada em outros cenários.

Palavras-chave: Bioquerosene; Milho; Análise Espacial; Análise do Ciclo de Vida.

Abstract of Undergraduate Project presented to POLI/UFRJ as a partial fulfillment of the requirements for the degree of Environmental Engineer.

Life Cycle Assessment of Aviation Biofuel Production from maize in Brazilian Midwest

Jessica dos Santos Cugula

September of 2024

Advisor: Cláudia do Rosário Vaz Morgado

Co-advisor: Elisa Maria Mano Esteves

Course: Environmental Engineering

Brazil must meet greenhouse gas emission reduction targets in the aviation sector starting in 2027. This goal could be achieved through the production of aviation biofuel (biojet). This study aims to assess the potential of biojet fuel production from corn in the Central-West region in two stages: spatial analysis to determine the feasibility of locating a biorefinery and life cycle analysis to compare the environmental impacts of the Alcohol-to-Jet (ATJ) and Hydroprocessed Esters and Fatty Acids (HEFA) production routes, both approved by CORSIA. The analysis shows that the Central-West region is suitable for the implementation of a biojet biorefinery, highlighting microregions such as Alto Teles Pires (MT), Dourados (MS), and Southwest Goiás (GO) due to high corn production and favorable infrastructure. In terms of comparing the routes, the HEFA route is less environmentally impactful compared to the ATJ route, which requires more corn and uses a high-impact biomass in the ethanol production stage, resulting in higher values in impact categories, except for climate change and fossil fuel depletion, where HEFA is more harmful due to the use of fossil hydrogen and natural gas. Research in this area should be encouraged to support the growth of the biojet industry in Brazil, especially with the impending mandatory use of aviation biofuels. This work presented a practical and efficient methodology that can be replicated in other scenarios.

Keywords: Biojet; Corn; Spatial Analysis; Life Cycle Assessment



## LISTA DE FIGURAS

<b>Figura 1</b> - Produção de biocombustíveis por região (a) etanol e (b) biodiesel.....	23
<b>Figura 2</b> - Produção de milho (em toneladas) por estado do Brasil .....	25
<b>Figura 3</b> - Diagrama de Blocos da Destilação Atmosférica .....	28
<b>Figura 4</b> - Gráfico com a Porcentagem de Produção de Derivados do Petróleo .....	28
<b>Figura 5</b> - Diagrama de blocos simplificado da produção de FT-SPK .....	31
<b>Figura 6</b> - Diagrama de blocos simplificado da produção de SPK-HEFA.....	31
<b>Figura 7</b> - Diagrama de blocos simplificado da produção de SPK-ATJ .....	32
<b>Figura 8</b> - Diagrama de blocos simplificado da produção de SIP .....	33
<b>Figura 9</b> - Diagrama de blocos simplificado da produção de CHJ.....	33
<b>Figura 10</b> - Diagrama de blocos simplificado da produção de SPK-HC-HEFA.....	34
<b>Figura 11</b> - Diagrama das etapas de aplicação da ACV .....	41
<b>Figura 12</b> - Ilustração das fronteiras do sistema em um ciclo de vida. ....	43
<b>Figura 13</b> - Mapa com os limites dos estados, municípios e microrregiões do Centro-Oeste. ....	49
<b>Figura 14</b> - Limites do Sistema da ACV da produção de BioQAV HEFA.....	55
<b>Figura 15</b> - Limites do Sistema da ACV da produção de BioQAV ATJ. ....	56
<b>Figura 16</b> – Mapa com a produtividade dos municípios da região Centro-Oeste do Brasil .....	73
<b>Figura 17</b> - Mapa com a demanda de BioQAV por microrregião e a localização dos aeroportos da região Centro-Oeste do Brasil .....	74
<b>Figura 18</b> - Mapa com a malha de transporte rodoviário e ferroviário da região Centro-Oeste do Brasil .....	75
<b>Figura 19</b> - Mapa com a localização das plantas de etanol e biodiesel da região Centro-Oeste do Brasil .....	76
<b>Figura 20</b> – Mapa com os valores de PPB, localização de plantas de biodiesel e etanol e áreas de desmatamento da região Centro-Oeste do Brasil (PPB = Potencial de Produção de BioQAV.....	77
<b>Figura 21</b> – Avaliação de impacto para o cultivo do milho na época de safra.....	80
<b>Figura 22</b> - Avaliação de impacto para o cultivo do milho na época de safrinha. ....	81
<b>Figura 23</b> - Avaliação de impacto para a extração de óleo de milho bruto. ....	83
<b>Figura 24</b> - Avaliação de impacto para o refino de óleo de milho .....	84
<b>Figura 25</b> - Avaliação de impacto para a produção do BioQAV HEFA .....	85

<b>Figura 26</b> - Avaliação de impacto para a produção do etanol de milho .....	87
<b>Figura 27</b> - Avaliação de impacto para a produção do BioQAV ATJ.....	88
<b>Figura 28</b> - Valores de impacto da categoria mudanças climáticas por etapa para as rotas HEFA e ATJ .....	89
<b>Figura 29</b> - Valores de impacto da categoria eutrofização por etapa para as rotas HEFA e ATJ .....	90
<b>Figura 30</b> - Valores de impacto da categoria toxicidade humana por etapa para as rotas HEFA e ATJ. ....	91
<b>Figura 31</b> - Valores de impacto da categoria ocupação de solo agrícola por etapa para as rotas HEFA e ATJ.....	92
<b>Figura 32</b> - Valores de impacto da categoria depleção de combustíveis fósseis por etapa para as rotas HEFA e ATJ. ....	93

## LISTA DE TABELAS

<b>Tabela 01</b> - Rotas de Produção de BioQAV e suas características.....	30
<b>Tabela 02</b> - Registros de regulamentações relacionadas à produção de BioQAV no mundo .....	35
<b>Tabela 03</b> - Registros de regulamentações relacionadas à produção de BioQAV no Brasil.....	37
<b>Tabela 04</b> - Métodos de análise de impacto ambiental e suas características .....	45
<b>Tabela 05</b> - Dados do inventário para o cultivo de milho na primeira safra e na safrinha .....	58
<b>Tabela 06</b> - Dados de conversão entre unidades mássicas e energéticas do óleo de milho .....	60
<b>Tabela 7</b> - Dados do inventário para a produção de óleo de milho bruto e refinado.....	61
<b>Tabela 08</b> - Dados do inventário para a produção de BioQAV HEFA .....	62
<b>Tabela 09</b> - Dados do inventário para a produção de etanol de milho .....	63
<b>Tabela 10</b> - Dados do inventário para a produção de BioQAV ATJ .....	64
<b>Tabela 11</b> - Dados do inventário para a produção de hidrogênio fóssil .....	65
<b>Tabela 12</b> - Fatores de alocação para a ACV da rota HEFA .....	66
<b>Tabela 13</b> - Fatores de alocação para a ACV da rota ATJ.....	67
<b>Tabela 14</b> - Quantidade de municípios por faixa de produtividade.....	69
<b>Tabela 15</b> - Quantidade de aeroportos, plantas de etanol e de biodiesel por estado do Centro-Oeste.....	70
<b>Tabela 16</b> - Estado, quantidade de aeroportos, demanda total de BioQAV, PPB e porcentagem da demanda em relação ao PPB para os aeroportos das microrregiões do Centro-Oeste (PPB = Potencial de Produção de BioQAV).....	71
<b>Tabela 17</b> – Valores de impacto para o cultivo no período de safra e safrinha para as rotas HEFA e ATJ .....	79
<b>Tabela 18</b> - Valores de impacto para a etapa de transporte para as rotas HEFA e ATJ	82
<b>Tabela 19</b> - Valores de impacto para a extração e refino de óleo de milho.....	82
<b>Tabela 20</b> - Valores de impacto para a produção de BioQAV HEFA.....	84
<b>Tabela 21</b> - Valores de impacto para a produção de etanol de milho.....	86
<b>Tabela 22</b> - Valores de impacto para a produção do BioQAV ATJ .....	87
<b>Tabela 23</b> – Análise e comparação de maiores valores para cada categoria de impacto e para cada etapa por rota. ....	94

<b>Tabela 24</b> – Valores VR5 e VR10 da análise de sensibilidade para a rota HEFA (VR5 = Valor Reduzido em 5%; VR10 = Valor Reduzido em 10%).....	96
<b>Tabela 25</b> - Valores VR5 e VR10 da análise de sensibilidade para a rota ATJ (VR5 = Valor Reduzido em 5%; VR10 = Valor Reduzido em 10%).....	97
<b>Tabela 26</b> – Inventário construído para a etapa de cultivo em períodos de safra e safrinha para a produção de 1 MJ de BioQAV.....	114
<b>Tabela 27</b> - Inventário construído para a etapa de extração e produção do óleo de milho bruto e conversão em BioQAV HEFA para a produção de 1 MJ de BioQAV. ....	115
<b>Tabela 28</b> - Inventário construído para a etapa de produção do etanol de milho e conversão em BioQAV ATJ para a produção de 1 MJ de BioQAV. ....	116
<b>Tabela 29</b> - Inventário construído para a produção de Hidrogênio Fóssil.....	116

## **LISTA DE SIGLAS**

**ACV** – Avaliação do Ciclo de Vida

**ANP** – Agência Nacional do Petróleo

**ASTM** – American Society for Testing and Materials

**BIOQAV** – Biocombustíveis para Aviação

**CHJ** – Componente de Hidrogênio

**CORSIA** – Carbon Offsetting and Reduction Scheme for International Aviation

**GEE** – Gases de Efeito Estufa

**ICAO** – International Civil Aviation Organization

**PIB** – Produto Interno Bruto

**PPB** – Potencial de Produção de BioQAV

**QAV** – Querosene de Aviação

**SIP** – Sistema de Informação de Preços

**SPK** – Synthetic Paraffinic Kerosene

**SPK/A** – Synthetic Paraffinic Kerosene with Aromatics

**SPK-ATJ** – Synthetic Paraffinic Kerosene derived from Alcohol-to-Jet

**SPK-HEFA** – Synthetic Paraffinic Kerosene derived from Hydroprocessed Esters and Fatty Acids

**SPK-HC-HEFA** – Synthetic Paraffinic Kerosene derived from Hydroprocessed Esters and Fatty Acids with Hydrocarbon Component

## SUMÁRIO

<b>1. INTRODUÇÃO</b> .....	<b>17</b>
1.1. OBJETIVOS .....	19
1.1.1. Objetivos Específicos .....	20
1.2. ESTRUTURA DO TRABALHO .....	20
<b>2. REFERENCIAL TEÓRICO</b> .....	<b>22</b>
2.1. A INDÚSTRIA DE BIOCOMBUSTÍVEIS NO BRASIL .....	22
2.2. PRODUÇÃO E USO DO MILHO .....	24
2.3. QUEROSENE DE AVIAÇÃO .....	27
2.4. ROTAS TECNOLÓGICAS DE PRODUÇÃO DE BIOQAV .....	29
2.4.1. SPK-FT e SPK/A .....	30
2.4.2. SPK-HEFA .....	31
2.4.3. SPK-ATJ .....	32
2.4.4. SIP .....	32
2.4.5. CHJ .....	33
2.4.6. SPK-HC-HEFA .....	33
2.5. LEGISLAÇÃO E ACORDOS DE INCENTIVOS À PRODUÇÃO DE BIOQAV 34	
2.5.1. Legislações Internacionais .....	34
2.5.2. Legislações Nacionais .....	37
2.6. CENÁRIO ATUAL DA PRODUÇÃO DE BIOQAV .....	38
2.7. AVALIAÇÃO DO CICLO DE VIDA .....	40
2.7.1. Definição de Objetivo e Escopo .....	42
2.7.2. Análise de Inventário .....	43
2.7.3. Avaliação de Impactos .....	44
2.7.4. Interpretação dos Resultados .....	47
<b>3. METODOLOGIA</b> .....	<b>48</b>
3.1. AVALIAÇÃO DO POTENCIAL DE PRODUÇÃO DE BIOQAV DE MILHO	48
3.1.1. Local de Estudo .....	48
3.1.2. Obtenção dos Parâmetros .....	50
3.1.3. Análise Espacial .....	53

3.2. COMPARAÇÃO DO IMPACTO AMBIENTAL ENTRE ROTAS DE PRODUÇÃO DE BIOQAV DE MILHO .....	53
3.2.1. Definição de Objetivo e Escopo .....	53
3.2.2. Análise do Inventário.....	56
3.2.2.1. Cultivo .....	56
3.2.2.2. Transporte .....	59
3.2.2.3. Produção do BioQAV HEFA .....	60
3.2.2.4. Produção do BioQAV ATJ .....	62
3.2.2.5. Geração de Hidrogênio Fóssil.....	64
3.2.2.6. Processos de Alocação .....	65
3.2.3. Avaliação dos Impactos .....	67
3.2.3.1. Análise de Sensibilidade .....	68
<b>4. RESULTADOS.....</b>	<b>69</b>
4.1. POTENCIAL DO USO DE MILHO PARA PRODUÇÃO DE BIOQAV .....	69
4.2. AVALIAÇÃO DOS IMPACTOS DO CICLO DE VIDA .....	78
4.2.1. Cultivo .....	78
4.2.2. Transporte.....	81
4.2.3. Rota HEFA .....	82
4.2.4. Rota ATJ.....	85
4.2.5. Análise Comparativa .....	88
4.2.6. Análise de Sensibilidade.....	95
4.2.6.1. BioQAV HEFA.....	95
4.2.6.2. BioQAV ATJ .....	97
<b>5. CONSIDERAÇÕES FINAIS .....</b>	<b>99</b>
<b>6. REFERÊNCIAS .....</b>	<b>102</b>
<b>7. APÊNDICE .....</b>	<b>114</b>
7.1. APÊNDICE A – Dados de entrada no SimaPro para o inventário do trabalho.....	114

## 1. INTRODUÇÃO

A aviação é uma das formas de integração mundial, iniciada no final do século XX, alavancando as mais diversas áreas, como mercados consumidores, uso e divulgação tecnológica, acesso a serviços e assistência social (BONSER, 2019). No Brasil, o setor é grande contribuinte da economia, tendo gerado \$18,8 bi de dólares em 2017 e mais de 800 mil empregos (IATA, 2019). O uso da aviação no Brasil avança principalmente a cadeia de suprimentos e o turismo (CNT, 2021). O país apresentou um crescimento na demanda de quase 30% desde 2011, com interrupção ao longo do ano de 2020 que sofreu os impactos da pandemia de COVID-19 (ANAC, 2019) (ANAC, 2020).

Em 2020, mais de 80% da composição energética global era proveniente de fontes de energia fóssil, com destaque para o petróleo (IEA, 2021). A indústria extrativista do petróleo contribui de forma significativa para a economia de muitos países, o Brasil tem 13% do Produto Interno Bruto (PIB) relacionado a essa indústria, sendo o oitavo maior produtor de petróleo no mundo (ANP, 2020). Apesar da contribuição econômica e social, a atividade de extração e uso do petróleo é altamente impactante para o meio ambiente, principalmente no que se refere às emissões de GEE, sendo um dos maiores contribuintes para as mudanças climáticas (IPCC, 2022).

Atualmente, a matriz energética para o setor de transporte brasileiro deriva principalmente de combustíveis produzidos a partir do petróleo, incluindo o transporte aéreo, que utiliza majoritariamente o querosene de aviação de origem fóssil (QAV), seguido pela gasolina de aviação (EPE, 2022a). Desta forma, o uso de QAV é um dos principais contribuintes para que o transporte aéreo contribua para 2% do total global de emissões de GEE (IATA, 2024). Ainda hoje, os combustíveis fósseis detêm um papel importante para o desenvolvimento do globo, no entanto, o alto impacto da sua cadeia produtiva e o fato de serem uma fonte finita de energia, faz com que a sociedade caminhe em busca de alternativas mais sustentáveis a longo prazo (COSTA, TEIXEIRA, *et al.*, 2023). Com isso, a tendência futura, visando a sustentabilidade do setor, é a redução da dependência de combustíveis fósseis (ANAC, 2021).

Em contraponto aos combustíveis derivados de matrizes fósseis, os biocombustíveis vêm assumindo papel de destaque, surgindo como uma alternativa mais sustentável, considerando a menor emissão de GEE ao longo do seu ciclo de vida, além de serem



adaptáveis por conta da variedade de matérias primas (GOES e MARRA, 2008). O Brasil é pioneiro na produção de biocombustíveis, a motivação para investimento na área surgiu da necessidade de limitar a dependência da economia do país com relação aos combustíveis fósseis (VIDAL, 2019).

Apesar do pioneirismo quanto à produção de biocombustíveis para o transporte rodoviário, o Brasil ainda não produz combustível de fonte renovável para a aviação. No Acordo de Paris, o Brasil se comprometeu em reduzir 25% das suas emissões de GEE até 2025, em comparação aos valores de 2005, atuando principalmente em setores chaves, como o energético, que engloba os combustíveis (UNFCCC, 2022). O setor da aviação é visto com preocupação dado o fato de que até 2050 pode ser responsável por 22% das emissões globais de GEE se nada for alterado (SOARES e CENAMO, 2018). Por conta disso, acordos mundiais cobram a redução de emissões no setor de aviação, tal como o “Esquema de Redução e Compensação de Emissões da Aviação Internacional” (em inglês, Carbon Offsetting and Reduction Scheme for International Aviation – CORSIA/ICAO) criado pela Organização da Aviação Civil Internacional (em inglês, International Civil Aviation Organization - ICAO) (IATA, 2024).

O programa tem como objetivo que o setor estabilize suas emissões observadas nos anos 2019-2020, evitando crescimento mesmo considerando o aumento da demanda (DE MIRANDA RODRIGUES e HENKES, 2021). O Brasil escolheu participar apenas da etapa mandatória a partir de 2027, caso contrário o país poderia evitar emitir até 8,6 tCO<sub>2</sub> (SOARES e CENAMO, 2018). Apesar disso, o país instituiu o Programa Nacional do Bioquerosene através da Lei Nº 14.248, de 25 de novembro de 2021, esse tem como objetivo incentivar as pesquisas acerca do uso de biomassa para a produção desse biocombustível (BRASIL, 2021).

Além disso, a Agência Nacional do Petróleo, Gás Natural e Biocombustíveis (ANP) regulamentou, através da resolução nº 856 de 22 de outubro de 2021, 7 rotas de produção de querosene alternativos (QAV alternativo) (ANP, 2021). O QAV alternativo pode ser misturado em proporções determinadas com o QAV fóssil de forma a adquirirem a característica de combustível drop-in, que não requisitam mudanças nos equipamentos e aeronaves, o que é uma característica cada vez mais buscada (KARATZOS, MCMILLAN e SADDLER, 2014). O QAV alternativo pode ser produzido através de três tipos de processos: os bioquímicos, que usam de leveduras e bactérias motivadas para processar

açúcares; os químicos para matérias-primas de óleos vegetais e gorduras animais; os termoquímicos que usam biomassa lignocelulósica gaseificada (CGEE, 2010).

O Brasil, além do conhecimento aprofundado na produção de biocombustíveis, é detentor de uma vasta quantidade de matérias primas que podem ser utilizadas para a produção de QAV alternativo, principalmente os que usam biomassa (Bioquerosene - BioQAV) (CARVALHO, 2017). Uma das culturas mais produzidas no país é a do milho, que juntamente com a soja integra um sistema de rotação, sendo responsáveis por 80% da produção total de grãos do país (NUNES, 2020). A destinação dessa produção se dá principalmente para a produção de ração animal, consumo humano e importação (CONAB, 2018). Além disso, essa cultura é considerada agroenergética, devido às propriedades de celulose, carboidratos, lipídios e teor de amido que a configura como de alto potencial energético (SILVA, JUNIOR, *et al.*, 2021).

O Centro-Oeste é a região com maior produção de milho no Brasil, detendo 57% do total produzido, com destaque para o estado de Mato Grosso que tem um quarto da produção nacional na maior área plantada do país (SIDRA, 2022). Logo, esta região foi selecionada como local de estudo por conta da sua alta disponibilidade da matéria-prima estudada para a produção de BioQAV e pela existência de conhecimento no setor produtivo, além de incentivar a aplicação da matéria-prima em indústrias sustentáveis. Neste cenário, o milho é destacado como uma matéria prima versátil para a produção de bioquerosene, já que este pode ser processado de diversas formas, tais como óleo de milho, etanol de milho, butanol de milho e resíduo de milho, que são utilizadas para produção do combustível sustentável (PROQR, 2022). Além disso, a discussão sobre o uso do milho no Brasil está aumentando, tendo em vista o crescimento de sua plantação e a deficiência em estoque, abrindo espaço para uma nova aplicação nacional (ABIMAQ, 2023).

Com isso, são de grande importância estudos que investiguem a produção de bioquerosene a partir de matérias primas viáveis no cenário brasileiro, considerando os acordos internacionais do clima e as cobranças sofridas pelas empresas do setor de aviação.

## **1.1. OBJETIVOS**

Comparar os impactos ambientais de diferentes rotas de produção de bioquerosene de aviação que considera como matéria-prima o milho produzido no Centro-Oeste brasileiro.

### *1.1.1. Objetivos Específicos*

- Identificar o potencial de produção de bioquerosene de aviação a partir do milho produzido de diferentes formas no Centro-Oeste brasileiro;
- Analisar a infraestrutura potencial para a produção de bioquerosene de aviação no Centro-Oeste brasileiro;
- Identificar os melhores locais para a instalação de biorrefinarias de BioQAV a partir de milho no Centro-Oeste brasileiro;
- Aplicar a ferramenta de Análise do Ciclo de Vida para entender os insumos necessários para a produção de bioquerosene de aviação e as principais limitações para a execução dos processos;

## **1.2. ESTRUTURA DO TRABALHO**

Este trabalho está estruturado em capítulos que abordam diferentes aspectos da pesquisa. O primeiro capítulo introduz o tema, fornecendo uma visão geral dos pontos principais, justificando a importância do estudo, e delineando os objetivos gerais e específicos a serem alcançados.

O segundo capítulo compreende o referencial teórico, onde são exploradas várias facetas relacionadas ao tema central da pesquisa. Isso inclui um panorama da indústria de biocombustíveis, análises sobre o uso e produção de milho no Brasil e no mundo, características específicas do querosene de aviação (BioQAV), diferentes rotas para a sua produção, legislações pertinentes a esse mercado, o panorama atual da produção de BioQAV, e a caracterização e normatização da Análise do Ciclo de Vida (ACV).

O terceiro capítulo detalha a metodologia adotada neste estudo, descrevendo os processos empregados para atingir os objetivos delineados. Este capítulo inclui os parâmetros utilizados na análise espacial, o método empregado para realizar essa análise, detalhes sobre a aplicação da ACV, e o inventário resultante desta análise.

No quarto capítulo, são apresentados os resultados obtidos na pesquisa. Esses resultados são divididos em dois tópicos principais: o potencial do uso de milho na produção de BioQAV, com foco na análise espacial realizada, e a Avaliação dos Impactos do Ciclo de Vida (ACV), que apresenta os resultados específicos obtidos dessa análise.

Finalmente, o quinto capítulo traz as conclusões do trabalho, onde são apresentadas as respostas aos objetivos propostos e as considerações finais sobre os resultados alcançados ao longo da pesquisa.

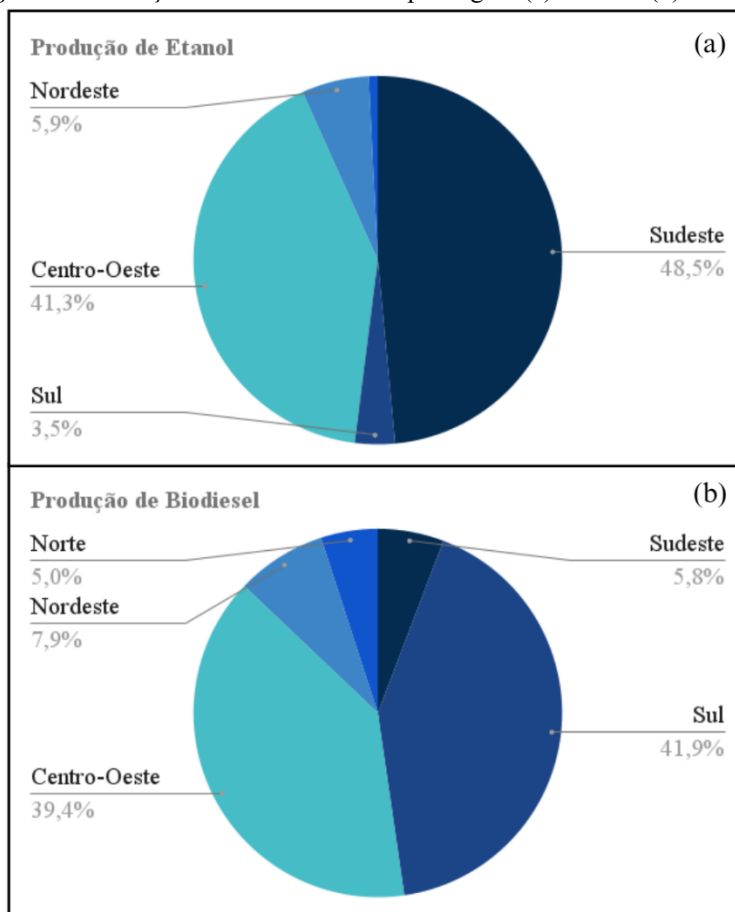
## 2. REFERENCIAL TEÓRICO

### 2.1. A INDÚSTRIA DE BIOCOMBUSTÍVEIS NO BRASIL

Os biocombustíveis estão cada vez mais presentes no setor de transportes, o que se deve ao fato de sua produção ter um ciclo com menor impacto em relação aos combustíveis de origem fóssil, além do fato de terem a versatilidade de serem produzidos por uma vasta variedade de matérias-primas renováveis (VIDAL, 2019). O Brasil começou a apresentar interesse no ramo de produção de biocombustíveis a partir do início da década de 1970 devido ao aumento e instabilidade dos preços dos combustíveis fósseis, além do fato de as causas ambientais estarem ganhando força, trazendo mais atenção para a redução de emissão de GEE (DUARTE, VALENTINI, *et al.*, 2022). O programa Proálcool, criado em 1975, foi o propulsor de todo o movimento dos biocombustíveis no Brasil, com o foco de aumentar a produção de etanol e diminuir a dependência da gasolina (CORTEZ, CRUZ, *et al.*, 2021).

Atualmente, o Brasil é um dos maiores responsáveis pela produção de biocombustíveis no mundo. Em 2023, o país produziu 8 milhões m<sup>3</sup> de biodiesel e 35,4 milhões m<sup>3</sup> de etanol, as matérias-primas de destaque são a soja para o biodiesel, que corresponde à 75% do total, e a cana-de-açúcar para o etanol, que produz à 83% do volume total nacional (ANP, 2024a) (ANP, 2024b). O principal produtor de etanol do país é o estado de São Paulo, na região Sudeste, que é a que detém a maior produção do biocombustível, como pode ser visto na **Figura 01 (a)** (ANP, 2024a). Enquanto para o biodiesel, o estado do Mato Grosso é o principal produtor do país, este está localizado na região Centro-Oeste que é a região de segunda maior produção de biodiesel no Brasil, cujo percentual é visto na **Figura 01 (b)**, atrás apenas da região Sul (ANP, 2024b).

**Figura 1** - Produção de biocombustíveis por região (a) etanol e (b) biodiesel



Fonte: (ANP, 2024a) e (ANP, 2024b)

As perspectivas da OCDE (Organização para a Cooperação e Desenvolvimento Econômico) são de que a produção de biocombustíveis continuará crescendo nos próximos anos, porém em um ritmo mais lento. Também é esperado que haja um aumento na produção de biocombustíveis de segunda geração, que são aqueles que não competem com a produção de alimentos, frente a uma demanda por processos mais sustentáveis (VIDAL, 2019).

Além disso, também estão tendo entrada no mercado nacional outros biocombustíveis, como é o caso do biogás e do biometano, para os quais no ano de 2021 foram instaladas 102 novas plantas para a sua produção (CIBIOGÁS, 2022). A indústria do hidrogênio verde também sofre pressões para o seu desenvolvimento, principalmente pelo fato do mercado de hidrogênio ser dominado pela exploração de fonte fóssil. Este mercado no Brasil tem potencial para se tornar um dos maiores do mundo, já que o país é referência na produção de energia renovável, que pode ser utilizada para produção de hidrogênio verde (BEZERRA, 2021). No momento, o país ainda não produz hidrogênio verde em escala comercial, porém já existem projetos em estados no Nordeste por conta da

consolidação de usinas de energia renovável nesta região (FERNANDES, AZEVEDO, *et al.*, 2023).

Na questão dos biocombustíveis, o Brasil segue também buscando combustíveis renováveis para outros modais de transporte, além do rodoviário, como é o caso do bioquerosene de aviação. O país ainda não produz este combustível em escala comercial, porém existem cada vez mais iniciativas para o desenvolvimento desta indústria, que será essencial para a diminuição de impactos do setor (MILANEZ, MAIA, *et al.*, 2021).

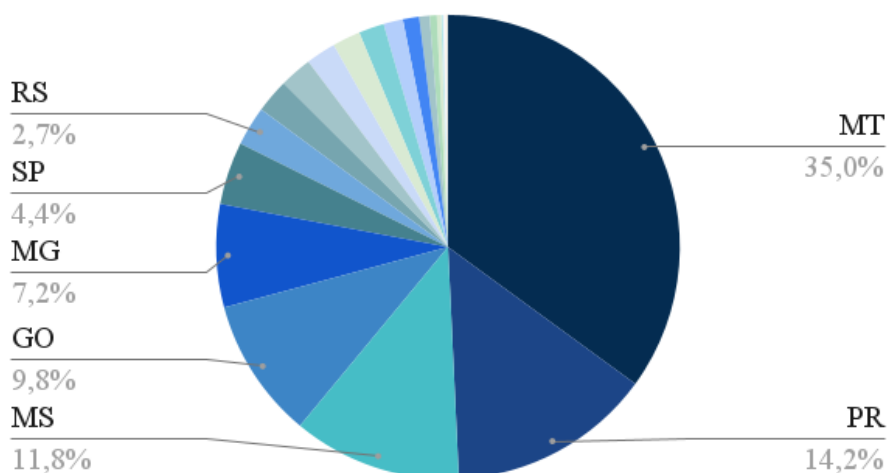
## 2.2. PRODUÇÃO E USO DO MILHO

O milho é um grão oleaginoso com alto caráter energético, a sua estrutura pode ser definida por quatro partes, o endosperma onde se concentra o amido e representa 82% da massa do grão, o gérmen que detém majoritariamente os lipídios e minerais do grão, o pericarpo que é casca rica em fibras e a ponta, menor área do grão (STRAZZI, 2015) (PAES, 2006). Este grão é o de maior produção no mundo, com mais de 1,2 bilhões de toneladas produzidas em um ano. Neste cenário, o Brasil se apresenta como o terceiro maior produtor, atrás dos Estados Unidos e da China (FAO, 2021).

Atualmente o Brasil tem uma área de 20.442,2 mil ha com produção de milho, com uma produtividade média de 5.561 kg/ha e uma produção total de 113.696,2 mil toneladas de milho por safra (CONAB, 2024). Neste cenário, milho é o segundo grão de maior produção nacional, atrás apenas da soja, e seu foco de produtividade ocorre no Centro-Oeste do país, somando 56% de toda a produção do país. O estado de maior produção é o Mato-Grosso, representando 35% da produção nacional, seguido pelo Paraná, com 14,2%, como pode ser visto na **Figura 02** (IBGE, 2022).

**Figura 2** - Produção de milho (em toneladas) por estado do Brasil

**Produção de Milho (t)**



Fonte: (IBGE, 2022)

A produção de milho ocorre de duas formas no Brasil, o plantio de verão também conhecido como primeira safra ocorre junto do período de chuva entre agosto e novembro, e o plantio de segunda safra ou safrinha, no qual o milho é plantado após a soja colhida antes do tempo, entre fevereiro e março, que ocorre. É muito comum a produção do milho safrinha em rotação com a cultura da soja, principalmente no Centro-Oeste (EMBRAPA, 2021). Diversos estudos mostram os benefícios para o solo da rotação de culturas, aumentando a presença de nutrientes e a produtividade (SILVA, NASCENTE, *et al.*) (JESUS e FREITAS, 2018).

Além disso, o milho também é muito empregado em sistemas de integração lavoura-pecuária (ILP), que consistem em forma de produção focada em diversificar, rotacionar e combinar atividades agrícolas na propriedade rural, buscando o aumento de produtividade de todas, já que a área se mantém sendo explorada ao longo de todo o tempo (ALVARENGA, GONTIJO NETO, *et al.*, 2007). O milho tem destaque nos sistemas ILP por conta de sua aplicação diversa, que pode ser utilizado para alimentação humana e animal (EMBRAPA, 2021).

