

UNIVERSIDADE DE SÃO PAULO
ESCOLA DE ENGENHARIA DE SÃO CARLOS
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA DE PRODUÇÃO

LEONARDO SEIJI SATO PRADO

**Engenharia do Ciclo de Vida na produção de álcool a partir da
cana-de-açúcar: uma revisão bibliográfica sistemática**

São Carlos
2024

LEONARDO SEIJI SATO PRADO

**Engenharia do Ciclo de vida na produção de álcool a partir da
cana-de-açúcar: uma revisão bibliográfica sistemática**

Monografia apresentada ao Curso de
Engenharia de Produção, da Escola de
Engenharia de São Carlos da Universidade de
São Paulo, como parte dos requisitos para
obtenção do título de Engenheiro de Produção.

Orientador: Prof. Dr. Lucas Gabriel Zanon

São Carlos

2024

Dedico este trabalho à minha mãe, que me amou,
me ajudou, me apoiou, me incentivou e acreditou
em mim, mesmo em meio a tantas dificuldades.

AGRADECIMENTOS

À Deus, que me carregou pelos dias mais difíceis e que nunca me permitiu desistir dos meus sonhos.

Aos meus pais, Djalma e Cristina, que me ajudaram em todos os momentos em que precisei.

Às minhas irmãs, Letícia e Lívia que às vezes mesmo sem saber, me deram forças para continuar. Aos meus tios, tias e avós, que sempre me incentivaram.

Aos meus amigos da república Open Beach e república Babilônia, por me proporcionarem meus melhores anos em São Carlos.

Aos professores Lucas Gabriel Zanon e Aldo Roberto Ometto. O primeiro, por me motivar e me orientar com tanta sabedoria e paciência. O segundo, por ter me feito interessar pelo tema do meu trabalho e por ter me inspirado tanto, mesmo que num contexto virtual, por causa da pandemia. Também agradeço à Ana Carolina Bertassini, que juntamente com os dois professores, aceitou compor a banca deste trabalho.

Aos meus amigos Raphael Hoshijima e Jéssica Ribeiro, por todo apoio que me deram neste trabalho, sou muito grato a vocês.

Ao pessoal que dividiu apartamento comigo nos condomínios parque das flores, parque das bromélias e no edifício Riviera, pelos bons momentos morando junto.

Ao Renan Sasaki, Vinicius Shoji Takehara, Luis Fernando dos Anjos, Luísa Basile e Rafael Rosolen, pela amizade que resistiu à distância.

A todos os meus familiares, pelo apoio e incentivo.

A todos os meus amigos de Bastos e Penápolis.

A todos os meus colegas do CAASO e UFSCar que de alguma forma participaram dessa minha jornada de crescimento em São Carlos.

AUTORIZO A REPRODUÇÃO TOTAL OU PARCIAL DESTE TRABALHO,
POR QUALQUER MEIO CONVENCIONAL OU ELETRÔNICO, PARA FINS
DE ESTUDO E PESQUISA, DESDE QUE CITADA A FONTE.

Ficha catalográfica elaborada pela Biblioteca Prof. Dr. Sérgio Rodrigues Fontes da
EESC/USP com os dados inseridos pelo(a) autor(a).

P896e Prado, Leonardo Seiji Sato
Engenharia do ciclo de vida na produção de
álcool a partir da cana-de-açúcar: uma revisão
bibliográfica sistemática / Leonardo Seiji Sato Prado;
orientador Lucas Gabriel Zanon. São Carlos, 2024.

Monografia (Graduação em Engenharia de
Produção) -- Escola de Engenharia de São Carlos da
Universidade de São Paulo, 2024.

1. Sustentabilidade. . 2. Cana-de-Açúcar. 3.
Aspectos Ambientais. 4. Impactos Ambientais. 5. Ciclo
de Vida. 6. LCA. 7. LCE. I. Título.

FOLHA DE APROVAÇÃO

Candidato: Leonardo Seiji Sato Prado
Título do TCC: Engenharia do Ciclo de vida na produção de etanol a partir da cana-de-açúcar: uma revisão bibliográfica sistemática
Data de defesa: 27/06/2024

Comissão Julgadora	Resultado
Professor Doutor Lucas Gabriel Zanon (orientador)	Aprovado
Instituição: EESC - SEP	
Professor Associado Aldo Roberto Ometto	Aprovado
Instituição: EESC – SEP	
Pesquisadora Ana Carolina Bertassini	Aprovado
Instituição: Chalmers University of Technology - ESA	

Presidente da Banca: **Professor Doutor Lucas Gabriel Zanon**

RESUMO

Com a crescente preocupação global em relação às mudanças climáticas, a procura por soluções sustentáveis vem se intensificando. Nesse contexto, a produção de etanol a partir da cana-de-açúcar há muitos anos prova-se como uma alternativa viável para a substituição de combustíveis fósseis em automóveis a combustão. A engenharia do ciclo de vida se preocupa em analisar todo o ciclo de vida de um produto para desenvolver soluções considerando toda a cadeia, pensando na sustentabilidade econômica, social e ambiental de todo o processo. Essas soluções podem fazer com que o etanol se torne cada vez mais competitivo ambientalmente e economicamente. Este estudo apresenta uma revisão bibliográfica sistemática sobre a produção de etanol a partir da cana-de-açúcar, com foco na aplicação da engenharia do ciclo de vida (LCE) para identificar os principais aspectos ambientais referentes a esta cadeia produtiva. Este trabalho analisa artigos dos últimos 10 anos referentes a esse tema, investigando os principais aspectos ambientais envolvidos na produção de etanol, abrangendo desde a preparação do solo até a utilização final do etanol como combustível. Além de identificar os principais aspectos ambientais, o texto analisa diferentes avaliações do ciclo de vida (LCA) deste setor e reflete sobre as principais práticas de minimização dos impactos ambientais negativos gerados por esses aspectos. Após passar pelos aspectos, explicita-se os principais impactos ambientais relacionados a cada um deles e destaca-se alguns pontos de atenção relacionados à cadeia de produção. A revisão evidencia a importância de práticas agrícolas sustentáveis e a integração de sistemas de bioenergia para otimizar a utilização de recursos e minimizar impactos ambientais. A análise também reflete sobre o desenvolvimento de coprodutos, como bioplásticos e combustíveis sustentáveis para a aviação e sobre a dificuldade de considerá-los nas avaliações do ciclo de vida. Este estudo contribui para a compreensão dos desafios e oportunidades na produção sustentável de etanol, alinhando-se com os Objetivos de Desenvolvimento Sustentável da ONU.

PALAVRAS-CHAVE: LCE. LCA. Sustentabilidade. Cana-de-açúcar. Aspectos Ambientais

ABSTRACT

With the growing global concern regarding climate change, the search for sustainable solutions has been intensifying. In this context, the production of ethanol from sugarcane has been proven as a viable alternative to the replacement of fossil fuels in combustion vehicles. Life cycle engineering is concerned with analyzing the entire life cycle of a product to develop solutions considering the entire chain, focusing on the economic, social, and environmental sustainability of the entire process. These solutions can make ethanol increasingly competitive both environmentally and economically. This study presents a systematic literature review on the production of ethanol from sugarcane, focusing on the application of life cycle engineering (LCE) to identify the main environmental aspects related to this production chain. The following work analyzes articles from the last 10 years related to this topic, investigating the main environmental aspects involved in ethanol production, covering everything from soil preparation to the final use of ethanol as fuel. In addition to identifying the main environmental aspects, the text analyzes different life cycle assessments (LCA) of this sector and reflects on the main practices for minimizing the negative environmental impacts generated by these aspects. After addressing these aspects, the primary environmental impacts associated with each are explained, and some key points of attention related to the production chain are highlighted. The review highlights the importance of sustainable agricultural practices and the integration of bioenergy systems to optimize resource use and minimize environmental impacts. The analysis also reflects on the development of co-products, such as bioplastics and sustainable aviation fuels, and the difficulty of considering them in life cycle assessments. This study contributes to understanding the challenges and opportunities in the sustainable production of ethanol, aligning with the UN's Sustainable Development Goals.

KEYWORDS: LCE. LCA. Sustainability. Sugarcane. Environmental Aspects

Lista de Ilustrações

Figura 1- Guarda-chuva da LCE.....	15
Figura 2 - Framework para condução da revisão bibliográfica sistemática.....	20
Figura 3 - Nuvem de Palavras.....	26
Figura 4 - Número de publicações ao longo dos anos.....	27
Figura 5 - Diagrama dos processos e aspectos ambientais.....	28
Figura 6 - Frequência dos processos e aspectos ambientais.....	33

Lista de Tabelas

Tabela 1 - Artigos a serem analisados.....	23
Tabela 2 - Processos e aspectos ambientais presentes em cada artigo.....	30

SUMÁRIO

1. INTRODUÇÃO.....	12
1.1. Justificativa.....	14
1.2. Objetivo.....	15
1.2.1. Objetivos Específicos.....	15
2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA.....	16
2.1. Engenharia do Ciclo de Vida.....	16
2.1.1 Definição.....	16
2.1.2 Avaliação do Ciclo de Vida.....	17
2.1.3. Aspectos ambientais.....	17
2.2 Setor sucroalcooleiro.....	18
2.3 Avaliação do ciclo de vida na produção de etanol a partir da cana.....	19
3. METODOLOGIA.....	21
3.1 Conceitos de pesquisa.....	21
3.2 Questão de pesquisa.....	23
3.3 Base de dados e string de busca.....	23
4. RESULTADOS E DISCUSSÃO.....	25
4.1 Resultados iniciais.....	25
4.1.1 Resultados após filtro.....	25
4.1.2 Conteúdo da análise.....	26
4.1.3 Nuvem de palavras.....	27
4.1.4 Número de publicações ao longo dos anos.....	27
4.1.5 Diagrama dos processos e aspectos ambientais.....	31
4.1.6 Aspectos ambientais presentes em cada artigo.....	31
4.1.7 Gráfico de frequência dos processos e aspectos ambientais.....	36
4.2 Discussão.....	36
4.2.1 Considerações Gerais.....	36
4.2.2 Plantação de cana-de-açúcar.....	38
4.2.3 Mudança no uso da terra.....	39
4.2.4 Preparação do solo e aplicações químicas.....	40
4.2.5 Emissões de N ₂ O.....	41
4.2.6 Colheita.....	41
4.2.7 Uso de água.....	42
4.2.8 Emissão de resíduos líquidos.....	43
4.2.9 Produção de Etanol e uso de insumos industriais.....	44
4.2.10 Geração de coprodutos e subprodutos.....	44
4.2.11 Transporte da cana e distribuição de etanol.....	46
4.2.12 Uso de etanol combustível.....	46
4.2.13 Emissão de gases de efeito estufa.....	46
4.2.14 Atuação da engenharia do ciclo de vida na redução de impactos	

ambientais.....	47
4.2.15 Oportunidades.....	47
5. CONCLUSÃO.....	49
REFERÊNCIAS.....	50
Apêndice A - Tabelas com dados detalhados sobre o setor sucroalcooleiro brasileiro.....	56
Apêndice B - Resultados da busca de artigos na base de dados Scopus.....	60
Apêndice C - 60 Palavras mais frequentes.....	61

1. INTRODUÇÃO

De acordo com Hauschild, Jeswiet e Alting (2005), as soluções ambientais relacionadas aos produtos passaram por transformações durante o tempo. Entre as décadas de 60 e 70 as empresas desenvolviam tratamentos para impactos ambientais já existentes, além de soluções popularmente conhecidas como soluções de “fim do tubo”, que visavam apenas atenuar a contaminação causada por resíduos logo antes do seu descarte. Já nas décadas de 1980 e 1990, a ecoeficiência tornou-se palavra de ordem e as soluções caracterizaram-se pelo refinamento e redesenho dos produtos existentes fazendo com que a sustentabilidade e a ecologia industrial entrassem no léxico ambiental com o foco principal na identificação de oportunidades para reduzir resíduos e poluição.