Em 2023, o Brasil superou os EUA e se mantém em primeiro lugar no ranking de exportação mundial do milho. Além disso, com o aumento da oferta do milho no país, ele passou a ser visto como matéria-prima disponível ao setor de produção energética, principalmente etanol (VIDAL, 2019). No entanto, o constante aumento da produtividade vem gerando preocupações quanto ao seu armazenamento, já que a estrutura destinada



para isso não cresce com a produção, deixando muitos armazéns lotados e grãos sendo dispostos ao relento, logo, nota-se a necessidade de pensar em novas formas de aplicação da cultura agrícola (CARRANÇA, 2023) (COÊLHO, 2023).

Atualmente, 82% do milho é usado para alimentação animal, tendo em vista seus produtos com alta densidade proteica, no entanto, os produtos da cultura também são empregados para consumo humano e outros usos industriais (EMBRAPA, 2021) (DE LIMA, PAES e QUEIROZ, 2011). As principais formas de processamento do milho ocorrem através da moagem a seco, que consiste no processo de quebra física do grão com baixa alteração da umidade, ou moagem via úmida, onde o grão é macerado em tanques com água a temperaturas em torno de 50° (REGITANO-DARCE, SPOTO e CASTELLUCCI, 2015). Estes processos permitem a separação do gérmen do endosperma, gerando produtos como canjica, farinha, *gifs* ou canjiquinhas, flocos, óleo e farelo, que são utilizados na indústria para diversos setores, como: produção de salgadinhos, cervejas, alimentos infantis, na panificação, explosivos, tecelagem, sopas, biscoitos, entre outros (STRAZZI, 2015).

No setor agroenergético, o milho desempenha um papel crucial na produção de etanol, especialmente nos Estados Unidos, que é o maior produtor mundial desse biocombustível. Mais de 95% do etanol produzido nos EUA é derivado do milho (STATISTA, 2024). Na Europa, cerca de 47.8% do etanol também é proveniente desse grão (EPURE, 2022). No Brasil, sua importância ainda é relativamente baixa devido à sua menor rentabilidade em comparação com o etanol de cana-de-açúcar (VIDAL, 2020). No entanto, nos últimos anos foi possível notar um crescimento significativo, com uma estimativa de 800% de aumento no seu uso como matéria-prima para o etanol nos últimos cinco anos (NOVA CANA, 2023a). Este aumento ocorre principalmente por conta dos períodos de preço baixo do milho devido à alta produtividade, além do fato de que o milho é uma matéria-prima mais viável para a produção de etanol durante os períodos de entressafra da cana-de-açúcar (VIDAL, 2020).

Na produção de biocombustíveis, o milho também tem potencial para a fabricação de biodiesel. Contudo, no Brasil, sua utilização é mínima, representando menos de 1% do total de biodiesel produzido, equivalente a aproximadamente 2 mil metros cúbicos (ANP, 2024b). Esta baixa participação se deve principalmente à preferência por outras matérias-primas oleaginosas mais economicamente vantajosas e rentáveis, tais como a soja, a palma e as gorduras animais (MONTEIRO, DA LUZ e MAINIER, 2015). No entanto, já

está prevista a expansão desta indústria também, principalmente com a integração a outros processos produtivos, como as plantas de extração de etanol de milho (VELJKOVIĆ, BIBERDŽIĆ, *et al.*, 2018).

### 2.3. QUEROSENE DE AVIAÇÃO

No cenário atual, o transporte aéreo comercial oferece mais de 48 mil rotas, se consolidando como uma forma de transporte que conecta os lugares distantes no menor intervalo de tempo possível. Em 2019, esta forma de transporte atendeu mais de 4,5 bilhões de pessoas no mundo, o que a tornou responsável pelo consumo de 363 bilhões de litros de combustível. Deste total de combustível utilizado, mais de 99% deriva de fonte fóssil, com destaque para o Querosene de Aviação (QAV) (ABBB, 2020).

O querosene obtido de fonte fóssil é classificado de acordo com a Resolução nº856 da ANP em JET-A e JET-A1, onde a principal diferença é que o primeiro tem ponto de congelamento máximo de 40°C e o segundo de 47°C (ANP, 2021). Este combustível é obtido através do refino do petróleo no processo de fracionamento por destilação atmosférica, ilustrado na **Figura 03**, produzindo vários outros derivados do petróleo (PERISSÉ, 2007). O querosene fóssil é um combustível formado por alcanos, cicloalcanos, alcenos e aromáticos, com uma cadeia de 11 a 12 carbonos, com aspecto claro, límpido e isento de água não dissolvida e material sólido à temperatura ambiente e poder calorífico de 42,8 MJ/kg (ANP, 2021).

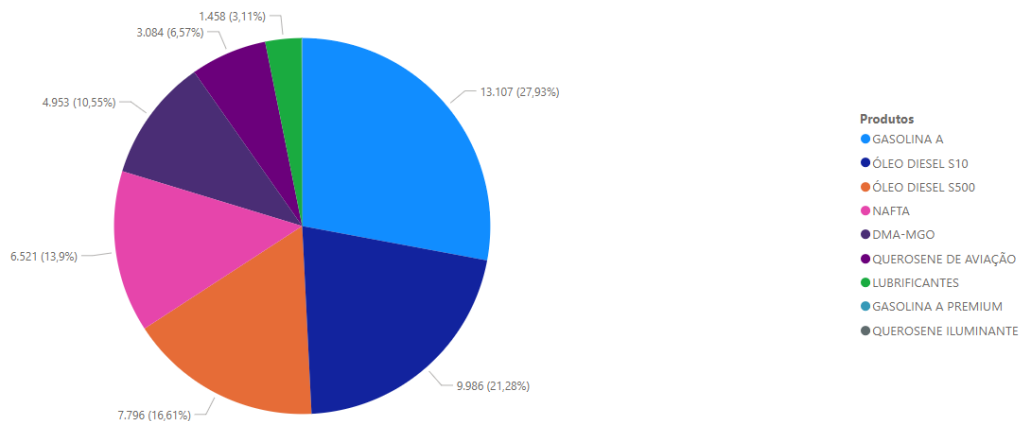
**Figura 3 - Diagrama de Blocos da Destilação Atmosférica**



Fonte: (PERISSÉ, 2007), adaptado pela autora

O querosene fóssil está entre os seis principais derivados do petróleo produzidos no Brasil, representando 6,57% do total ao longo dos anos de 2021 até 2023, atrás do óleo diesel (S10; S500; DMA-MGO), gasolina e nafta, como mostra na **Figura 04** (ANP, 2024c). Atualmente existem nove refinarias que produzem querosene no país, com mais da metade delas localizada no Sudeste, com foco no estado de São Paulo, que produz 54,3% do querosene do país (MENDES, TEIXEIRA, *et al.*, 2018).

**Figura 4 - Gráfico com a Porcentagem de Produção de Derivados do Petróleo**



Fonte: (ANP, 2024c)

Com o intuito de diminuir as emissões e impacto do setor, também estão sendo produzidos Querosenes de Aviação Alternativo (QAV ou JET Alternativo), que é definido como um combustível proveniente de fontes alternativas, como biomassa, óleos vegetais, gordura animal, gases residuais, resíduos sólidos, carvão e gás natural, estando o bioquerosene

(BioQAV) englobado pelo termo JET alternativo (ANP, 2021). A produção do JET alternativo pode ocorrer através de três processos: bioquímicos que utilizam leveduras e bactérias para processar açúcares; químicos para matérias-primas provenientes de óleos vegetais e gorduras animais; e termoquímicos que utilizam biomassa lignocelulósica gaseificada (GUTIÉRREZ-ANTONIO, DE LIRA-FLORES e HERNÁNDEZ, 2017).

#### **2.4. ROTAS TECNOLÓGICAS DE PRODUÇÃO DE BIOQAV**

A norma D7566-21 da American Society for Testing and Materials (ASTM) regulamenta as especificações para a produção de biocombustível de aviação, denominando as rotas já aprovadas. No Brasil, a Resolução nº 856 de 2021 da ANP segue a definição internacional da ASTM e, até o momento, regulamenta sete rotas de produção que podem ser utilizadas para a produção de BioQAV, sendo elas:

- O Querosene Parafínico Hidroprocessado e Sintetizado por Fischer-Tropsch (Synthesized Paraffinic Kerosene - Fischer Tropsch - SPK-FT);
- O Querosene Parafínico Sintetizado com Aromáticos (Synthesized Paraffinic Kerosene/Aromatics - SPK/A);
- O Querosene Parafínico Sintetizado por Ácidos Graxos e Ésteres Hidroprocessados (Synthesized Paraffinic Kerosene From Hydroprocessed Esters And Fatty Acids - SPK-HEFA);
- O Querosene Parafínico Sintetizado por Álcool (Synthesized Paraffinic Kerosene From Alcohol To Jet - SPK-ATJ);
- As Isoparafinas Sintetizadas de Açúcares Fermentados e Hidroprocessados (Synthesized Iso Paraffinic - SIP);
- O Querosene de Hidrotermólise Catalítica (Catalytic Hydrothermolysis Synthesized Kerosene - CHJ);
- O Querosene Parafínico Sintetizado por Hidrocarbonetos Bioderivados, Ácidos Graxos e Ésteres Hidroprocessados (Synthesized Paraffinic Kerosene From Hydroprocessed Hydrocarbons, Esters And Fatty Acids - SPK-HC-HEFA).

O bioquerosene é regulamentado como um combustível *drop in*, isso é, que é utilizado misturado ao combustível fóssil e não requer alterações nos motores e estruturas das aeronaves (PROQR, 2022). A Norma nº856 da ANP define a maneira que essa mistura

deve ocorrer: é proibido utilizar o JET alternativo sem misturá-lo ao JET A ou JET A-1, esta mistura dará origem ao JET C; não é permitido misturar mais de um tipo de JET alternativo com os combustíveis de origem fóssil; os JET Alternativos devem respeitar os limites de mistura definido pela norma (ANP, 2021). A **Tabela 01** apresenta as rotas de produção, a porcentagem de mistura definida na norma, os tipos de matérias-primas e o ano de aprovação das rotas.

**Tabela 01** - Rotas de Produção de BioQAV e suas características

<b>Nome</b>	<b>% de mistura</b>	<b>Matéria-prima</b>	<b>Ano de Aprovação</b>
<b>SPK-FT</b>	50%	Biomassa	2009
<b>SPK/A</b>	50%	Biomassa	2015
<b>SPK-HEFA</b>	50%	Óleos e Gorduras	2011
<b>SPK-ATJ</b>	50%	Etanol e Isobutanol	2016
<b>SIP</b>	10%	Açúcar	2014
<b>CHJ</b>	50%	Óleos e Gorduras	2020
<b>SPK-HC-HEFA</b>	10%	Óleo de Microalgas	2020

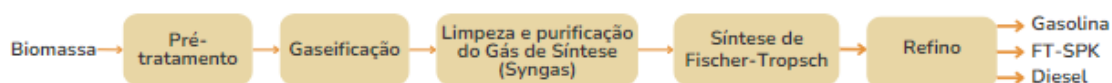
Fonte: (ANP, 2021) e (ASTM, 2021)

#### 2.4.1. *SPK-FT e SPK/A*

O querosene parafínico hidroprocessado e sintetizado por Fischer-Tropsch (SPK-FT) e o querosene parafínico sintetizado com aromáticos (SPK/A) são definidos pela resolução nº 856 da ANP como querosenes parafínicos sintetizados obtidos pelo processo Fischer-Tropsch, a única diferença é que para produzir o SPK/A ocorre adição de aromáticos leves (ANP, 2021). O processo de produção a partir desta rota se inicia com o pré-tratamento e gaseificação da biomassa, que é convertida em gás de síntese, contendo uma grande quantidade de CO e H<sub>2</sub>. Este gás é purificado para estar livre de sólidos, alcatrões e compostos com nitrogênio e enxofre, e então enviado para o processo de síntese de Fischer-Tropsch que é um processo que transforma o gás em hidrocarboneto líquido. Por fim, o líquido é refinado e separado, produzindo gasolina, combustível de aviação (FT-SPK) e diesel. Para a produção do SPK/A, após o refino, ocorre a adição de aromáticos

(NG, FAROOQ e YANG, 2021) (NEULING e KALTSCHMITT, 2018). A **Figura 05** apresenta o diagrama de blocos simplificado do processo.

**Figura 5** - Diagrama de blocos simplificado da produção de SPK-FT



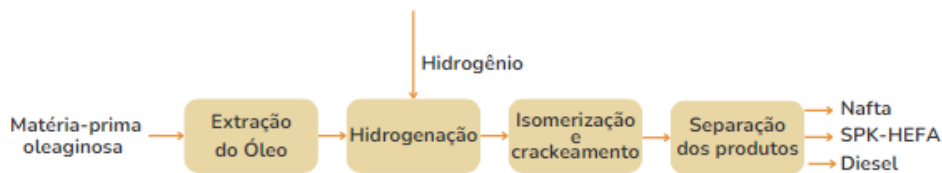
Fonte: (NG, FAROOQ e YANG, 2021), adaptado pela autora

#### 2.4.2. SPK-HEFA

O Querosene Parafínico Sintetizado a partir do Hidroprocessamento de Ésteres e Ácidos Graxos (SPK-HEFA) utiliza uma variedade de matérias-primas, incluindo óleos vegetais, gorduras animais, resíduos de óleo de cozinha, óleo de pirólise e óleo de algas, para produzir BioQAV (MILANEZ, MAIA, *et al.*, 2021). Para a produção do BioQAV HEFA é necessário a desoxigenação das moléculas de ésteres e ácidos graxos livres, que pode ocorrer através de: hidrogenação, decarbonização ou descarboxilação. Como os dois últimos métodos consomem carbono para remover oxigênio, o método de hidrogenação é o mais indicado. Nesse processo, a adição de átomos de hidrogênio reage com o oxigênio da molécula e geram água como subproduto (NEULING e KALTSCHMITT, 2015). No entanto, um dos grandes problemas da hidrogenação é o impacto que gera no ciclo de vida de produção do BioQAV HEFA ao depender do uso de hidrogênio, que é uma matéria-prima ainda obtida majoritariamente de fonte fóssil (DE JONG, ANTONISSEN, *et al.*, 2017).

Em seguida, o produto resultante passa por isomerização, que é um processo que gera alcanos, reduzindo o ponto de congelamento do combustível, além disso, também ocorre o craqueamento, que reduz o tamanho molecular, diminuindo o peso molecular do produto final. Além do BioQAV, o processo também gera diesel e nafta, ambos produtos de valor comercial, portanto, há uma etapa de separação dos três produtos ao final do processo (NEULING e KALTSCHMITT, 2015). O diagrama detalhado do processo pode ser visualizado na **Figura 06**.

**Figura 6** - Diagrama de blocos simplificado da produção de SPK-HEFA



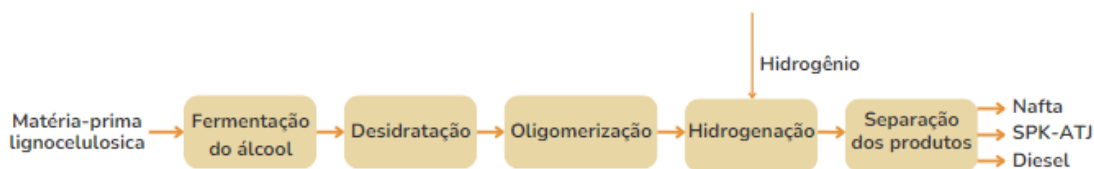
Fonte: (NEULING e KALTSCHMITT, 2018), adaptado pela autora

A principal vantagem da rota HEFA consiste em ser o único processo já aplicado em escala industrial, em comparação com as demais rotas. Atualmente, ele é aplicado principalmente para obtenção de diesel verde, mas essas plantas podem também ser adaptadas para produzir bioquerosene (NEULING e KALTSCHMITT, 2018).

#### 2.4.3. SPK-ATJ

O Querosene Parafínico Sintetizado com Álcool (SPK-ATJ) consiste em um produto resultante da transformação de álcoois, principalmente etanol e butanol, em combustível de aviação. O processo se inicia com a matéria-prima lignocelulósica que será fermentada para obtenção do álcool, com isso, este produto será desidratado e transformado em alcenos. Na etapa seguinte, oligomerização, os alcenos terão suas cadeias aumentadas e o produto será hidrogenado e separado, produzindo o SPK-ATJ, nafta e diesel (NEULING e KALTSCHMITT, 2018). A **Figura 07** apresenta o diagrama de blocos simplificado para a produção do biocombustível.

**Figura 7** - Diagrama de blocos simplificado da produção de SPK-ATJ



Fonte: (NEULING e KALTSCHMITT, 2018), adaptado pela autora

#### 2.4.4. SIP

O Iso-parafinas Sintetizadas (SIP) é um querosene produzido diretamente da sintetização de açúcares. O processo se inicia com a separação dos açúcares da lignina da biomassa, seguido por uma conversão desses açúcares em farneseno (C<sub>15</sub>H<sub>24</sub>) pelo processo de hidrólise enzimática e fermentação. Por fim, este líquido passa por uma separação para recuperação do farneseno de outros produtos e seu hidrocessamento para farnesano

(C<sub>15</sub>H<sub>32</sub>), que é o combustível de aviação conhecido como SIP (NG, FAROOQ e YANG, 2021). A **Figura 08** apresenta o diagrama de blocos simplificado do processo de produção através da rota SIP.

**Figura 8** - Diagrama de blocos simplificado da produção de SIP

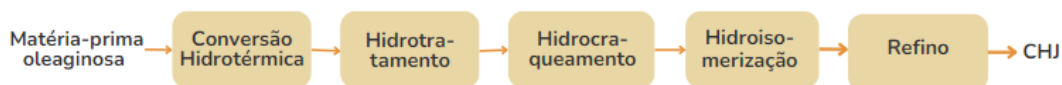


Fonte: (NG, FAROOQ e YANG, 2021), adaptado pela autora

#### 2.4.5. CHJ

O querosene de hidrotermólise catalítica (CHJ) é um processo que visa converter os triglicerídeos da matéria-prima oleaginosa em hidrocarbonetos, para isso, é realizada uma conversão hidrotérmica onde o óleo ou gordura é misturado com água em alta temperatura para quebrar produzir ácidos graxos. Após isso, ocorre um hidrotreatamento para remoção de impurezas, seguido de hidrocraqueamento e hidroisomerização para saturar ligações duplas e melhorar as propriedades do combustível. Por fim, a substância passa pela etapa de refino, onde é separado e purificado para obtenção do CHJ (CAFFI, 2018). A **Figura 09** apresenta o diagrama de blocos simplificado do processo da rota CHJ.

**Figura 9** - Diagrama de blocos simplificado da produção de CHJ



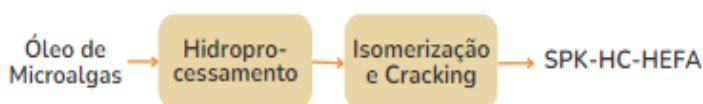
Fonte: (CAFFI, 2018), adaptado pela autora

#### 2.4.6. SPK-HC-HEFA

O querosene parafínico sintetizado por hidrocarbonetos bioderivados, ácidos graxos e ésteres hidroprocessados (SPK-HC-HEFA) consiste de um processo focado em óleo de microalgas como matéria-prima, inicialmente ele fará a conversão dos lipídios em hidrocarbonetos removendo o oxigênio, através do hidroprocessamento. Esta mistura será então submetida a um processo de isomerização e craqueamento produzindo o SPK-HC-HEFA (CAFFI, 2018). A **Figura 10** apresenta o diagrama de blocos simplificado do processo de produção a partir da rota HC-HEFA.



**Figura 10** - Diagrama de blocos simplificado da produção de SPK-HC-HEFA



Fonte: (CAFFI, 2018), adaptado pela autora

## 2.5. LEGISLAÇÃO E ACORDOS DE INCENTIVOS À PRODUÇÃO DE BIOQAV

A indústria de refino de petróleo está consolidada no mundo todo, o que faz com que a inserção de biocombustíveis no mercado enfrente certas dificuldades, principalmente quando os custos de produção são mais elevados (MILANEZ, MAIA, *et al.*, 2021). Desta forma, entendendo a necessidade ambiental de redução de emissões, é preciso que existam legislações e incentivos do governo para que as empresas invistam em alternativas mais sustentáveis.

### 2.5.1. Legislações Internacionais

A **Tabela 02** utiliza informações dos trabalhos de NG et al. (2021) e Shahriar & Khanal (2022) para trazer as principais regulamentações e programas que abordem biocombustível de aviação mundialmente, e suas metas. Um dos programas mais importantes globalmente no cenário atual é o Esquema de Compensação e Redução de Carbono para a Aviação Internacional (Carbon Offsetting and Reduction Scheme for International Aviation - CORSIA), proposto pela Organização da Aviação Civil Internacional (International Civil Aviation Organization - ICAO). O programa realiza o controle das emissões do setor desde 2019, no período entre 2021 e 2026 apenas alguns países voluntários participarão da fase voluntária, onde eles precisarão compensar e diminuir emissões. O Brasil não é um dos voluntários, participando apenas da etapa obrigatória que começará em 2027 (DE MIRANDA RODRIGUES e HENKES, 2021).

O programa define uma lista de padrões de sustentabilidade para a produção de combustíveis renováveis de aviação, além de ter um estudo de impacto do ciclo de vida para vários possíveis combustíveis de aviação, esta lista é chamada de Combustíveis Elegíveis ao CORSIA, em inglês CORSIA Eligible Fuels (ICAO, 2022). Um estudo realizado pelo Instituto de Conservação e Desenvolvimento Sustentável da Amazônia (IDESAM) mostrou que se o Brasil tivesse aderido as etapas voluntárias do programa

teria sido possível reduzir até 8,6MTCO<sub>2</sub> das emissões produzidas no setor, mostrando os impactos que o programa pode produzir (SOARES e CENAMO, 2018).

Além do CORSIA, a **Tabela 02** mostra iniciativas de outros países com o fim de reduzir os impactos da aviação. Os Estados Unidos e a União Europeia são os lugares que mais se destacam em termos de leis e programas vigentes, tendo desde 2008 programas para a redução de emissões do setor. Além desses, também ocorre o destaque para o México, que apresenta um programa de diminuição de emissões regulamentado desde 2007. De forma geral, as regulamentações definem metas percentuais de mistura de bioquerosene de aviação no total de combustíveis utilizados no setor. Algumas ainda são sobre contabilização e redução das emissões, enquanto outras mencionam a concessão de taxas para iniciativas que produzam e utilizem bioquerosene. É possível ver também que a maior parte das leis acontecem a partir de 2018, coincidindo com o início do CORSIA, que se definiu como um marco para o início da discussão da sustentabilidade do setor.

**Tabela 02** - Registros de regulamentações relacionadas à produção de BioQAV no mundo

<b>País ou Região</b>	<b>Ano</b>	<b>Nome da Lei/Programa/Acordo</b>	<b>Objetivos principais</b>
Global	2018	Esquema de Compensação e Redução de Carbono para a Aviação Internacional (Carbon Offsetting and Reduction Scheme for International Aviation - CORSIA)	Introduzir o uso de biocombustíveis de aviação e outras medidas de sustentabilidade no setor globalmente, com meta de parar o aumento das emissões de carbono a partir de 2020.
União Europeia	2008	Esquema de Comércio de Emissões da União Europeia (European Union Emission Trading Scheme- EU ETS)	Inclui as atividades de emissão no Esquema de Comércio de Emissões da UE, com meta de reduzir as emissões anuais do setor do período de 2013 até 2020 para 5% do nível médio de 2004 até 2006.
	2011	Roteiro Europeu para Biocombustíveis Avançados (European Advanced Biofuels Flightpath)	Planeja estratégias para reduzir as emissões do setor e produzir dois milhões de toneladas de BioQAV por ano

	2021	Iniciativa ReFuelEU para Aviação (ReFuelEU Aviation initiative)	Aumentar a oferta e incentivar a procura por combustível de aviação sustentável, com metas progressivas de incorporar ele no uso, sendo de 2% até 2025, 6% até 2030 e 70% até 2050.
	2010	Fazenda ao Voo (Farm to Fly)	Aumentar a viabilidade do uso do BioQAV, com meta de produzir mais de 3 bilhões de litros anualmente.
Estados Unidos	2014	Projeto de Produção de Biocombustíveis Avançados Drop-in (Advanced Drop-in Biofuels Production Project)	Produzir mais de 300 milhões de litros de diesel verde e BioQAV para uso militar, com baixo custo.
	2021	Lei de Combustível de Aviação Sustentável (Sustainable Aviation Fuel Act)	Definir créditos para a produção de BioQAV, variando de acordo com a redução da emissão de GEE.
Indonésia	2013	Plano de Ação Nacional da Indonésia (Indonesia's national action plan)	Alcançar 2% de mistura de combustível de aviação renovável até 2016, 3% até 2020 e 5% até 2025.
Reino Unido	2018	Obrigação de Combustível de Transporte Renovável (Renewable Transport Fuel Obligation)	Incentivar a produção de BioQAV.
Portugal	2019	Roteiro para Neutralidade de Carbono 2050 (Roadmap for carbon neutrality 2050)	Alcançar a descarbonização do setor de aviação até 2050.
Espanha	2020	Lei de Mudanças Climáticas (Climate Change Law)	Alcançar 2% de mistura de combustível de aviação renovável até 2025.
França	2020	Lei de Mudanças Climáticas (Climate Change Law)	Alcançar 5% de mistura de combustível de aviação renovável até 2030.
Suécia	2020	Iniciativa da Indústria Sueca Livre de Combustíveis Fósseis (Fossil-free Sweden industry initiative)	Alcançar 30% de mistura de combustível de aviação renovável até 2030.

México	2007	Lei para o Desenvolvimento e Promoção da Bioenergia (Law for the Development and Promotion of Bioenergy)	Alcançar 15% de mistura de combustível de aviação renovável até 2020 e 50% até 2040.
--------	------	--	--

Fonte: (NG, FAROOQ e YANG, 2021) e (SHAHRIAR e KHANAL, 2022)

### 2.5.2. Legislações Nacionais

O Brasil apresenta um destaque para a produção de biocombustíveis no cenário global, desta forma, espera-se que o mesmo ocorra para o bioquerosene. Neste sentido, o país já aprovou leis e resoluções para que isso ocorra, como pode ser visto na **Tabela 03**. Em 2017, foi instituída a Política Nacional de Biocombustíveis (RenovaBio), que tem 3 objetivos principais: Definir metas de descarbonização; aplicar a certificação da produção de biocombustíveis; e aplicar créditos de descarbonização (CBIO) (ANP, 2017). O foco da política é incentivar a produção de todos os biocombustíveis, incluindo o bioquerosene, e foi regulamentada após o Acordo de Paris em 2016, quando o Brasil se comprometeu em reduzir 37% das emissões de carbono até 2025 (MME, 2021).

**Tabela 03** - Registros de regulamentações relacionadas à produção de BioQAV no Brasil

Nome da Lei/Resolução	Ano	Objetivos
Lei nº 13.576 RenovaBio	2017	Apresentar iniciativas para contribuir com os compromissos do Brasil no Acordo de Paris; expandir os biocombustíveis na matriz energética, garantindo o abastecimento regular; assegurar previsibilidade no mercado de combustíveis, promovendo eficiência energética e redução de emissões de gases de efeito estufa.
PL 528 Programa Combustível do Futuro	2020	Dispõe sobre a promoção da mobilidade sustentável de baixo carbono e a captura e a estocagem geológica de dióxido de carbono; institui o Programa Nacional de Combustível Sustentável de Aviação (ProBioQAV), o Programa Nacional de Diesel Verde (PNDV) e o Programa Nacional de Descarbonização do Produtor e Importador de Gás Natural e de Incentivo ao Biometano.
Lei nº 14.248 Programa Nacional do Bioquerosene	2021	Estabelece o Programa Nacional do Bioquerosene para o incentivo à pesquisa e o fomento da produção de energia à base de biomassas, visando à sustentabilidade da aviação brasileira.

Resolução ANP nº 856	2021	Estabelece as especificações do querosene de aviação JET A e JET A-1, dos querosenes de aviação alternativos e do querosene de aviação C (JET C), bem como as obrigações quanto ao controle da qualidade a serem atendidas pelos agentes econômicos que comercializam esses produtos em território nacional.
-------------------------	------	--

Fonte: (ANP, 2021), (SENADO, 2020), (ANP, 2017) e (BRASIL, 2021)

Em 2020 foi criado o Projeto de Lei (PL) 528, que propõe dar uma atenção especial ao diesel verde, biometano e ao bioquerosene, biocombustíveis que ainda não são muito produzidos no país, garantindo incentivos para a sua produção, atualmente o PL foi aprovado na câmara dos deputados e será enviada ao senado (SENADO, 2020). O Programa Nacional do Bioquerosene está inserido no Programa Combustível do Futuro, tendo como objetivo iniciar a produção de combustíveis sustentáveis de aviação a partir do desenvolvimento de tecnologias, e criar estímulos para o desenvolvimento deste mercado (BRASIL, 2021).

A ANP é o órgão regulador das atividades de petróleo, gás natural e biocombustíveis no Brasil, desta forma, é imprescindível que ela reconheça e regularize as formas de produzir o bioquerosene. A resolução nº 856 de 2021 da ANP reconhece sete rotas de produção de bioquerosene de aviação e define o seu uso misturado ao querosene fóssil, além de estabelecer as características físico-químicas necessárias para produzir bioquerosene *drop in* (ANP, 2021).

## 2.6. CENÁRIO ATUAL DA PRODUÇÃO DE BIOQAV

Atualmente 47 países apresentam pelo menos uma planta para produção de bioquerosene, sendo os três primeiros deles nos Estados Unidos, com capacidade de 36,5 bilhões de litros por ano, no Canadá, com capacidade de 6,4 bilhões de litros por ano e na França, com capacidade de 1,81 bilhões de litros por ano. Juntos, esses países têm capacidade de produzir um total de 103,1 bilhões de litros por ano (ICAO, 2024). A maior parte deste bioquerosene é produzido a partir da rota HEFA, com uma das principais matérias-primas sendo óleo de cozinha usado, ocorre ainda a produção via ATJ e Fischer Tropsch, porém em escala muito menor, mas com perspectiva de aumentar no futuro (IRENA, 2021).

Uma das principais atuantes na produção de bioquerosene é a Neste, empresa finlandesa, que é a maior produtora deste biocombustível no mundo (ICAO, 2024). O bioquerosene

produzido pela Neste deriva majoritariamente de óleo de cozinha usado e gordura animal, e já é distribuído globalmente, utilizado em grandes aeroportos como o Aeroporto Internacional de São Francisco (SFO), o Aeroporto Internacional de Los Angeles (LAX), o Aeroporto de Frankfurt (FRA), entre outros (NESTE, 2024). A SGB Bioenergy também tem planos de se destacar no setor, tendo anunciado a construção de uma biorrefinaria no Panamá, nomeada Biorrefinaria Ciudad Dorada, com produção aproximada de 10 bilhões de litros de combustível por ano, iniciando em 2027 (WHYTE, 2023).

No registro de locais de produção do ICAO, o Brasil conta com 11 plantas registradas. Destas, 9 foram anunciadas recentemente e não estão em produção, e duas já estão em operação, porém sem registro da quantidade de bioquerosene produzido por ano (ICAO, 2024). Apesar dos incentivos, o Brasil não está progredindo da mesma forma que o resto do mundo com relação à produção de BioQAV. Em 2010, o Brasil realizou seus primeiros voos experimentais. Alguns anos depois a Gol promoveu viagens utilizando 4% de BioQAV obtido através do óleo de milho. No entanto, foram iniciativas pontuais que não se mantiveram (RIBEIRO, 2019).

Com a implementação do CORSIA e a obrigatoriedade de redução de emissões do setor, o Brasil apresenta uma alta demanda de BioQAV, mas a produção ainda é inexistente, deixando margem para a possibilidade de que a partir de 2027 o país precise importar o combustível de aviação necessário. A realidade da importação do biocombustível seria uma completa falta de aproveitamento do potencial do Brasil, que pode produzir até 9 bilhões de litros por ano de BioQAV com matéria-prima já existente. Desta forma, existem iniciativas que estão sendo colocadas em prática para que este cenário seja evitado (BERTÃO, 2023).

O H2CA (Laboratório de Hidrogênio e Combustíveis Avançados) inaugurou em 2023 a primeira fábrica piloto no país para a produção de BioQAV, localizado no município de Natal (Rio Grande do Norte). O laboratório pretende usar glicerina, um coproduto da indústria do biodiesel, como matéria-prima, com metas de produzir até 5l de biocombustível por dia (BALAGO, 2023). A Raízen, que já é uma empresa destaque na produção do etanol, também já reconheceu e iniciou os investimentos no uso do etanol para a produção de bioquerosene, a partir da rota ATJ (RAÍZEN, 2023). A empresa recebeu o selo ISCC Corsia Plus para o seu etanol de primeira geração, atestando que o

mesmo está apto para ser utilizado na produção de bioquerosene, sendo a primeira no mundo a receber o certificado para o etanol de cana-de-açúcar (NOVA CANA, 2023b).