A partir da década de 90, as empresas começaram a pensar na responsabilidade ambiental relacionada ao ciclo de vida de seus produtos, desde a extração das matérias-primas até o seu descarte. A função da engenharia do ciclo de vida dos produtos é justamente incorporar, no desenvolvimento do produto, as preocupações e parâmetros ambientais que permeiam seu ciclo de vida. (Alting, 1995)

Segundo a Política Nacional de Resíduos Sólidos (Lei 12.305/10), pode-se entender o ciclo de vida de um produto como uma representação de etapas que envolvem: o desenvolvimento do produto, a obtenção de matérias-primas e insumos, o processo produtivo, o consumo e a disposição final (Brasil, 2010).

A engenharia do ciclo de vida de produtos tem como objetivo principal integrar todas essas etapas de forma eficiente, levando em consideração aspectos técnicos, biológicos, ambientais e sociais, onde a uma abordagem eficaz de engenharia do ciclo de vida de produtos busca maximizar o desempenho e a qualidade dos produtos, otimizar os processos de produção, reduzir os custos, minimizar os impactos ambientais e melhorar a sustentabilidade, onde isso envolve uma análise detalhada de cada fase do ciclo de vida e implementação de estratégias projetadas para melhorar o desempenho global do produto (Silva, C.R.U., 2021).

Dessa forma, uma das principais considerações na engenharia do ciclo de vida dos produtos é a seleção de materiais adequados, onde os materiais utilizados em um produto têm um impacto significativo em sua durabilidade, eficiência energética, reciclabilidade e impacto ambiental geral, onde a escolha de materiais

ecológicos e de baixo impacto ambiental podem resultar em produtos mais duráveis, energeticamente eficientes e ambientalmente amigáveis (Morini, 2019).

A eficiência logística e o gerenciamento adequado da cadeia de suprimentos são elementos cruciais para garantir a entrega rápida e segura dos produtos aos consumidores, dispensando assim o desperdício e os custos associados (Farias, 2020). O estágio final do ciclo de vida de produtos é o descarte adequado, onde a engenharia do ciclo de vida de produtos busca promover práticas de descarte responsáveis. Isso inclui a adoção de métodos de reciclagem, reutilização e recuperação de materiais, bem como a minimização dos resíduos enviados para aterros sanitários. O objetivo é reduzir a pegada ambiental dos produtos e promover a economia circular.

Atualmente a busca por cenários alternativos aos combustíveis fósseis pode ser observada em todas as esferas econômicas, mas principalmente no setor de transporte, uma vez que este setor é principalmente abastecido com produtos derivados do petróleo (93%), tornando-se o setor menos renovável (Nogueira, L. A. H., *et al.*, 2020). Esse setor foi responsável pelo uso de mais de 28% da energia global e por mais de 30% das emissões de CO₂ em 2018 (U.S. Energy Information Administration, 2018).

As biorrefinarias emergiram como uma solução inovadora e sustentável para otimizar o uso da biomassa, transformando-a em produtos de alto valor agregado, de acordo com Hingsamer e Jungmeier (2018), um dos objetivos das biorrefinarias é utilizar todas as sinergias possíveis para uma produção sustentável e eficiente, com o objetivo de otimizar os benefícios econômicos, ambientais e sociais. O desenvolvimento de novos processos de produção para biocombustíveis e o crescimento do mercado de biocombustíveis, fazem com que o desenvolvimento de novas biorrefinarias integradas seja necessário.

A Avaliação do Ciclo de Vida (em inglês: *Life Cycle Engineering* ou LCA) tem sido amplamente aplicada para a avaliação da sustentabilidade da biorrefinaria, que muitas vezes é considerada inerentemente sustentável devido ao potencial de renovação da biomassa. Por outro lado, os efeitos ambientais dos sistemas de biorrefinarias relacionados a diferentes tipos de coprodução de bioenergia e bioprodutos variam principalmente de acordo com a matéria-prima, práticas agrícolas e os processos de bioconversão empregados. Em geral, em um estudo de LCA de biorrefinaria, os limites do sistema comumente definem a cadeia de

produção de biomassa e sua subsequente conversão nos produtos-alvo. (Bezergianni; Chrysikou, 2020).

A LCA permite comparar diferentes esquemas de produção integrada, fornecendo ferramentas de decisão para determinar a viabilidade e sustentabilidade de projetos em biorrefinarias. Dessa forma, ela contribui para a utilização sustentável desse tipo de instalação industrial, considerando variáveis complexas que envolvem aspectos ambientais, econômicos e sociais.

Segundo a Associação Brasileira de Normas Técnicas na norma ABNT NBR ISO 14040 (2009), a LCA coloca em foco os aspectos ambientais e os potenciais impactos ambientais, sendo que os impactos são consequências diretas dos aspectos. E essa identificação de aspectos é realizada em todo o ciclo de vida de um produto desde a aquisição das matérias-primas, produção, uso, tratamento pós-uso, reciclagem até a disposição final.

1.1. Justificativa

O setor sucroalcooleiro é um setor que há muito tempo vem se renovando, criando novas soluções, melhorando seus processos e se tornando cada vez mais sustentável tanto economicamente, quanto ambientalmente, sendo, há muito tempo, uma opção sustentável em um cenário que era dominado por combustíveis fósseis.

Com a crescente popularização dos carros elétricos como alternativa sustentável, é visível a necessidade por estudos atuais relacionados ao ciclo de vida do etanol para que se entenda como esse combustível se posiciona (socialmente, ambientalmente e economicamente) frente a esse novo concorrente. Além da necessidade de identificar as inovações e tendências relacionadas à engenharia do ciclo de vida deste setor.

A LCA emergiu como uma técnica crucial nesse contexto, pois permite identificar oportunidades para melhorar o desempenho ambiental de produtos ao longo de seus ciclos de vida. Além disso, fornece informações essenciais para tomadores de decisão na indústria e em organizações governamentais e não governamentais, facilitando o planejamento estratégico, definição de prioridades e o projeto ou reprojeto de produtos e processos (Associação Brasileira de Normas Técnicas, 2009). A LCA também contribui para a seleção de indicadores de

desempenho ambiental relevantes e técnicas de medição eficazes, promovendo um desenvolvimento mais sustentável e consciente. Dessa forma, pode-se observar a necessidade da identificação dos aspectos ambientais e seus potenciais impactos.

Além disso, o presente artigo busca explorar a produção de etanol a partir da cana-de-açúcar, identificando aspectos ambientais dessa cadeia produtiva. Este estudo também é fundamental para o cumprimento de diversos Objetivos de Desenvolvimento Sustentável (ODS) da ONU, conforme descrito abaixo:

- ODS 7 - Energia Limpa e Acessível: A produção de etanol, um biocombustível renovável, contribui para a diversificação da matriz energética, promovendo o uso de fontes de energia mais limpas e acessíveis;
- ODS 9 - Indústria, Inovação e Infraestrutura: O desenvolvimento de biorrefinarias e a inovação em processos de produção de etanol impulsionam a industrialização sustentável e fomentam a inovação tecnológica;
- ODS 13 - Ação contra a Mudança Global do Clima: A substituição de combustíveis fósseis por etanol reduz significativamente as emissões de gases de efeito estufa, contribuindo para a mitigação das mudanças climáticas.

1.2. Objetivo

O presente trabalho de conclusão de curso visa elaborar uma revisão bibliográfica sistemática para mapear os principais aspectos ambientais associados à engenharia do ciclo de vida na cadeia de produção sucroalcooleira.

1.2.1. Objetivos Específicos

- Investigar conceitos fundamentais da Engenharia do Ciclo de Vida, compreendendo seus princípios;
- Analisar a atuação da Engenharia do Ciclo de Vida na redução dos impactos ambientais ao longo do ciclo de vida dos produtos do setor sucroalcooleiro;
- Mapear os principais aspectos ambientais associados à cadeia de produção sucroalcooleira.

2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

2.1. Engenharia do Ciclo de Vida

2.1.1 Definição

De acordo com Hauschild, Jeswiet e Alting (2005), a engenharia do ciclo de vida dos produtos (em inglês: Life Cycle Engineering ou LCE) pode ser definida como uma série de atividades de engenharia que incluem a aplicação de princípios tecnológicos e científicos no projeto e fabricação de produtos, com o objetivo de proteger o meio ambiente e conservar os recursos, ao mesmo tempo que incentiva o progresso econômico, levando em consideração a necessidade de sustentabilidade e otimizando o ciclo de vida do produto, minimizando a poluição e o desperdício. Resumindo, o LCE engloba atividades de engenharia que lidam com impactos ambientais numa perspectiva do ciclo de vida do produto.

Segundo Wanyama (2003) engenharia de ciclo de vida (LCE) é uma metodologia de tomada de decisão que considera os requisitos de desempenho, ambientais e de custo durante a vida útil de um produto. Ela envolve princípios de ecodesign, manufatura ambientalmente consciente e disposição final dos produtos. A LCE também enfatiza o desenvolvimento de ferramentas e programas de computador para ajudar na sua aplicação e a necessidade de pesquisa contínua nessa área. A abordagem é aplicável a vários setores, como o automotivo, o eletrônico e o eletromecânico, e é fundamental para obter compensações entre fatores econômicos, técnicos e ambientais. Além disso, o LCE envolve equações para calcular os tempos de desmontagem, avaliação de métricas e abordagem dos impactos e desafios ambientais em diferentes setores.

Pode-se observar na figura 1 “guarda-chuva da LCE”, que esse termo é usado como um guarda-chuva para abranger diferentes temas que se relacionam com esse conceito.

Figura 1- Guarda-chuva da LCE



Fonte: Jeswiet (2003).

2.1.2 Avaliação do Ciclo de Vida

Ainda de acordo com Wanyama (*op. cit.*), a Avaliação do Ciclo de Vida (que será abreviada no texto como LCA, do inglês, *Life Cycle Assessment*) é uma das funções da Engenharia do ciclo de vida, podendo ser definida como uma ferramenta para avaliar os efeitos ambientais de um produto, processo ou sistema proposto ao longo de sua vida, sendo que todos os aspectos do ciclo de vida do produto são levados em consideração nessa avaliação. A LCA também pode ser classificada como um quadro conceitual e técnico usado para avaliar o desempenho ambiental do processo a ser analisado.

2.1.3. Aspectos ambientais

Segundo a Associação Brasileira de Normas Técnicas na norma ABNT NBR ISO 14001 (2015), aspectos ambientais são um conjunto de atividades, produtos ou serviços de uma organização que interagem com o meio ambiente como emissões, resíduos e consumo de recursos naturais. A partir dessa definição, entende-se que essas atividades, produtos ou serviços podem gerar impactos positivos ou negativos no meio ambiente, sendo de suma importância a análise e caracterização desses aspectos.

A norma acima também coloca como um de seus requisitos a determinação dos aspectos ambientais relacionados às atividades, produtos e serviços das organizações. A avaliação desses aspectos é fundamental para identificar riscos e oportunidades ambientais, permitindo que a organização tome medidas adequadas para prevenção, mitigação e melhoria contínua. A análise dos aspectos ambientais é fundamental para a identificação de impactos ambientais e o desenvolvimento de soluções efetivas. Essa abordagem sistemática contribui para a eficácia do sistema de gestão ambiental e para o alcance dos objetivos ambientais das organizações.

Entende-se que a identificação dos aspectos ambientais é um dos objetos de trabalho da LCE, que busca identificar impactos ambientais e a gerar soluções que possam reduzir os impactos ambientais negativos de todo o ciclo de vida do produto (Confederação Nacional da Indústria, 2018).

Segundo Henkels (2002), algo crucial para determinar se uma organização vai conseguir implementar de forma efetiva um sistema de gestão ambiental é a qualidade das informações coletadas na avaliação de aspectos ambientais, ou seja, a qualidade na identificação dos aspectos é fundamental para que o sistema seja implementado e assim as soluções sejam as melhores possíveis.

2.2 Setor sucroalcooleiro

Pode-se dizer que a produção de etanol combustível no Brasil está intimamente ligada ao Proálcool, um programa criado em 1975 (em plena crise do petróleo) que integrou diversos setores da sociedade Brasileira para o desenvolvimento de um novo combustível automotivo com o potencial de reduzir a dependência brasileira do petróleo.

Segundo Macedo (2007), ainda no século passado, já podíamos observar algumas inovações em relação ao início (em 1975) do ciclo de vida do etanol, como a utilização da vinhaça como fertilizante, a utilização de controle biológico nas plantações, geração de energia elétrica como co-produto, transformações genéticas da planta e colheita mecanizada.

De 2007 pra cá, pôde-se constatar que outros países seguiram o exemplo do Brasil e começaram a investir na produção de biocombustíveis. Atualmente, os

maiores produtores de etanol do mundo são os Estados Unidos, porém utilizando milho como sua principal fonte. Logo, pode-se constatar que o Brasil ainda é o maior produtor de etanol a partir da cana-de-açúcar.

O setor sucroalcooleiro refere-se à cadeia produtiva destinada à produção de açúcar e etanol. Este setor integra atividades agrícolas e industriais, abrangendo desde o cultivo até o uso dos produtos finais. Segundo Souza *et al.* (2023), a produção de etanol combustível utilizando fontes renováveis de energia é vista de maneira promissora na agenda de transição energética global e é esperado que essa transição tenha uma forte contribuição no cumprimento das metas de descarbonização acordadas pelo Brasil na 26ª Conferência das Nações Unidas sobre as Mudanças Climáticas (COP-26).

Optou-se, no cenário brasileiro, pela utilização da cana-de-açúcar como matéria prima majoritária do setor sucroalcooleiro, sendo que a safra 2023/2024 da cana-de-açúcar atingiu seu recorde na série histórica da Conab, com um total de 713, 2 milhões de toneladas, um aumento de 16,8% em relação à safra anterior (Companhia Nacional de Abastecimento - CONAB, 2024). Pode-se observar, no Apêndice A deste trabalho, as seguintes tabelas com dados detalhados do setor sucroalcooleiro:

- Tabela 1 - área, produtividade e produção de cana-de-açúcar;
- Tabela 2 - produtos da indústria sucroalcooleira - estimativa da produção de açúcar;
- Tabela 3 - estimativa da produção de etanol total a partir da cana-de-açúcar;
- Tabela 4 - estimativa da produção de etanol a partir do milho.

Sendo que, todas as tabelas são referentes às safras 2022/23 e 2023/24, contendo dados separados por Região e UF.

2.3 Avaliação do ciclo de vida na produção de etanol a partir da cana-de-açúcar

Existem inúmeras razões para a avaliação do ciclo de vida do setor sucroalcooleiro, dentre elas temos que o setor sucroalcooleiro possui o apelo de produzir um combustível a partir de um produto renovável (ao contrário de outros

tipos de combustíveis), outro ponto importante é o fato de que entende-se que a realização da LCA pode gerar melhorias nos processos produtivos do setor e além desses dois primeiros pontos, temos a possibilidade do setor sucroalcooleiro gerar outros produtos além de açúcar e álcool, contribuindo assim, ainda mais com a mudança da matriz energética. (Ometto; Hauschild e Roma, 2009).

Ainda para Ometto, Hauschild e Roma (*op. cit.*), podemos categorizar 9 aspectos ambientais do setor sucroalcooleiro para realizarmos essa avaliação, sendo eles:

- Preparação do solo;
- Plantação de cana-de-açúcar;
- Aplicações químicas (pesticidas e fertilizantes);
- Colheita;
- Processo industrial de etanol combustível;
- Cogeração de energia elétrica;
- Irrigação;
- Distribuição de etanol;
- Uso de etanol combustível em carros.

Logo, entende-se a necessidade de LCAs desse setor com a utilização de métodos diferentes e com objetivos diferentes, visto que esse é um setor muito amplo que muda constantemente.

3. METODOLOGIA

Uma revisão sistemática representa uma metodologia de pesquisa que se baseia na análise da literatura pertinente a um domínio específico. Este método provê uma síntese das evidências relacionadas a uma abordagem particular de intervenção, utilizando métodos explícitos e sistemáticos de busca, avaliação crítica e consolidação das informações selecionadas. As revisões sistemáticas desempenham um papel crucial na integração de informações provenientes de diversos estudos individuais, abordando resultados tanto conflitantes quanto concordantes. Além disso, identificam lacunas no conhecimento, contribuindo para orientar pesquisas futuras (Sampaio; Mancini, 2007).

As revisões bibliográficas são realizadas por vários motivos. Entre eles, estão fornecer uma base teórica para pesquisas futuras, compreender a extensão da pesquisa sobre um tópico de interesse ou responder a perguntas práticas sobre o que já foi pesquisado sobre determinado assunto (Okoli, 2015).

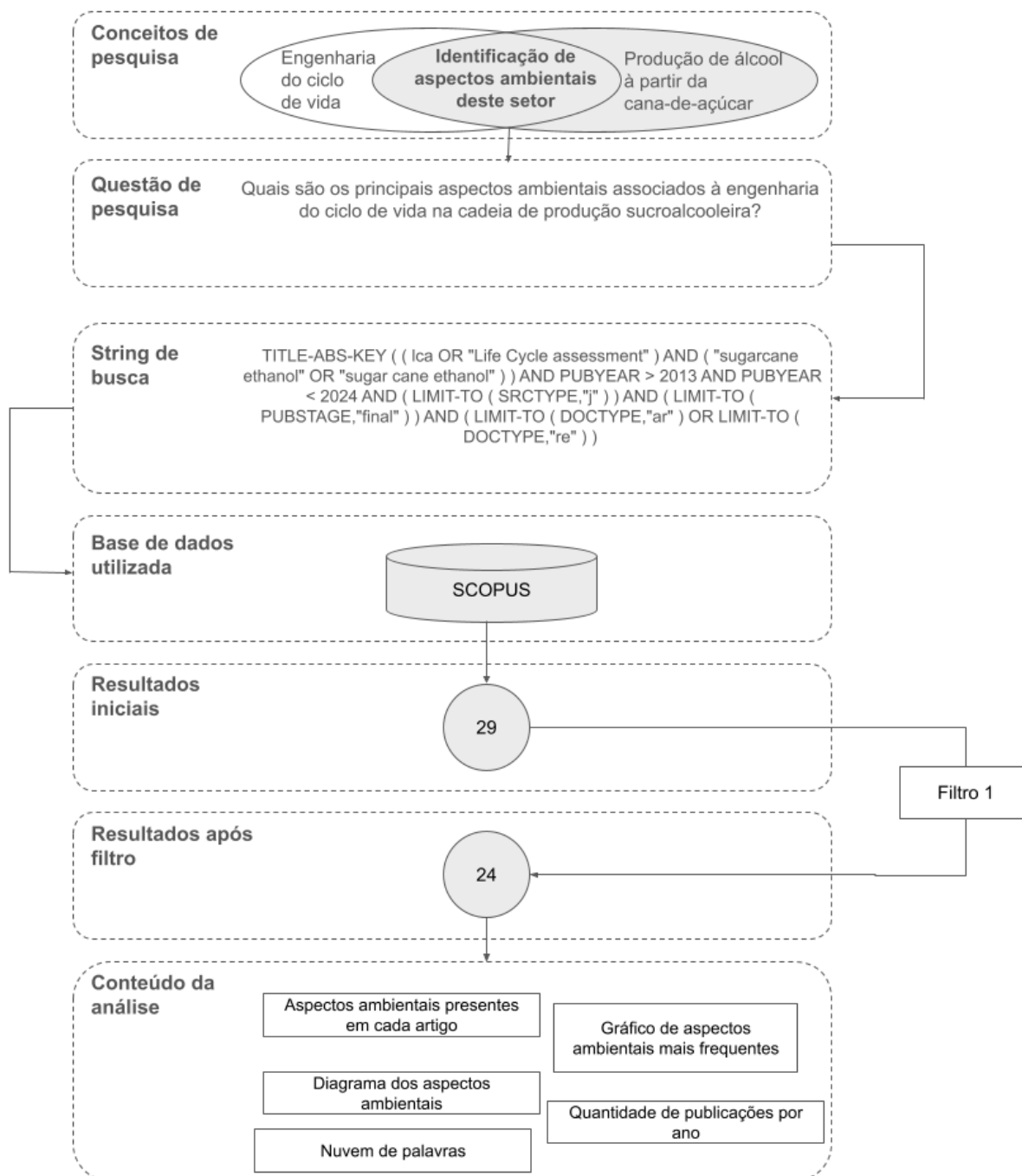
Para a realização desta revisão sistemática, utilizou-se uma adaptação do framework para revisão de literatura proposto por Zanon (2022). Essa adaptação pode ser visualizada na Figura 1 - “Framework para condução da revisão bibliográfica sistemática”.

Sendo que o filtro 1 consiste em selecionar apenas os textos que citam aspectos ambientais relacionados à cadeia de produção sucroalcooleira.

3.1 Conceitos de pesquisa

Os conceitos básicos de pesquisa para o seguinte trabalho foram detalhados conforme a seção 2 “REVISÃO BIBLIOGRÁFICA”, onde pode-se obter uma definição sobre os principais temas relacionados a este trabalho.

Figura 2 - Framework para condução da revisão bibliográfica sistemática



Fonte: adaptado de Zanon (2012).

3.2 Questão de pesquisa

Definiu-se para esse trabalho, o intento de estudar a engenharia do ciclo de vida no setor sucroalcooleiro, analisando a influência da Engenharia do Ciclo de Vida na redução de impactos ambientais. Além disso, pretende-se mapear os principais aspectos ambientais associados à cadeia de produção sucroalcooleira. Os objetivos deste trabalho foram detalhados na seção 1.2 “OBJETIVOS”. Sendo assim, definiu-se a seguinte questão de pesquisa: “quais são os principais aspectos ambientais associados à engenharia do ciclo de vida na cadeia de produção sucroalcooleira?”. Relacionando um dos vários conceitos da LCE (aspectos ambientais), com o ciclo de vida do etanol.

3.3 Base de dados e string de busca

A seguir, delimitou-se os anos de publicação dos textos integrantes do estudo (2015-2024). Nesta revisão, analisou-se artigos na plataforma online Scopus.

Definiu-se fontes primárias de busca desse trabalho conforme a seção 2 “REVISÃO BIBLIOGRÁFICA”. Para a formulação da string de busca, observou-se que a aplicação da LCA em artigos desta temática é muito frequente e que a utilização deste termo como palavra-chave facilitaria a identificação de aspectos ambientais (objetivo citado na seção 1.2 “OBJETIVOS”). Além disso, definiu-se na seção 2.1.2 “Avaliação do Ciclo de Vida” o conceito de LCA como uma das funções do LCE, por isso espera-se que os artigos analisados possuam uma visão integrada desses dois conceitos na produção de etanol a partir da cana de açúcar.

Com a intenção de obter uma gama mais abrangente de trabalhos, utilizou-se palavras-chave em inglês. Realizou-se a pesquisa no dia 24 de maio de 2024 e considerou-se apenas artigos e revisões, ambos finalizados e publicados em *journals*, com o intuito de aumentar a qualidade dos estudos selecionados.

Em seguida, pode-se observar a *string* e as palavras-chave utilizadas para a busca de artigos na base de dados Scopus.

TITLE-ABS-KEY ((lca OR "*Life Cycle assessment*") AND ("*sugarcane ethanol*" OR "*sugar cane ethanol*")) AND PUBYEAR > 2013 AND PUBYEAR < 2024 AND (LIMIT-TO (SRCTYPE,"j")) AND (LIMIT-TO (PUBSTAGE,"final")) AND (LIMIT-TO (DOCTYPE,"ar") OR LIMIT-TO (DOCTYPE,"re"))

Palavras-chave utilizadas:

- *Life Cycle assessment* ou LCA;
- *Sugarcane ethanol* ou *Sugar cane ethanol*.

4. RESULTADOS E DISCUSSÃO

4.1 Resultados iniciais

Ao realizar essa busca, obteve-se 29 resultados, os quais podem ser observados no Apêndice B deste trabalho “resultados da busca de artigos na base de dados Scopus”.