Outra iniciativa para a produção de bioquerosene é da empresa Geo Biogás & Tech, que investirá R\$ 15 milhões em uma planta de produção de bioquerosene a partir da rota Fischer-Tropsch, associando-a às suas unidades de geração de biogás no Paraná, com meta de produzir até 660 litros por dia e início de operação em 2023 (BRASIL, 2022). A Vibra Energia também anunciou uma parceria com a Brasil BioFuels (BBF) para a produção de combustível sustentável de aviação, o projeto usará o óleo de palma como matéria-prima e terá um investimento inicial de 2 bilhões de reais para a construção de um biorrefinaria na Zona Franca de Manaus (AM), com previsão de início de operação para o ano de 2025 (VIBRA, 2024). Por fim, outro projeto em escala industrial é o da Acelen, empresa controlada por um capital de Abu Dhabi, que investirá R\$12 bilhões nos próximos 10 anos em biocombustíveis, incluindo a produção de bioquerosene a partir da macaúba, com planos de iniciar a exportação do combustível a partir de 2027 (NOVA CANA, 2024).

Existem também os casos de outros países investindo na produção de bioquerosene a partir de empresas brasileiras, como é o caso da GranBio, tendo recebido verba do governo dos Estados Unidos para construção de uma planta de BioQAV em escala de demonstração no estado da Georgia (EUA). Esta iniciativa, apesar do volume produzido não ser brasileiro, traz conhecimento para empresas nacionais (RAMOS, 2022). Desta forma, é possível perceber que o Brasil já iniciou a construção de seu mercado de bioquerosene, e, com incentivo da legislação e dos acordos estabelecidos, pode se tornar um grande produtor no futuro.

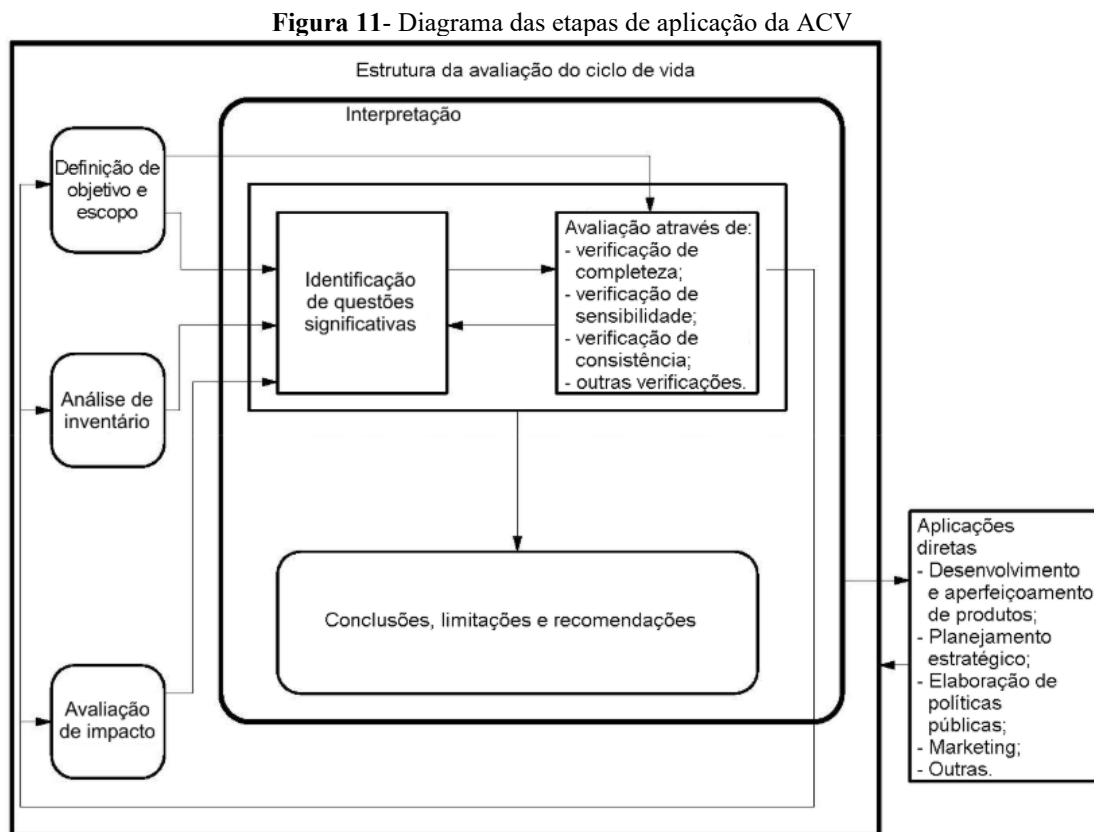
## **2.7. AVALIAÇÃO DO CICLO DE VIDA**

O ciclo de vida de um produto é definido como as etapas consecutivas e encadeadas de sua produção, podendo ir desde a obtenção da matéria-prima até a disposição final (ABNT, 2009). Entender o ciclo de vida de um produto é importante para a sua gestão estratégica, permitindo compreender os pontos de maior impacto e dificuldade da produção e propor mudanças visando a otimização do processo (SILVA, JUNIOR, *et al.*, 2021). A Avaliação do Ciclo de Vida (ACV) é uma metodologia de análise de impactos ambientais a partir de uma definição detalhada dos insumos mássicos e energéticos,

avaliando a produção e transporte de cada um deles, podendo ser dividido por fases de um sistema (ABNT, 2009).

Existem duas normas editadas e regulamentadas pela Associação Brasileira de Normas Técnicas (ABNT) que são referentes à aplicação do ACV. Uma delas é a Norma ABNT ISO 14040, publicada inicialmente em 2006 e atualizada em 2009, que apresenta a ACV como ferramenta de Gestão Ambiental, explorando a estrutura de uma ACV e seus objetivos. A outra é a Norma ABNT NBR ISO 14044, também publicada inicialmente em 2006 e atualizada em 2009, que complementa a norma anterior, aprofundando os conceitos e a metodologia de aplicação.

Estas normas são consideradas em todos os estudos que aplicam a ACV, e elas definem que toda a análise deve seguir as seguintes etapas: Definição de Objetivo e Escopo; Análise de Inventário; Avaliação de Impactos; Interpretação. Desta forma, estas etapas serão explicadas nos próximos tópicos. A **Figura 11** apresenta as etapas e como elas se relacionam, de acordo com o que é apresentado pelas normas.



Fonte: (ABNT, 2009)



### 2.7.1. Definição de Objetivo e Escopo

De acordo com a ABNT 14044, nesta etapa são definidos o objetivo da ACV, declarando como será aplicada, quais as razões para realizar o estudo, o público-alvo e a intenção de comparação com outros processos. Ainda, é organizado também o escopo do estudo, que consiste na definição dos itens: sistema do produto; funções do sistema; unidade funcional; fronteira do sistema; alocação; entre outros (ABNT, 2009). As principais definições serão exploradas a seguir.

- *Unidade Funcional e Fluxo de Referência*

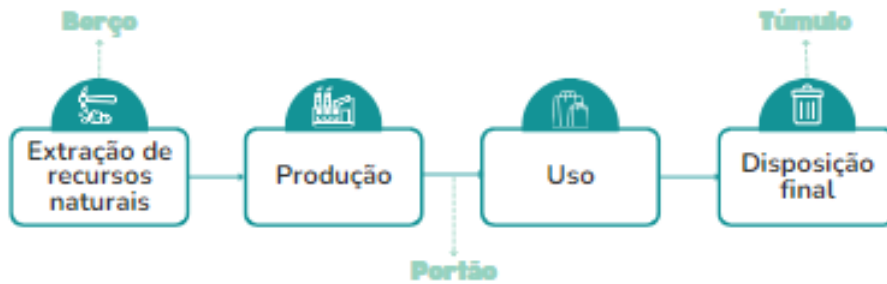
A unidade funcional, que é a base de referência para a qual os resultados serão gerados, sendo uma variável muito importante para que o estudo consiga atingir o seu objetivo e ser utilizado para comparação com outros ciclos. Enquanto o fluxo de referência é a quantidade necessária do produto em função do cumprimento da unidade funcional selecionada (ABNT, 2009).

- *Fronteira do Sistema*

A fronteira do sistema é a forma de estabelecer os limites para a aplicação da análise. As principais fronteiras são definidas com relação às etapas de produção de um produto, como ilustrado na **Figura 12**, sendo elas (KOKARE, OLIVEIRA e GODINA, 2023):

- Berço ao Portão (*cradle-to-gate*): análise que engloba as etapas de produção do produto, envolvendo a obtenção dos recursos e operações de processamento e fabricação até ele estar pronto para uso;
- Berço ao Túmulo (*cradle-to-grave*): análise que engloba todas as etapas do ciclo de vida do produto, indo desde a obtenção de recursos, às etapas de produção, ao uso até a disposição final e as etapas de transporte entre elas;
- Portão ao portão (*gate-to-gate*): análise que engloba processos que ocorrem dentro de uma mesma planta de produção, excluindo os processos de obtenção de recursos, uso e disposição final;
- Portão ao túmulo (*gate-to-grave*): análise que engloba os processos de uso e descarte final do produto, desconsiderando a sua produção e os recursos obtidos.

Figura 12 - Ilustração das fronteiras do sistema em um ciclo de vida.



Fonte: elaborado pela autora (2024)

- *Alocação*

A alocação é um processo usado em sistemas onde há a produção de mais produtos do que o de interesse. A alocação envolve a distribuição dos fluxos de modo a quantificar os impactos gerados exclusivamente pelo produto principal do sistema, sem considerar os impactos dos coprodutos resultantes dos processos (ABNT, 2009). Há várias maneiras de determinar os fatores de alocação, como os baseados em massa, energia e economia. O estudo de RAMÍREZ (2009) identificou 26 métodos distintos para realizar a alocação, porém, também concluiu que não há um método de alocação definido como o melhor, sendo responsabilidade de cada estudo selecionar aquele mais adequado às suas necessidades.

Em estudos envolvendo processos de produção de biocombustíveis os métodos mais utilizados são os: mássico, onde a massa do produto de interesse sobre a soma de todos os produtos gerados forma o fator de alocação; econômico, onde o valor do produto de interesse sobre a soma do valor de todos os produtos gerados forma o fator de alocação; energético, onde a energia contida no produto de interesse sobre a soma do valor da energia total dos produtos gerados forma o fator de alocação. Em todos estes métodos, para sistemas com mais de uma etapa, como é o caso deste trabalho, os fatores de cada etapa são multiplicados para gerar o fator de alocação final.

### 2.7.2. *Análise de Inventário*

A análise de inventário consiste da coleta de dados e os cálculos necessários para quantificar as entradas e saídas do sistema de um produto. Os dados de um inventário podem envolver entradas de energia, de matéria-prima, entradas auxiliares, outras

entradas físicas, produtos, coprodutos e resíduos, emissões atmosféricas, descargas para a água e solo, entre outros (ABNT, 2009).

A construção de um inventário é uma etapa de extrema importância para alcançar o objetivo do trabalho, onde quanto mais detalhado e mais próximo à realidade da análise, mais certos serão os resultados obtidos. Desta forma, os dados podem ser coletados de diversas fontes, como trabalhos da literatura, banco de dados para ACV ou dados de empresas. Uma das principais bases de dados internacionais para ACV é a *Ecoinvent*, com mais de 20 mil processos nas áreas de agricultura, construção, químicos, combustíveis, entre outros (ECOINVENT, 2023). Existem outras bases de dados, focadas em diversos segmentos, como: Agri-footprint; Exiobase; ARVI, Agribalyse, entre outras.

Os *softwares* utilizados para a realização da Análise do Ciclo de Vida (ACV) são diversos. Um exemplo é o GREET Model, criado pelo Departamento de Energia e Tecnologias de Transporte dos Estados Unidos, com foco na avaliação do ciclo de vida dos combustíveis. Outro *software* popular é o Umberto, desenvolvido pelo Instituto de Informática Ambiental de Hamburgo, amplamente utilizado para a elaboração gráfica dos resultados da ACV em diversos processos. Desde sua apresentação em 1990, o SimaPro é um dos *softwares* mais utilizados para a aplicação de ACV, sendo especialmente eficaz para a análise de ciclos de vida complexos devido à vasta base de dados agregada à licença (CAMPOLINA, SIGRIST e DA SILVA MORIS, 2015).

### 2.7.3. Avaliação de Impactos

A Avaliação de impacto tem como principal objetivo quantificar a significância de diferentes classes de impactos ambientais, o processo consiste em utilizar dados do inventário para calcular indicadores de impacto seguindo métodos pré-definidos (ABNT, 2009). Esta etapa apresenta pontos obrigatórios, como: selecionar as categorias de impacto, classificação e caracterização, e pontos opcionais: normalização, agrupamento e ponderação de dados.

A seleção da metodologia usada para calcular o impacto é um ponto importante na ACV, apesar da escolha ser feita na primeira etapa do estudo, a aplicação dela ocorre na etapa de avaliação de impactos. Os métodos utilizados para a etapa de Avaliação de Impacto Ambiental são diversos, estes se diferem pela forma que calculam os impactos, através de pesos estabelecidos para os insumos utilizados, além disso, cada um deles também

engloba classes de impacto diferentes e foram pensados em níveis globais específicos. A **Tabela 04** apresenta os principais métodos de cálculo de impacto ambiental considerado pelas literaturas de (CHOMKHAMRSRI, WOLF e PANT, 2011) e (MENDES, BUENO e OMETTO, 2015).

A **Tabela 04** também mostra os níveis de avaliação de impacto, que indicam impactos Midpoints, Endpoints e os Combinados. Os indicadores midpoints são aqueles onde o impacto ambiental é quantificado ao longo do processo, antes de chegar ao ponto final, por exemplo: Mudanças Climáticas; Eutrofização; Acidificação, entre outros, que são impactos que oferecem mais detalhamento sobre o processo. Já os endpoints são categorias que quantificam o impacto final em áreas mais abrangentes, como: Danos à Saúde Humana; Danos ao Meio Ambiente, entre outros. Os combinados são as metodologias que apresentam categorias de impacto das duas formas (MENDES, BUENO e OMETTO, 2015).

Além destas informações, a **Tabela 04** também apresenta as Categorias de Impacto Principais que os métodos calculam, pode ser visto que a maioria abrange todas as categorias de impacto, com exceção de alguns métodos que são mais específicos. Também pode ser vista a abrangência do método, o que representa as localidades para as quais os métodos podem ser aplicados com a menor taxa de erro. O Brasil não apresenta um método que se enquadre apenas na realidade do país, desta forma, os métodos recomendados para aplicação nacional são aqueles cuja abrangência é global (MENDES, BUENO e OMETTO, 2015).

**Tabela 04** - Métodos de análise de impacto ambiental e suas características (MC= Mudanças Climáticas; DCO= Depleção da Camada de Ozônio; AC= Acidificação; EU= Eutrofização; FFO= Formação de Foto-oxidantes; ET= Ecotoxicidade; EH= Toxicidade Humana; CR= Consumo de Recursos; UT= Uso da Terra; MID= Midpoint; END= Endpoint; COMB= Combinado; GLO= Global; EU = Europa; SU= Suíça; AN = América do Norte; CA= Canadá; JA= Japão.)

Método	Nível	Categorias de Impacto Principais									Abrangência
		MC	DCO	AC	EU	FFO	ET	TH	CR	UT	
CML 2002	MID										GLO

Eco-Indicator 99	END									EU <sup>e</sup> GLO
Ecological Scarcity	COMB									SU
EDIP 97	MID									GLO
EDIP 2003	MID									EU <sup>e</sup> GLO
ESP 2000	END									GLO
Impact 2002+	COMB									EU
LIME	COMB									JA <sup>e</sup> GLO
LUCAS	MID									CA <sup>e</sup> GLO
MEEuP	MID									EU
ReCiPe	COMB									EU <sup>e</sup> GLO
TRACI	MID									AN <sup>e</sup> GLO
USEtox	MID									GLO
IMPACT World +	COMB									GLO

Fonte: elaborado pela autora (2024)

#### *2.7.4. Interpretação dos Resultados*

A interpretação é a fase final da ACV, onde se busca chegar a conclusões para responder ao objetivo definido no início, considerando as constatações da análise de inventário e da avaliação de impacto. A partir desta etapa é possível chegar aos pontos-chaves de um ciclo de vida, como as etapas que têm mais impacto, os insumos que são mais impactantes, quais as categorias de maior impacto no ciclo de um produto e, desta forma, pensar em recomendações para solucionar estas questões. Também é parte desta etapa a apresentação dos resultados de forma completa e bem organizada. Além disso, esta etapa é iterativa, de forma que, após o processo de análise crítica, é possível retomar as etapas anteriores, caso seja percebido alguma inconsistência com o objetivo definido (ABNT, 2009).

### **3. METODOLOGIA**

Neste capítulo serão descritas as etapas metodológicas desenvolvidas para alcançar os objetivos previamente mencionados no **Capítulo 01**. Para isso, o trabalho será dividido em duas etapas: (a) avaliação do potencial de produção de BioQAV de milho no Centro-Oeste; (b) realização de uma análise do ciclo de vida comparativa entre as rotas que utilizam o milho como matéria-prima.

O CORSIA é o acordo internacional de maior importância para a produção de bioquerosene, e, de acordo com a lista de combustíveis sustentáveis elegíveis ao programa, existem duas formas dos tipos de bioquerosene a partir do milho (CORSIA, 2022). Sendo eles o Querosene Parafínico Sintetizado por Ácidos Graxos e Ésteres Hidroprocessados (BioQAV HEFA) obtido a partir do óleo de milho, e o Querosene Parafínico Sintetizado por Álcool (BioQAV ATJ) fabricado a partir do etanol de milho. Com isso, este estudo focará na análise destas duas formas de produção.

#### **3.1. AVALIAÇÃO DO POTENCIAL DE PRODUÇÃO DE BIOQAV DE MILHO**

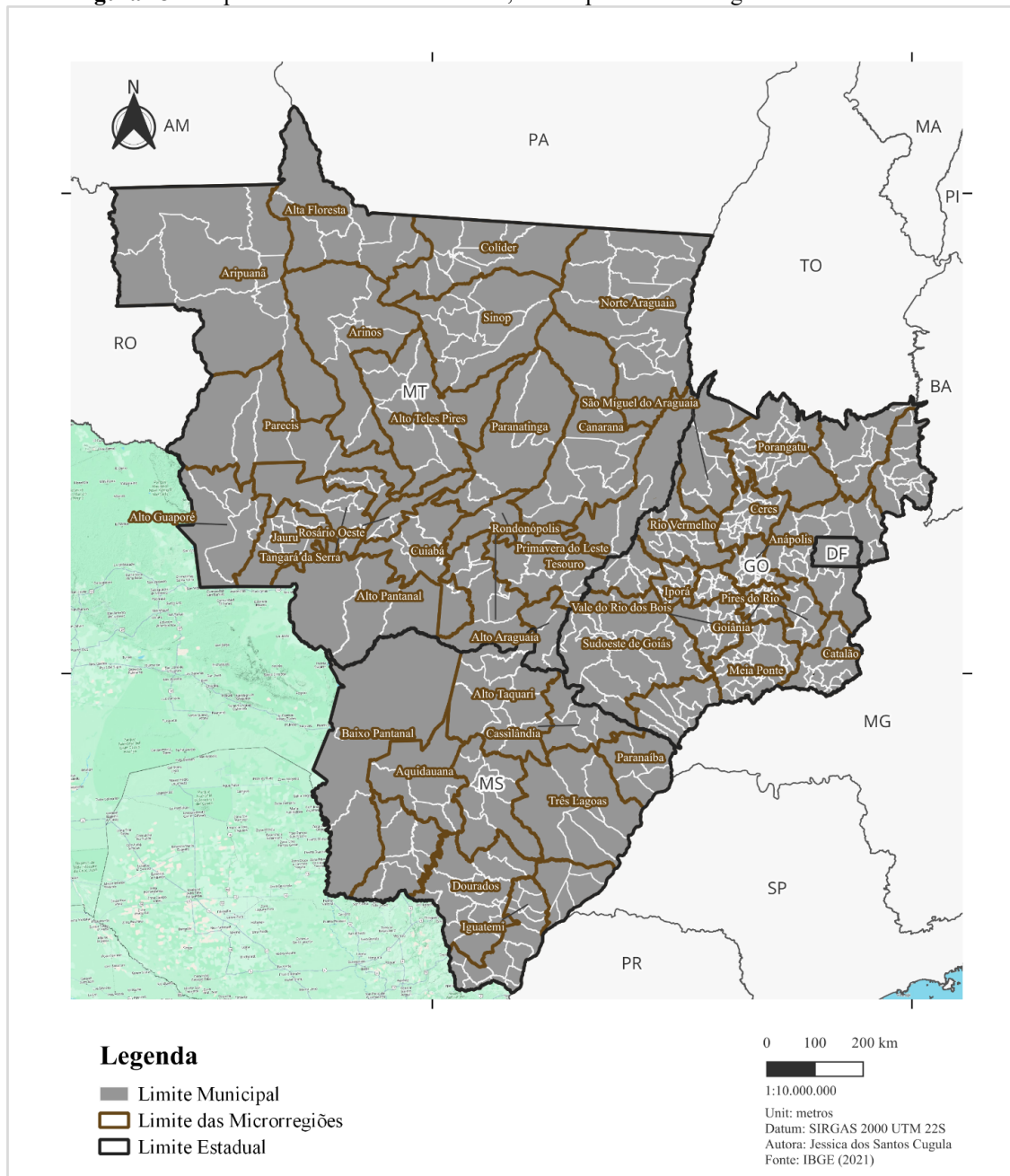
Nesta etapa foi avaliado o potencial de produção de BioQAV de milho, utilizando uma análise espacial de dados de produtividade e de infraestrutura existente no Centro-Oeste para alocar uma biorrefinaria de BioQAV. Logo, o texto foi dividido em três tópicos. O primeiro tópico caracteriza o local de estudo, a região Centro-Oeste. O segundo tópico detalha os parâmetros analisados que serão utilizados para definir as melhores localidades para alocação de uma biorrefinaria. Finalmente, o terceiro tópico trata da realização da análise espacial.

##### *3.1.1. Local de Estudo*

A região Centro-Oeste do Brasil é formada por três estados e o Distrito Federal, sendo eles: Mato Grosso, Mato Grosso do Sul, Goiás e Brasília. Esta região é a segunda maior do país em área, mas detém apenas 8% da população, sendo a menos populosa por conta da ocupação tardia devido à sua distância com relação ao litoral. No entanto, ao longo dos últimos anos é a que vem apresentando o maior crescimento populacional (IBGE, 2022a). Os estados do Centro-Oeste somam 466 municípios, que podem ser divididos em 51 microrregiões, que são áreas determinadas pelas suas características sociais, naturais e de

comunicação (IBGE, 2022b). A **Figura 13** mostra a divisão espacial da região, com os estados, municípios e as microrregiões.

**Figura 13** - Mapa com os limites dos estados, municípios e microrregiões do Centro-Oeste.



Fonte: elaborado pela autora (2024)

Os biomas prevalentes na região Centro-Oeste são o Pantanal, Cerrado e Amazônia, que têm características muito distintas entre si, trazendo diferentes paisagens para a região. A presença destes biomas é colocada em alerta frente à expansão econômica, que é baseada em atividades ligadas ao setor primário, como agropecuária e exploração mineral (VISCONTI e SANTOS, 2014). Diante disto, a região sofre com impactos de



mudança de uso da terra, intensificados pelo fato de os biomas locais apresentam características de extrema importância para a biodiversidade (AQUINO, DE SOUZA, *et al.*, 2018).

A região contribui com 10% do PIB nacional atualmente, que ocorre majoritariamente por conta da grande produção agropecuária (MIRAGAYA, 2014). Além disso, ela também conta com os estados de Mato Grosso, Mato Grosso do Sul e Goiás apresentando IDH no padrão de alto, já o Distrito Federal se destaca ao ter um IDH classificado como muito alto, sendo o maior valor do país. Todos os estados tiveram um crescimento exponencial do IDH a partir dos anos 2000, o que se relaciona com o aumento das rendas produzidas com a maior produção agrícola (PNUD, 2016).

O Centro-Oeste tem uma concentração de latifúndios destinados a lavouras temporárias, sendo destaque na produção de soja, carne bovina, cana-de-açúcar, algodão herbáceo e milho (DE CASTRO, 2014). Por conta da presença de cultivo de biomassa, também é destaque na produção de biocombustíveis, sendo a maior produtora de etanol e a segunda maior de biodiesel no país (ANP, 2021).

### 3.1.2. *Obtenção dos Parâmetros*

Para realização da análise espacial do potencial de produção de BioQAV de milho no Centro-Oeste foram obtidos dados de cultivo de matéria-prima e a infraestrutura para suportar uma indústria de produção de bioquerosene de aviação. Logo, foram selecionados critérios considerando o proposto pela literatura que indicam a melhor localização para uma biorrefinaria, adaptados para o cenário de produção de bioquerosene (LÓPEZ-DÍAZ, LIRA-BARRAGÁN, *et al.*, 2017) (PETTERSSON e HARVEY, 2013). Além disso, o CORSIA também define regras de sustentabilidade que a produção do bioquerosene precisa aderir para ser considerado no acordo, dentre eles está o fato de que a matéria-prima utilizada para a produção do biocombustível não pode ser produzida em área desmatada (ICAO, 2022).

Com isso, foram avaliados os critérios de: proximidade com a matéria-prima, pontos de demanda por combustível de aviação, estrutura de transporte dos municípios, indústrias pré-estabelecidas que podem ser associadas à de bioquerosene, as áreas de desmatamento na região e a estimativa de quanto bioquerosene a região pode produzir.

Para o critério de proximidade com a matéria-prima, foram considerados os dados de produção (ton) de milho e a área (km<sup>2</sup>) por município para calcular a produtividade (ton/km<sup>2</sup>), os valores de produção foram obtidos através do SIDRA - Sistema IBGE de Recuperação Automática do IBGE - Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística para o ano de 2022, enquanto a área de cada município está disponível na Base Contínua do IBGE (SIDRA, 2022). Estes dados foram obtidos no formato de planilha (xml) para cada estado, logo, para a análise espacial, foi utilizado um arquivo vetorial no formato *shapefile* (shp) do IBGE com a divisão municipal para cada estado e aplicada a ferramenta *join* no *software* QGIS 3.28.11. Esta ferramenta consiste na associação de dados entre uma camada vetorial e uma planilha a partir de uma coluna em comum (nome dos municípios), levando os dados da planilha para o *shapefile* permitindo assim que sejam trabalhados e visualizados no *software*.

Os aeroportos e o seu potencial de demanda de bioquerosene foram obtidos através da planilha de Voos e Operações Aéreas da ANAC para o ano de 2023 (ANAC, 2024). Esta planilha oferece os gastos de combustíveis para cada aeroporto do Brasil e, para este trabalho, foram filtrados os aeroportos do Centro-Oeste, totalizando 18 pontos com demanda acima de 1000 litros de querosene. Estes aeroportos foram georreferenciados com uso do *software* *Google Earth* através da marcação de pontos no formato vetorial *Keyhole Markup Language* (kml), que foram convertidos no *software* QGIS para *shapefile*. Neste novo arquivo vetorial foi criada uma coluna preenchida com os dados da demanda de bioquerosene por aeroporto, este valor foi calculado considerando que este biocombustível pode ser misturado em até 50% do total de querosene, segundo a Resolução nº 856/2021 da ANP, logo, o valor derivado da planilha da ANAC foi dividido por dois para obtenção do volume demandado.

Em relação a estrutura de transporte nos municípios, observa-se que no Centro-Oeste os principais modais de transporte utilizados para escoamento da produção são as rodovias e ferrovias, logo, foram obtidas as localizações destes transportes para a região. Tanto o arquivo vetorial (*shapefile*) das rodovias quanto das ferrovias foram obtidos para cada unidade da federação através da base contínua do IBGE para o ano de 2021 (IBGE, 2023). Estes dados foram unidos para toda a região Centro-Oeste no *software* QGIS 3.28.11.

Em relação às indústrias pré-estabelecidas que podem ser associadas a produção de bioquerosene, foram consideradas: a) as plantas de processamento de biodiesel, tendo em

vista que podem ser integradas à produção de bioquerosene a partir da rota HEFA, b) as de produção de etanol, cujo processamento é necessário durante a rota ATJ (PERES, DRUMMOND, *et al.*, 2021). A localização dessas plantas foi obtida através da plataforma WebEPE já no formato vetorial (*shapefile*).

Para o critério de desmatamento, foram obtidas as áreas desmatadas nos últimos 5 anos (2019 – 2024) na base PRODES (Projeto de Monitoramento do Desmatamento na Amazônia Legal por Satélite) do MapBiomas para os biomas Mata Atlântica, Amazônia, Pantanal e Cerrado, que cobrem a área do Centro-Oeste (MAPBIOMAS, 2024). As camadas vetoriais de cada um dos biomas foram unidas utilizando a ferramenta mesclar camadas do QGIS e cortadas apenas para a área do Centro-Oeste com a ferramenta recortar.

Ainda, para estimar a quantidade de bioquerosene que a região consegue produzir a partir do milho foi calculado o Potencial de Produção de BioQAV (PPB).

O Potencial de Produção de BioQAV (PPB) consiste em uma estimativa da quantidade de BioQAV que a microrregião pode produzir com o milho cultivado. Para obter a porcentagem de milho disponível para a indústria do BioQAV foi usado o valor da produção total de milho no ano de 2022 da base SIDRA IBGE e diminuído os consumos humano, industrial e animal registrados no portal da Associação Brasileira das Indústrias de Milho (Abimilho) para o mesmo ano (ABIMILHO, 2024). Com isso, foi encontrado que aproximadamente 30% de milho não é utilizado por nenhuma dessas indústrias.

Desta forma, a Quantidade de Milho Disponível (QMD) foi calculada considerando que 30% da produção de milho (gramas) pode ser usada para a indústria de BioQAV. Este valor foi calculado por microrregião, com a produção total de milho para cada uma delas sendo obtida somando os valores individuais de produção dos municípios dentro dos limites das microrregiões. Além disso, o cálculo também depende de um Fator de Rendimento (FR) que expressa quantas gramas de milho são necessárias para produzir 11 de bioquerosene. Este fator foi calculado através dos dados de de Jong et al. (2019) e dos padrões da Resolução nº856/21 da ANP para a rota HEFA e ATJ. Para o cálculo do PPB, o Fator de Rendimento consistiu da média aritmética entre a rentabilidade encontrada para a rota HEFA e ATJ.

Com isso o PPB para cada município foi calculado a partir da divisão do QMD para cada microrregião pelo FR, como pode ser visto na **equação 01**.

$$(01) \quad PPB (l) = \frac{QMD}{FR}$$

*Onde:*

*PPB = Potencial de Produção de Bioquerosene, em litros (l);*

*QMD = Quantidade de Milho Disponível, em gramas (g);*

*FR = Fator de rendimento, em gramas por litros (g/l)*

### 3.1.3. Análise Espacial

Os dados foram analisados através de arquivos vetoriais com a geolocalização referente. Logo foram elaborados mapas com todas as informações no *software* QGIS 3.28.11. Além disso, foram realizadas seleções por localização para entender a distribuição das estruturas para os estados e para as microrregiões. Os valores de produtividade de milho foram separados em 5 classes, sendo elas: 0 até 10 toneladas/km<sup>2</sup>, pois apesar de diferentes de zero, alguns valores de produtividade ainda eram muito pequenos; 10 até 100 toneladas/km<sup>2</sup>; 100 até 200 toneladas/km<sup>2</sup>; 200 até 300 toneladas/km<sup>2</sup>; e, por fim, 300 até 450 toneladas/km<sup>2</sup>. Evitou-se criar uma classe acima de 400 toneladas/km<sup>2</sup>, pois existiam pouquíssimos municípios neste grupo.

## 3.2. COMPARAÇÃO DO IMPACTO AMBIENTAL ENTRE ROTAS DE PRODUÇÃO DE BIOQAV DE MILHO

A Análise do Ciclo de Vida será aplicada utilizando o *software* Simapro, considerando as diretrizes apresentadas nas normas ABNT NBR ISO 14040:2009 e ABNT NBR ISO 14044:2009. Estas apresentam a estrutura da ACV de acordo com as etapas de definição de objetivo e escopo, análise de inventário, avaliação de impactos e interpretação.

### 3.2.1. Definição de Objetivo e Escopo

Neste trabalho serão analisadas e comparadas duas formas de produção distintas que tem o milho como matéria-prima, seguindo a lista dos combustíveis sustentáveis elegíveis ao programa CORSIA (CORSIA Eligible Fuels - CEF) (ICAO, 2022). Desta forma, serão objetos deste estudo:

- O Querosene Parafínico Sintetizado por Ácidos Graxos e Ésteres Hidroprocessados (BioQAV HEFA) obtido a partir do óleo de milho;
- O Querosene Parafínico Sintetizado por Álcool (BioQAV ATJ) fabricado a partir do etanol de milho;

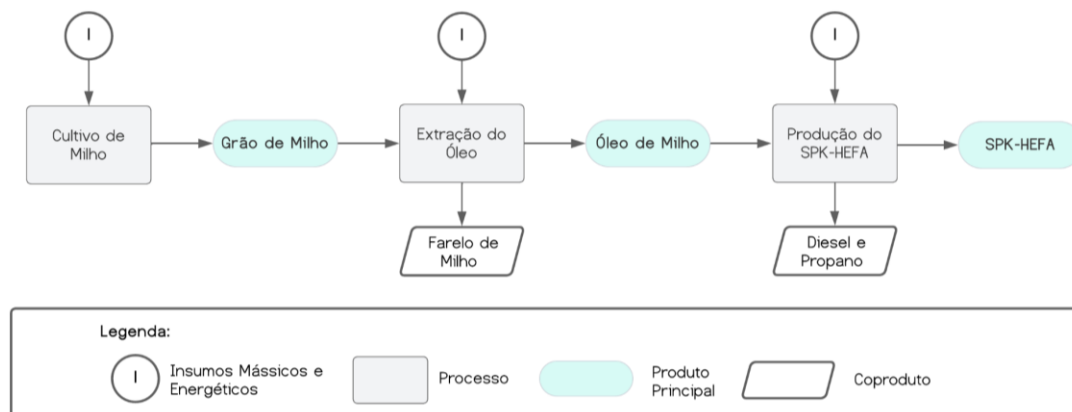
Cada forma de produção terá um sistema individual, ou seja, não será considerada integração entre as produções pelas duas rotas. O sistema para cada uma tem as fronteiras definidas pelo modelo “berço ao portão”. Com isso, as etapas e os insumos considerados serão separados nas fases agrícolas, processamento da matéria-prima, produção do bioquerosene e o transporte entre as etapas.

A etapa agrícola corresponde ao cultivo do milho, agregando também a obtenção dos insumos relacionados à atividade. As entradas serão as mesmas para ambas as rotas, já que os dados derivam da mesma fonte, porém irão variar de acordo com a necessidade de milho para atingir a unidade funcional do trabalho.

Para a rota HEFA, o milho cultivado será transportado para uma planta de extração de óleo de milho. Nesta etapa o milho passa pelo processo de limpeza e remoção de impurezas, seguido da extração mecânica do óleo através da prensa expeller que vai produzir óleo de milho e uma parte sólida chamada de torta, que ainda contém uma grande quantidade de óleo. Logo, este produto passa por uma etapa de extração com solvente orgânico (normalmente o hexano) que reagirá com o óleo presente na torta. Por fim, serão separadas as fases sólidas e líquidas, obtendo uma mistura de óleo com hexano, que são separados por destilação, e o farelo de milho (BARRERA-ARELLANO, BADAN-RIBEIRO e SERNA-SALDIVAR, 2019). Este óleo bruto passa também pelo processo de refino, para remoção de impurezas. As etapas deste sistema envolvem a degomagem, que é a remoção de substâncias coloidais e fosfatídeos, seguida pela neutralização do pH, a adição de substâncias clareadoras e a remoção de substâncias causadoras de odor (ICAO, 2022) (BARRERA-ARELLANO, BADAN-RIBEIRO e SERNA-SALDIVAR, 2019). O óleo refinado será destinado para uma planta de produção de bioquerosene a partir do processo HEFA. Este se inicia pelo hidrotreamento com uso de catalisador, que tem como objetivo remover moléculas de oxigênio, em seguida ocorrem os processos de isomerização, para remoção de alcanos, e craqueamento para reduzir o tamanho da molécula (NEULING e KALTSCHMITT, 2015). Este processo, além do bioquerosene,

produz também diesel e propano, como pode ser observado na **Figura 14**, que mostra todo o sistema considerado no trabalho para a produção de BioQAV HEFA

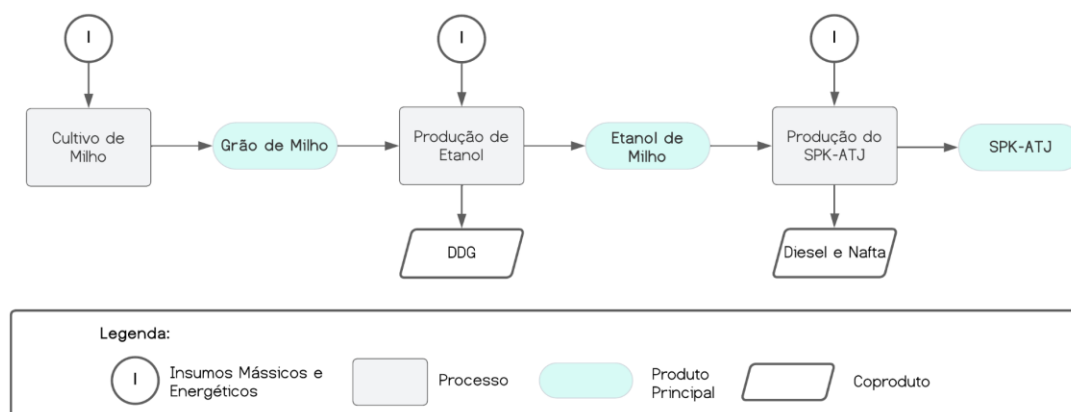
**Figura 14** - Limites do Sistema da ACV da produção de BioQAV HEFA



Fonte: elaborado pela autora (2024)

No processo ATJ, o milho será utilizado para a geração de etanol, seguindo os processos de hidrólise, que engloba a moagem do milho, o cozimento da farinha e a adição de enzimas para auxiliar na quebra do amido em açúcar. Logo após ocorre a fermentação, onde são adicionadas leveduras na mistura produzida durante a hidrólise produzindo etanol e dióxido de carbono, e a destilação, para separar o etanol dos outros componentes. Este processo produz alguns coprodutos como a energia elétrica, obtida ao utilizar a biomassa para produção de vapor. O DDGS (da sigla em inglês *Dried Distillers Grains with Solubles*) que é a parte sólida restante do milho no fim do processo, normalmente é utilizado na alimentação animal pelo seu alto teor proteico. Também pode ser gerado o óleo de milho durante as etapas de processamento da matéria-prima (DA SILVA e CASTAÑEDA-AYARZA, 2021). Este álcool será desidratado para remoção de moléculas de água oligomerizado, onde cadeias maiores são formadas a partir de menores. Seguido da hidrogenação para melhorar a qualidade do bioquerosene a separação dos produtos, com foco em obter apenas o bioquerosene, porém são gerados os coprodutos diesel e nafta (NEULING e KALTSCHMITT, 2015). Os limites do sistema de produção a partir desta rota são apresentados na **Figura 15**.

**Figura 15** - Limites do Sistema da ACV da produção de BioQAV ATJ.



Fonte: elaborado pela autora (2024)

A análise terá como unidade funcional a produção de 1MJ de bioquerosene, e em todas as etapas serão contabilizados os fluxos de massa e energia.

### 3.2.2. Análise do Inventário

Os dados do inventário foram obtidos através de diversos estudos da literatura, dando preferência para informações da realidade brasileira. A base de dados utilizada foi o **Ecoinvent 3.1**, disponível no *software Simapro 08*. O inventário foi construído separadamente para a produção de BioQAV HEFA e BioQAV ATJ, convertendo os valores da literatura para as proporções necessárias para produzir 1 MJ dos dois combustíveis. Os dados de eletricidade utilizados foram baseados na matriz brasileira (BR). Todos os outros dados foram referentes ao resto do mundo (ROW) ou global (GLO). As seções seguintes explicam o inventário e apresentam as entradas e saídas por etapa. No entanto, o inventário completo com a nomenclatura utilizada no programa SimaPro pode ser visto no **Apêndice 01**.

#### 3.2.2.1. Cultivo

O cultivo de milho no Brasil acontece em dois momentos diferentes do ano, a primeira safra, também conhecida como safra de verão, que ocorre nos meses de chuva, entre agosto e novembro, e a segunda safra, ou safrinha, que ocorre após a colheita antecipada da soja nos meses de inverno, normalmente entre fevereiro e março (EMBRAPA, 2021). Desta forma, neste estudo serão considerados dados de insumos para a produção durante a safrinha e a primeira safra.

Como a etapa de cultivo é comum às rotas HEFA e ATJ, os dados foram obtidos das mesmas fontes da literatura. Os insumos são obtidos para a quantidade de milho necessária para obter 1MJ de BioQAV ATJ e BioQAV HEFA. Este cálculo foi realizado a partir do valor final. Segundo de Jong et al. (2017), para produzir 1 MJ de bioquerosene da rota HEFA é preciso 1,17MJ de óleo de milho refinado. Seguindo esta linha, Gaglio et al. (2019) considera que para a produção de 1 tonelada de óleo de milho refinado são necessárias 1,5 toneladas de óleo de milho bruto. Já Regitano-d'Arce & Vieira (2015) diz que o óleo de milho refinado tem 25g/MJ, com essa relação todos os insumos foram convertidos para valores referentes à produção de 1,17MJ (equivalente à 29,25g) de óleo de milho refinado e foi encontrado que para isso eram necessários 43,88g de óleo de milho bruto. Ainda com os valores de Gaglio et al. (2019), 2,74 toneladas de milho são necessárias para produzir 1,5 tonelada de óleo de milho bruto, seguindo esta proporção, foi obtido o valor de 80,15g de milho para produzir 29,25g de óleo de milho bruto (ou 1,17MJ de óleo de milho refinado ou 1 MJ de BioQAV HEFA).

O mesmo processo foi feito para obter o valor necessário de milho para a rota ATJ, Gaglio et al. (2019) diz que para produzir 1 MJ de BioQAV ATJ são utilizados 1,49 MJ de etanol de milho. Neste ínterim, da Costa et al. (2019) considera que a produção de 430 litros de etanol de milho utiliza 1 tonelada de milho, os valores foram convertidos para a unidade desejada considerando que o poder calorífico do etanol é de 22,5 MJ/l (NOVA CANA, 2024). Desta forma, foi encontrado que para produzir 1,49 MJ de etanol de milho são necessários 153,94g de milho.

Os dados da produção durante o período de safrinha foram obtidos a partir da média das informações de Esteves et al. (2018), que apresenta os insumos e saídas de cultivo de cinco fazendas que produzem soja no verão e milho nas entressafras na microrregião de Dourados no estado do Mato Grosso do Sul. Os dados do estudo foram adaptados apenas para a produção de milho, em alguns casos Esteves et al. (2018) já apresenta os valores de entradas separados entre o cultivo de milho e de soja, mas existem os insumos compartilhados pelos dois, como: uso de calcário e gesso e as fontes energéticas e térmicas (diesel, gás natural e lenha). Nestes casos, os valores de entrada foram divididos por dois para utilização neste trabalho.

A unidade funcional de Esteves et al. (2018) considera os insumos para a produção de 5820 kg de milho (corresponde à média da produção das cinco fazendas), logo, o valor



dos insumos foi convertido proporcionalmente para a unidade funcional deste trabalho, que são referentes à quantidade de milho necessária para produzir 1MJ de BioQAV HEFA (80,15g) e 1MJ de BioQAV ATJ (153,94g).

As informações de insumo para a produção de milho durante o período da primeira safra foram obtidas de Embrapa (2015), onde são apresentados os principais insumos utilizados para uma lavoura comercial. No estudo da Embrapa (2015), os insumos são referentes à produção de uma tonelada de milho, logo, os valores também foram proporcionalmente convertidos para que as saídas fossem de 80,15g de milho na rota HEFA e 153,94g na rota ATJ, adaptados para 1MJ de BioQAV. Além disso, no estudo de Embrapa (2015) não são apresentados valores de entrada para os insumos energéticos: diesel, gás natural e lenha, usado no maquinário das fazendas, logo, para a padronização da análise, os valores foram adaptados de Esteves et al. (2018), utilizando a relação entre a quantidade de sementes dos processos.

Com isso, na análise foram consideradas as entradas de sementes, fertilizantes, correção do solo e o consumo energético do maquinário, enquanto as saídas compreendem a produção de milho necessária para cada rota produzir 1MJ de bioquerosene. Os insumos e saídas que formam o inventário da etapa do cultivo do milho na primeira safra e na safrinha podem ser vistos na **Tabela 05**.

**Tabela 05** - Dados do inventário para o cultivo de milho na primeira safra e na safrinha

<b>Plantio Primeira Safra - agosto até novembro (EMBRAPA, 2015)</b>			
<b>Entrada</b>	<b>Unidade</b>	<b>Rota HEFA</b>	<b>Rota ATJ</b>
Calcário	g/MJ de BioQAV	8,01	15,39
Gesso	g/MJ de BioQAV	4,58	8,80
Sementes	g/MJ de BioQAV	0,82	1,58
Fertilizante (N)	g/MJ de BioQAV	0,27	0,53
Fertilizante (P)	g/MJ de BioQAV	0,96	1,85
Fertilizante (K)	g/MJ de BioQAV	0,55	1,06
Pesticida	g/MJ de BioQAV	0,01	0,01
Diesel	g/MJ de BioQAV	1,47	2,81

Gás natural	l/MJ de BioQAV	0,70	1,35
Lenha	g/MJ de BioQAV	0,01	0,02
<b>Saídas</b>	<b>Unidade</b>		
Milho	g/MJ de BioQAV	80,15	153,94
<b>Plantio Safrinha – fevereiro até março (ESTEVES, ESTEVES, <i>et al.</i>, 2018)</b>			
<b>Entrada</b>	<b>Unidade</b>	<b>Rota HEFA</b>	<b>Rota ATJ</b>
Calcário	g/MJ de BioQAV	5,74	11,02
Gesso	g/MJ de BioQAV	2,30	4,41
Sementes	g/MJ de BioQAV	0,25	0,48
Semente de braquiária	g/MJ de BioQAV	0,03	0,07
Fertilizante (N)	g/MJ de BioQAV	1,65	3,17
Pesticidas	g/MJ de BioQAV	0,05	0,10
Diesel	g/MJ de BioQAV	0,44	0,85
Gás natural	l/MJ de BioQAV	0,21	0,41
Lenha	g/MJ de BioQAV	0,00	0,01
<b>Saídas</b>	<b>Unidade</b>		
Milho	g/MJ de BioQAV	80,15	153,94

Fonte: elaborado pela autora (2024)

### 3.2.2.2. Transporte

O transporte ocorre entre o cultivo e a etapa de geração de bioquerosene via meio rodoviário, neste cenário, é considerado que a etapa de processamento da matéria-prima (extração do óleo de milho para a rota HEFA e produção do etanol de milho para a rota ATJ) é realizada no mesmo local da produção de bioquerosene.

Para calcular a distância percorrida, foram consideradas as produções de milho nas microrregiões de cada estado, representadas espacialmente pelos centroides dessas áreas, obtidos no QGIS. Neste contexto, a microrregião com a maior produtividade de milho em cada estado foi considerada como o local ideal para a instalação da biorrefinaria. Assim, para cada estado, foi calculada a distância entre o centroide da microrregião mais

produtiva e os centroides das outras microrregiões do estado produtoras de milho. A medição dessas distâncias foi realizada utilizando a ferramenta "Linha Mais Curta entre Feições" do QGIS, que calcula a distância direta entre os pontos no mapa. Esse processo forneceu a distância entre o centroide da microrregião mais produtiva e os centroides das demais microrregiões. Para a distância final, foi considerada a média de todas as distâncias encontradas.

Na base de dados Ecoinvent as entradas para transporte de caminhão estão na unidade tonelada por quilômetro, considerando que os quilômetros seriam percorridos por um caminhão carregando uma tonelada de produto. No caso deste estudo, o valor da unidade (tkm) foi obtido fazendo uma proporção para o transporte de 80,15g de milho na rota HEFA e 153,94g na rota ATJ.

### 3.2.2.3. *Produção do BioQAV HEFA*

No caso da rota de produção do BioQAV HEFA, a etapa de produção de óleo de milho é necessária, separada em extração de óleo bruto e o seu refino, que depois é utilizado como insumo na produção do bioquerosene. Os dados da produção de óleo bruto e refinado foram obtidos de Gaglio et al. (2019), que realizou uma ACV da produção de óleo de milho refinado utilizando dados de uma fábrica do nordeste da Itália adaptados para a produção da quantidade necessária para produzir 1MJ de bioquerosene. No trabalho de Gaglio et al. (2019), os dados têm como unidade funcional a produção de 1 tonelada de óleo de milho refinado, porém, o necessário para a produção de 1 MJ de BioQAV HEFA, de acordo com de Jong et al. (2017) é de 1,17MJ de óleo de milho refinado. Logo, a conversão entre as unidades mássicas para energéticas considerou que o poder calorífico do milho é de 25g/MJ (REGITANO-DARCE, SPOTO e CASTELLUCCI, 2015), estes valores são resumidos na **Tabela 06**. Com isso, mudando o valor da saída de óleo de milho refinado, todos os valores de entradas e coprodutos foram mudados proporcionalmente.

**Tabela 06** - Dados de conversão entre unidades mássicas e energéticas do óleo de milho

Quantidade mássica de óleo de milho (g)	Quantidade energética de óleo de milho (MJ)	Fonte
25	1	Regitano-d'Arce & Vieira (2015)
1.000.000	40.000	
29,25	1,17	

Fonte: elaborado pela autora (2024)

Na etapa de produção de óleo bruto, os insumos envolvem o milho cultivado, energia elétrica e térmica para processamento do milho. Além destes, é utilizado também o hexano, substância orgânica que auxilia na extração do óleo. No entanto, é considerado que ele todo é reciclado no processo, logo, ele não entra na análise de impactos. Já na etapa de refino do óleo, os insumos são o óleo bruto, energia elétrica e térmica e agentes químicos, como ácido fosfórico, hidróxido de sódio e argila descolorante, utilizados para desodorizar, clarear e desarborizar o óleo refinado, e a saída mássica do processo é o óleo de milho refinado. Os insumos e saídas considerados no trabalho para as etapas de produção de óleo bruto e o seu refino são apresentados na **Tabela 07**.

**Tabela 7** - Dados do inventário para a produção de óleo de milho bruto e refinado

<b>Produção do Óleo de Milho Bruto (GAGLIO, TAMBURINI, <i>et al.</i>, 2019)</b>		
<b>Insumos</b>	<b>Unidade</b>	<b>Quantidade</b>
Milho	g/MJ de BioQAV	80,15
Energia elétrica	wh/MJ de BioQAV	5,75
Energia térmica	wh/MJ de BioQAV	19,57
<b>Saídas</b>	<b>Unidade</b>	<b>Quantidade</b>
Óleo de milho bruto	g/MJ de BioQAV	43,88
Farelo de milho	g/MJ de BioQAV	52,65
<b>Produção do Óleo de Milho Refinado (GAGLIO, TAMBURINI, <i>et al.</i>, 2019)</b>		
<b>Insumos</b>	<b>Unidade</b>	<b>Quantidade</b>
Óleo de milho bruto	g/MJ de BioQAV	43,88
Energia elétrica	wh/MJ de BioQAV	1,50
Energia térmica	wh/MJ de BioQAV	6,58
Ácido fosfórico	g/MJ de BioQAV	0,04
Hidróxido de sódio	g/MJ de BioQAV	0,06
Argila clareante	g/MJ de BioQAV	0,07
<b>Saídas</b>	<b>Unidade</b>	<b>Quantidade</b>
Óleo de milho refinado	MJ/MJ de BioQAV	1,17

Fonte: elaborado pela autora (2024)

Os dados de produção do BioQAV HEFA (**Tabela 08**) foram obtidos do trabalho de de Jong et al. (2017), que analisa a produção de diferentes tipos de bioquerosenes tendo como unidade funcional a produção de 1 MJ de BioQAV. Neste caso, os insumos da etapa são o óleo de milho refinado, energia térmica e elétrica para o processo e hidrogênio obtido de fonte fóssil, enquanto as saídas são o BioQAV HEFA e a Nafta e o Propano, que são os coprodutos do processo.

**Tabela 08** - Dados do inventário para a produção de BioQAV HEFA

<b>Produção do BioQAV HEFA (DE JONG, ANTONISSEN, <i>et al.</i>, 2017)</b>		
<b>Insumos</b>	<b>Unidade</b>	<b>Quantidade</b>
Óleo de milho refinado	MJ/MJ de BioQAV	1,17
Gás natural	MJ/MJ de BioQAV	0,18
Eletricidade	MJ/MJ de BioQAV	0,005
Hidrogênio	MJ/MJ de BioQAV	0,15
<b>Saídas</b>	<b>Unidade</b>	<b>Quantidade</b>
SKP-HEFA	MJ	1
Nafta	MJ/MJ de BioQAV	0,14
Propano	MJ/MJ de BioQAV	0,1

Fonte: elaborado pela autora (2024)

#### 3.2.2.4. *Produção do BioQAV ATJ*

Para a produção do BioQAV ATJ, o milho cultivado será destinado à uma planta de produção de etanol, na qual o combustível produzido será utilizado para a produção de bioquerosene. O trabalho utilizou os dados de da Costa et al. (2020), que avalia a viabilidade econômica de uma indústria de produção de etanol de milho nos estados do Mato Grosso e Mato Grosso do Sul, na região Centro-Oeste. O trabalho utilizado como fonte dos dados tem a unidade funcional de 1 tonelada de milho que produzem 430l de etanol hidratado, os dados foram proporcionalmente adaptados considerando que para gerar 1MJ de bioquerosene são necessários 1,49 MJ de etanol hidratado de Jong et al., (2017), para a conversão dos dados volumétricos para de energia foi utilizado o fator de conversão de 22,5MJ/l de etanol (NOVA CANA, 2024).

Na produção de etanol de milho no Brasil, a biomassa comumente utilizada são as lascas de madeira extraídas do eucalipto, no entanto, na base Ecoinvent utilizada no trabalho este processo não estava disponível (MOREIRA e ARANTES, 2018). Desta forma, para construção do inventário, a entrada utilizada foi de lascas de madeira extraídas do salgueiro, opção disponível na base de dados. Com isso, serão esperadas diferenças de impacto para a realidade brasileira, no entanto, ambas as culturas são produzidas através da silvicultura e utilizadas em processos de extração de lascas para uso como fonte de produção de energia térmica (JUNIOR, DE MELO, *et al.*, 2016). A principal diferença entre o salgueiro e o eucalipto está nas áreas de plantio, onde o primeiro é produzido em regiões de clima temperado e o segundo em áreas de clima tropical (KEOLEIAN e VOLK, 2005).

A **Tabela 09** apresenta os valores de insumos e saídas convertidos para a unidade funcional do trabalho e utilizados como inventário da análise.

**Tabela 09** - Dados do inventário para a produção de etanol de milho

<b>Produção do Etanol de Milho (DA COSTA, ESTEVES, <i>et al.</i>, 2020)</b>		
<b>Insumos</b>	<b>Unidade</b>	<b>Quantidade</b>
Lascas de Madeira	g/MJ de BioQAV	71,43
Milho	g/MJ de BioQAV	153,94
<b>Saídas</b>	<b>Unidade</b>	<b>Quantidade</b>
Etanol hidratado	MJ/MJ de BioQAV	1,49
Energia elétrica	kWH/MJ de BioQAV	0,02
Óleo de milho	g/MJ de BioQAV	2,00
DDGS	g/MJ de BioQAV	55,88

Fonte: elaborado pela autora (2024)

Para a produção do BioQAV ATJ os valores dos insumos e saídas foram obtidos no trabalho de de Jong et al. (2017) e adaptados para unidade funcional do trabalho, estes podem ser vistos na **Tabela 10**. Os insumos para a produção de BioQAV ATJ são o etanol de milho, eletricidade e hidrogênio, obtido de fonte fóssil, o processo vai gerar bioquerosene, além de nafta e propano em baixas quantidades.

**Tabela 10** - Dados do inventário para a produção de BioQAV ATJ

<b>Produção do BioQAV ATJ (DE JONG, ANTONISSEN, <i>et al.</i>, 2017)</b>		
<b>Insumos</b>	<b>Unidade</b>	<b>Quantidade</b>
Etanol hidratado	MJ/MJ de BioQAV	1,49
Eletricidade	MJ/MJ de BioQAV	0,03
Hidrogênio	MJ/MJ de BioQAV	0,08
<b>Saídas</b>	<b>Unidade</b>	<b>Quantidade</b>
BioQAV ATJ	MJ	1
Diesel	MJ/MJ de BioQAV	0,12
Nafta	MJ/MJ de BioQAV	0,21

Fonte: elaborado pela autora (2024)

#### 3.2.2.5. *Geração de Hidrogênio Fóssil*

O hidrogênio é utilizado na produção de bioquerosene em ambas as rotas de produção, logo, este produto é importante para a definição de impacto do ciclo de vida (DE JONG, ANTONISSEN, *et al.*, 2017). A principal forma de produção de hidrogênio no mundo, com o Brasil seguindo a tendência, é a partir da reforma do gás natural, onde o gás natural em altas temperaturas é misturado com vapor d'água, produzindo principalmente hidrogênio e monóxido de carbono (EPE, 2022b). Na base Ecoinvent 3.0 este produto não é especificado, logo, foi criado um produto novo referente à produção de hidrogênio para ser utilizado nos processos de produção do bioquerosene.

A produção de hidrogênio considerou os dados de entrada do trabalho de Zhao *et al.* (2022), que utiliza três fontes da literatura [(CETINKAYA, DINCER e NATERER, 2012); (MARQUEVICH, SONNEMANN, *et al.*, 2002); (DUFOUR, SERRANO, *et al.*, 2011)] para construir o seu inventário do método de produção a partir da reforma do gás natural. Os valores de Zhao *et al.* (2022) são para a produção de 1kg de hidrogênio, no entanto, neste estudo a unidade de entrada para este insumo é energética, com isso, os valores foram convertidos para o que é necessário para produzir 1 MJ de hidrogênio, considerando que 1kg de hidrogênio é equivalente à 141,86 MJ (SANTOS e SANTOS, 2005). A **Tabela 11** apresenta os dados utilizados no inventário deste estudo para a produção do hidrogênio fóssil.

**Tabela 11** - Dados do inventário para a produção de hidrogênio fóssil

<b>Produção de Hidrogênio (ZHAO, TAMADON e PONS, 2022)</b>		
<b>Insumos</b>	<b>Unidade</b>	<b>Quantidade</b>
Gás Natural	kg/ MJ de H2	0,025
Vapor	kg/ MJ de H2	0,133
Energia elétrica	MJ/ MJ de H2	0,008
<b>Saídas</b>	<b>Unidade</b>	<b>Quantidade</b>
Hidrogênio	MJ	1
<b>Emissões</b>	<b>Unidade</b>	<b>Quantidade</b>
Vapor	kg/ MJ de H2	0,133
CO2	kg/MJ de H2	0,053
CO	g/MJ de H2	0,012
CH4	g/MJ de H2	0,001
NOX	g/MJ de H2	0,023
Partículas	g/MJ de H2	0,450
SO2	g/MJ de H2	0,007

Fonte: elaborado pela autora (2024)

#### 3.2.2.6. *Processos de Alocação*

Para a produção do BioQAV HEFA serão gerados fatores de alocação nas etapas de produção do óleo de milho bruto e produção do bioquerosene, pois a etapa do cultivo não gera coprodutos e a etapa de refino do óleo não produz coprodutos relevantes em massa ou que tenham alto valor agregado (**Figura 14**). Com isso, para a etapa de produção do óleo bruto será realizada a alocação mássica, tendo em vista que não foram encontrados valores de comercialização de todos os itens produzidos e os mesmos não tem relevância como insumos energéticos.

Os dados de massa considerados são de Gaglio et al. (2019) que diz que para produzir 1,5 tonelada de óleo de milho bruto também são produzidas 1,8 toneladas de farelo de milho, 3,59kg de hexano e 0,03kg de PM10.

Para o processo de produção do bioquerosene, a alocação será energética, pois todos os produtos gerados nesta etapa têm potencial energético comerciável e não é possível



considerar um preço de comercialização do bioquerosene no Brasil. Neste caso, de Jong et al. (2017) diz que para produzir 1MJ de BioQAV HEFA também serão produzidos 0,14MJ de nafta e 0,1MJ de propano. Os fatores de alocação foram calculados para cada etapa e são apresentados na **Tabela 12**.

**Tabela 12** - Fatores de alocação para a ACV da rota HEFA

Produção do óleo de milho bruto		Produção do bioquerosene (HEFA)	
Produtos	Alocação Mássica	Produtos	Alocação Energética
Óleo de milho bruto	45,40%	SKP-HEFA	80,65%
Farelo de milho	54,49%	Nafta	11,29%
Hexano	0,11%	Propano	8,06%
PM10	0,00%		

Fonte: elaborado pela autora (2024)

O fator de alocação final para a rota HEFA é obtido multiplicando os fatores individuais de cada produto de interesse por etapa. Logo, é multiplicado o fator do óleo de milho bruto (45,40%) com o do SPK-HEFA (80,65%) e encontrado o fator de alocação final no valor de 37%.

Quanto ao processo de produção do BioQAV ATJ, foi realizada alocação para as etapas de produção do etanol e de produção do bioquerosene, que são as que geram coprodutos (**Figura 15**). Para a etapa de produção do etanol será utilizada a alocação econômica, tendo em vista que a maior parte dos produtos gerados são altamente comerciáveis.

De acordo com da Costa et al. (2020), para produzir 1l de etanol de milho, são produzidos 151 kwh de energia elétrica, 13kg de óleo de milho, 363 kg de DDGS. O Portal Nova Cana (2022), diz que o valor de 1l de etanol de milho é de R\$1,76. Já a Equatorial Energia (2024), informa que a tarifa residencial normal de energia elétrica está custando R\$0,71/kwh. E, de acordo com a distribuidora Loja Cocamar (2024), o valor comercial do óleo de milho é de R\$ 8,84 para 500ml, que considerando a densidade relativa de 0,917 (MAPA, 2006), é equivalente a cobrar R\$16,22 por 1kg de óleo, por fim, o valor de 1kg de DDGS é de R\$1,98 de acordo com a plataforma Agro2business (2024). Considerando os valores dos produtos e as quantidades geradas foram calculados os fatores de alocação apresentados na **Tabela 13**.

Com relação à produção do bioquerosene (BioQAV ATJ), a alocação realizada foi a energética, onde, de acordo com de Jong et al. (2017), para produzir 1MJ de BioQAV ATJ também são produzidos 0,12 MJ de diesel e 0,21MJ de nafta, os fatores de alocação calculados com esses valores estão na **Tabela 13**.

**Tabela 13** - Fatores de alocação para a ACV da rota ATJ

Produção do etanol		Produção do bioquerosene (ATJ)	
Produtos	Alocação Econômica	Produtos	Alocação Energética
Etanol hidratado	42,19%	SKP-ATJ	75,19%
Energia elétrica	5,98%	Diesel	9,02%
Óleo de milho	11,76%	Nafta	15,79%
DDGS	40,07%		

Fonte: elaborado pela autora (2024)

O valor de alocação final encontrado foi de 32%, este foi calculado multiplicando o fator individual do etanol hidratado (42,19%) pelo do SPK-ATJ (75,19%), com isso foi encontrado.

### 3.2.3. Avaliação dos Impactos

A avaliação de impacto neste trabalho será realizada utilizando o método ReCiPe *Hierarchist*, um dos mais clássicos e utilizado em vários estudos de ACV, na abordagem Global, já que a outra opção seria a Europeia, que não engloba o local deste estudo (RASHEDI e KHANAM, 2020) (LAMNATOU, NICOLAÏ, *et al.*, 2019). Este método integra abordagens *midpoint* e *endpoint*, contando com 16 categorias *midpoint* e 3 categorias *endpoint* (PIEKARSKI, DA LUZ, *et al.*, 2012). Para a análise do ciclo de vida da produção de bioquerosene de milho serão consideradas 05 categorias *midpoint*, buscando uma visão mais detalhada dos impactos em todas as etapas. Com isso, foram selecionados impactos que são mais vistos desde o cultivo, sendo eles: Eutrofização; Ocupação de Solo Agrícola; Toxicidade (WITHERS, NEAL, *et al.*, 2014) (Withers et al., 2014) (ALENGEBAWY, ABDELKHALEK, *et al.*, 2021). Além destes, também foram escolhidos os impactos de Mudanças Climáticas e Depleção de Combustíveis Fósseis, que são mais vigentes em processos de processamento e produção de biocombustíveis, e também podem ser usados para avaliar um dos principais motivos para a produção de BioQAV de acordo com o CORSIA, que é a redução das emissões do setor (DELUCCHI, 2010). Estas categorias são muito importantes no estudo de biocombustíveis, já que eles

surtem como uma alternativa aos combustíveis fósseis por terem menor potencial de impacto no aquecimento global (WWF, 2021) (IATA, 2024).

#### 3.2.3.1. *Análise de Sensibilidade*

A análise de sensibilidade consiste na realização de procedimentos que testem os efeitos das escolhas do inventário nos resultados do estudo (ABNT, 2009). Neste trabalho esta análise será realizada para avaliar se o valor de impacto de cada categoria é afetado pela variação da quantidade de entrada do insumo de maior impacto. Para isso, serão alteradas as quantidades dos insumos de maior impacto para cada uma das categorias de impacto analisadas. Dessa forma, serão produzidos novos valores de impactos para as categorias, estes serão nomeados de VR5 (quando a redução do valor de insumo de maior impacto for de 5%) e VR10 (quando a redução for de 10%).