4.1.1 Resultados após filtro

Após a realização dessa busca, foram retirados desses 29 artigos, 5 que não citavam aspectos ambientais relacionados à produção de álcool a partir da cana de açúcar, restando assim, 24 artigos para análise. Na Figura 1, “Framework para condução da revisão bibliográfica sistemática” descreveu-se essa retirada como “Filtro1”.

Sendo assim, definiu-se esses 24 artigos como o objeto de análise desta revisão bibliográfica sistemática. Na tabela 1 - Artigos a serem analisados, pode-se observar o título, os autores e o ano de publicação de cada um dos artigos selecionados.

Tabela 1 - Artigos a serem analisados

Autor(es)	Título do artigo (em inglês)	Year
(continua)		
Chum H.L.; Warner E.; Seabra J.E.A.; Macedo I.C.	<i>A comparison of commercial ethanol production systems from Brazilian sugarcane and US corn</i>	2014
Cai H.; Wang M.Q.	<i>Consideration of black carbon and primary organic carbon emissions in life-cycle analysis of Greenhouse gas emissions of vehicle systems and fuels</i>	2014
Collet P.; Lardon L.; Steyer J.-P.; Hélias A.	<i>How to take time into account in the inventory step: A selective introduction based on sensitivity analysis</i>	2014
Souza S.P.; Seabra J.E.A.	<i>Integrated production of sugarcane ethanol and soybean biodiesel: Environmental and economic implications of fossil diesel displacement*</i>	2014
Tsiropoulos I.; Faaij A.P.C.; Seabra J.E.A.; Lundquist L.; Schenker U.; Briois J.-F.; Patel M.K.	<i>Life cycle assessment of sugarcane ethanol production in India in comparison to Brazil</i>	2014
Da Silva C.R.U.; Franco H.C.J.; Junqueira T.L.; Van Oers L.; Van Der Voet E.; Seabra J.E.A.	<i>Long-term prospects for the environmental profile of advanced sugar cane ethanol</i>	2014
Souza S.P.; Gopal A.R.; Seabra J.E.A.	<i>Life cycle assessment of biofuels from an integrated Brazilian algae-sugarcane biorefinery</i>	2015
Tsiropoulos I.; Faaij A.P.C.; Lundquist L.; Schenker U.; Briois J.F.; Patel M.K.	<i>Life cycle impact assessment of bio-based plastics from sugarcane ethanol</i>	2015
Ammous S.	<i>Lifecycle assessment of biofuel production: An overview</i>	2017

Pereira L.G.; Cavalett O.; Bonomi A.; Zhang Y.; Warner E.; Chum H.L.	<i>Comparison of biofuel life-cycle GHG emissions assessment tools: The case studies of ethanol produced from sugarcane, corn, and wheat</i>	2019
Autor(es)	Título do artigo (em inglês)	
		(conclusão)
Bicalho T.; Sauer I.; Patiño-Echeverri D.	<i>Quality of data for estimating GHG emissions in biofuel regulations is unknown: A review of default values related to sugarcane and corn ethanol*</i>	2019
de Souza N.R.D.; Fracarolli J.A.; Junqueira T.L.; Chagas M.F.; Cardoso T.F.; Watanabe M.D.B.; Cavalett O.; Venzke Filho S.P.; Dale B.E.; Bonomi A.; Cortez L.A.B.	<i>Sugarcane ethanol and beef cattle integration in Brazil</i>	2019
Bressanin J.M.; Guimarães H.R.; Chagas M.F.; Sampaio I.L.D.M.; Klein B.C.; Watanabe M.D.B.; Bonomi A.; Morais E.R.D.; Cavalett O.	<i>Advanced technologies for electricity production in the sugarcane value chain are a strategic option in a carbon reward policy context</i>	2021
Ocampo Battle E.A.; Escobar Palacio J.C.; Silva Lora E.E.; Da Costa Bortoni E.; Horta Nogueira L.A.; Carrillo Caballero G.E.; Vitoriano Julio A.A.; Escorcia Y.C.	<i>Energy, economic, and environmental assessment of the integrated production of palm oil biodiesel and sugarcane ethanol</i>	2021
Carvalho J.L.N.; Oliveira B.G.; Cantarella H.; Chagas M.F.; Gonzaga L.C.; Lourenço K.S.; Bordonal R.O.; Bonomi A.	<i>Implications of regional N₂O–N emission factors on sugarcane ethanol emissions and granted decarbonization certificates</i>	2021
Uusitalo V.; Horn R.; Maier S.D.	<i>Assessing Land Use Efficiencies and Land Quality Impacts of Renewable Transportation Energy Systems for Passenger Cars Using the LANCA® Method</i>	2022
Battle E.A.O.; Julio A.A.V.; Santiago Y.C.; Palácio J.C.E.; Bortoni E.D.C.; Nogueira L.A.H.; Dias M.V.X.; González A.M.	<i>Brazilian integrated oilpalm-sugarcane biorefinery: An energetic, exergetic, economic, and environmental (4E) assessment</i>	2022
Nogueira G.P.; Capaz R.S.; Franco T.T.; Dias M.O.S.; Cavaliero C.K.N.	<i>Enzymes as an environmental bottleneck in cellulosic ethanol production: Does on-site production solve it?</i>	2022
Lavrador R.B.; Teles B.A.D.S.	<i>Life cycle assessment of battery electric vehicles and internal combustion vehicles using sugarcane ethanol in Brazil: A critical review*</i>	2022
Souza N.R.D.D.; Cavalett O.; Junqueira T.L.	<i>Techno-economic and environmental assessment of bioenergy and livestock integrated systems in Brazil</i>	2022
Maia R.G.T.; Bozelli H.	<i>The importance of GHG emissions from land use change for biofuels in Brazil: An assessment for current and 2030 scenarios*</i>	2022
Real Guimarães H.; Marcon Bressanin J.; Lopes Motta I.; Ferreira Chagas M.; Colling Klein B.; Bonomi A.; Maciel Filho R.; Djun Barbosa Watanabe M.	<i>Decentralization of sustainable aviation fuel production in Brazil through Biomass-to-Liquids routes: A techno-economic and environmental evaluation</i>	2023
Arcentales D.; Silva C.; Ramirez A.D.	<i>Environmental analysis of road transport: Sugarcane ethanol gasoline blend flex-fuel vs battery electric vehicles in Ecuador</i>	2023
Chagas M.F.; Ferreira G.F.; Gomes L.C.M.; Zanthorlin L.M.; Martins L.Z.O.; Sampaio I.L.M.; Hernandez T.A.D.; Junqueira T.L.; Morais E.R.	<i>From enzyme to cell-factory: Economic and environmental assessment of biobased pathways to unlock the potential of long-haul transportation biofuels</i>	2023

Fonte: autoria própria.

*não participou da nuvem de palavras

4.1.2 Conteúdo da análise

Por fim, cinco análises foram realizadas para um melhor entendimento do tema deste trabalho, as análises serão descritas a seguir. Neste capítulo as análises serão apenas apresentadas para que a discussão seja realizada no capítulo seguinte.

4.1.3 Nuvem de palavras

A Figura 2 - “nuvem de palavras” tem como objetivo criar uma imagem com as palavras mais repetidas em certo contexto, de modo que as maiores palavras da imagem são as mais repetidas (ou seja, são as que mais aparecem nesse contexto) e conforme menor for tamanho da fonte da palavra escrita na nuvem, menor é a frequência da palavra no contexto.

Para a criação desta nuvem de palavras utilizou-se o aplicativo do LARHUD, disponível em: “<https://larhud.ibict.br/nuvem-de-palavras/>”, acessado em 06/06/2024.

Por causa de uma limitação deste aplicativo, quatro, dos vinte e quatro trabalhos analisados, não participaram da criação desta nuvem, estes quatro trabalhos foram identificados com a cor azul e um asterisco na Tabela 1.

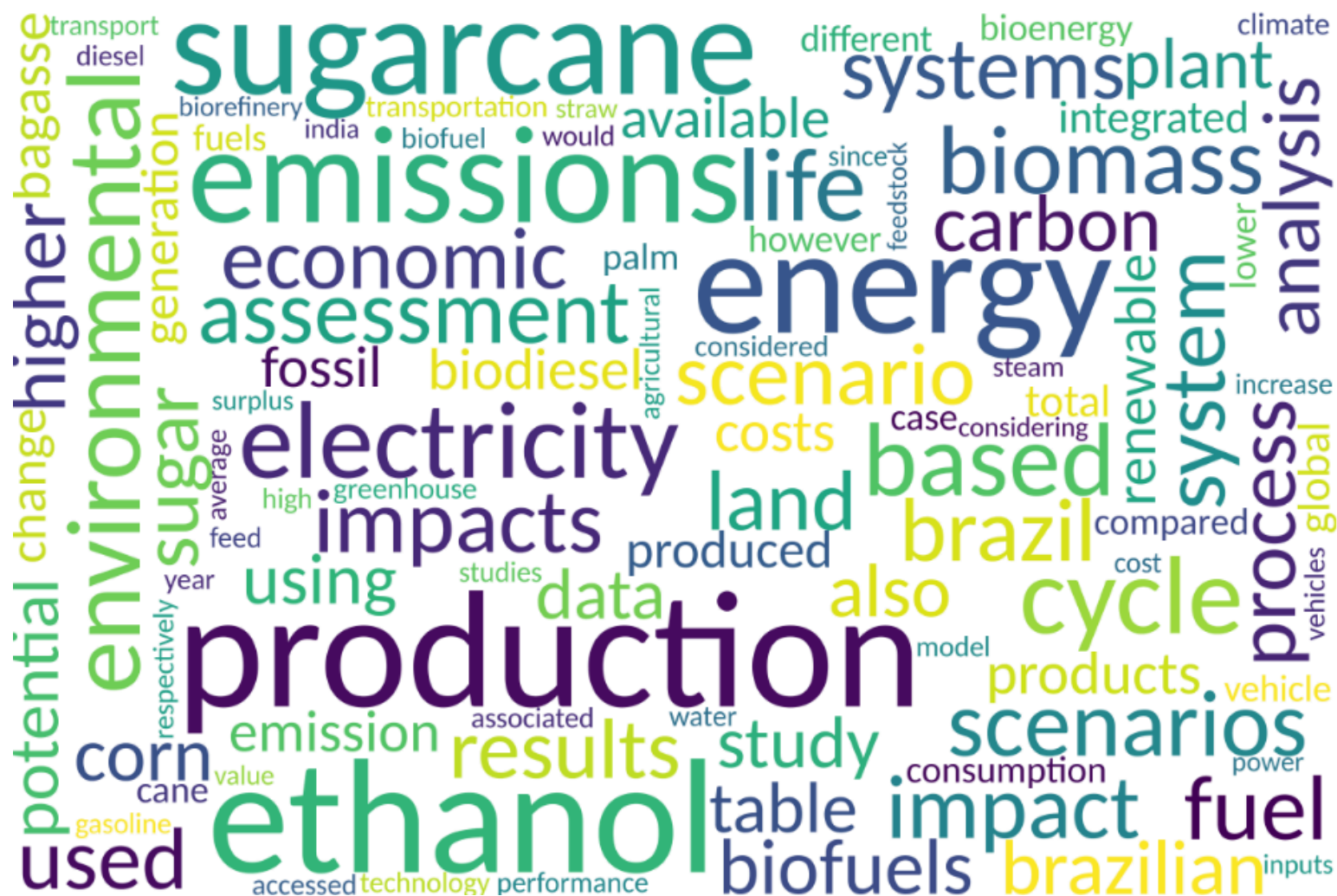
No Apêndice C pode-se observar as 60 palavras mais frequentes, também extraídas utilizando a ferramenta do LARHUD.

Interpretações sobre a nuvem podem ser observadas na seção 4.2.1 “Considerações Gerais”.

4.1.4 Número de publicações ao longo dos anos

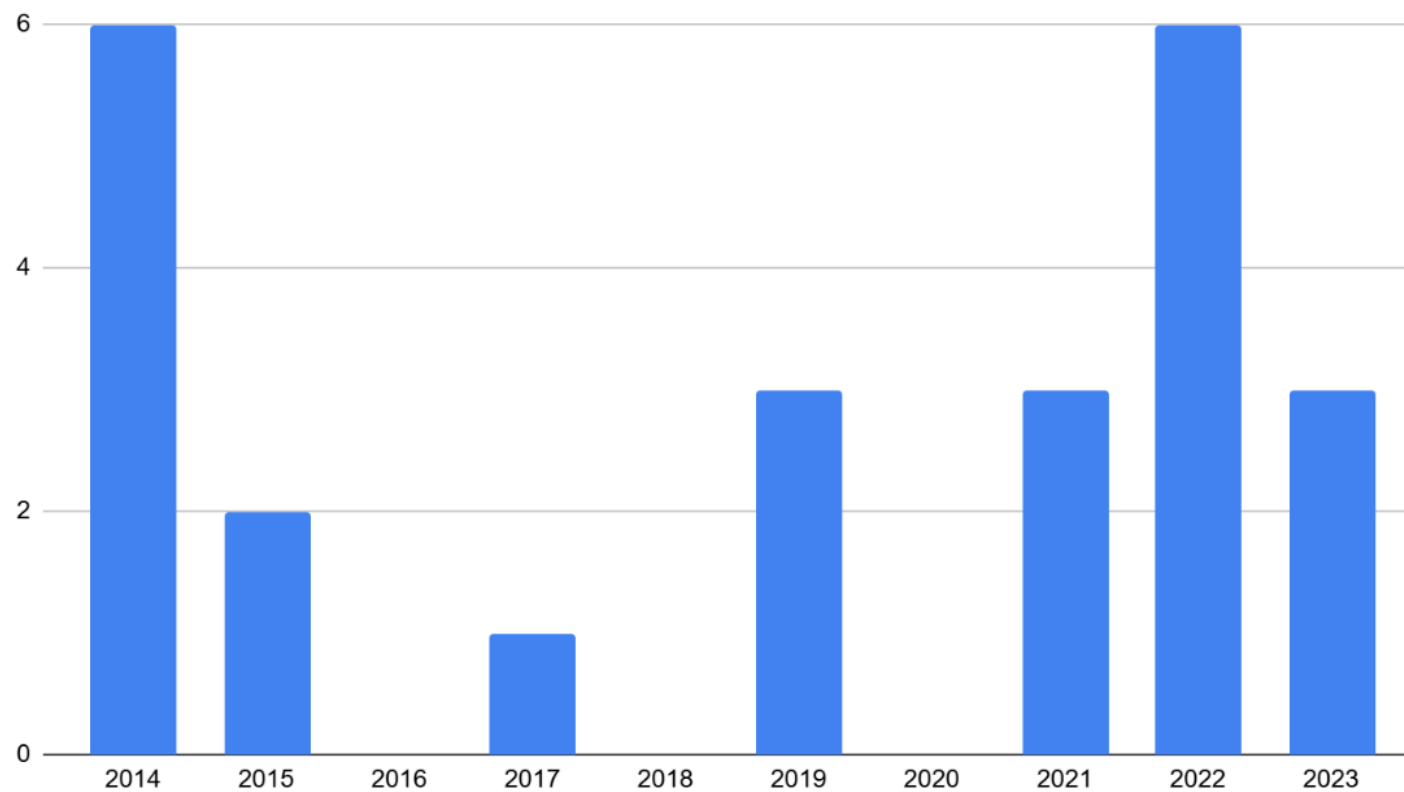
O gráfico 1 - “Número de publicações ao longo dos anos” explicita a evolução da quantidade de publicações sobre o tema durante os anos. Para a construção do gráfico, utilizou-se os anos dos 24 artigos selecionados para análise.

Figura 3 - Nuvem de Palavras



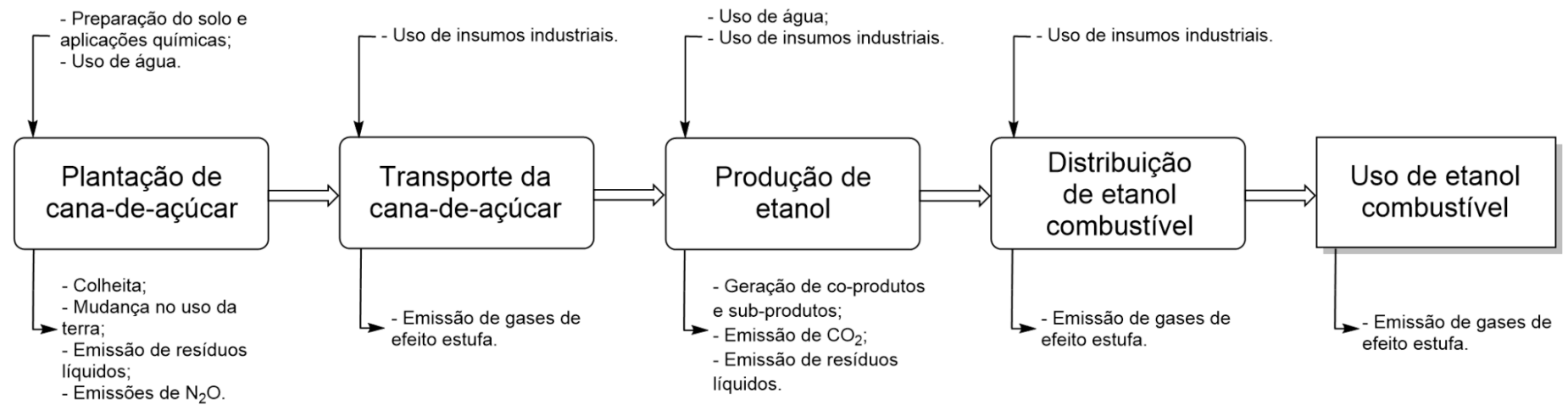
Fonte: autoria própria.

Figura 4 - Número de publicações ao longo dos anos



Fonte: autoria própria.

Figura 5 - Diagrama dos processos e aspectos ambientais



Fonte: Adaptado de Pereira (2019)

4.1.5 Diagrama dos processos e aspectos ambientais

A figura 4 - “Diagrama dos processos e aspectos ambientais” engloba processos e os principais aspectos ambientais relacionados ao ciclo de vida na produção de etanol a partir da cana de açúcar citados nos artigos analisados, de modo que os seguintes termos:

- Plantação de cana-de-açúcar;
- Transporte da cana de açúcar;
- Produção de etanol;
- Distribuição de etanol combustível;
- Uso de etanol combustível;
- Colheita.

São etapas (processos) da cadeia produtiva sucroalcooleira. É válido destacar que a partir desses processos derivam-se vários aspectos ambientais que podem (ou não) se repetir entre as etapas do processo produtivo. É importante esclarecer que esse trabalho não possui o ambicioso objetivo de esgotar todos os possíveis aspectos ambientais dessa cadeia produtiva, e sim destacar os principais aspectos. Um exemplo de aspecto ambiental positivo que não foi citado nessa diagrama explicitamente, pertence ao processo “plantação de cana-de-açúcar” e é a absorção do gás carbônico atmosférico. Essa absorção atua de modo a neutralizar o gás carbônico emitido na plantação da cana-de-açúcar, e possivelmente gerar um saldo positivo para a neutralização de parte do gás carbônico emitido no resto da cadeia.

Além disso, representou-se os aspectos ambientais de entrada na parte superior do diagrama e os aspectos ambientais de saída na parte inferior do diagrama.

4.1.6 Aspectos ambientais presentes em cada artigo

A tabela 2 - “Processos e aspectos ambientais presentes em cada artigo” pretende explicitar os processos e aspectos ambientais presentes em cada artigo. Ela foi construída e revisada manualmente, contendo os aspectos ambientais citados nos textos analisados.

Tabela 2 - Processos e aspectos ambientais presentes em cada artigo

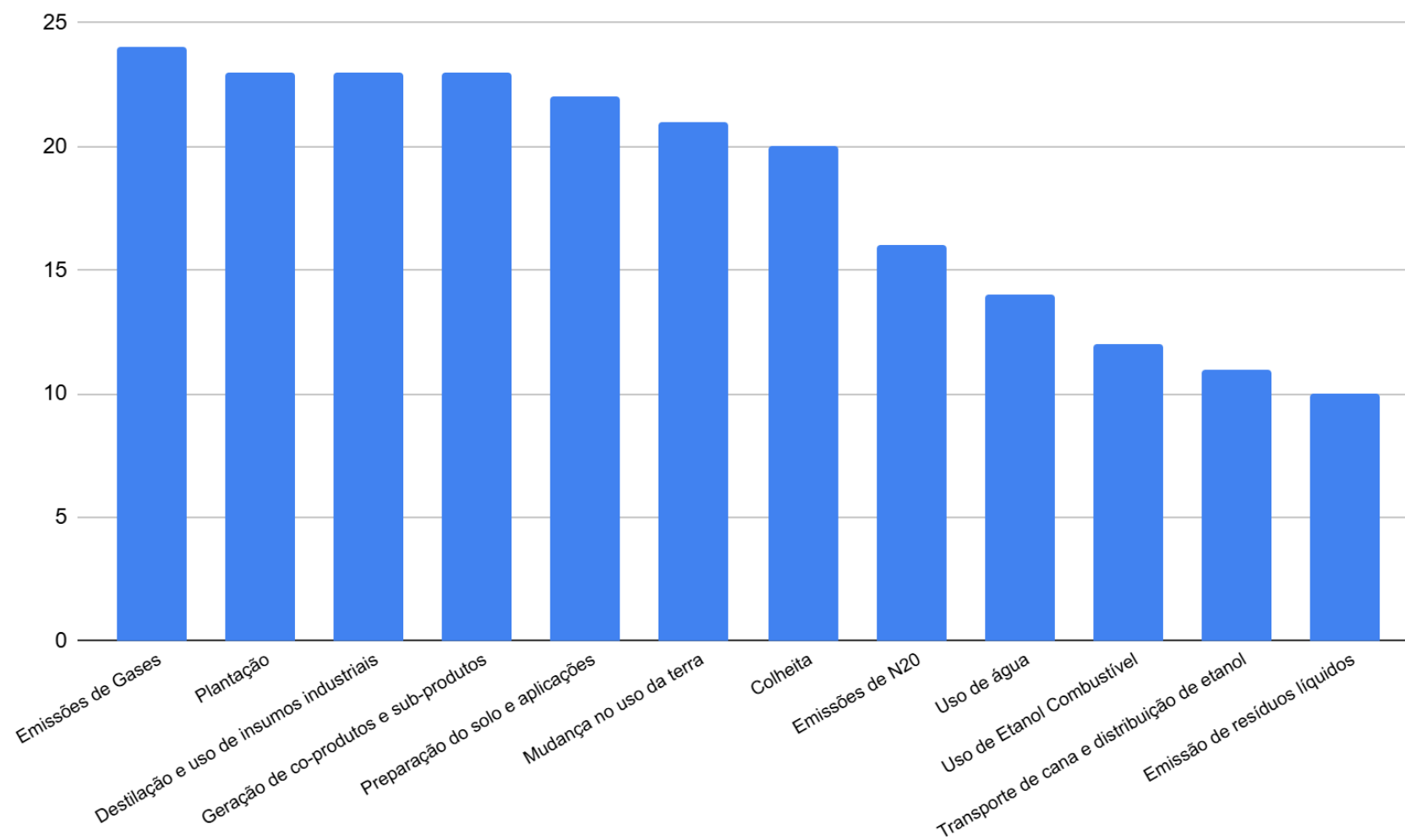
Artigo	Plantação de Cana-de-Açúcar	Mudança no uso da terra	Preparação do solo e aplicações químicas	Emissão de resíduos líquidos	Emissões de N2O	Colheita	Produção de Etanol e uso de insumos industriais	Uso de água	Geração de coprodutos e subprodutos	Transporte da cana e distribuição de etanol	Uso de Etanol Combustível	Emissões de Gases de Efeito Estufa
(continua)												
<i>A comparison of commercial ethanol production systems from Brazilian sugarcane and US corn</i>	Presente	Presente	Presente	Presente	Presente	Presente	Presente	Presente	Presente	Não mencionado	Não mencionado	Presente
<i>Advanced technologies for electricity production in the sugarcane value chain are a strategic option in a carbon reward policy context</i>	Presente	Presente	Presente	Não mencionado	Não mencionado	Não mencionado	Presente	Não mencionado	Presente	Não mencionado	Não mencionado	Presente
<i>Assessing Land Use Efficiencies and Land Quality Impacts of Renewable Transportation Energy Systems for Passenger Cars Using the LANCA® Method</i>	Presente	Presente	Presente	Não mencionado	Não mencionado	Não mencionado	Presente	Presente	Presente	Presente	Presente	Presente
<i>Brazilian integrated oilpalm-sugarcane biorefinery: An energetic, exergetic, economic, and environmental (4E) assessment</i>	Presente	Presente	Presente	Presente	Presente	Presente	Presente	Presente	Presente	Presente	Não mencionado	Presente
<i>Comparison of biofuel life-cycle GHG emissions assessment tools: The case studies of ethanol produced from sugarcane, corn, and wheat</i>	Presente	Presente	Presente	Não mencionado	Presente	Presente	Presente	Presente	Presente	Presente	Presente	Presente
<i>Consideration of black carbon and primary organic carbon emissions in life-cycle analysis of Greenhouse gas emissions of vehicle systems and fuels</i>	Não mencionado	Não mencionado	Não mencionado	Não mencionado	Presente	Presente	Presente	Não mencionado	Presente	Não mencionado	Presente	Presente
<i>Decentralization of sustainable aviation fuel production in Brazil through Biomass-to-Liquids routes: A techno-economic and environmental evaluation</i>	Presente	Não mencionado	Presente	Não mencionado	Não mencionado	Presente	Presente	Não mencionado	Presente	Presente	Não mencionado	Presente