## 4. RESULTADOS

### 4.1. POTENCIAL DO USO DE MILHO PARA PRODUÇÃO DE BIOQAV

O Centro-Oeste produz mais de 62 milhões de toneladas de milho, distribuídos em 61,59% no MT, 20,68% no MS, 17,21% em GO e 0,53% no DF. Em termos de produtividade, foram analisadas 5 faixas de valores, 48,8% dos municípios têm uma produtividade menor que 10 ton/km<sup>2</sup>, indicando uma baixa densidade de produção e representando a maioria dos casos do Centro-Oeste, 40,2% dos municípios produzem entre 10 até 100 ton por km<sup>2</sup>, enquanto 6,8% produzem entre 100 e 200 ton por km<sup>2</sup> e 3,0% estão com a produtividade de milho entre 200 e 300 ton/km<sup>2</sup>. Acima de 300 ton/km<sup>2</sup> são apenas 1,2% dos municípios, sendo 5 municípios, onde dois deles no Mato Grosso do Sul, dois no Mato Grosso e um em Goiás, como pode ser visto na **Tabela 14**.

**Tabela 14** - Quantidade de municípios por faixa de produtividade

Produtividade (ton/km <sup>2</sup> )	Quantidade de Municípios	DF	GO	MS	MT
0 – 10	228 (48,8%)	0	141	27	60
10-100	188 (40,2%)	1	92	36	59
100-200	32 (6,8%)	0	9	8	15
200-300	14 (3,0%)	0	3	6	5
300-450	5 (1,2%)	0	1	2	2
Total	467	1	246	79	141

Fonte: elaborado pela autora (2024)

A região conta com 18 aeroportos, com 9 deles no estado do Mato Grosso, seguido por 5 no Mato Grosso do Sul, 3 em Goiás e 1 no Distrito Federal. Estes aeroportos têm potencial de demandar mais de 216 milhões de litros de bioquerosene, com 14,3% no Mato Grosso, 6,0% no Mato Grosso do Sul, 12,7% em Goiás e 67,0% no Distrito Federal. Apesar de ter apenas um aeroporto no Distrito Federal, o aeroporto de Brasília é o terceiro maior em fluxo de todo o Brasil, sendo responsável por uma boa parte da demanda de combustível da região (RODRIGUES, 2024). Além disso, o Centro-Oeste apresenta 104 plantas de produção de etanol e 26 de biodiesel, onde a primeira indústria se concentra com maior

intensidade no estado de Goiás e a segunda no Mato Grosso. A quantidade de aeroportos, plantas de etanol e de biodiesel por estado no Centro-Oeste pode ser vista na **Tabela 15**.

**Tabela 15** - Quantidade de aeroportos, plantas de etanol e de biodiesel por estado do Centro-Oeste

Estado	Aeroportos	Plantas de Etanol	Plantas de Biodiesel
DF	1	0	0
GO	3	48	9
MS	5	25	2
MT	9	31	15
Total	18	104	26

Fonte: elaborado pela autora (2024)

Com relação à estrutura de transporte, todos os municípios do Centro-Oeste apresentam rodovias que podem ser utilizadas para escoamento da produção, porém apenas 51 municípios do Goiás, 20 municípios do Mato Grosso do Sul, 2 municípios do Mato Grosso e o Distrito Federal são integrados pela existência de ferrovias.

Com relação às áreas desmatadas na região Centro-Oeste, o total dos últimos 5 anos foi de 22.684 km<sup>2</sup> de áreas de vegetação nativa desmatadas. Deste total, 62,1% estão no estado de Mato Grosso, 19,7% no Mato Grosso do Sul e 18,1% em Goiás e 0,1% no Distrito Federal. O Mato Grosso é o terceiro estado com mais áreas desmatadas em todo o Brasil, o que se deve pela expansão do agronegócio em regiões de floresta nativa (MAPBIOMAS, 2022).

Para o cálculo do Potencial de Produção de Bioquerosene (PPB) foi necessário utilizar o rendimento para as rotas ATJ e HEFA, neste caso, foi encontrado que 2671,5g de milho produz 1l de BioQAV HEFA e 5131,2g produz 1l de BioQAV ATJ, e a média entre eles consiste no Fator de Rendimento no valor de 3.901,25 (g/l). A aplicação da equação 01 com o FR mencionado anteriormente produziu valores de PPB para cada microrregião. Desta forma, a região Centro-Oeste tem um PPB total de 4.786.080.461 litros de BioQAV, deste total 61,59% deriva das microrregiões do Mato Grosso, 20,68% do Mato Grosso do Sul, 17,21% de Goiás e 0,53% do Distrito Federal.

Os valores de PPB foram comparados com a demanda de bioquerosene por microrregião que tem um ou mais aeroportos para investigar quais delas conseguem manter a demanda

interna com a produção de milho atual, estes valores foram sintetizados na **Tabela 16**. Em um cenário onde 30% do milho produzido na microrregião é convertido em BioQAV para abastecimento dos aeroportos locais, grande parte deles têm um potencial de produção maior do que a demanda máxima que os aeroportos locais podem ter. Em 12 microrregiões, a produção de bioquerosene poderia alcançar valores tão altos que menos de 1% seria utilizado nos aeroportos locais, de forma que existe uma capacidade de expansão do mercado para outras microrregiões e estados, até mesmo fora da região Centro-Oeste. Ao observar os quatro aeroportos que demandariam mais de 10 milhões de litros de bioquerosene por ano, localizados nas microrregiões de Campo Grande (MS), Goiânia (GO), Cuiabá (MT) e Brasília (DF), apenas Campo Grande (MS) conseguiria produzir o suficiente para suprir a demanda interna, enquanto as outras microrregiões precisariam pensar em uma cadeia envolvendo outras microrregiões do Centro-Oeste.

**Tabela 16** - Estado, quantidade de aeroportos, demanda total de BioQAV, PPB e porcentagem da demanda em relação ao PPB para os aeroportos das microrregiões do Centro-Oeste (PPB = Potencial de Produção de BioQAV)

<b>Microrregião</b>	<b>Estado</b>	<b>Quantidade de aeroportos</b>	<b>Demanda total de BioQAV (l)</b>	<b>PPB (l)</b>	<b>Porcentagem da demanda em relação ao PPB</b>
Brasília	DF	1	34.550.111	25.145.787	137,40%
Cuiabá	MT	1	26.949.153	16.451.343	163,81%
Goiânia	GO	1	26.801.519	11.746.927	228,16%
Campo Grande	MS	1	11.528.618	129.450.971	8,91%
Sinop	MT	1	2.690.875	322.484.332	0,83%
Dourados	MS	1	499.812	559.844.640	0,09%
Rondonópolis	MT	1	456.948	117.641.525	0,39%
Meia Ponte	GO	1	368.478	50.057.725	0,74%
Alto Teles Pires	MT	1	251.524	921.658.597	0,03%
Sudoeste de Goiás	GO	1	249.666	458.010.894	0,05%

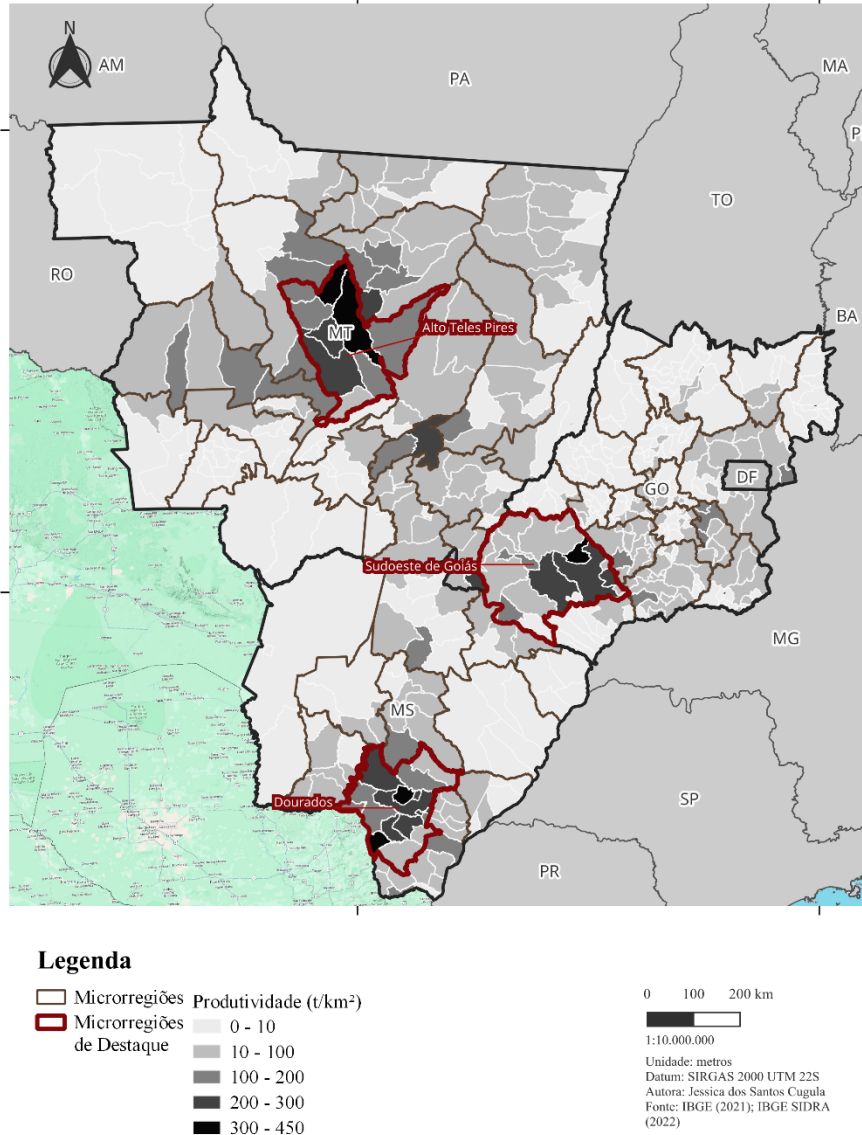
Baixo						
Pantanal	MS	1	193.646	3.039.487	6,37%	
Aripuanã	MT	2	32.700	76.454.265	0,04%	
Médio						
Araguaia	MT	1	21.621	11.218.251	0,19%	
Canarana	MT	1	7.154	200.071.644	0,00%	
Bodoquena	MS	1	677	42.404.563	0,00%	
Alto Floresta	MT	1	428	18.265.607	0,00%	
Três Lagoas	MS	1	147	2.581.403	0,01%	

---

Fonte: elaborado pela autora (2024)

O parâmetro de produtividade por município no Centro-Oeste pode ser visto espacialmente na **Figura 16**, que também apresenta a malha das microrregiões e destaca as com maior total de produção. A partir da análise desta figura é possível perceber que os municípios de maior produtividade se agrupam em regiões específicas de cada estado, caracterizando microrregiões de maior produtividade que ocorrem por conta de sua tendência rural. No Mato Grosso, a microrregião de Alto Teles Pires produz mais de 11 milhões de toneladas de milho, sendo a maior produtora de toda a região Centro-Oeste. Já o estado do Mato Grosso do Sul tem a microrregião de Dourados como destaque de produtividade, produzindo cerca de 7 milhões de toneladas de milho, esta também é a segunda maior produtora da região Centro-Oeste. Em Goiás, a microrregião de Sudoeste do Goiás é a maior produtora do estado, com produção de quase 6 milhões de toneladas de milho, e também é a terceira maior produtora da região Centro-Oeste.

**Figura 16** – Mapa com a produtividade dos municípios da região Centro-Oeste do Brasil

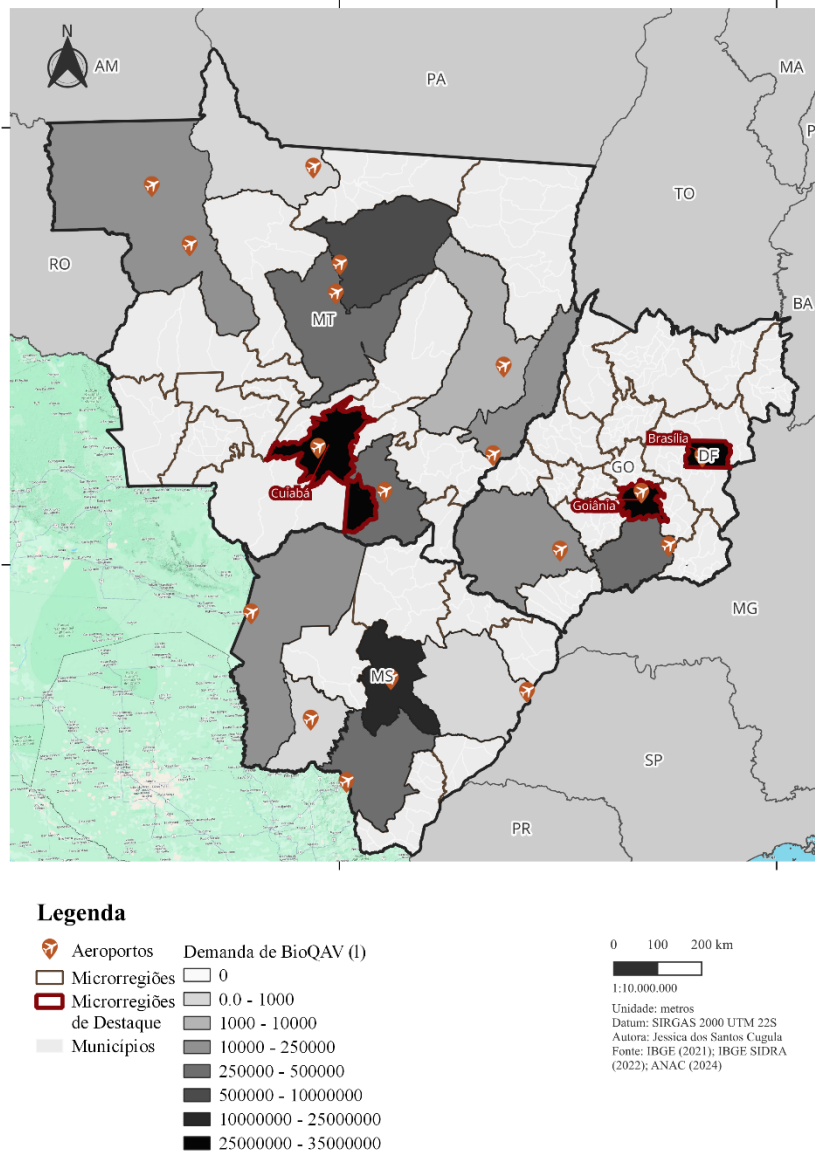


Fonte: elaborado pela autora (2024)

A **Figura 17** apresenta a localização dos aeroportos e a demanda de BioQAV por microrregião, além de destacar as microrregiões com maior demanda. Existe uma distribuição considerável pelas microrregiões da região Centro-Oeste, do total de 51 microrregiões mais o Distrito Federal, 35 não tem nenhum aeroporto. Ainda, comparando com a produtividade das microrregiões na **Figura 16**, a maior parte destes aeroportos estão localizados em microrregiões de menor produtividade, isto ocorre por estas serem regiões menos rurais, onde estão localizados os maiores agrupamentos urbanos. O mapa também destaca a demanda de BioQAV por aeroporto, as maiores demandas estão nas microrregiões de Cuiabá (MT), Goiânia (GO) e na região de Brasília (DF). Estas áreas não se destacam por sua produtividade, mas podem ser supridas por microrregiões vizinhas que tem uma maior presença da produção agrícola.



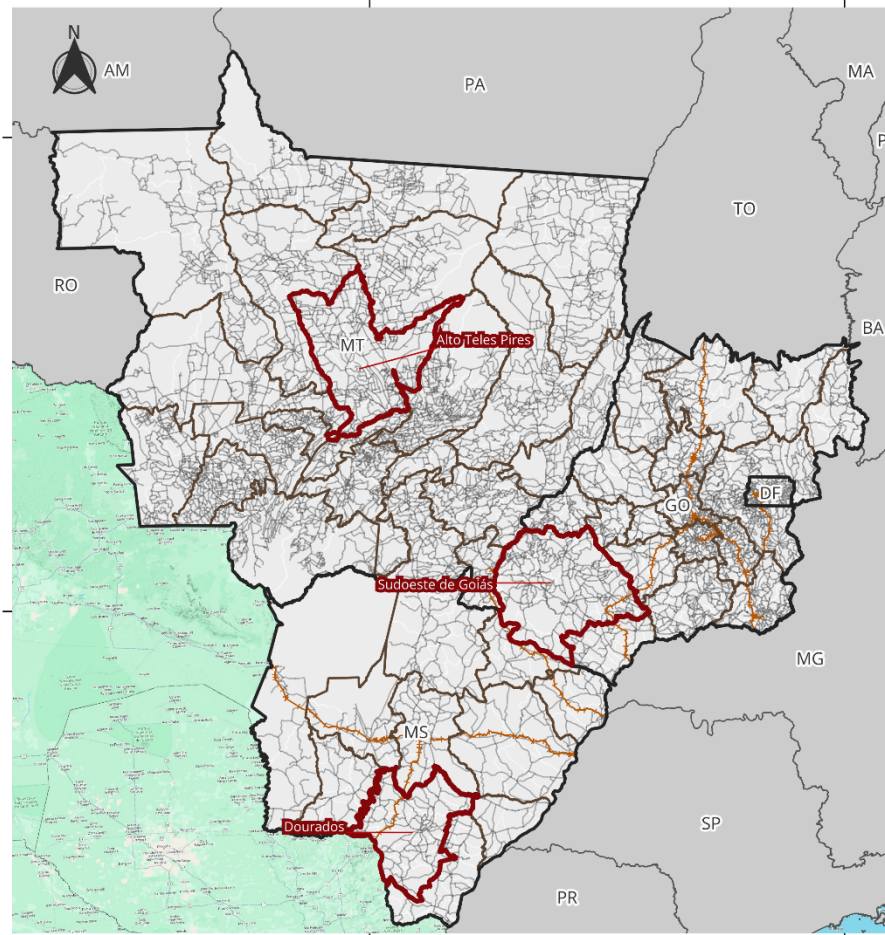
**Figura 17** - Mapa com a demanda de BioQAV por microrregião e a localização dos aeroportos da região Centro-Oeste do Brasil



Fonte: elaborado pela autora (2024)

A **Figura 18** apresenta um mapa da região Centro-Oeste com a malha de transporte rodoviário e ferroviário, com destaque para as três microrregiões de maior produtividade (Alto Teles Pires, (MT), Dourados (MS) e Sudoeste de Goiás (GO)). O modal rodoviário se mostra bem presente em toda a região, com exceção de alguns pontos a oeste no Mato Grosso do Sul e ao norte do Mato Grosso. Já o transporte ferroviário tem uma malha de baixa densidade, conectando poucos municípios, fazendo com que não seja uma boa forma de transportar a produção de milho na região. Nas microrregiões de maior produtividade existe presença geral do transporte rodoviário, enquanto que as microrregiões de Sudoeste de Goiás (GO) e Dourados (MS) apresentam malha ferroviária também.

**Figura 18** - Mapa com a malha de transporte rodoviário e ferroviário da região Centro-Oeste do Brasil



**Legenda**

- Malha Ferroviária
- Malha Rodoviária
- Microrregiões
- Microrregiões de Destaque
- Municípios

0 100 200 km

1:10.000.000

Unidade: metros

Datum: SIRGAS 2000 UTM 22S

Autora: Jessica dos Santos Cugula

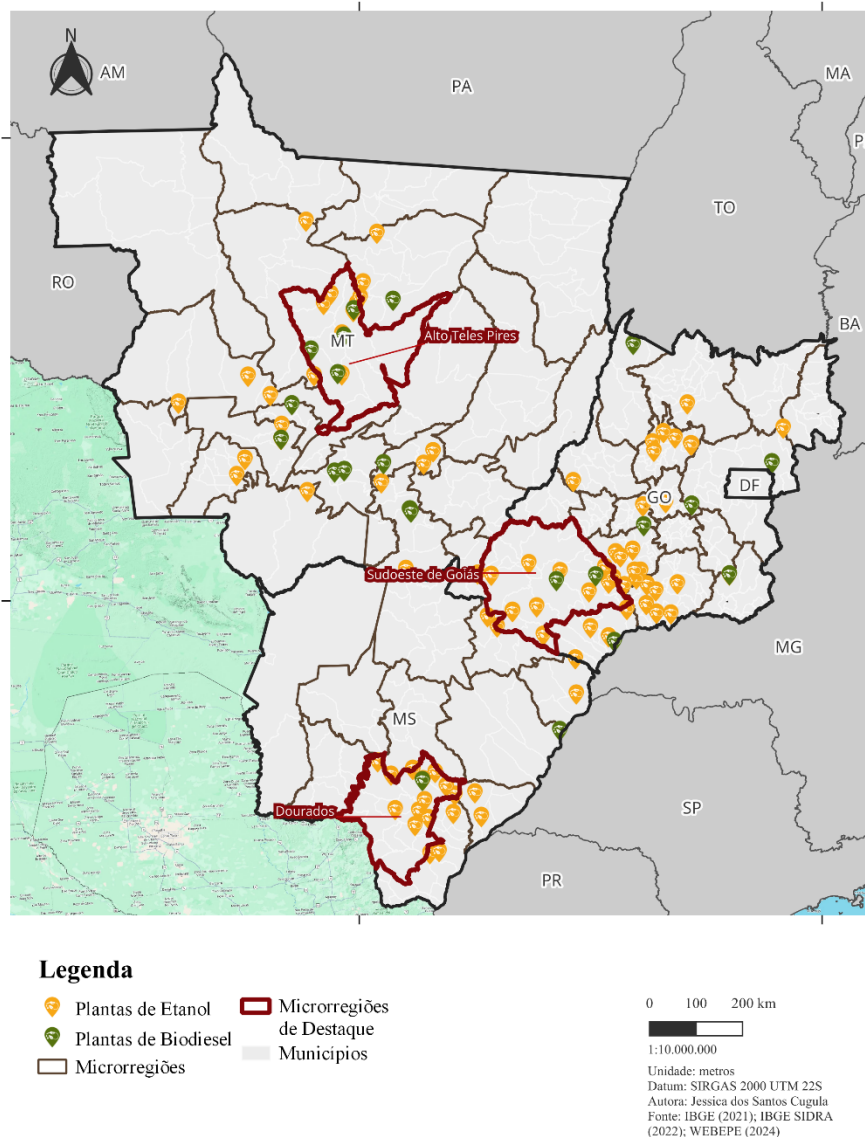
Fonte: IBGE (2021); IBGE SIDRA

(2022)

Fonte: elaborado pela autora (2024)

A **Figura 19** apresenta a localização das plantas de etanol e biodiesel no Centro-Oeste, destacando as três microrregiões que tem a maior presença dessas indústrias (Alto Teles Pires (MT), Dourados (MS) e Sudoeste de Goiás (GO)). Comparando com a **Figura 16**, é possível perceber que estas indústrias estão concentradas nas regiões de maior produtividade agrícola. Neste caso, as microrregiões em destaque por produtividade também são as que apresentam a maior quantidade de plantas de etanol e biodiesel. Em termos de logística da instalação de uma indústria de BioQAV nestas microrregiões, o fato de ter plantas de processamento de matéria-prima (biodiesel, que utiliza óleo de milho, e etanol de milho) a serem associadas já presentes é um forte indicador da alta aptidão destes lugares.

**Figura 19** - Mapa com a localização das plantas de etanol e biodiesel da região Centro-Oeste do Brasil



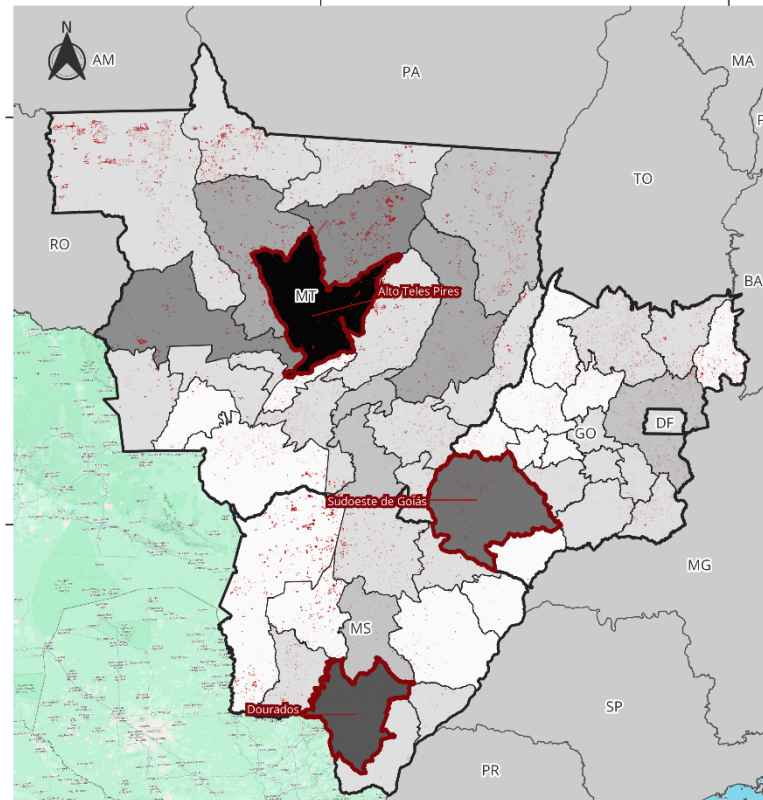
Fonte: elaborado pela autora (2024)

A **Figura 20** apresenta os valores de PPB por microrregião, assim como as áreas de desmatamento, destacando as três microrregiões de maior Potencial de Produção de BioQAV. O estado do Mato Grosso é o que se destaca com a presença de microrregiões de maior PPB. Novamente, o destaque para a potencial de produção de bioquerosene fica para as microrregiões de Alto Teles Pires no Mato Grosso, seguida por Dourados no Mato Grosso do Sul e Sudoeste de Goiás em Goiás. A presença de desmatamento na região Centro-Oeste nos últimos 5 anos está mais concentrada no norte do Mato Grosso, que também é a área de presença do bioma Floresta Amazônica.

Já nas microrregiões destacadas por maior PPB (**Figura 20**), o desmatamento não é considerável, a maior porcentagem desmatada entre as três é na microrregião de Alto

Teles Pires, com o valor de 1% da área desmatada nos últimos 5 anos (2019 – 2024), logo, estas áreas não vão contra o estabelecido pelo CORSIA como critério para produção de matéria-prima para uso na indústria do BioQAV, que exige que não sejam utilizadas regiões de desmatamento para o cultivo.

**Figura 20** – Mapa com os valores de PPB, localização de plantas de biodiesel e etanol e áreas de desmatamento da região Centro-Oeste do Brasil (PPB = Potencial de Produção de BioQAV)



**Legenda**

- Desmatamento
  - Microrregiões
  - Microrregiões de Destaque
  - Municípios
- |   |                 |
|---|-----------------|
| ■ | 0 - 10000       |
| ■ | 10000 - 100000  |
| ■ | 100000 - 200000 |
| ■ | 200000 - 300000 |
| ■ | 300000 - 400000 |
| ■ | 400000 - 500000 |
| ■ | 500000 - 600000 |
| ■ | 600000 - 700000 |
| ■ | 700000 - 800000 |
| ■ | 800000 - 950000 |

0 100 200 km

1:10.000.000

Unidade: metros

Datum: SIRGAS 2000 UTM 22S

Autora: Jessica dos Santos Cugula

Fonte: IBGE (2021); IBGE: SIDRA (2022); MapBiomass (2024)

Fonte: elaborado pela autora (2024)

A partir destas análises é visto que a região Centro-Oeste do Brasil apresenta um grande potencial para alocar uma produção de bioquerosene utilizando o milho como matéria-prima, seguindo o padrão de outras indústrias agroenergéticas presentes na região. A região conta com uma altíssima produtividade, somada a uma boa infraestrutura de

transporte rodoviário, que é a principal forma de escoamento na produção agrícola do Brasil.

Além disso, foi visto que existe uma demanda local para o bioquerosene produzido, justificando a implementação de uma indústria. Esta apresentará menos impactos nas etapas de transporte entre as fases de produção e não precisará sobreviver a base de exportação para outras regiões.

Em termos de melhores localizações para alocar uma biorrefinaria, todos os estados mostraram uma microrregião que se destacou para a maioria dos parâmetros analisados, sendo elas Alto Teles Pires no Mato Grosso, Dourados no Mato Grosso do Sul e Sudoeste de Goiás em Goiás. Estas são, respectivamente, as três regiões de maior produtividade da região Centro-Oeste, e apresentam uma malha rodoviária densa que cobre boa parte da área.

Além disso, estas também são as microrregiões de maior presença de plantas de biodiesel e etanol na região, indicando uma infraestrutura já existente de produção que pode ser associada e adaptada para a produção do BioQAV. Estas são também as microrregiões de maior Potencial de Produção de BioQAV (PPB), além de serem áreas com aeroportos próximos, que servem como pontos de demanda inicial para a produção. Por fim, essas microrregiões não tem uma taxa de desmatamento considerável, estando dentro dos padrões requisitados pelo CORSIA.

## 4.2. AVALIAÇÃO DOS IMPACTOS DO CICLO DE VIDA

Nesta seção será realizada a interpretação, separada em: Cultivo do milho; Transporte; Produção do BioQAV-HEFA; Produção do BioQAV-ATJ; Comparação entre as duas rotas. Todas as etapas foram analisadas considerando o resultado das avaliações dos impactos de: Mudanças Climáticas; Eutrofização; Toxicidade Humana; Ocupação de Solo Agrícola; e Depleção de Combustíveis Fósseis.

### 4.2.1. *Cultivo*

O cultivo do milho foi analisado em dois períodos diferentes, considerando as características da produção do grão no sistema brasileiro: safra e safrinha. A **Tabela 17** apresenta os valores encontrados para as categorias de impacto analisadas durante ambos os períodos, tanto para o milho produzido para ser utilizado na rota HEFA, quanto para a

rota ATJ. Entre os impactos das rotas de produção analisadas, é importante ressaltar que os insumos dos processos foram as mesmas, mudando apenas o valor da saída necessária de milho para cumprir a unidade funcional, que para a rota ATJ é quase o dobro da rota HEFA, logo, se esperava que esta proporção se mantivesse nos impactos. Com isso, os impactos da rota ATJ são maiores do que os da rota HEFA para todas as classes, tanto na safra quanto na safrinha. Comparando os períodos de produção, a safra apresenta mais impactos que a safrinha para as classes de eutrofização, ocupação de solo agrícola e depleção de combustíveis fósseis. No entanto, de forma geral os valores das categorias de impacto para a safra e safrinha estão sempre na mesma ordem, variando poucos décimos entre eles. A principal diferença que ocorre entre os períodos de impacto é para a classe de mudanças climáticas, que o impacto da safrinha é mais do que o dobro da safra.

**Tabela 17** – Valores de impacto para o cultivo no período de safra e safrinha para as rotas HEFA e ATJ

Categoria de Impacto	HEFA		ATJ	
	Safra	Safrinha	Safra	Safrinha
Mudanças Climáticas (kg CO <sub>2</sub> eq)	2,97E-03	7,53E-03	5,05E-03	1,25E-02
Eutrofização (kg P eq)	1,16E-06	1,04E-06	1,93E-06	1,74E-06
Toxicidade Humana (kg 1,4-DB eq)	1,19E-03	1,82E-03	1,99E-03	3,03E-03
Ocupação de Solo Agrícola (m <sup>2</sup> a)	7,90E-04	6,00E-04	1,32E-03	1,03E-03
Depleção de Combustíveis Fósseis (kg oil eq)	1,50E-03	1,36E-03	2,50E-03	2,26E-03

Fonte: elaborado pela autora (2024)

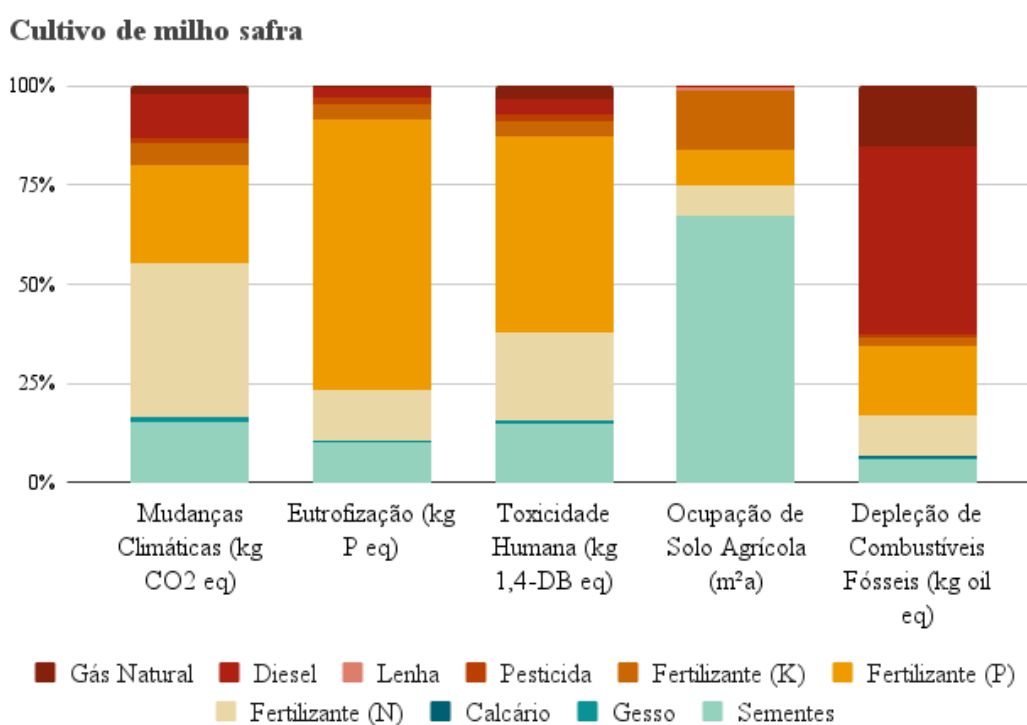
A **Figura 21** apresenta a contribuição dos insumos para cada categoria de impacto para a safra. Devido ao fato de as rotas utilizarem os mesmos insumos, apenas em proporções diferentes, as porcentagens finais de contribuição para a categoria de impacto por insumo é a mesma as duas rotas, logo, o gráfico apresentado na **Figura 21** é válido para a rota HEFA e ATJ.