Artigo	Plantação de Cana-de-Açúcar	Mudança no uso da terra	Preparação do solo e aplicações químicas	Emissão de resíduos líquidos	Emissões de N2O	Colheita	Produção de Etanol e uso de insumos industriais	Uso de água	Geração de coprodutos e subprodutos	Transporte da cana e distribuição de etanol	Uso de Etanol Combustível	Emissões de Gases de Efeito Estufa
(continuação)												
<i>Energy, economic, and environmental assessment of the integrated production of palm oil biodiesel and sugarcane ethanol</i>	Presente	Presente	Presente	Presente	Presente	Presente	Presente	Não está presente	Presente	Presente	Não mencionado	Presente
<i>Environmental analysis of road transport: Sugarcane ethanol gasoline blend flex-fuel vs battery electric vehicles in Ecuador</i>	Presente	Presente	Presente	Não mencionado	Não mencionado	Presente	Presente	Presente	Presente	Presente	Presente	Presente
<i>Enzymes as an environmental bottleneck in cellulosic ethanol production: Does on-site production solve it?</i>	Presente	Presente	Presente	Não mencionado	Não mencionado	Presente	Presente	Presente	Presente	Não mencionado	Presente	Presente
<i>From enzyme to cell-factory: Economic and environmental assessment of biobased pathways to unlock the potential of long-haul transportation biofuels</i>	Presente	Presente	Presente	Não mencionado	Não mencionado	Presente	Presente	Não está presente	Presente	Presente	Presente	Presente
<i>How to take time into account in the inventory step: A selective introduction based on sensitivity analysis</i>	Presente	Presente	Presente	Não mencionado	Presente	Presente	Presente	Presente	Não mencionado	Não mencionado	Não mencionado	Presente
<i>Implications of regional N2O–N emission factors on sugarcane ethanol emissions and granted decarbonization certificates</i>	Presente	Presente	Presente	Presente	Presente	Presente	Presente	Não está presente	Presente	Não mencionado	Não mencionado	Presente
<i>Integrated production of sugarcane ethanol and soybean biodiesel: Environmental and economic implications of fossil diesel displacement</i>	Presente	Presente	Presente	Presente	Presente	Presente	Presente	Presente	Presente	Não mencionado	Não mencionado	Presente

Artigo	Plantação de Cana-de-Açúcar	Mudança no uso da terra	Preparação do solo e aplicações químicas	Emissão de resíduos líquidos	Emissões de N20	Colheita	Produção de Etanol e uso de insumos industriais	Uso de água	Geração de coprodutos e subprodutos	Transporte da cana e distribuição de etanol	Uso de Etanol Combustível	Emissões de Gases de Efeito Estufa
(conclusão)												
<i>Life cycle assessment of battery electric vehicles and internal combustion vehicles using sugarcane ethanol in Brazil: A critical review</i>	Presente	Presente	Presente	Não mencionado	Não mencionado	Presente	Presente	Não está presente	Presente	Não mencionado	Presente	Presente
<i>Life cycle assessment of biofuels from an integrated Brazilian algae-sugarcane biorefinery</i>	Presente	Não mencionado	Presente	Não mencionado	Presente	Não mencionado	Presente	Não está presente	Presente	Presente	Presente	Presente
<i>Life cycle assessment of sugarcane ethanol production in India in comparison to Brazil</i>	Presente	Presente	Presente	Não mencionado	Presente	Presente	Presente	Presente	Presente	Presente	Presente	Presente
<i>Life cycle impact assessment of bio-based plastics from sugarcane ethanol</i>	Presente	Presente	Presente	Presente	Presente	Presente	Presente	Presente	Presente	Não mencionado	Não mencionado	Presente
<i>Lifecycle assessment of biofuel production: An overview</i>	Presente	Presente	Presente	Presente	Presente	Não mencionado	Presente	Não está presente	Presente	Presente	Presente	Presente
<i>Long-term prospects for the environmental profile of advanced sugar cane ethanol</i>	Presente	Presente	Presente	Presente	Presente	Presente	Presente	Não está presente	Presente	Presente	Presente	Presente
<i>Quality of data for estimating GHG emissions in biofuel regulations is unknown: A review of default values related to sugarcane and corn ethanol</i>	Presente	Presente	Presente	Presente	Presente	Presente	Presente	Presente	Presente	Não mencionado	Não mencionado	Presente
<i>Sugarcane ethanol and beef cattle integration in Brazil</i>	Presente	Presente	Presente	Não mencionado	Presente	Presente	Presente	Presente	Presente	Não mencionado	Presente	Presente
<i>Techno-economic and environmental assessment of bioenergy and livestock integrated systems in Brazil</i>	Presente	Presente	Presente	Presente	Presente	Presente	Presente	Presente	Presente	Não mencionado	Não mencionado	Presente
<i>The importance of GHG emissions from land use change for biofuels in Brazil: An assessment for current and 2030 scenarios</i>	Presente	Presente	Não mencionado	Não mencionado	Não mencionado	Presente	Não mencionado	Presente	Presente	Não mencionado	Não mencionado	Presente

Fonte: autoria própria

Figura 6 - Frequência dos processos e aspectos ambientais



Fonte: autoria própria

4.1.7 Gráfico de frequência dos processos e aspectos ambientais

A partir da tabela 2, criou-se o gráfico da figura 6 para explicitar a quantidade de textos que citam cada um dos aspectos ambientais identificados. Sendo que no “eixo y” temos a quantidade de artigos e no “eixo x” os aspectos ambientais.

4.2 Discussão

4.2.1 Considerações Gerais

Ao analisar a figura 2 “nuvem de palavras” explicitada no capítulo 3.6.1 deste trabalho, observa-se a falta da palavra *engineering* na composição da nuvem. Utilizou-se o conceito da LCA para sistematizar os principais aspectos ambientais relacionados ao ciclo de vida do etanol combustível.

Na prática, observa-se que a aplicação da LCA em artigos desta temática é muito frequente e que na maioria dos artigos analisados a aplicação não foi feita de forma holística quando se trata de integrar outras esferas do ciclo de vida como Life Cycle Cost, o SLCA e o LCE. Esse é o principal motivo pelo qual a palavra *engineering* não foi uma das mais citadas no contexto geral dos artigos analisados. De todo modo, isso não compromete a realização dos objetivos pretendidos neste trabalho.

Também pode-se observar na figura 2 “nuvem de palavras” a palavra “emissions” escrita em letras grandes, com isso, podemos concluir que as emissões são uma grande preocupação dos textos analisados. Também podemos observar a palavra “integrated”, já um pouco menor, mas que pode remeter ao tipo de soluções buscadas nos artigos: soluções integradas. Ou seja, soluções que visam benefícios de âmbito geral, seja pensando na cadeia de valor como um todo ou integrando várias cadeias de produção diferentes.

Considerando o gráfico 1 “Número de publicações ao longo dos anos” presente na seção 3.6.2 deste trabalho, observa-se que o número de publicações que estavam zeradas em 2020 subiram para 6 em 2022. Não pode-se inferir muita coisa com esse pequeno recorte, mas é de conhecimento geral que 2020 foi o ano da disseminação do vírus SARS-CoV-2 que gerou a pandemia de coronavírus, o que pode ter impactado negativamente no interesse que esse tipo de tema despertava em pesquisadores. Indo para 2022, tem-se o ano em que a maioria das restrições

impostas pela pandemia foram flexibilizadas e, além disso, é um ano em que pode-se observar um aumento da frota global de veículos elétricos.

Entende-se que, enquanto os veículos elétricos estiverem em ascensão e evidência, as discussões em torno dos aspectos e impactos ambientais gerados pelos demais combustíveis de veículos também estarão em alta. Inclusive no que tange análises comparativas dos impactos gerados pelos carros movidos a biocombustíveis em relação aos impactos gerados pelos carros movidos a eletricidade.

É válido ressaltar que a grande maioria dos aspectos ambientais outrora citados e considerados nesta análise não estão explicitados nos textos como “aspectos ambientais”. Os artigos analisados possuem temáticas bem diversas e, dentro de suas análises, citam aspectos ambientais do ciclo de vida do etanol sem indicar ao leitor que aquela ação descrita é um aspecto ambiental do ciclo de vida do etanol. Em alguns casos, os textos citam o mesmo aspecto ambiental utilizando palavras diferentes, e em outros o contexto do mesmo aspecto ambiental pode ser diferente, por isso, no diagrama, alguns aspectos ambientais se repetem nas etapas da cadeia de produção. Um exemplo do mesmo aspecto ambiental sendo descrito utilizando palavras diferentes é o aspecto ambiental “uso de água”. Em alguns textos, o uso de água estava sendo citado apenas utilizando a palavra irrigação, e em outros textos a expressão “uso de água” era utilizada junto da palavra irrigação (ou seja, se referindo à mesma ação) . Porém, em outros contextos, utilizou-se a expressão “uso de água” para se referir ao uso de água no processo de destilação. Nesses casos, optou-se por aglutinar alguns aspectos para a realização da quantificação (tópicos 3.6.4 e 3.6.5), e pretende-se realizar o detalhamento de cada um dos aspectos quantificados ainda neste capítulo.

Em linhas gerais, percebe-se uma maior preocupação em analisar os aspectos ambientais negativos em detrimento dos aspectos ambientais positivos, algo que de certa forma é prejudicial para as LCAs estudadas. Porém, pode-se justificar isso com base na urgente necessidade do desenvolvimento de boas práticas para minimizar os impactos negativos provenientes desses aspectos.

Analisando-se o gráfico 2 - “Frequência dos aspectos ambientais” pode-se inferir que único aspecto citado por todos os artigos foi: “Emissões de gases de efeito estufa”, que é um dos aspectos ambientais negativos mais comentados da atualidade. E, além desse aspecto, os aspectos relacionados à plantação também

foram muito citados. Logo, pode-se concluir que os aspectos relacionados ao transporte e produção são citados em menos textos, e talvez não estejam sendo o foco da maioria das análises.

Além disso, pode-se notar diferenças nos resultados das LCAs analisadas e isso se deve à aplicação de diferentes metodologias, suposições e dados. Nesse contexto, pode-se utilizar a harmonização para comparar esses resultados, visto que o objetivo do procedimento de harmonização é avaliar em que medida uma diferença em etapas específicas afeta os resultados e avaliar a proximidade dos valores finais obtidos após os modelos serem harmonizados usando um dos modelos como “padrão”, ou seja, tentando ao máximo, padronizar as metodologias e suposições utilizadas em cada LCA. (Pereira *et al.*, 2019)

4.2.2 Plantação de cana-de-açúcar

Inicia-se a discussão sobre os aspectos ambientais identificados com o primeiro processo da figura 4 “Diagrama dos aspectos ambientais”, contida na seção 3.6.3 que possui o mesmo nome da figura. Temos que esse processo foi citado em 23 dos 24 artigos analisados, sendo que pode-se observar alguns outros aspectos ambientais importantes contidos dentro dessa etapa da cadeia produtiva, dentre esses aspectos, destacou-se durante a análise os seguintes:

- Mudança no uso da terra;
- Preparação do solo e aplicações químicas;
- Emissões de N₂O;
- Uso de água;
- Emissão de resíduos líquidos.

Além desses, observa-se outros aspectos ambientais derivados desse processo, alguns desses aspectos são:

- Uso de combustíveis;
- Emissão de gás carbônico (vindo dos maquinários e da própria cana-de-açúcar);
- Absorção de gás carbônico atmosférico;

- Emissão de metano;
- Utilização de mão de obra para plantação, manutenção e colheita;

Além desses aspectos, pode-se explicitar outros vários, derivados, ou não, desses aspectos ambientais acima citados.

Em termos gerais, o principal impacto ambiental positivo gerado pela plantação da cana-de-açúcar é a redução do efeito estufa causado pela absorção do gás carbônico. Porém, esse saldo positivo de gás carbônico têm uma grande variância conforme as práticas de cultivo e colheita de cada plantação, essas práticas que determinam o saldo de gás carbônico serão explicadas nos tópicos seguintes. Além disso, serão detalhados, nos tópicos seguintes, alguns impactos ambientais relevantes dos aspectos ambientais contidos dentro dessa etapa da cadeia produtiva.

4.2.3 Mudança no uso da terra

Mudança no uso da terra (*Land use change* ou LUC) é um dos aspectos ambientais relacionados à plantação de cana-de-açúcar. Esse aspecto envolve a transformação da terra de seu estado natural ou uso anterior para um uso diferente, o que pode impactar significativamente o meio ambiente. Esse processo é frequentemente impulsionado pela expansão agrícola e pelo desenvolvimento urbano, podendo gerar impactos ambientais como erosão, a diminuição do habitat de animais selvagens, diminuição da qualidade do solo e, a longo prazo, contribuir para o aquecimento global. Considerando esse contexto, a contabilização das emissões de GEE associadas à mudança no uso da terra é crítica para verificar a sustentabilidade do biocombustível brasileiro (MAIA; BOSELLI, 2022).

De acordo com Uusitalo, Horn e Maier (2022), existe um aumento significativo no risco de erosão do solo quando há redução na cobertura vegetal das florestas tropicais para dar lugar ao cultivo de cana-de-açúcar.

Ainda de acordo com Uusitalo, Horn e Maier (*op. cit.*), a redução do habitat causado pelo uso da terra é uma das principais causas da diminuição da biodiversidade, que pode causar efeitos imprevisíveis aos seres humanos, por isso a LUC é um dos grandes desafios para o aumento da produção de energia renovável

para transporte. Principalmente quando considera-se um possível cenário de expansão da plantação de cana-de-açúcar em terras cada vez menos produtivas.

Nesse contexto, o aumento da produtividade das áreas já cultivadas é um ponto chave para a redução dos impactos ambientais provenientes da LUC, e de encontro a esse uso eficiente da terra, temos os BLI (Sistemas integrados de bioenergia e pecuária) que, segundo Souza, Cavalett e Junqueira (2022), visam otimizar o uso da terra, contribuindo para a redução destes último impactos ambientais citados. Por outro lado, Uusitalo, Horn e Maier (*op. cit.*), destacam que, a pressão por aumento de produtividade também aumenta a necessidade da avaliação dos impactos na qualidade do solo e na biodiversidade.

Os BLI, assim como seus impactos ambientais, serão detalhados posteriormente no capítulo de geração de coprodutos e subprodutos. Além disso, é válido ressaltar que o capítulo de geração de coprodutos e subprodutos se relaciona inteiramente com este capítulo, pois a utilização de subprodutos e a geração de coprodutos, nesse contexto, contribuem para um uso mais eficiente da terra.

4.2.4 Preparação do solo e aplicações químicas

A preparação do solo envolve etapas como a análise do solo, correção do PH (usualmente aplicando calcário), uma possível descompactação e nivelção do solo, além da aplicação de fertilizantes.

Já as aplicações químicas envolvem a aplicação de fertilizantes, pesticidas e herbicidas (neste capítulo trataremos dos fertilizantes, pesticidas e herbicidas inorgânicos, a utilização da vinhaça será mencionada posteriormente). Os fertilizantes são importantes para o crescimento da planta e os pesticidas são responsáveis pelo controle de pragas e doenças que podem atacar as plantações.

Os impactos ambientais relacionados à preparação do solo são, principalmente, o aquecimento global, proveniente do uso de máquinas agrícolas, além de possíveis erosões, caso a preparação do solo não seja realizada corretamente.

Já os impactos ambientais relacionados às aplicações químicas são a poluição de rios e a contaminação de lençóis freáticos. Segundo Arcenales, Silva e Ramirez (2023) o uso de fertilizantes, pesticidas e herbicidas na produção da

cana-de-açúcar pode contribuir inclusive para a destruição da camada de ozônio. Além disso, a aplicação de pesticidas pode impactar negativamente na fauna local.

Além dos impactos ambientais citados, as aplicações químicas também podem contribuir significativamente para o aumento do próximo aspecto ambiental: emissões de N₂O.

4.2.5 Emissões de N₂O

As emissões de óxido nitroso (N₂O) possuem um potencial de aquecimento global mais de 250 vezes maior do que as emissões de CO₂ (Myhre *et al.*, 2013), por isso, qualquer aumento na emissão desse gás deve ser fortemente evitado.

Essas emissões estão em destaque neste trabalho porque um dos 24 artigos analisados reportou um possível aumento na emissão de N₂O em plantações de cana-de-açúcar. Para entender o aumento identificado precisa-se primeiramente entender o que é a torta de filtro: um resíduo da indústria sucroalcooleira proveniente da filtração do caldo extraído das moendas no filtro rotativo. Além disso, tem-se também a vinhaça, um resíduo líquido, fruto da destilação fracionada do caldo de cana-de-açúcar fermentado. Esses dois resíduos funcionam como fertilizantes orgânicos em plantações de cana-de-açúcar. Segundo Carvalho *et al.* (2021), quando aplica-se fertilizantes nitrogenados juntamente com resíduos orgânicos pode-se observar, em alguns casos, um aumento na emissão de N₂O, sendo que, nesses casos, as emissões foram maiores do que as estimadas pelo Painel Intergovernamental sobre Mudanças Climáticas. Por isso, Carvalho *et al.* (*op. cit.*) propõe práticas de utilização de fertilizantes nitrogenados e resíduos orgânicos de modo a minimizar os riscos de aumento de emissões de N₂O.

4.2.6 Colheita

Segundo Pereira *et al.* (2019), para a realização de uma análise do ciclo de vida na produção de etanol a partir da cana-de-açúcar, é necessário considerar a proporção entre a colheita mecanizada de cana-de-açúcar e a cana de açúcar colhida manualmente após a realização de queimadas.

De fato, é importante determinar essa proporção, pois os dois tipos de colheita possuem níveis de impacto ambientais diferentes. Enquanto a colheita

mecanizada polui o ar utilizando máquinas agrícolas e contribui para o aquecimento global queimando combustíveis fósseis, também observa-se esses dois impactos ambientais à partir das queimadas, porém em proporções maiores (principalmente no que tange a poluição local do ar, que fica extremamente contaminado com fuligens).

Nos últimos anos os governos (federal e estaduais) vêm criando leis com o intuito de diminuir a quantidade de queimadas, porém, ainda existe certa dificuldade para determinar essa proporção citada no parágrafo anterior.

4.2.7 Uso de água

Esse é o primeiro dos aspectos ambientais analisados que transpassa mais de um processo mencionado na figura 4 “Diagrama dos aspectos ambientais”. O uso de água foi identificado de três formas diferentes nos artigos analisados.

O primeiro uso de água a ser explicitado é o uso de água na irrigação da cana-de-açúcar, algo que não está presente na realidade de grande parte do Brasil. Segundo Tsiropoulos *et al.* (2015), no centro-sul do Brasil, as plantações de cana-de-açúcar utilizam praticamente apenas água da chuva, e raramente são irrigadas. Por outro lado, em Uttar Pradesh, na Índia, a realidade é bem diferente da brasileira, pois as plantações de cana-de-açúcar são irrigadas com água doce, resultando em um consumo significativamente maior de água na cadeia produtiva.

O segundo uso de água a ser explicitado é o uso de água na produção do etanol combustível (que acontece à partir do processo de destilação), segundo Arcentales, Silva e Ramirez (2023), o processo de destilação consome uma quantidade significativa de água, o que pode impactar os recursos naturais locais.

O terceiro uso da água identificado nos artigos poderia até ser classificado como um impacto ambiental proveniente da plantação de cana-de-açúcar, que é o uso da água do lençol freático, absorvida pela planta. Novamente, segundo Uusitalo Horn e Maier (2022) a produção de biocombustíveis apresenta altos impactos na redução da regeneração de águas subterrâneas, que se intensificam em áreas tropicais onde a vegetação natural é substituída por culturas agrícolas. Nesses casos, existe uma redução na capacidade do solo de regenerar as águas subterrâneas, afetando negativamente os recursos hídricos locais.

Em todos os três casos, pode-se destacar dois possíveis impactos ambientais: esgotamento dos recursos hídricos e poluição da água

4.2.8 Emissão de resíduos líquidos

O principal resíduo líquido da cadeia de produção de etanol a partir da cana-de-açúcar é a vinhaça, pois ela permeia mais de uma etapa da cadeia produtiva, deixando de ser resíduo para se tornar um subproduto. Assim como já foi dito anteriormente neste trabalho, ela é fruto da destilação fracionada do caldo de cana-de-açúcar fermentado e pode ser aproveitada como um fertilizante orgânico no cultivo de cana-de-açúcar. Novamente segundo Carvalho *et al.* (2021), é importante que a vinhaça e fertilizantes nitrogenados não sejam aplicados concomitantemente para mitigar o risco de aumento de emissão de óxido nitroso.

Esse resíduo de grande destaque, há tempos deixou de ser apenas um resíduo para se tornar um subproduto, porém, em uma de suas possíveis utilizações como subproduto (fertilizante orgânico), ainda pode emitir resíduos líquidos. Ou seja, pode ser um resíduo líquido tanto da produção de etanol quanto da plantação, pois, quando aplicado nas plantações de cana-de-açúcar ele tem potencial para causar impactos ambientais negativos, poluindo rios, lagos, nascentes e o lençol freático.

Um outro possível uso da vinhaça, é a utilização desse resíduo para a geração de energia elétrica. Segundo Moraes *et al.* (2014), é possível gerar energia elétrica a partir do biogás produzido a partir da digestão anaeróbica da vinhaça, porém, nesse mesmo texto, a autora afirma que, considerando apenas os impactos ambientais, a melhor utilização para a vinhaça é a produção de biogás para substituir o diesel (com o excedente sendo utilizado para a produção de vapor e eletricidade).

Sobre as outras aplicações da vinhaça, elas contribuem para que a vinhaça deixe de ser apenas um resíduo líquido da produção de etanol, e fazem com que a vinhaça se torne um subproduto, porém essas aplicações também podem gerar outros impactos ambientais. Dessa forma, análises como a de Moraes *et al.*, citada no parágrafo acima, se tornam importantes para a minimização dos impactos ambientais negativos gerados por esse subproduto.