Para o cultivo durante a safra, os impactos de eutrofização, toxicidade humana e mudanças climáticas tem a maior parte do seu valor (mais de 75%) relacionados com o uso de fertilizantes, principalmente os de base de fosfato para eutrofização e toxicidade e os de base nitrogenada para mudanças climáticas. O uso das sementes também são um



grande causador de impacto, principalmente na classe de ocupação de solo agrícola, representando 67,4% do total do impacto nesta classe. Este fato ocorre devido ao processo selecionado na base Ecoinvent, que considera a realização da secagem utilizando como fonte o calor da queima de biomassa de madeira. Existem duas formas de secar os grãos das sementes, sendo eles de forma natural, utilizando a energia do sol e do vento, ou artificial, através de sistema de produção de energia térmica. O principal utilizado no Brasil é o sistema de secagem com ar aquecido de forma artificial através de ventiladores térmicos, se aproximando do selecionado para o inventário (SILVA, AFONSO e DONZELLES, 2018). Na categoria de depleção de combustíveis fósseis, o uso de diesel e gás natural representam 62,4% dos impactos totais.

**Figura 21** – Avaliação de impacto para o cultivo do milho na época de safra

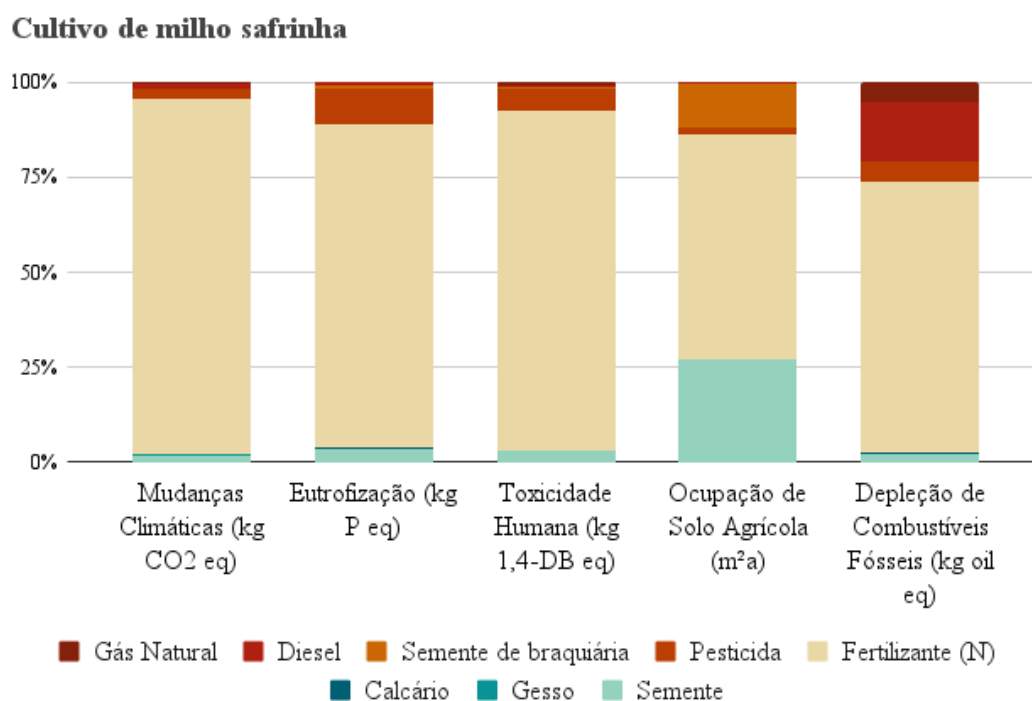


Fonte: elaborado pela autora (2024)

Já a **Figura 22** apresenta a contribuição dos insumos para cada categoria de impacto para a safrinha. Como explicado anteriormente, os insumos utilizados para a rota HEFA e ATJ mudam proporcionalmente ao valor final necessário para produção de 1MJ. Desta forma, a contribuição final deles para os valores das categorias de impacto são as mesmas, então o gráfico apresentado na **Figura 22** é válido para as duas rotas analisadas. Na época de safrinha o uso de fertilizante nitrogenado é o principal contribuinte de impacto em todas as categorias, principalmente a de eutrofização, toxicidade humana e mudanças

climáticas. Na categoria de ocupação de solo, o uso de sementes tem um impacto relevante (27,1%), mas menor do que a da safra pela quantidade menor de entrada no inventário. Assim como, na classe de depleção de combustíveis fósseis, o uso de gás natural e diesel não tem uma contribuição tão significativa na safrinha, pois a quantidade utilizada no inventário é menos da metade do que é utilizado na safra. Neste cenário, o fertilizante nitrogenado detém responsabilidade por mais de 90% do impacto desta classe, isto ocorre devido ao fato de que estes tipos de fertilizante aumentam o nitrogênio mineral no solo e fazem com que sejam emitidos mais óxido nitroso (N<sub>2</sub>O), um gás do efeito estufa (DE CARVALHO, DE OLIVEIRA e REIN, 2021).

**Figura 22** - Avaliação de impacto para o cultivo do milho na época de safrinha.



#### 4.2.2. Transporte

O raio de distância média encontrado para o Mato Grosso foi de 312 km, para o Mato Grosso do Sul o valor foi de 265 km, enquanto em Goiás o valor foi de 343 km. Com isso, a distância final média considerada no trabalho foi de 307 km. Considerando a unidade de tonelada por km, na rota HEFA o valor correspondente para transportar 80,15g é de 0,025tkm. Para a rota ATJ, o valor encontrado para transportar 153,94g de milho por 307km é de 0,047tkm.



Estes valores foram utilizados para calcular os impactos para as categorias selecionadas e estes podem ser vistos na **Tabela 18** para a rota HEFA e ATJ. Os maiores valores absolutos são para as classes de mudanças climáticas (kg CO<sub>2</sub> eq), toxicidade humana (kg 1,4-DB eq) e depleção de combustíveis fósseis (kg oil eq). Além disso, todos os valores são maiores para a rota ATJ do que para a rota HEFA, já que os valores em tonelada-quilometro (tkm) foi maior para esta rota.

**Tabela 18** - Valores de impacto para a etapa de transporte para as rotas HEFA e ATJ

<b>Categoria de Impacto</b>	<b>HEFA</b>	<b>ATJ</b>
Mudanças Climáticas (kg CO <sub>2</sub> eq)	1,26E-03	2,13E-03
Eutrofização (kg P eq)	9,21E-08	1,56E-07
Toxicidade Humana (kg 1,4-DB eq)	4,37E-04	7,41E-04
Ocupação de Solo Agrícola (m <sup>2</sup> a)	1,89E-05	3,20E-05
Depleção de Combustíveis Fósseis (kg oil eq)	4,57E-04	7,74E-04

Fonte: elaborado pela autora (2024)

#### 4.2.3. Rota HEFA

Para produzir 1 MJ de BioQAV HEFA, o milho cultivado seguirá para a etapa de extração, seguido por refino do óleo de milho (**Figura 14**). Os valores para cada categoria de impacto destas etapas podem ser vistos na **Tabela 19**. Para a extração do óleo, os principais impactos (considerando valores absolutos) são de mudanças climáticas (kg CO<sub>2</sub> eq), toxicidade humana (kg 1,4-DB eq) e depleção de combustíveis fósseis (kg oil eq). Já para o refino do óleo, os maiores valores também são nas mesmas categorias, o que é esperado devido ao fato de que o principal insumo do refino do óleo é o produto resultado no processo de extração de óleo.

**Tabela 19** - Valores de impacto para a extração e refino de óleo de milho

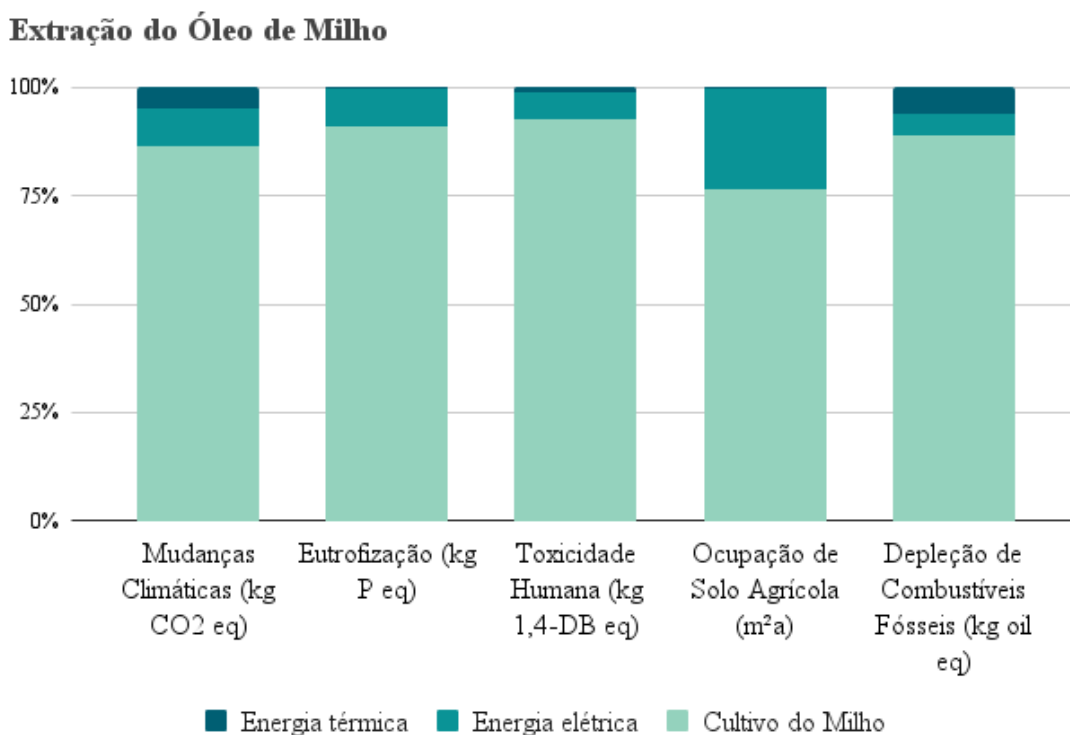
<b>Categoria de Impacto</b>	<b>Extração do Óleo</b>	<b>Refino do Óleo</b>
Mudanças Climáticas (kg CO <sub>2</sub> eq)	6,07E-03	6,35E-03
Eutrofização (kg P eq)	1,21E-06	1,28E-06
Toxicidade Humana (kg 1,4-DB eq)	1,62E-03	1,69E-03
Ocupação de Solo Agrícola (m <sup>2</sup> a)	9,10E-04	9,69E-04
Depleção de Combustíveis Fósseis (kg oil eq)	1,60E-03	1,68E-03

Fonte: elaborado pela autora (2024)

A **Figura 23** apresenta a contribuição de cada um dos insumos para os impactos finais da etapa de extração do óleo de milho. Desta forma, é visto o cultivo de milho como o principal contribuinte para todas as categorias de impacto, representando mais de 75%

em todas as categorias analisadas. Além do milho, o uso de energia elétrica é a segunda classe que mais contribui para os impactos, sendo mais relevante na categoria de ocupação de solo agrícola, contribuindo com 23,5% do impacto nesta classe. Já com relação ao uso de energia térmica, a sua principal contribuição é na classe de depleção de combustíveis fósseis com 6,1% de participação do valor total. O processo selecionado na base Ecoinvent considera o mix de produção de eletricidade específico para o Brasil, onde a energia renovável, principalmente hidrelétrica, representa mais de 70% do total.

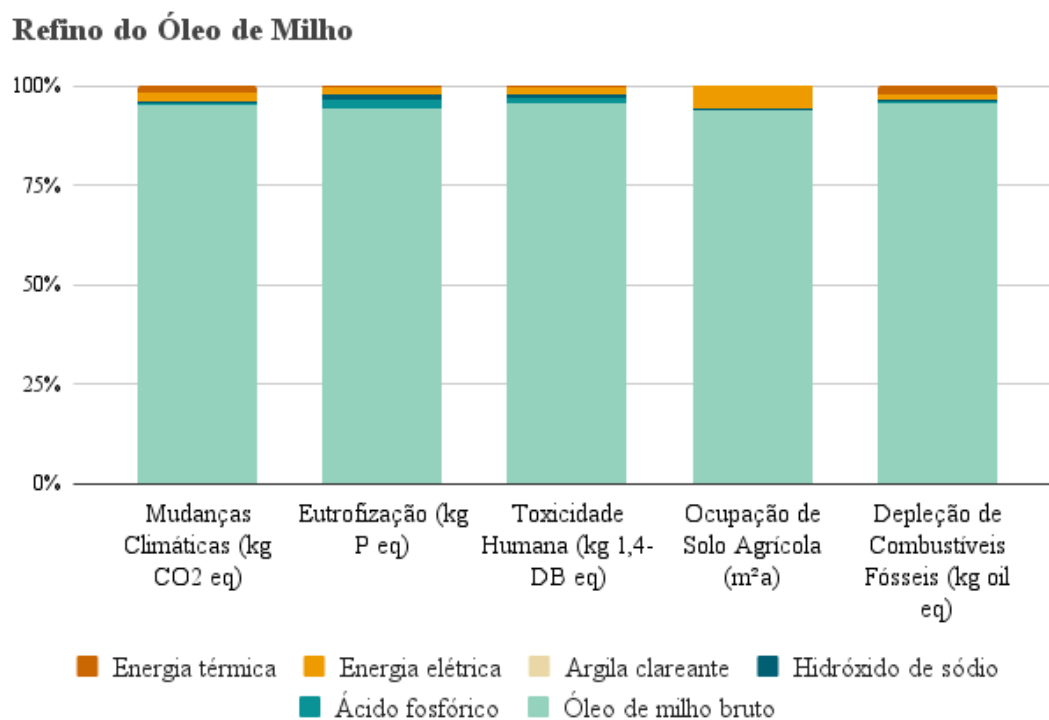
**Figura 23** - Avaliação de impacto para a extração de óleo de milho bruto.



Fonte: elaborado pela autora (2024)

O óleo de milho bruto seguirá para a etapa de refino, cuja contribuição de cada insumo para o impacto final das categorias pode ser vista na **Figura 24**. Os principais impactos estão associados ao insumo de maior quantidade, o óleo de milho bruto, que corresponde à mais de 90% dos impactos em todas as categorias. Dentre os outros insumos, os que mais contribuem para os impactos são a energia elétrica e o ácido fosfórico, o primeiro representando mais de 5% da classe de ocupação de solo agrícola e o segundo correspondendo a mais de 2% da classe de eutrofização, mas ainda sendo contribuições bem inferiores ao óleo de milho bruto, devido ao fato de que este insumo acumula impactos da etapa anterior (cultivo de milho).

**Figura 24** - Avaliação de impacto para o refino de óleo de milho



O óleo milho refinado vai ser utilizado para a produção de BioQAV HEFA. A **Tabela 20** mostra os valores do impacto de cada classe para esta etapa. O maior valor de impacto absoluto é o da categoria de mudanças climáticas (kg CO<sub>2</sub> eq), seguido pela depleção de combustíveis fósseis (kg oil eq) e a toxicidade humana (kg 1,4-DB eq).

**Tabela 20** - Valores de impacto para a produção de BioQAV HEFA

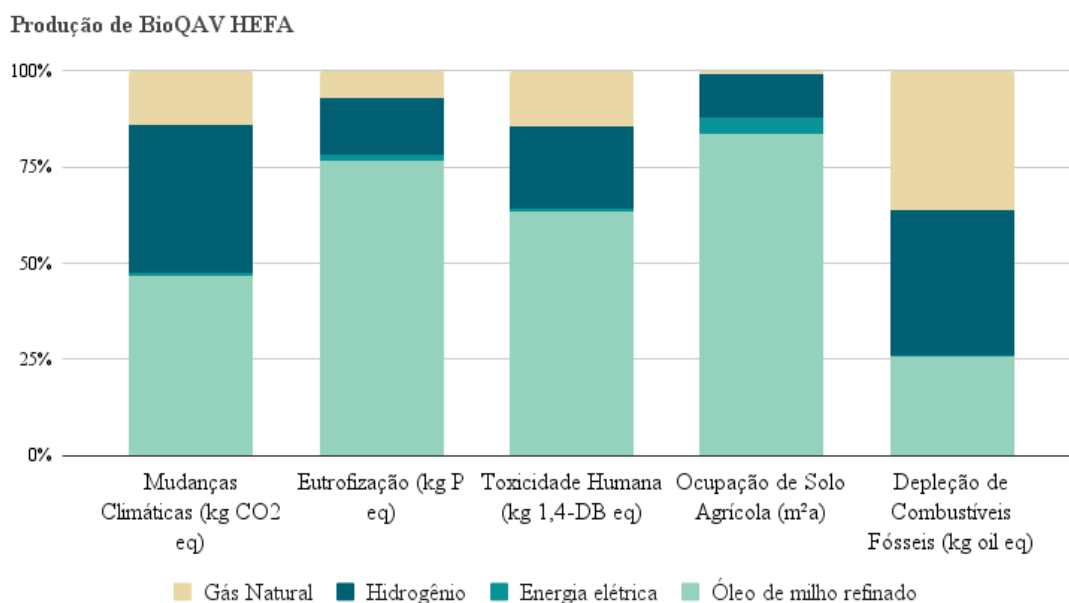
<b>Categoria de Impacto</b>	<b>Total</b>
Mudanças Climáticas (kg CO <sub>2</sub> eq)	1,36E-02
Eutrofização (kg P eq)	1,67E-06
Toxicidade Humana (kg 1,4-DB eq)	2,67E-03
Ocupação de Solo Agrícola (m <sup>2</sup> a)	1,16E-03
Depleção de Combustíveis Fósseis (kg oil eq)	6,51E-03

Fonte: elaborado pela autora (2024)

A **Figura 25** apresenta os impactos de cada insumo na produção do BioQAV. Neste caso, o principal contribuinte para a maioria das classes é o óleo de milho refinado, esta tem mais de 50% dos impactos nas categorias de eutrofização, toxicidade humana e ocupação de solo agrícola. Já na categoria de mudanças climáticas, o óleo de milho refinado representa 46,6% dos impactos, e na depleção de combustíveis fósseis apenas 25,6%. Nestas categorias, o destaque é do hidrogênio fóssil e do gás natural, ambos combustíveis

obtidos de fontes fósseis, que carregam um impacto significativo. Na categoria de mudanças climáticas, o hidrogênio detém 38,4% do impacto, enquanto o gás natural 14,1%. Já na de depleção de combustíveis fósseis o hidrogênio representa 37,9% do total do impacto, e o gás natural 36% do impacto. A rede de impactos da produção de hidrogênio mostra que a maior parte do impacto nestas classes é por conta dos insumos gás natural e vapor utilizados no processo.

**Figura 25** - Avaliação de impacto para a produção do BioQAV HEFA



Fonte: elaborado pela autora (2024)

#### 4.2.4. Rota ATJ

Nesta rota, para produção de 1 MJ de BioQAV-ATJ, o milho cultivado será fermentado para a produção de etanol, que será utilizado como matéria-prima para a produção do bioquerosene (**Figura 15**). A **Tabela 21** apresenta os valores de impacto para cada uma das categorias na etapa de produção de etanol. Neste caso, analisando os valores absolutos das categorias de impacto, o maior valor é da classe de ocupação de solo agrícola (m<sup>2</sup>a), seguido pela de mudanças climáticas (kg CO<sub>2</sub> eq), enquanto os valores das classes de toxicidade humana (kg 1,4-DB eq) e depleção de combustíveis fósseis (kg oil eq) estão muito próximos, e o de eutrofização (kg P eq) é o menor valor no total.

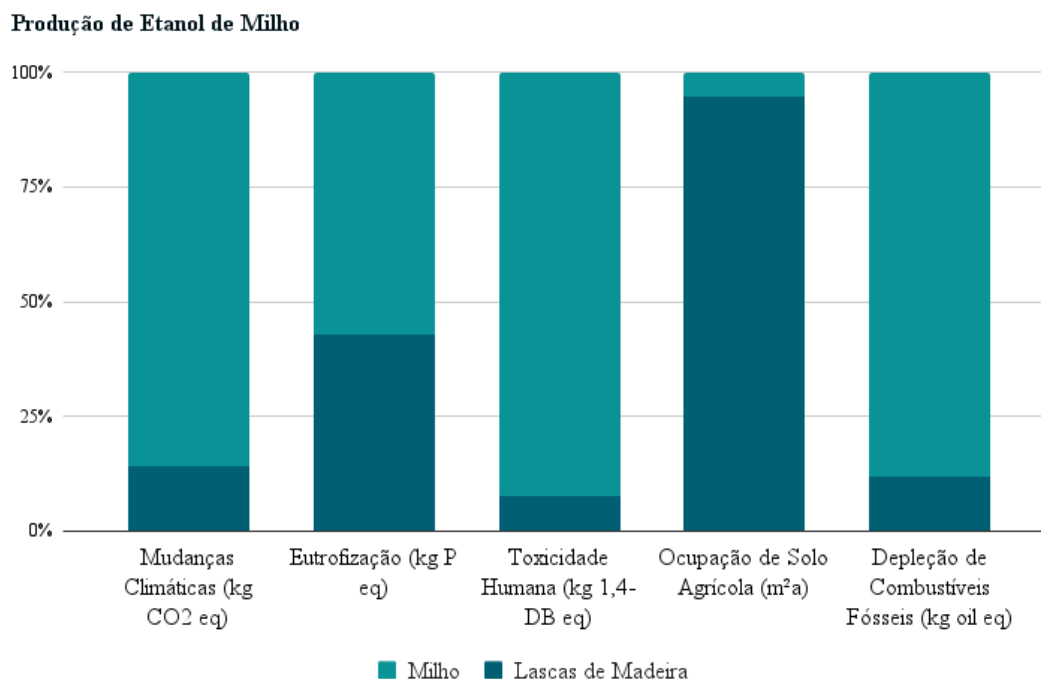
**Tabela 21** - Valores de impacto para a produção de etanol de milho

<b>Categoria de Impacto</b>	<b>Total</b>
Mudanças Climáticas (kg CO2 eq)	4,27E-03
Eutrofização (kg P eq)	1,95E-06
Toxicidade Humana (kg 1,4-DB eq)	1,01E-03
Ocupação de Solo Agrícola (m <sup>2</sup> a)	2,19E-02
Depleção de Combustíveis Fósseis (kg oil eq)	1,08E-03

Fonte: elaborado pela autora (2024)

A **Figura 26** apresenta o quanto cada insumo contribui no impacto final das categorias para a etapa de produção do etanol de milho. Neste caso existem dois insumos no processo, o milho cultivado e as lascas de madeira. Para as classes de mudanças climáticas, toxicidade humana e depleção de combustíveis fósseis, o principal contribuinte de impacto é o cultivo de milho. No entanto, nas classes de eutrofização e ocupação de solo agrícola as lascas de madeira detêm a maior parte dos impactos, sendo mais de 70% na primeira categoria e quase 100% da segunda categoria. Observando a rede deste insumo, é visto que este comportamento é devido principalmente ao cultivo das árvores que ocupam um grande espaço e utilizam pesticidas e fertilizantes na sua produção. Com mencionado na seção 3.2.2.4, as lascas de madeiras consideradas no trabalho derivam de uma outra espécie (salgueiro) do que normalmente é utilizado no Brasil (eucalipto). Logo, pode haver variações nos impactos deste insumo, porém a produção de ambas é semelhante, então não são alterações de grande significância.

**Figura 26** - Avaliação de impacto para a produção do etanol de milho



Fonte: elaborado pela autora (2024)

O etanol de milho será utilizado como insumo para a produção de BioQAV ATJ e os impactos deste processo podem ser visto na **Tabela 22**. A classe de maior impacto absoluto é a de mudanças climáticas (kg CO<sub>2</sub> eq), seguido pela de depleção de combustíveis fósseis (kg oil eq) e toxicidade humana (kg 1,4-DB eq). Já a de menor impacto é a de eutrofização (kg P eq).

**Tabela 22** - Valores de impacto para a produção do BioQAV ATJ

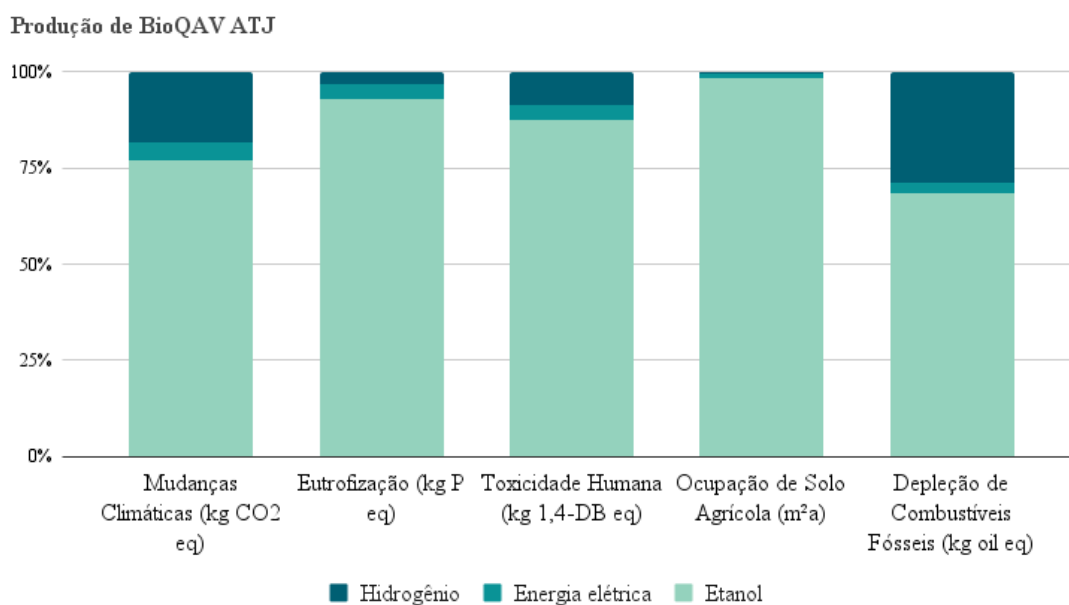
<b>Categoria de Impacto</b>	<b>Total</b>
Mudanças Climáticas (kg CO <sub>2</sub> eq)	9,43E-03
Eutrofização (kg P eq)	1,52E-06
Toxicidade Humana (kg 1,4-DB eq)	2,07E-03
Ocupação de Solo Agrícola (m <sup>2</sup> a)	1,30E-03
Depleção de Combustíveis Fósseis (kg oil eq)	2,91E-03

Fonte: elaborado pela autora (2024)

A **Figura 27** mostra a contribuição de cada insumo utilizado na produção do BioQAV ATJ nas categorias de impacto analisadas. O etanol produzido nas etapas anteriores é o principal contribuinte em todas as categorias, superando 50% de participação nos impactos. Além disso, o hidrogênio tem uma parcela de contribuição, principalmente nas

classes de mudanças climáticas (25,6%) e depleção de combustíveis fósseis (39,1%). Já a energia elétrica tem sua maior contribuição na categoria de ocupação de solo agrícola, com 20,7% de participação no valor desta categoria.

**Figura 27** - Avaliação de impacto para a produção do BioQAV ATJ



Fonte: elaborado pela autora (2024)

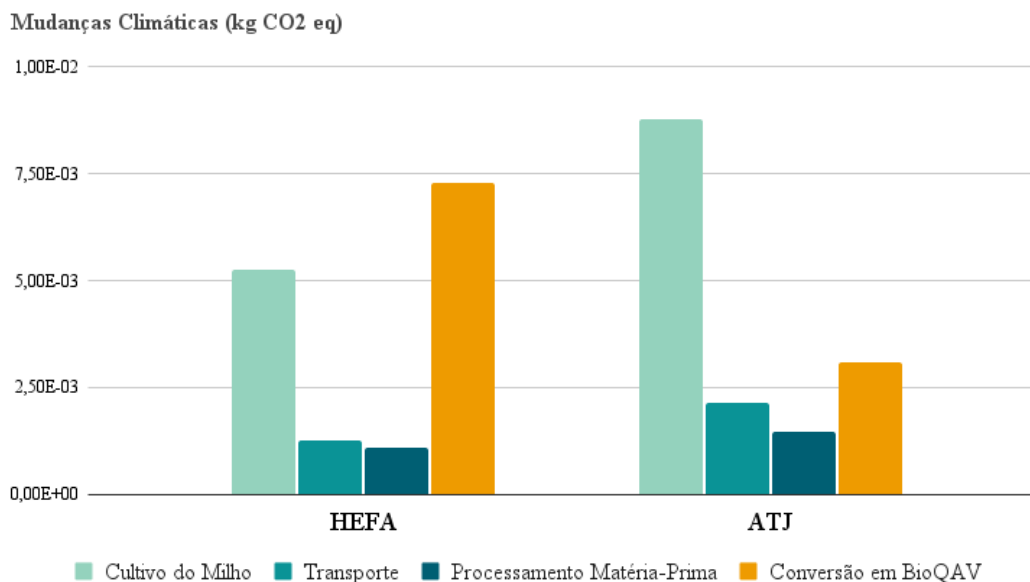
#### 4.2.5. Análise Comparativa

Neste capítulo serão analisadas todas as categorias de impacto individualmente e como as etapas de cada rota se comportam e as principais implicações. As etapas apresentadas nos gráficos de análise serão de cultivo do milho, transporte, processamento da matéria-prima, que para rota HEFA corresponde a extração e refino do óleo de milho e para a rota ATJ é a produção do etanol de milho, e a produção do BioQAV.

A **Figura 28** apresenta os valores da categoria de mudanças climáticas para todas as etapas dos processos das rotas HEFA e ATJ. Como já foi mencionado, os impactos na etapa de cultivo sempre serão maiores para a rota ATJ, pois esta utiliza mais milho para produzir 1 MJ de BioQAV. Nas etapas de transporte e processamento da matéria-prima os valores desta categoria para os processos HEFA e ATJ são muito próximos, sendo as etapas que menos agregam ao impacto de mudanças climáticas para ambas as rotas. Já no processo de conversão em BioQAV, a rota HEFA apresenta mais que o dobro do impacto da rota ATJ. Este fato ocorre, pois, os insumos utilizados na rota HEFA são o hidrogênio fóssil e o gás natural, sendo o hidrogênio também utilizado no processo ATJ, porém em

menores quantidades, já o gás natural não é utilizado na rota ATJ, fazendo com que essa apresente menos impactos nesta etapa. A influência destes insumos nesta classe ocorre por conta do seu ciclo de extração serem processos de alto impacto derivados de combustíveis fósseis com alta taxa de emissão de GEE (EPE, 2022b).

**Figura 28** - Valores de impacto da categoria mudanças climáticas por etapa para as rotas HEFA e ATJ

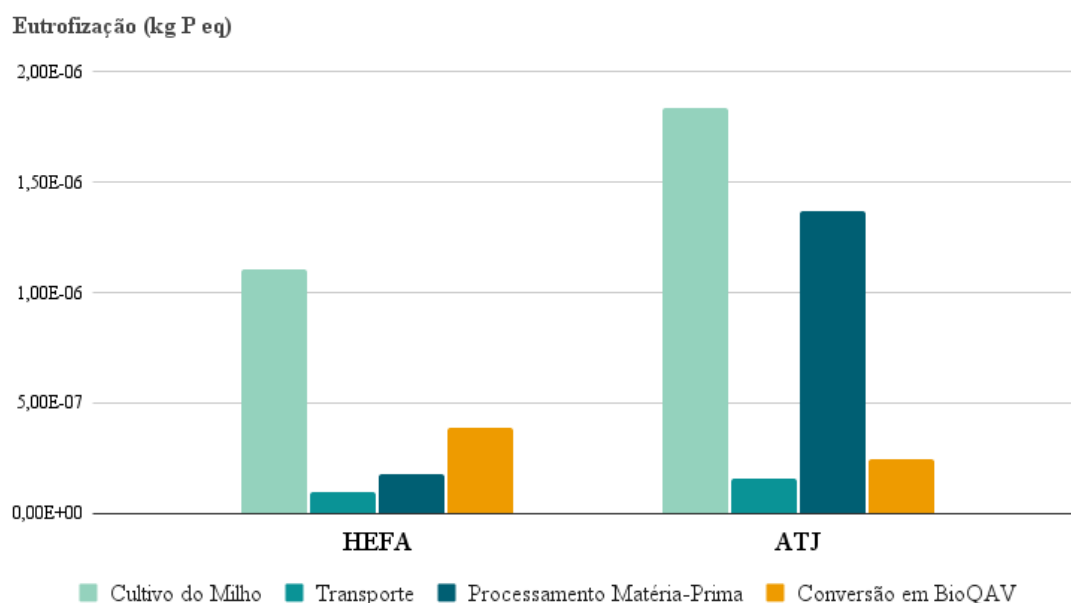


Fonte: elaborado pela autora (2024)

A **Figura 29** apresenta o impacto de eutrofização por etapa para as rotas analisadas. A etapa de maior contribuição é a de cultivo. Este comportamento é padrão na produção de biocombustíveis onde a matéria-prima é a produção agrícola, já que o cultivo utiliza insumos químicos que contribuem para a eutrofização de corpos hídricos, sendo compostos com alto potencial de periculosidade para a saúde humana (DE ANDRADE, 2023). Além disso, na rota ATJ, o processamento da matéria-prima tem um impacto muito grande em comparação com as outras etapas, podendo ser justificado pelo fato de esta etapa utilizar as lascas de madeira como biomassa, que tem alto impacto agregado na sua produção.



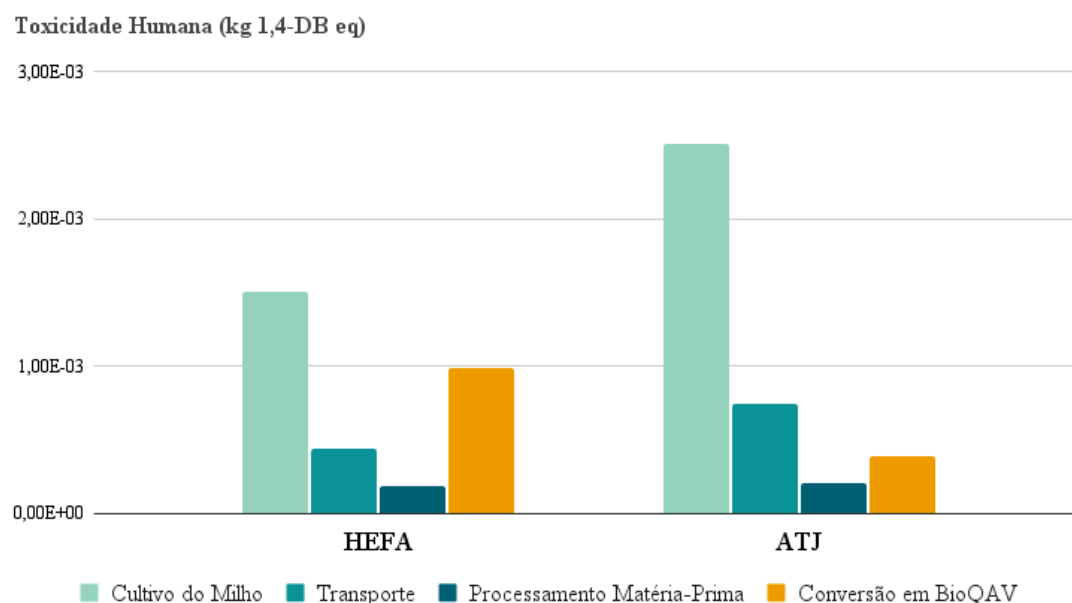
**Figura 29** - Valores de impacto da categoria eutrofização por etapa para as rotas HEFA e ATJ



Fonte: elaborado pela autora (2024)

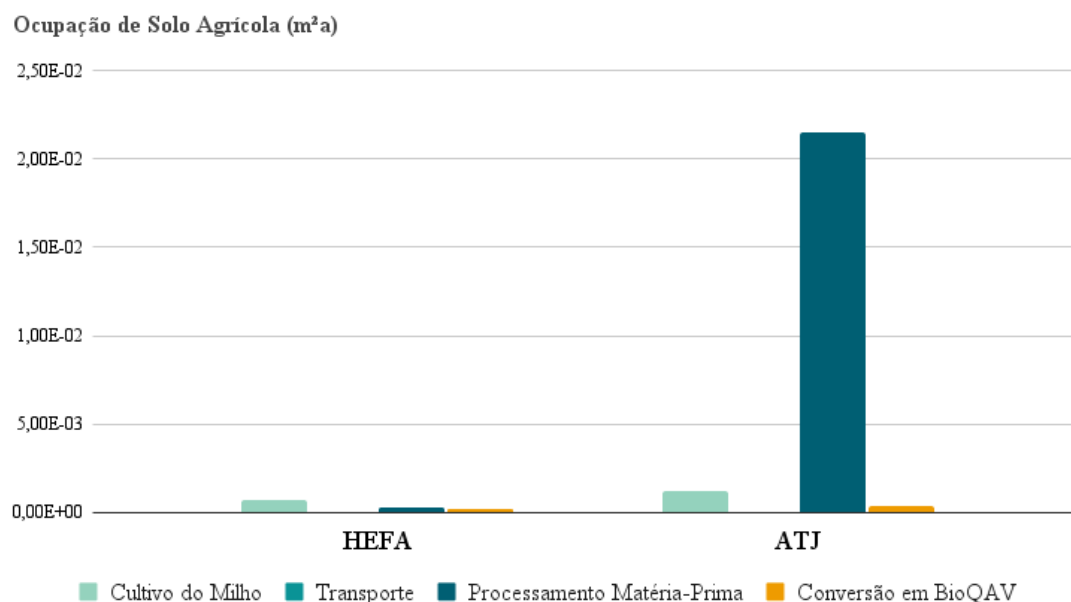
A **Figura 30** apresenta os valores da classe de toxicidade humana para todas as etapas no processo HEFA e ATJ. Novamente, a etapa de maior impacto é a de cultivo, e, similar à categoria de eutrofização, isso acontece pelo uso de insumos agrícolas, que são tóxicos para vários organismos vivos, incluindo os seres humanos, além de poderem contaminar o solo e a água, aumentando o número de pessoas afetadas (ALEXANDRE, 2009). Nas etapas de transporte e processamento da matéria-prima os valores são baixos e parecidos entre as rotas. Já na etapa de conversão em BioQAV, o impacto da rota HEFA é mais do que o dobro da rota ATJ. Este fato ocorre por conta do uso de insumos fósseis, cujo processo de extração ocorrem sob risco de contaminação, sendo substâncias perigosas para os seres humanos (RIBEIRO, 2012).

**Figura 30** - Valores de impacto da categoria toxicidade humana por etapa para as rotas HEFA e ATJ



A **Figura 31** mostra os impactos da classe de ocupação de solo agrícola para a rota HEFA e ATJ. Neste caso, todas as etapas de ambas as rotas têm valores baixíssimos, com exceção da etapa de processamento da matéria-prima na rota ATJ. Este fato ocorre por conta do uso de lascas de madeira, que agrega muitos impactos ambientais, em função da ocupação de grandes áreas agrícolas que afeta a biodiversidade local (RAMOS, MATSUURA e BARRANTES, 2018). Ainda neste cenário, a tendência já vista com o aumento da produção de etanol de milho no Brasil é a maior demanda de biomassa, que, diferente do etanol de cana-de-açúcar que utiliza o bagaço de cana, precisa utilizar uma nova fonte, neste caso, esta nova fonte será o cavaco de eucalipto obtido de florestas plantadas, levando a uma tendência de expansão deste setor (MOREIRA, MORALES, *et al.*, 2021). No entanto, este momento de crescimento do setor seria o ideal para a proposição de novas biomassas para o processo, dando foco às residuais, que tem menor impacto.

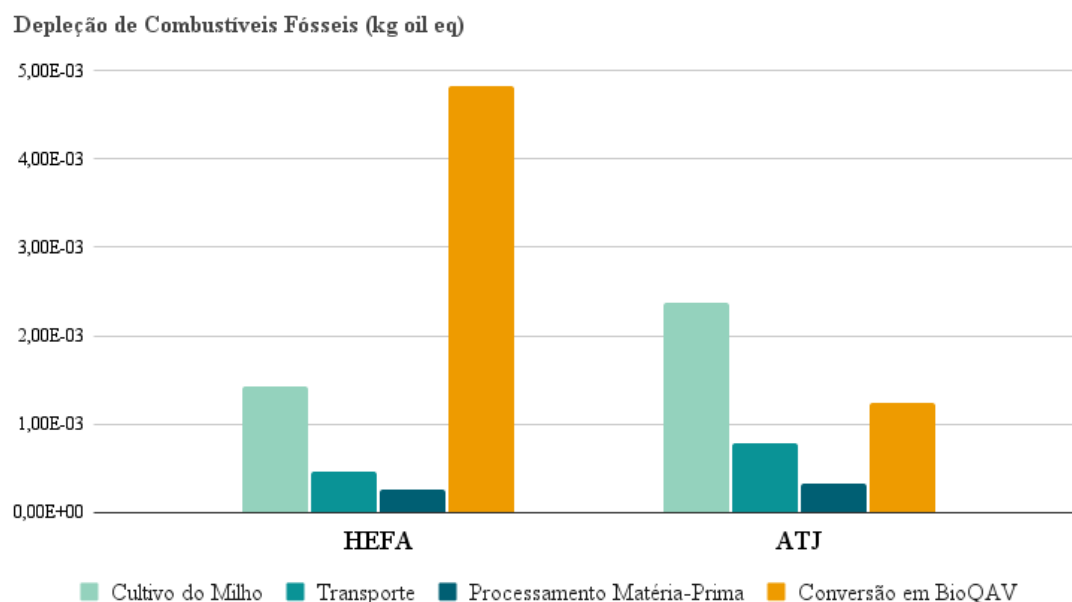
**Figura 31** - Valores de impacto da categoria ocupação de solo agrícola por etapa para as rotas HEFA e ATJ



Fonte: elaborado pela autora (2024)

Por fim, a **Figura 32** apresenta os impactos da classe de depleção de combustíveis fósseis para todas as etapas da rota HEFA e ATJ. O principal destaque nesta classe ocorre para o valor de impacto da produção de BioQAV HEFA ser muito maior em comparação com outras etapas tanto da própria rota HEFA, quanto da rota ATJ. Similar ao impacto de mudanças climáticas, isto ocorre por conta do maior uso de hidrogênio e gás natural de origem fóssil no processo de conversão em BioQAV da rota HEFA em comparação à ATJ. Esta classe se refere ao uso de combustíveis fósseis no processo, logo, este é um comportamento esperado, mostrando que a rota HEFA depende mais desses combustíveis para sua execução.

**Figura 32** - Valores de impacto da categoria depleção de combustíveis fósseis por etapa para as rotas HEFA e ATJ



Fonte: elaborado pela autora (2024)

A **Tabela 23** sintetiza os resultados apresentando qual a rota teve o maior impacto por etapa (célula pintada) e marcando a etapa de maior impacto por categoria de impacto para as duas rotas. A rota ATJ teve os maiores impactos para todas as classes nas etapas de cultivo, transporte e processamento da matéria-prima. Já na etapa de produção de BioQAV, a rota ATJ só tem o maior valor na categoria de ocupação de solo agrícola, em todas as outras é rota HEFA que tem o maior impacto.

Com relação ao maior valor de impacto por categoria analisada, a rota HEFA teve os maiores valores das categorias de eutrofização, toxicidade humana e ocupação de solo agrícola na etapa de cultivo, enquanto as classes mudanças climáticas e depleção de combustíveis fósseis tiveram maiores valores na etapa de produção do BioQAV. Na rota ATJ, a maioria das categorias tiveram seus maiores valores na etapa de cultivo, apenas a categoria de ocupação de solo agrícola que apresentou maior valor na etapa de processamento da matéria-prima por conta do uso da biomassa de madeira na produção de etanol.

**Tabela 23** – Análise e comparação de maiores valores para cada categoria de impacto e para cada etapa por rota

<b>Categoria de Impacto</b>	<b>Mudanças Climáticas</b>	<b>Eutrofi-zação</b>	<b>Toxicidade Humana</b>	<b>Ocupação de Solo Agrícola</b>	<b>Depleção de Combustíveis Fósseis</b>
Cultivo	HEFA		Maior Impacto	Maior Impacto	Maior Impacto
	ATJ	Maior Impacto		Maior Impacto	Maior Impacto
Transporte	HEFA				
	ATJ				
Processamento da Matéria-Prima	HEFA				
	ATJ			Maior Impacto	
Conversão em BioQAV	HEFA	Maior Impacto			Maior Impacto
	ATJ				

Fonte: elaborado pela autora (2024)

Desta forma, é possível entender que a rota ATJ tem um ciclo de vida mais impactante do que o da rota HEFA, principalmente por conta do uso de mais insumos agrícolas e uso de biomassa no processo de produção do etanol. Isto reforça o impacto do cultivo no ciclo de vida de um biocombustível. Neste sentido, o ideal é sempre pensar na implementação de sistemas agrícolas mais sustentáveis como forma de diminuir cada vez os impactos da cadeia. Algumas opções já vêm sendo discutidas para transformar os sistemas agrícolas, tais como, a utilização de sistemas de integração lavoura, pecuária e florestas (ILPF) que aumentam a produtividade do solo, reduzindo pragas e doenças, como discutido por Balbino et al. (2012). Outra opção envolvem o uso de biofertilizantes, que são obtidos a partir da reciclagem de material orgânico durante o processo de produção de biogás, de forma que o crescimento desta indústria, como vem acontecendo nos últimos anos, também auxilia na sustentabilidade do cultivo. Ainda, podem ser aplicados também sistemas de irrigação de menor escala e compostos orgânicos para aumentar nutrientes no solo, como estudado por Zerssa et al. (2023).

A rota HEFA se mostrou uma boa opção para a implantação de bioquerosene de milho no Brasil, por apresentar menor cadeia de impacto. Além disso, conforme Neuling esta rota é a que possui tecnologia mais consolidada no mercado de produção de BIOQAV. No entanto, esta rota é limitada pela necessidade de insumos fósseis na produção do BioQAV, principalmente o hidrogênio fóssil, que tem uma cadeia de extração repleta de impactos ambientais. Uma solução para tal problema seria a adoção de hidrogênio verde, que é obtido a partir de fontes renováveis. O mercado de hidrogênio verde vem se

mostrando promissor no Brasil, que é um grande pioneiro da energia renovável, porém o país ainda precisa investir em uma produção de larga escala para que se torne um produto com competitividade de mercado (FERNANDES, AZEVEDO, *et al.*, 2023).

Apesar do maior impacto para a rota ATJ ao longo da maioria das fases do ciclo de vida, é necessário entender que este é um processo que ainda pode ser mais viável dependendo da região de produção. O Brasil, por exemplo é pioneiro na produção de etanol e muitas empresas estão localizadas na região Centro-Oeste. É uma tendência que as empresas produtoras coloquem o bioquerosene em sua lista de produção, utilizando o etanol como matéria-prima.

Logo, os resultados deste estudo podem contribuir para que a empresa entenda os principais pontos de impacto desta rota, que são referentes à etapa de cultivo e ao uso da biomassa de madeira, para que eles possam ser tratados e o processo atinja critérios mais elevados de sustentabilidade.

#### *4.2.6. Análise de Sensibilidade*

Nos resultados apresentados foi possível entender os impactos de cada etapa do processo para a rota HEFA e ATJ. A análise de sensibilidade realizada permitirá definir se variações no inventário causariam mudanças nos impactos.

##### *4.2.6.1. BioQAV HEFA*

Para a rota HEFA, a análise de sensibilidade foi conduzida sabendo que o uso de fertilizantes é responsável por 53% do impacto da categoria eutrofização e 40% da toxicidade humana, sendo o insumo de maior impacto nestas categorias de impacto. Logo, os novos valores de impacto (VR5 e VR10) foram calculados para estas classes considerando a redução de 5% e 10%, respectivamente, destes insumos. Neste caso, seguindo o padrão do trabalho, o valor de impacto final é a média entre o período de safra e safrinha. Para a categoria de ocupação de solo agrícola, o principal impacto também deriva do cultivo, com a semente como principal contribuinte (30%), neste caso, os valores de VR5 e VR10 foram obtidos calculando a redução neste insumo.

Já nas demais classes, mudanças climáticas e depleção de combustíveis fósseis, o insumo de maior impacto é o hidrogênio fóssil (35% em ambas as classes), utilizado na conversão em BioQAV. Com isso, os valores de VR5 e VR10 foram calculados para estas classes

considerando a redução de 5% e 10%, respectivamente, deste insumo. A **Tabela 24** apresenta os valores de VR5, VR10, o valor total sem alterações no inventário e a porcentagem do VR5 e do VR10 em relação ao valor total para a rota HEFA.

**Tabela 24** – Valores VR5 e VR10 da análise de sensibilidade para a rota HEFA (VR5 = Valor Reduzido em 5%; VR10 = Valor Reduzido em 10%)

<b>Categoria de Impacto</b>	<b>VR5</b>	<b>VR10</b>	<b>Original</b>	<b>VR5/Original (%)</b>	<b>VR10/Original (%)</b>
Mudanças Climáticas (kg CO2 eq)	1,35E-02	1,34E-02	1,49E-02	90,50%	89,81%
Eutrofização (kg P eq)	1,06E-06	1,04E-06	1,76E-06	60,45%	59,03%
Toxicidade Humana (kg 1,4-DB eq)	1,92E-03	1,90E-03	3,11E-03	61,74%	61,05%
Ocupação de Solo Agrícola (m <sup>2</sup> a)	1,05E-03	1,03E-03	1,18E-03	88,99%	87,53%
Depleção de Combustíveis Fósseis (kg oil eq)	6,46E-03	6,41E-03	6,96E-03	92,81%	92,11%

Fonte: elaborado pela autora (2024)

Nas categorias de eutrofização e toxicidade humana, onde a redução do valor de entrada foi do fertilizante, nota-se uma diminuição em 40% do valor original tanto para o VR5 e o VR10 de ambas as classes, com pouca variação entre si. Esta grande redução de valor confirma o quanto este insumo é relevante para o impacto destas categorias, apresentando alta sensibilidade. Este conhecimento é importante para definir decisões estratégicas acerca do uso destes insumos no ciclo, podendo ser utilizado como motivador para pensar em formas de reduzi-lo.

Já para a categoria de ocupação de solo agrícola, novamente não é notável uma diferença considerável nos impactos VR5 e VR10 que, em comparação com o valor original, foi de cerca de 13%. Enquanto isso, nas categorias de mudanças climáticas e depleção de combustíveis fósseis os valores de VR5 e VR10 variam menos de 1% entre si, e cerca de 8% do valor original. Nestes casos, os comportamentos dos valores de impacto com o insumo reduzido estão mais próximos da proporção de diminuição que foi feita na quantidade do insumo (5% e 10%). No entanto, as alterações são pouco significativas em relação ao valor original, de forma que estes insumos não apresentam alta relevância no impacto e tem baixa sensibilidade.

#### 4.2.6.2. BioQAV ATJ

Para a rota ATJ, nas categorias de mudanças climáticas, eutrofização, toxicidade humana e depleção de combustíveis fósseis o principal contribuinte para o impacto é o uso de fertilizantes durante o cultivo, representando, respectivamente 49%, 43%, 50% e 25% do total de impacto em cada classe. Logo, os valores de VR5 e VR10 para estas classes foram calculados considerando a redução deste insumo. Enquanto isso para a categoria de ocupação de solo agrícola, o principal contribuinte de impacto é o uso das lascas de madeira (93%), e os valores de VR5 e VR10 para esta classe foram obtidos reduzindo este insumo.

**Tabela 25** - Valores VR5 e VR10 da análise de sensibilidade para a rota ATJ (VR5 = Valor Reduzido em 5%; VR10 = Valor Reduzido em 10%)

<b>Categoria de Impacto</b>	<b>VR5</b>	<b>VR10</b>	<b>Original</b>	<b>VR5/Original (%)</b>	<b>VR10/Original (%)</b>
Mudanças Climáticas (kg CO <sub>2</sub> eq)	1,34E-02	1,31E-02	1,54E-02	87,06%	84,82%
Eutrofização (kg P eq)	2,38E-06	2,34E-06	3,60E-06	66,16%	65,08%
Toxicidade Humana (kg 1,4-DB eq)	1,76E-03	1,72E-03	3,84E-03	45,79%	44,92%
Ocupação de Solo Agrícola (m <sup>2</sup> a)	2,17E-02	2,06E-02	2,30E-02	94,23%	89,58%
Depleção de Combustíveis Fósseis (kg oil eq)	4,15E-03	4,10E-03	4,71E-03	88,13%	86,94%

Fonte: elaborado pela autora (2024)

As alterações no valor de entrada do fertilizante produziram novos valores para quatro categorias. O valor VR10 reduziu em relação ao original em cerca de 15% e o VR5 em 13% para a categoria de mudanças climáticas. Para a categoria eutrofização, a redução é de cerca de 35% dos novos valores em relação ao original. Já para a categoria toxicidade humana, a redução de 5% e 10% na quantidade de fertilizante utilizadas produziu uma variação de mais de 50% do valor original, com alteração de menos de 1% entre os valores de VR5 e VR10. Enquanto para a categoria de depleção de combustíveis fósseis, a variação é de cerca de 12% para o VR5 e aproximadamente 13% para o VR10.



Com isso, as classes de eutrofização e toxicidade humana apresentaram uma alta sensibilidade às variações na quantidade de fertilizante, sendo um insumo importante para realizar uma análise precisa de impacto, além de demonstrar que é estratégico para a diminuição do impacto do ciclo de vida. No entanto, a alteração do mesmo insumo nas categorias de mudanças climáticas e depleção de combustíveis fósseis não mostra uma variação tão significativa, representando a baixa sensibilidade e relevância deste insumo nestas classes.

Por fim, na categoria de ocupação de solo agrícola, a variação ocorre no valor utilizado de lascas de madeiras. Com isso, a redução encontrada no VR5 é de cerca de 5% do valor original, enquanto que para o VR10, a redução é de cerca de 10%. Este mostra um caso onde a alteração do insumo é diretamente relacionada com o impacto final. Neste cenário, o impacto desta classe tem menor sensibilidade à variação do insumo, tendo um comportamento mais previsível.

## 5. CONSIDERAÇÕES FINAIS

Este estudo apresentou uma análise da viabilidade da produção de bioquerosene a partir do milho na região Centro-Oeste, seguindo os direcionamentos propostos pelo CORSIA para minimizar o impacto ambiental do setor de aviação. A análise foi dividida em duas etapas. Na primeira, examinou-se a estrutura e viabilidade da produção de bioquerosene de milho por meio de uma análise espacial. Na segunda, compararam-se os impactos ambientais das rotas de produção utilizando o milho como matéria-prima, através da ferramenta de análise do ciclo de vida.

Com relação à análise de viabilidade da produção de BioQAV no Centro-Oeste a partir do milho, o estudo mostrou que a região apresenta uma alta produtividade de milho bem dividida pelos estados, apresentando um bom sistema já estabelecido de transporte e de indústrias relacionadas ao setor de biocombustíveis que podem servir como complementares ao processo de produção de bioquerosene. Ainda, a região conta com 18 aeroportos, reforçando a demanda local pelo bioquerosene que é de mais de 200 milhões de litros, fazendo com que as indústrias locais não precisem sobreviver à base de exportação para outras regiões. Analisando as microrregiões, Alto Teles Pires (MT), Dourados (MS) e Sudoeste de Goiás se destacam pela alta produtividade, boa cobertura de transporte, presença de indústrias que podem ser associadas à produção de BioQAV, ter uma demanda de BioQAV local ou próxima, valores altos de PPB e baixa taxa de desmatando, sendo microrregiões indicadas para alocação de uma biorrefinaria.

Para otimizar a produção de bioquerosene de milho no Centro-Oeste, é necessário avaliar qual das duas rotas permitidas pelo CORSIA, HEFA ou ATJ, causa menor impacto ambiental. Ambas as rotas enfrentam impactos significativos devido ao cultivo de milho, especialmente relacionados ao uso de fertilizantes, que são responsáveis por grande parte dos impactos, com destaque para as categorias de eutrofização e toxicidade humana. Neste cenário, a análise de sensibilidade mostrou que a redução na quantidade de fertilizante pode diminuir esses impactos em mais de 40% para ambas as rotas nessas duas categorias, reforçando a importância deste insumo no ciclo de vida do bioquerosene.

De forma geral, a rota HEFA apresentou menor impacto ambiental total em todas as categorias de impacto, com exceção da de depleção de combustíveis fósseis. Além da etapa de cultivo, a conversão em BioQAV também é uma etapa impactante no ciclo da

rota HEFA, o que ocorre por conta do uso do hidrogênio fóssil e gás natural. No entanto, ao realizar a análise de sensibilidade do insumo hidrogênio nos impactos de mudanças climáticas e depleção de combustíveis fósseis este mostrou baixa sensibilidade, de forma que a diminuição do seu uso causa pouca variação de impacto. Desta forma, seria importante pensar em uma substituição deste insumo, como o uso de hidrogênio verde, cujo ciclo de vida é menos impactante.

Além disso, apesar de a rota ATJ ter mais impacto na maioria das categorias de impacto, esta ainda pode ser considerada para a produção de BioQAV a partir do milho, principalmente pela existência de um mercado de etanol consolidado no Brasil. No entanto, seria necessário pensar em redução de impacto no ciclo da produção, que pode ocorrer através da diminuição de insumos agrícolas e do uso de biomassa de lascas de madeira na produção do etanol. Ademais, as lascas de madeira, responsáveis por mais de 90% do impacto na categoria de ocupação de solo agrícola, mostraram baixa sensibilidade à variação da quantidade de insumo, apresentando um comportamento quase linear entre a redução do insumo e do impacto. Com isso, também seria necessário pensar em uma outra fonte de biomassa mais sustentável, como o uso de matéria-prima residual.

Por fim, a sustentabilidade do setor de aviação é um tema que vêm sendo discutido e incentivado nos últimos anos, mas o Brasil ainda está em estágios iniciais na instauração de medidas para redução de impactos, como a produção de BioQAV. Desta forma, estudos como esse devem ser encorajados e ampliados para serem usados de apoio para o crescimento da indústria, essas análises serão cruciais no cenário futuro, onde o uso de combustíveis de aviação renováveis será obrigatório. As análises, no entanto, são limitadas pelo acesso as informações de ciclo de vida ao nível nacional, muitas vezes precisando recorrer a estudos de outros países que não retratam a realidade local. Além disso, os estudos de ACV também dependem da existência de bases de dados de processos que, em alguns casos, não representam o mercado brasileiro.

A metodologia adotada, pouco explorada na literatura, mostrou-se eficiente e prática, permitindo a replicação do estudo em outras localidades e contextos. Estudos futuros podem desenvolver análises comparativas com outras matérias-primas que possam ser utilizadas na fabricação de bioquerosene. Estes trabalhos podem focar em utilizar matérias-primas residuais com impactos de produção menores. Também podem ser realizados trabalhos que atinjam um nível de detalhamento menor na alocação de uma

biorrefinaria, buscando otimizar cada vez mais a cadeia produtiva de um bioquerosene de fácil acesso ao mercado, com alta competitividade ao combustível fóssil.

## 6. REFERÊNCIAS

ABBB. **Global Fact Sheet 2020**. Aviation Benefits Beyond Borders. 2020.

ABIMAQ. **Falta de silos de armazenamento ameaça a superprodução de grãos no Centro-Oeste do Brasil**. 2023.

ABIMILHO. Estatísticas, 2024. Disponível em: <<https://www.abimilho.com.br/estatisticas>>. Acesso em: 15 Maio 2024.

ABNT. **NBR ISO 14040 - GA-ACV - Princípios de estrutura**. 2009.

AGRO2BUSINESS. Marketplace, 2024. Disponível em: <Marketplace Agro2Business>. Acesso em: 10 Maio 2024.

ALENGEBAWY, A. et al. Heavy metals and pesticides toxicity in agricultural soil and plants: Ecological risks and human health implications. **Toxics**, 2021.

ALEXANDRE, S. F. Exposição a agrotóxicos e fertilizantes químicos: agravos à saúde dos trabalhadores no agronegócio do abacaxi, em Limoeiro do Norte-CE. **Dissertação (Mestrado em Saúde Pública) - Faculdade de Medicina, Universidade Federal do Ceará, Fortaleza**, 2009.

ALVARENGA, R. C. et al. Sistema de Integração Lavoura-Pecuária: o modelo implantado na Embrapa Milho e Sorgo, 2007.

ANAC. **Relatório de Atividades 2019**. Agência Nacional de Aviação Civil. 2019. Disponível em: <[https://www.gov.br/anac/pt-br/centrais-de-conteudo/publicacoes/publicacoes-arquivos/Relatorio\\_de\\_Atividades\\_2019.pdf](https://www.gov.br/anac/pt-br/centrais-de-conteudo/publicacoes/publicacoes-arquivos/Relatorio_de_Atividades_2019.pdf)>. Acesso em: 20 Fevereiro 2024.

ANAC. **Relatório de Gestão e Atividades 2020**. Agência Nacional de Aviação Civil. 2020. Disponível em: <<https://www.gov.br/anac/pt-br/centrais-de-conteudo/publicacoes/publicacoes-arquivos/RelatriodeGestoeAtividades2020.pdf>>. Acesso em: 20 Fevereiro 2024.

ANAC. **Plano de Ação 2022**. Agência Nacional de Aviação Civil. 2021. Disponível em: <<https://www.gov.br/anac/pt-br/assuntos/meio-ambiente/arquivos/ebookPlanodeAo2022PTBRversofinal.pdf>>. Acesso em: 07 jul. 2024.

ANAC. **Dados estatísticos do transporte aéreo**. 2024. Disponível em: <<https://www.anac.gov.br/acesso-a-informacao/dados-abertos/areas-de->

atuacao/voos-e-operacoes-aereas/dados-estatisticos-do-transporte-aereo>.  
Acesso em: 07 jul. 2024.

ANP. **Renovabio**. 2017. Disponível em: <<https://www.gov.br/anp/pt-br/assuntos/renovabio>>. Acesso em: 15 maio 2024.

ANP. **Anuário estatístico brasileiro do petróleo, gás natural e biocombustíveis**. Agência Nacional de Petróleo, Gás Natural e Biocombustíveis. 2020. Disponível em: <<http://www.anp.gov.br/arquivos/central-conteudos/anuario-estatistico/2020/anuario-2020.pdf>>. Acesso em: 15 Maio 2024.

ANP. Resolução ANP nº 856, de 2021. **Agência Nacional de Petróleo, Gás Natural e Biocombustíveis**, 2021. Disponível em: <<https://www.legisweb.com.br/legislacao/?id=422075>>. Acesso em: 10 março 2024.

ANP. **Painel Dinâmico de Produtores de Etanol**. Agência Nacional do Petróleo, Gás Natural e Biocombustíveis. 2024a.

ANP. **Painel Dinâmico de Produtores de Biodiesel**. Agência Nacional do Petróleo, Gás Natural e Biocombustíveis. 2024b.

ANP. **Painel Dinâmico de Produtores de Derivados de Petróleo**. 2024c.

AQUINO, C. M. M. et al. Centro-Oeste: Agronegócio, Meio Ambiente e Novas Territorialidades. **Arigó-Revista do Grupo PET e Acadêmicos de Geografia da Ufac**, 2018.

ASTM. **Standard specification for aviation turbine fuel containing synthesized hydrocarbons**. USA: ASTM International. 2021.

BALAGO, R. SAF Natal abre primeira fábrica piloto de combustível de aviação sustentável no Brasil. **Exame**, 2023. Disponível em: <<https://exame.com/brasil/saf-natal-abre-primeira-fabrica-piloto-de-combustivel-de-aviacao-sustentavel-no-brasil/>>. Acesso em: 15 Maio 2024.

BALBINO, L. C. et al. Sistemas de integração: o que são, suas vantagens e limitações., 2012.

BARRERA-ARELLANO, D.; BADAN-RIBEIRO, A. P.; SERNA-SALDIVAR, S. O. Corn Oil: Composition, Processing, and Utilization. **AACC International Press**, 2019.

BERTÃO, J. C. Brasil pode gerar 9 bilhões de litros de SAF apenas com resíduos agrícolas. **Nova Cana**, 2023. Disponível em: <<https://www.novacana.com/noticias/brasil-gerar-9-bilhoes-litros-saf- apenas-residuos-agro-181223>>. Acesso em: 15 Maio 2024.

BEZERRA, F. D. Hidrogênio verde: nasce um gigante no setor de energia., 2021.

BONSER, M. P. Global aviation system: Towards sustainable development. *International Journal of Aviation, Aeronautics, and Aerospace*, v. 6, n. 3, p. 8, 2019.

BRASIL. Política Nacional do Bioquerosene - Lei nº 14.248, de 25 de novembro de 2021, 25 novembro 2021. Disponível em: <[https://presrepublica.jusbrasil.com.br/legislacao/1324278429/lei-14248-21#:~:text=Estabelece%20o%20Programa%20Nacional%20do,Ver%20t%C3%B3pico%20\(10%20documentos\)&text=Bras%C3%ADlia%2C%2025%20de%20novembro%20de,Independ%C3%Aancia%20e%20133%C2%BA%20da%20Rep](https://presrepublica.jusbrasil.com.br/legislacao/1324278429/lei-14248-21#:~:text=Estabelece%20o%20Programa%20Nacional%20do,Ver%20t%C3%B3pico%20(10%20documentos)&text=Bras%C3%ADlia%2C%2025%20de%20novembro%20de,Independ%C3%Aancia%20e%20133%C2%BA%20da%20Rep)>. Acesso em: 20 Março 2024.

BRASIL, M. Geo anuncia R\$ 15 milhões para produção piloto de bioquerosene de aviação. **EPBR**, 2022. Disponível em: <<https://epbr.com.br/geo-anuncia-r-15-milhoes-para-producao-piloto-de-bioquerosene-de-aviacao/>>. Acesso em: 15 Maio 2024.

CAFFI. **Approved Fuels**. 2018. Disponível em: <[http://www.caafi.org/focus\\_areas/fuel\\_qualification.html#approved](http://www.caafi.org/focus_areas/fuel_qualification.html#approved)>. Acesso em: 06 Outubro 2023.

CAMPOLINA, J. M.; SIGRIST, C. S. L.; DA SILVA MORIS, V. A. Uma revisão de literatura sobre softwares utilizados em estudos de Avaliação do Ciclo de Vida. **Revista Eletrônica em Gestão, Educação e Tecnologia Ambiental**, p. 735-750, 2015.

CARRANÇA, T. Por que há montanhas de milho ao relento no interior do Brasil. **BBC News Brasil**, 2023. Disponível em: <<https://www.bbc.com/portuguese/articles/cm5jvg73z74o>>. Acesso em: 20 Março 2024.

CARVALHO, F. M. **Evaluation of the Brazilian potential for producing aviation biofuels through consolidated routes**. Dissertação de Mestrado, Planejamento Energético, COPPE - UFRJ. 2017.

CETINKAYA, E.; DINCER, I.; NATERER, G. Life cycle assessment of various hydrogen production methods. **International journal of hydrogen energy**, v. 37, n. 3, 2012.

CGEE. **Biocombustíveis: Progressos e Desafios. Série de documentos técnicos do Centro de Gestão e Estudos Estratégicos**. Centro de Gestão e Estudos Estratégicos. 2010.

CHOMKHAMRSRI, K.; WOLF, M.; PANT, R. International reference life cycle data system (ILCD) handbook: Review schemes for life cycle assessment. **Towards life cycle sustainability management**, 2011.

CIBIOGÁS. **Panorama do Biogás no Brasil 2021**. 2022. Disponível em: <<https://cibiogas.org/wp-content/uploads/2022/04/NT-PANORAMA-DO-BIOGAS-NO-BRASIL-2021.pdf>>. Acesso em: 20 Maio 2024.

- CNT. **Anuário do Transporte 2021**. Confederação Nacional do Transporte. 2021.
- COÊLHO, A. **Documento da Superintendência de Desenvolvimento Regional e Infraestrutura (SUINF)**. 2023.
- CONAB. **Análise Mensal – Milho 2018**. Companhia Nacional de Abastecimento. 2018.
- CONAB. **E-book Boletim de Safras 2024**. Companhia Nacional de Abastecimento. 2024.
- CORTEZ, L. A. B. et al. Da criação ao fim do Proálcool. In Proálcool-Universidades e Empresas: 40 Anos de Ciência e Tecnologia para o Etanol Brasileiro, v. 1, n. 1, 2021.
- COSTA, L. et al. **A transição energética e o setor de petróleo e gás brasileiro**. 2023.
- DA COSTA, C. L. P. et al. Life Cycle Assessment of Maize Ethanol harvested from an Integrated Crop Livestock System, 2020.
- DA SILVA, A. L.; CASTAÑEDA-AYARZA, J. A. Macro-environment analysis of the corn ethanol fuel development in Brazil. **Renewable and Sustainable Energy Reviews**, 2021.
- DE ANDRADE, T. S. **A POLUIÇÃO DAS AGUAS POR AGROTOXICOS**. 2023.
- DE CARVALHO, A. M.; DE OLIVEIRA, A. D.; REIN, T. A.. Qual é o Impacto da Adubação Nitrogenada e Práticas Agrícolas na Emissão de N. 2021.
- DE CASTRO, C. N. **A agropecuária na região Centro-Oeste: limitações ao desenvolvimento e desafios futuros**. 2014.
- DE JONG, S. et al. Life-cycle analysis of greenhouse gas emissions from renewable jet fuel production. **Biotechnology for biofuels**, 2017.
- DE LIMA, G. J. M. M.; PAES, M. C. D.; QUEIROZ, V. A. V. O milho na nutrição animal e humana, 2011.
- DE MIRANDA RODRIGUES, S. L.; HENKES, J. A. Sustentabilidade Ambiental Na Aviação: O Programa Corsia E Sua Aplicação No Brasil. **Revista Brasileira De Aviação Civil & Ciências Aeronáuticas**, v. 1, n. 3, p. 145-164, 2021.
- DELUCCHI, M. A. Impacts of biofuels on climate change, water use, and land use. *Annals of the New York Academy of Sciences*, 2010.
- DUARTE, V. H. et al. Biocombustíveis: uma revisão sobre o panorama histórico, produção e aplicações do biodiesel. **Meio Ambiente**, 2022.



DUFOUR, J. et al. Hydrogen production from fossil fuels: life cycle assessment of technologies with low greenhouse gas emissions. **Energy & Fuels**, 2011.

ECOINVENT. The ecoinvent database is updated yearly with expanded sectorial and geographical coverage. **Ecoinvent**, 2023. Disponível em: <<https://support.ecoinvent.org/releases-overview>>. Acesso em: 15 Maio 2024.

EMBRAPA. **Cultivo do milho**. 2015. Disponível em: <<https://www.infoteca.cnptia.embrapa.br/infoteca/handle/doc/486917>>. Acesso em: 15 Maio 2024.

EMBRAPA. **Agroindústria do milho**. 2021. Disponível em: <<https://www.embrapa.br/agencia-de-informacao-tecnologica/cultivos/milho/producao/sistemas-diferenciais-de-cultivo>>. Acesso em: 07 Junho 2024.

ENERGIA, E. Valor de tarifas e serviços, 2024. Disponível em: <<https://go.equatorialenergia.com.br/valor-de-tarifas-e-servicos/#residencial-normal>>. Acesso em: 05 Junho 2024.

EPE. **Balanço Energético Nacional 2022**. 2022a. Disponível em: <<https://www.epe.gov.br/sites-pt/publicacoes-dados-abertos/publicacoes/PublicacoesArquivos/publicacao-675/topico-638/BEN2022.pdf>>. Acesso em: 07 Junho 2024.

EPE. **Nota Técnica sobre Hidrogênio Cinza**. 2022b. Disponível em: <https://www.epe.gov.br/sites-pt/publicacoes-dados-abertos/publicacoes/PublicacoesArquivos/publicacao-654/NT%20Hidrog%C3%AAnio%20Cinza.pdf>. Acesso em: 31 Junho 2024.

EPURE. **European renewable ethanol – key figures 2022**. 2022. Disponível em: <[https://www.epure.org/wp-content/uploads/2023/09/230829-DEF-PR-European-renewable-ethanol-Key-figures-2022\\_WEB.pdf](https://www.epure.org/wp-content/uploads/2023/09/230829-DEF-PR-European-renewable-ethanol-Key-figures-2022_WEB.pdf)>. Acesso em: 31 Junho 2024.

ESTEVES, E. M. M. et al. Greenhouse gas emissions related to biodiesel from traditional soybean farming compared to integrated crop-livestock systems. **Journal of Cleaner Production**, 2018.

FAO. **Biofuels and food security**. 2021. Disponível em: <<https://www.fao.org/3/cc3751en/cc3751en.pdf>>. Acesso em: 07 Junho 2024.

FERNANDES, G. et al. **Panorama dos desafios do hidrogênio verde no Brasil**. 2023.

FERNANDES, G. et al. **Panorama dos desafios do hidrogênio verde no Brasil**, 2023.

GAGLIO, M. et al. Life cycle assessment of maize-germ oil production and the use of bioenergy to mitigate environmental impacts: A gate-to-gate case study. **Resources**, 2019.

GOES, T.; MARRA, R. Biocombustíveis: uma alternativa para o mundo, uma oportunidade para o Brasil. **ALICE EMBRAPA**, 2008.

GUTIÉRREZ-ANTONIO, C. . G.-C. F. I.; DE LIRA-FLORES, J. A.; HERNÁNDEZ, S. A review on the production processes of renewable jet fuel. **Renewable and Sustainable Energy Reviews**, 2017.

IATA. **O Valor do Transporte Aéreo no Brasil**. International Air Transport Association. p. 38. 2019. Disponível em: <<https://www.iata.org/contentassets/bc041f5b6b96476a80db109f220f8904/brazil-o-valor-do-transporte-aereo.pdf>>. Acesso em: 13 Fevereiro 2024.

IATA. **CORSIA handbook**. International Air Transport Association. 2024. Disponível em: <https://www.iata.org/contentassets/fb745460050c48089597a3ef1b9fe7a8/corsia-handbook.pdf>. Acesso em: 31 Junho 2024.

IBGE. **Produção Agrícola Municipal - Culturas Temporárias e Permanentes 2022**. Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística. 2022.

IBGE. Destaques - Censo 2022. **IBGE**, 2022a. Disponível em: <<https://censo2022.ibge.gov.br/panorama/>>. Acesso em: 20 Maio 2024.

IBGE. DTB - Divisão Territorial Brasileira. **IBGE**, 2022b. Disponível em: <<https://www.ibge.gov.br/geociencias/organizacao-do-territorio/estrutura-territorial/23701-divisao-territorial-brasileira.html>>. Acesso em: 10 Maio 2024.

IBGE. **Bases cartográficas contínuas - Brasil**. 2023. Disponível em: <<https://www.ibge.gov.br/geociencias/cartas-e-mapas/bases-cartograficas-continuas.html>>. Acesso em: 10 Maio 2024.

ICAO. **Sustainability criteria**. International Civil Aviation Organization (ICAO). 2022. Disponível em: [https://www.icao.int/environmental-protection/CORSIA/Documents/CORSIA\\_Eligible\\_Fuels/ICAO%20document%2005%20-%20Sustainability%20Criteria%20-%20November%202022.pdf](https://www.icao.int/environmental-protection/CORSIA/Documents/CORSIA_Eligible_Fuels/ICAO%20document%2005%20-%20Sustainability%20Criteria%20-%20November%202022.pdf). Acesso em: 05 Maio 2024.

ICAO. **Production Facilities for Sustainable Aviation Fuel (SAF)**. 2024. Disponível em: <<https://www.icao.int/environmental-protection/SAF/Pages/Production-Facilities.aspx>>. Acesso em: 15 Maio 2024.

IEA. **Data and statistics 2021**. International Energy Agency. 2021. Disponível em: <<https://www.iea.org/data-and-statistics/data->

browser?country=WORLD&fuel=Energy%20supply&indicator=TESbySource>.  
Acesso em: 03 Fevereiro 2024.

IPCC. **Climate Change 2022: Impacts, Adaptation, and Vulnerability**. 2022. Disponível em: <[https://report.ipcc.ch/ar6/wg2/IPCC\\_AR6\\_WGII\\_FullReport.pdf](https://report.ipcc.ch/ar6/wg2/IPCC_AR6_WGII_FullReport.pdf)>. Acesso em: 07 Junho 2024.

IRENA. **Reaching Zero with Biojet Fuels**. 2021. Disponível em: <[https://www.irena.org/-/media/Files/IRENA/Agency/Publication/2021/Jul/IRENA\\_Reaching\\_Zero\\_Biojet\\_Fuels\\_2021.pdf](https://www.irena.org/-/media/Files/IRENA/Agency/Publication/2021/Jul/IRENA_Reaching_Zero_Biojet_Fuels_2021.pdf)>. Acesso em: 15 Maio 2024.

JESUS, M. D. L. B. D.; FREITAS, J. C. D. O. Sistema de rotação de culturas milho e soja marinha, 2018.

KARATZOS, S.; MCMILLAN, J. D.; SADDLER, J. N. The potential and challenges of drop-in biofuels. **Relatório para IEA Bioenergy Task**, v. 39, 2014.

KEOLEIAN, G. A.; VOLK, T. A. Renewable energy from willow biomass crops: life cycle energy, environmental and economic performance. **BPTS**, v. 24, n. 5-6, p. 385-406, 2005.

KOKARE, S.; OLIVEIRA, J. P.; GODINA, R. Life cycle assessment of additive manufacturing processes: A review. **Journal of Manufacturing Systems**, v. 68, p. 536-559, 2023.

LAMNATOU, C. et al. Biogas production by means of an anaerobic-digestion plant in France: LCA of greenhouse-gas emissions and other environmental indicators. **Science of the total environment**, 2019.

LOJA COCAMAR. Óleo de milho Suavit 900ml Cocamar, 2024. Disponível em: <<https://www.lojacocamar.com.br/oleo-de-milho-suavit-900ml-cocamar/p?>>. Acesso em: 10 Maio 2024.

LÓPEZ-DÍAZ, D. C. et al. Optimal location of biorefineries considering sustainable integration with the environment. **Renewable Energy**, 2017.

MAPA. **Instrução Normativa MAPA nº 49**. Ministério da Agricultura, Pecuária e Abastecimento. 2006.

MAPBIOMAS. Região Centro-Oeste diminui alertas, mas biomas Amazônia e Pantanal crescem em desmatamento, 2022. Disponível em: <<https://brasil.mapbiomas.org/2021/07/23/regiao-centro-oeste-diminui-alertas-mas-biomas-amazonia-e-pantanal-crescem-em-desmatamento/#:~:text=%E2%80%93%20No%20Centro%2DOeste%2C%20foram,e%20o%20DF%20em%2083%25>>. Acesso em: 10 Maio 2024.

MAPBIOMAS. Downloads. **Mapbiomas**, 2024. Disponível em: <<https://brasil.mapbiomas.org/downloads/>>. Acesso em: Maio 20 2024.

MARQUEVICH, M. et al. Life cycle inventory analysis of hydrogen production by the steam-reforming process: comparison between vegetable oils and fossil fuels as feedstock. **Green Chemistry**, 2002.

MENDES, A. P. A. et al. THE OIL REFINING MARKET IN BRAZIL. **BNDES**, 2018.

MENDES, N. C.; BUENO, C.; OMETTO, A. R. Avaliação de Impacto do Ciclo de Vida: revisão dos principais métodos. **Production**, v. 26, p. 160-175, 2015.

MILANEZ, A. Y. et al. Biocombustíveis de aviação no Brasil: uma agenda de sustentabilidade. **Banco Nacional de Desenvolvimento Econômico e Social**, v. 28, n. 56, 2021.

MIRAGAYA, J. F. G. O desempenho da economia na Região Centro-Oeste, 2014.

MME. **Renovabio: Breve Resumo**. 2021. Disponível em: <[https://www.planalto.gov.br/ccivil\\_03/\\_ato2015-2018/2017/lei/113576.htm](https://www.planalto.gov.br/ccivil_03/_ato2015-2018/2017/lei/113576.htm)>. Acesso em: 07 jul. 2024.

MONTEIRO, L. P. C.; DA LUZ, C. C.; MAINIER, F. B. Comparação de oleaginosas para a produção de biodiesel. **Engevista**, v. 17, n. 2, 2015.

MOREIRA, J. et al. Viabilidade econômica do modal de sistema de produção de eucalipto para energia, na região médio-norte de Mato Grosso., 2021.

NESTE. **About Neste**. 2024. Disponível em: <<https://www.neste.com/about-neste#who-we-are>>. Acesso em: 15 maio 2024.

NEULING, U.; KALTSCHMITT, M. Conversion routes for production of biokerosene—status and assessment. **Biomass Conversion and Biorefinery**, 2015.

NEULING, U.; KALTSCHMITT, M. Techno-economic and environmental analysis of aviation biofuels. **Fuel Processing**, 2018.

NG, K. S.; FAROOQ, D.; YANG, A. Global biorenewable development strategies for sustainable aviation fuel production. **Renewable and Sustainable Energy Reviews**, v. 150, 2021.

NOVA CANA. Etanol de milho se torna mais rentável que o de cana, mas ainda tem desafios pela frente, 2022. Disponível em: <<https://www.novacana.com/noticias/etanol-milho-mais-rentavel-cana-ainda-desafios-frente-201022>>. Acesso em: 10 Maio 2024.

NOVA CANA. Produção de etanol de milho cresce 800% em cinco anos e atrai empresas, 2023a. Disponível em: <<https://www.novacana.com/noticias/producao-etanol-milho-cresce-800-cinco-anos-atrai-empresas-270123>>. Acesso em: 15 Maio 2024.

NOVA CANA. Raízen recebe certificação para produção de biocombustível de aviação. **Nova Cana**, 2023b. Disponível em: <<https://www.novacana.com/noticias/raizen-recebe-certificacao-producao-biocombustivel-aviacao-210823>>. Acesso em: 15 Maio 2024.

NOVA CANA. Acelen exportar SAF até 2027, diretor cadeia renováveis, 2024. Disponível em: <<https://www.novacana.com/noticias/acelen-exportar-saf-2027-diretor-cadeia-renovaveis-270524>>. Acesso em: 15 Maio 2024.

NOVA CANA. Propriedades físico-químicas do etanol. 2024., 2024. Disponível em: <<https://www.novacana.com/noticias/propriedades-fisico-quimicas>>. Acesso em: 05 Maio 2024.

NUNES, F. Comercialização de milho. **Agrolink**, 2020. Disponível em: <[https://www.agrolink.com.br/culturas/milho/informacoes-da-cultura/informacoes-gerais/comercializacao\\_361415.html](https://www.agrolink.com.br/culturas/milho/informacoes-da-cultura/informacoes-gerais/comercializacao_361415.html)>. Acesso em: 10 fevereiro 2024.

PAES, M. C. D. **Inovação para sistemas integrados de produção**: trabalhos apresentados. CONGRESSO NACIONAL DE MILHO E SORGO, 26., SIMPÓSIO BRASILEIRO SOBRE A LAGARTA-DO-CARTUCHO, SPODOPTERA FRUGIPERDA, 2., SIMPÓSIO SOBRE COLLETOTRICHUM GRAMINICOLA. 2006.

PERES, S. et al. Uso dos coprodutos da indústria do biodiesel para produção de bioquerosene de aviação. **Brazilian Journal of Development**, 2021.

PERISSÉ, J. B. Evolução do refino de petróleo no Brasil. **Dissertação de Mestrado na Pós-Graduação em Engenharia Química**, 2007.

PETTERSSON, K.; HARVEY, S. Optimal location of biorefineries, 2013.

PIEKARSKI, C. M. et al. Métodos de avaliação de impactos do ciclo de vida: uma discussão para adoção de métodos nas especificidades brasileiras. **Revista Gestão Industrial**, 2012.

PNUD. **Desenvolvimento humano nas macrorregiões brasileiras: 2016**. PROGRAMA DAS NAÇÕES UNIDAS PARA O DESENVOLVIMENTO. 2016.

PROQR. **Análise econômica de diferentes rotas de produção de SAF**. 2022.

RAÍZEN. Combustível Sustentável de Aviação (SAF): o que falta para a ideia decolar no Brasil?<<https://www.raizen.com.br/blog/saf-combustivel>>, 2023. Disponível em: <<https://www.raizen.com.br/blog/saf-combustivel>>. Acesso em: 10 Maio 2024.

RAMÍREZ, P. K. S. Análise de métodos de alocação utilizados em avaliação do ciclo de vida. **Tese de Doutorado. Universidade Federal de Santa Catarina, Centro Tecnológico. Programa de Pós-Graduação em Engenharia Ambiental.**, 2009.

RAMOS, L. H. M. GranBio tem novo prejuízo, mas inicia aposta em bioquerosene de aviação. **Valor econômico**, 2022. Disponível em: <<https://valor.globo.com/agronegocios/noticia/2022/03/30/granbio-tem-novo-prejuizo-mas-inicia-aposta-em-bioquerosene-de-aviacao.ghtml>>. Acesso em: 15 Maio 2024.

RAMOS, N. P.; MATSUURA, M. D. S.; BARRANTES, L. D. S. Avaliação do desempenho ambiental da produção de eucalipto para energia no estado de Goiás. **CONGRESSO BRASILEIRO SOBRE GESTÃO DO CICLO DE VIDA**, 2018.

RASHEDI, A.; KHANAM, T. Life cycle assessment of most widely adopted solar photovoltaic energy technologies by mid-point and end-point indicators of ReCiPe method. **Environmental Science and Pollution Research**, v. 27, 2020.

REGITANO-DARCE, M. A. B.; SPOTO, M. H. F.; CASTELLUCCI, A. C. L. Processamento e industrialização do milho para alimentação humana. **Visão Agrícola**, v. 13, p. 138-140, 2015.

RIBEIRO, H. Impactos de exploração do petróleo na saúde humana. *Revista USP*, n. 95, p. 61-71, 2012.

RIBEIRO, J. L. T. M. Brasil é apenas um espectador no avanço dos biocombustíveis para aviões. **Gazeta do Povo**, 2019. Disponível em: <<https://www.gazetadopovo.com.br/economia/brasil-e-apenas-um-espectador-no-avanco-dos-biocombustiveis-para-avioes-1u4ee5hd6dx6x5s6a4brzc1oe/>>. Acesso em: 15 Maio 2024.

RODRIGUES, M. Aeroporto de Brasília é o terceiro do país com maior movimentação internacional. **G1**, 2024. Disponível em: <<https://g1.globo.com/df/distrito-federal/noticia/2024/03/07/aeroporto-de-brasilia-e-o-terceiro-do-pais-com-maior-movimentacao-internacional.ghtml>>. Acesso em: 10 Maio 2024.

SANTOS, F. M.; SANTOS, F. A. Combustível "hidrogênio". **Millenium**, 2005.

SENADO. **Projeto de Lei nº 528, de 2020**. 2020.

SHAHRIAR, M. F.; KHANAL, A. The current techno-economic, environmental, policy status and perspectives of sustainable aviation fuel (SAF), 2022.

SIDRA. **Tabela 1612: Área plantada de milho, produção e rendimento médio**. Sistema IBGE de Recuperação Automática. 2022.

SILVA, J. S.; AFONSO, A. D. L.; DONZELLES, S. M. L. Secagem e Secadores. *Agricultura RS*. 2018.

- SILVA, L. R. S. et al. O ciclo de vida do produto e sua importância para gestão estratégica. **Revista Pesquisa e Ação**, v. 7, p. 95-114, 2021.
- SILVA, M. A. et al. Sistema de plantio direto e rotação de culturas no Cerrado. **Research, Society and Development**, v. 11, n. 13.
- SOARES, P.; CENAMO, M. C. Esquema de redução de emissões da Aviação Civil Internacional (CORSA/ICO): desafios e oportunidades. **IDESAM**, 2018.
- STATISTA. US Share Ethanol Production by Feedstock Type, 2024. Disponível em: <<https://www.statista.com/statistics/1106316/us-share-ethanol-production-by-feedstock-type/>>. Acesso em: 10 Junho 2024.
- STRAZZI, S. Derivados do milho são usados em mais de 150 diferentes produtos industriais. **Visão Agrícola**, v. 13, n. 9, p. 146-150, 2015.
- STRAZZI, S. Derivados do milho são usados em mais de 150 diferentes produtos industriais. **Visão Agrícola**, v. 13, n. 9, p. 146-150, 2015.
- UNFCCC. **Paris Agreement - First NDC**. Convenção-Quadro das Nações Unidas sobre a Mudança do Clima. 2022.
- VELJKOVIĆ, V. B. et al. Biodiesel production from corn oil: A review. **Renewable and Sustainable Energy Reviews**, v. 91, 2018.
- VIBRA. Vibra Energy recebe autorização para exportar SAF até 2027. **Vibra**, 2024. Disponível em: <<https://www.vibraenergia.com.br/sites/default/files/2022-04/release-vibra-BBF-SAF.pdf>>. Acesso em: 15 Maio 2024.
- VIDAL, M. D. F. Produção e uso de biocombustíveis no Brasil. **Banco do Nordeste**, 2019.
- VIDAL, M. D. F. Produção e mercado de etanol, 2020.
- VISCONTI, F.; SANTOS, J. L. **Região Centro-Oeste: desafios e perspectivas**. 2014.
- WHYTE, R. **SGP BioEnergy Golden City Biorefinery, Panama**. 2023.
- WITHERS, P. J. et al. Agriculture and eutrophication: where do we go from here? **Sustainability**, 2014.
- WWF. **Potencial de produção sustentável de biocombustíveis**. 2021. Disponível em: <[https://wwfbr.awsassets.panda.org/downloads/potencial\\_producao\\_sustentavel\\_biocombustiveis\\_english\\_web.pdf](https://wwfbr.awsassets.panda.org/downloads/potencial_producao_sustentavel_biocombustiveis_english_web.pdf)>. Acesso em: 07 Junho 2024.

ZERSSA, G. W.; HAILEMARIAM, M.; TADELE, K. T. Improving the Sustainability of Agriculture: Challenges and Opportunities, 2023.

ZHAO, P.; TAMADON, A.; PONS, D. Life cycle Assessment of hydrogen production via natural gas steam reforming vs. biomass gasification, 2022.



## 7. APÊNDICE

### 7.1. APÊNDICE A – Dados de entrada no SimaPro para o inventário do trabalho.

**Tabela 26** – Inventário construído para a etapa de cultivo em períodos de safra e safrinha para a produção de 1 MJ de BioQAV.

<b>Plantio Primeira Safra</b>			
<b>Entrada</b>	<b>Unidade</b>	<b>Rota HEFA</b>	<b>Rota ATJ</b>
Limestone, crushed, for mill {GLO}  market for   Alloc Def, U	g	8,01	15,39
Gypsum, mineral {GLO}  market for   Alloc Def, U	g	4,58	8,80
Maize seed, at farm {GLO}  market for   Alloc Def, U	g	0,82	1,58
Nitrogen fertiliser, as N {GLO}  market for   Alloc Def, U	g	0,27	0,53
Phosphate fertiliser, as P2O5 {GLO}  market for   Alloc Def, U	g	0,96	1,85
Potassium fertiliser, as K2O {GLO}  market for   Alloc Def, U	g	0,55	1,06
Pesticide, unspecified {GLO}  market for   Alloc Def, U	g	0,01	0,01
Diesel {RoW}  market for   Alloc Def, U	g	1,47	2,81
Natural gas, low pressure {RoW}  market for   Alloc Def, U	l	0,70	1,35
Wood chips, dry, measured as dry mass {RoW}  market for   Alloc Def, U	l	0,01	0,02
<b>Saídas</b>	<b>Unidade</b>	<b>Rota HEFA</b>	<b>Rota ATJ</b>
Milho SAFRA	g	80,15	153,94
<b>Plantio Safrinha</b>			
<b>Entrada</b>	<b>Unidade</b>	<b>Rota HEFA</b>	<b>Rota ATJ</b>
Limestone, crushed, for mill {GLO}  market for   Alloc Def, U	g	5,74	11,02
Gypsum, mineral {GLO}  market for   Alloc Def, U	g	2,30	4,41
Maize seed, at farm {GLO}  market for   Alloc Def, U	g	0,25	0,48
Grass seed, organic, for sowing {GLO}  market for   Alloc Def, U	g	0,03	0,07
Nitrogen fertiliser, as N {GLO}  market for   Alloc Def, U	g	1,65	3,17
Pesticide, unspecified {GLO}  market for   Alloc Def, U	g	0,05	0,04
Diesel {RoW}  market for   Alloc Def, U	g	0,44	0,85

Natural gas, high pressure {RoW}  market for   Alloc Def, U	1	0,21	0,41
Wood chips, dry, measured as dry mass {RoW}  market for   Alloc Def, U	1	0,00	0,01
<b>Saídas</b>	<b>Unidade</b>	<b>Rota HEFA</b>	<b>Rota ATJ</b>
Milho SAFRINHA	g	80,15	153,94

Tabela 27 - Inventário construído para a etapa de extração e produção do óleo de milho bruto e conversão em BioQAV HEFA para a produção de 1 MJ de BioQAV.

<b>Extração do Óleo de Milho Bruto</b>			
<b>Entradas</b>	<b>Unidade</b>	<b>Quantidade</b>	
Milho	g	80,15	
Electricity, high voltage {BR}  market for   Alloc Def, U	wh	5,75	
Heat, central or small-scale, natural gas, Jakobsberg {GLO}  market for   Alloc Def, U	wh	19,57	
<b>Saídas</b>	<b>Unidade</b>	<b>Quantidade</b>	
Óleo de milho bruto	g	43,88	
<b>Produção do Óleo de Milho Refinado</b>			
<b>Entradas</b>	<b>Unidade</b>	<b>Quantidade</b>	
Óleo de milho bruto	g	43,88	
Electricity, high voltage {BR}  market for   Alloc Def, U	wh	1,50	
Heat, central or small-scale, natural gas, Jakobsberg {GLO}  market for   Alloc Def, U	wh	6,58	
Phosphoric acid, industrial grade, without water, in 85% solution state {GLO}  market for   Alloc Def, U	g	0,04	
Sodium hydroxide, without water, in 50% solution state {GLO}  market for   Alloc Def, U	g	0,06	
Clay {GLO}  market for   Alloc Def, U	g	0,07	
<b>Saídas</b>	<b>Unidade</b>	<b>Quantidade</b>	
Óleo de milho refinado	MJ	1,17	
<b>Produção do BioQAV-HEFA</b>			
<b>Entradas</b>	<b>Unidade</b>	<b>Quantidade</b>	
Óleo de milho refinado	MJ	1,17	
Natural gas, liquefied {GLO}  market for   Alloc Def, U	MJ	0,18	
Electricity, high voltage {BR}  market for   Alloc Def, U	MJ	0,005	
Hidrogênio	MJ	0,15	
<b>Saídas</b>	<b>Unidade</b>	<b>Quantidade</b>	
BioQAV HEFA	MJ	1	

Tabela 28 - Inventário construído para a etapa de produção do etanol de milho e conversão em BioQAV ATJ para a produção de 1 MJ de BioQAV.

<b>Produção do Etanol de Milho</b>		
<b>Entradas</b>	<b>Unidade</b>	<b>Quantidade</b>
Wood chips and particles, willow {GLO}  market for   Alloc Def, U	g	71,43
Milho	g	153,94
<b>Saídas</b>	<b>Unidade</b>	<b>Quantidade</b>
Etanol hidratado	MJ	1,49
<b>Produção do SPK-ATJ</b>		
<b>Entradas</b>	<b>Unidade</b>	<b>Quantidade</b>
Etanol hidratado	MJ	1.49
Electricity, high voltage {BR}  market for   Alloc Def, U	MJ	0,03
Hidrogênio, gasoso, a partir de GN	MJ	0,08
<b>Saídas</b>	<b>Unidade</b>	<b>Quantidade</b>
BioQAV-ATJ	MJ	1

Tabela 29 - Inventário construído para a produção de Hidrogênio Fóssil

<b>Produção de Hidrogênio</b>		
<b>Entradas</b>	<b>Unidade</b>	<b>Quantidade</b>
Natural gas, high pressure {RoW}  market for   Alloc Def, U	m <sup>3</sup>	0,025
Steam, in chemical industry {RoW}  production   Alloc Def, U	kg	0,133
Electricity, high voltage {BR}  market for   Alloc Def, U	MJ	0,008
<b>Saídas</b>	<b>Unidade</b>	<b>Quantidade</b>
Hidrogênio, gasoso, a partir de GN	MJ	1
<b>Saídas para o ar</b>	<b>Unidade</b>	<b>Quantidade</b>
Carbon dioxide	kg	0,053
Carbon monoxide	g	0,012
Methane	g	0,001
Nitrogen oxides	g	0,0230
Particulates, < 10 um	g	0,4500
Sulfur dioxide	g	0,0070
Hydrocarbons, unspecified	g	0,0150
Water	kg	0,1330