4.2.9 Produção de Etanol e uso de insumos industriais

Para efeito de análise, aglutinou-se um processo “produção de etanol” e um aspecto ambiental “uso de insumos industriais”. Sendo que a “produção de etanol” engloba todo o processamento da cana-de-açúcar e dos seus subprodutos para a produção de etanol (atividade finalística) e de outros possíveis coprodutos.

Um ponto de destaque desse aspecto ambiental é a produção de etanol de segunda geração, um etanol produzido a partir de resíduos restantes do processo de fabricação do etanol comum. Que possui uma pegada de carbono ainda menor do que o etanol de primeira geração, justamente pelo fato de ser fabricado a partir de resíduos.

Já o uso de insumos industriais (termo amplo para consolidar o uso de vários insumos que foram citados esporadicamente entre os artigos), são todos aqueles insumos utilizados para a produção do etanol, desde os materiais utilizados para a fabricação da infraestrutura e das máquinas, até os combustíveis fósseis possivelmente utilizados e a energia utilizada.

Alguns impactos ambientais negativos da produção de etanol são a poluição atmosférica, a poluição hídrica e o aquecimento global, proveniente da emissão de gás carbônico no processo de destilação.

Já o principal impacto ambiental do uso desses insumos industriais é o esgotamento dos recursos não renováveis.

4.2.10 Geração de coprodutos e subprodutos

Ao analisar a cadeia produtiva do etanol a partir da cana-de-açúcar, observa-se que foram desenvolvidos muitos coprodutos e subprodutos derivados do processo produtivo do etanol. Os principais coprodutos identificados na análise realizada neste trabalho estão descritos a seguir:

- Geração de energia elétrica;
- Bioplásticos;
- Combustível sustentável de aviação;
- Etanol de segunda geração;
- Açúcar.

Dentre esses produtos, destaca-se nessa análise os bioplásticos e o combustível sustentável de aviação. Pois são dois produtos relativamente recentes (em comparação com os outros citados) que ainda não foram mencionados durante esse trabalho.

Segundo Tsiropoulos *et al.* (2015), a produção de bioplásticos a partir do etanol da cana-de-açúcar oferece várias vantagens ambientais, incluindo a redução das emissões de GHG. No entanto, há desafios significativos relacionados, por exemplo, ao uso de pesticidas, que precisam ser abordados para maximizar os benefícios ambientais desses bioplásticos.

Além disso, também pode-se destacar alguns subprodutos:

- Torta de Filtro;
- Vinhaça;
- Palha;
- Bagaço da cana.

Esses subprodutos, por sua vez, têm diferentes possibilidades de utilização, sendo que os sistemas integrados de bioenergia e pecuária (Bioenergy-livestock integrated systems ou BLI) se mostram promissores quando se trata da utilização desses subprodutos.

Os BLI são a combinação de produção de bioenergia e pecuária de forma a otimizar o uso da terra e reduzir as emissões de gases de efeito estufa (GEE). Esses sistemas utilizam subprodutos de biocombustíveis como suplemento alimentar para animais, o que permite liberar áreas de pastagem para a produção adicional de culturas. Segundo Souza, Cavalett e Junqueira (2022), sistemas integrados são uma opção importante para estratégias futuras de gestão do uso da terra, pois, quando comparados com cadeias de valor isoladas, conseguem otimizar o uso da terra, reduzir mudanças climáticas e outros impactos ambientais.

Segundo Guimarães *et al.* (2023), a integração da produção de combustível sustentável de aviação (SAF) com a produção de etanol de primeira geração (1G) pode reduzir os custos de produção de SAF, aproveitando as infraestruturas existentes e os incentivos econômicos, como os créditos de carbono.

Além disso, é importante destacar que um dos desafios de se avaliar o ciclo de vida do etanol produzido a partir da cana-de-açúcar é justamente quantificar o

impacto positivo gerado pelos coprodutos e subprodutos gerados. Esses coprodutos e subprodutos tem o potencial de influenciar drasticamente o resultado das LCAs.

4.2.11 Transporte da cana e distribuição de etanol

No cenário brasileiro, o transporte da cana e a distribuição de etanol são aspectos ambientais que possuem semelhanças muito evidentes. Por causa dessas semelhanças aglutinou-se esses dois aspectos para efeito de análise.

Na grande maioria dos casos estes dois transportes são realizados por caminhões movidos a diesel (ou biodiesel), gerando outros aspectos ambientais como: o uso de insumos industriais (outrora citado) e a emissão de gases de efeito estufa.

O uso de insumos industriais, nesse caso, deve-se ao consumo da borracha dos pneus, aos combustíveis e óleos lubrificantes, e outros inúmeros insumos necessários para o funcionamento de um caminhão. E a emissão de gases de efeito estufa se deve principalmente à queima do combustível utilizado. Os principais impactos ambientais relacionados a esses aspectos são: esgotamento de recursos não renováveis, poluição atmosférica e aquecimento global.

4.2.12 Uso de etanol combustível

O uso de etanol combustível gera como principal aspecto ambiental a emissão de gases de efeito estufa, que será o aspecto discutido no próximo capítulo. Porém, essa emissão não é propriamente considerada como aspecto ambiental pois considera-se que o ciclo do carbono produzido pela cana-de-açúcar é muito curto, ou seja: o carbono retirado pela plantação da cana-de-açúcar compensa as emissões de CO₂.

Vale ressaltar que, atualmente, também tem-se a utilização de etanol combustível em veículos híbridos (movidos a combustão e eletricidade) e que espera-se que a emissão de gases de efeito estufa gerada pelo uso de etanol seja menor nesses veículos.

4.2.13 Emissão de gases de efeito estufa

A emissão de gases de efeito estufa é um dos aspectos ambientais mais evidenciados nos últimos tempos, pois nos últimos anos a humanidade vem sentindo cada vez mais as consequências geradas pelo aquecimento global (com catástrofes naturais acontecendo no mundo todo e um aumento de temperatura sem precedentes) e a emissão de gases de efeito estufa se apresenta como a maior causadora desse impacto ambiental tão severo.

Esse é o principal motivo pelo qual deve-se atuar com veemência para que a humanidade consiga reduzir essas emissões.

4.2.14 Atuação da engenharia do ciclo de vida na redução de impactos ambientais

A atuação da engenharia do ciclo de vida na redução de impactos ambientais pode ser observada de diversas formas, desde a formulação de soluções inteligentes, a proposição de boas práticas, a criação de sistemas de integração e o desenvolvimento de novos produtos. Essa atuação busca otimizar a cadeia produtiva de modo que ela seja sustentável econômica e socialmente, minimizando os impactos ambientais gerados por toda a cadeia de produção.

Para concluir, alguns exemplos da atuação da engenharia do ciclo de vida na redução de impactos ambientais relacionados à cadeia de produção de etanol a partir da cana-de-açúcar serão explicitados abaixo:

- Criação de sistemas integrados de bioenergia e pecuária;
- Desenvolvimento de máquinas para colheita da cana-de-açúcar, de modo a reduzir o número de queimadas;
- Criação dos carros híbridos para aumentar a eficiência do consumo de etanol;
- Desenvolvimento de tecnologias para a produção de coprodutos como: etanol de 2ª geração, bioplásticos, combustível sustentável de aviação e energia elétrica;
- Desenvolvimento de tecnologias para um melhor aproveitamento da vinhaça.

4.2.15 Oportunidades

Observa-se as seguintes oportunidades de desenvolvimento de pesquisa a partir deste trabalho:

- Simulação computacional de cenários futuros relacionados ao uso de etanol;
- Estudo de campo para analisar a viabilidade econômica dos sistemas integrados de bioenergia e pecuária;
- Realização de um estudo com o intuito de integrar várias esferas do ciclo de vida da produção de etanol a partir da cana-de-açúcar;
- Pesquisas futuras podem contemplar o desenvolvimento de modelos quantitativos baseados em técnicas de apoio à decisão multicritério, principalmente as que contemplam a não-compensação entre critérios, para priorização de aspectos ambientais nesse contexto, utilizando, talvez, critérios baseados em abordagens como o FMEA.
- Pesquisas futuras podem contemplar a comparação entre modelos de negócio envolvendo as tecnologias atuais de motores automotivos. Fazendo uma análise econômica e ambiental das soluções mais populares.

5. CONCLUSÃO

Este estudo destacou a importância da aplicação da Engenharia do Ciclo de Vida (LCA) na produção de etanol a partir da cana-de-açúcar, evidenciando os benefícios e desafios associados a essa cadeia produtiva. A análise detalhada das diversas etapas do ciclo de vida do etanol revelou que a adoção de práticas sustentáveis e a integração de sistemas de bioenergia e pecuária (BLI) podem contribuir significativamente para a redução dos impactos ambientais e o aumento da eficiência no uso dos recursos naturais.

É possível concluir que a geração de valor na produção de etanol a partir da cana-de-açúcar não se limita apenas a utilização deste produto em veículos. A produção de etanol de segunda geração, a partir de resíduos da cana-de-açúcar, e o desenvolvimento de novos coprodutos, como bioplásticos e combustíveis sustentáveis de aviação, representam avanços significativos na busca por uma economia cada vez mais circular e de baixo carbono. Além disso, a utilização de subprodutos, como vinhaça e bagaço, para geração de energia e alimentação animal, demonstra o potencial de otimizar o uso da biomassa maximizando benefícios ambientais e econômicos.

Definiu-se que a pesquisa e o desenvolvimento de tecnologias que minimizem os aspectos negativos, como as emissões de óxido nitroso, a poluição hídrica e a emissão de gases de efeito estufa, são essenciais. A implementação de políticas públicas que incentivem práticas agrícolas sustentáveis e utilizações eficientes dos recursos naturais também serão cruciais para o sucesso a longo prazo desta cadeia produtiva.

Por fim, destaca-se que os objetivos propostos foram alcançados durante a construção desse trabalho, pois investigou-se, neste trabalho, conceitos fundamentais da Engenharia do Ciclo de Vida, mapeou-se os principais aspectos ambientais associados à cadeia de produção sucroalcooleira e então, a atuação da Engenharia do Ciclo de Vida na redução dos impactos ambientais ao longo do ciclo de vida dos produtos do setor sucroalcooleiro foi analisada.

Desta forma, o presente trabalho de conclusão de curso mostrou-se suficiente para atingir seus objetivos, pois proporcionou uma revisão dos conceitos aprendidos ao longo da graduação e possibilitou a fixação de conceitos aprendidos durante a graduação em engenharia de produção.

REFERÊNCIAS

ALTING, L. Life Cycle Engineering and Design. *CIRP Annals*, v.44, n.2, p.569-580, 1995.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **ABNT NBR ISO 14001:** sistemas de gestão ambiental - requisitos com orientações para uso. Rio de Janeiro: ABNT, 2015.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **ABNT NBR ISO 14040:** gestão ambiental – avaliação do ciclo de vida – princípios e estrutura. Rio de Janeiro: ABNT, 2009.

AMMOUS, S. Life cycle assessment of biofuel production: An overview. **Emergence: Complexity and Organization**, v.19, n.1, 2017.

ARCENTALES, D.; SILVA, C.; RAMIREZ, A.D. Environmental analysis of road transport: Sugarcane ethanol gasoline blend flex-fuel vs battery electric vehicles in Ecuador. **Transportation Research Part D: Transport and Environment**, v.118, p.e103718, 2023.

BATLLE, E.A.O.; JULIO, A.A.V.; SANTIAGO, Y.C.; PALÁCIO, J.C.E.; BORTONI, E.D.C.; NOGUEIRA, L.A.H.; DIAS, M.V.X.; GONZÁLEZ, A.M. Brazilian integrated oilpalm-sugarcane biorefinery: An energetic, exergetic, economic, and environmental (4E) assessment. **Energy Conversion and Management**, v.268, p.e116066, 2022.

BATLLE, E.A.O.; PALACIO, J.C.E.; LORA, E.E.S.; BORTONI, E.C.; NOGUEIRA, L.A.H.; CABALLERO, G.E.C.; JULIO, A.A.V.; ESCORCIA, Y.C. Energy, economic, and environmental assessment of the integrated production of palm oil biodiesel and sugarcane ethanol. **Journal of Cleaner Production**, v.311, p. e127638, 2021.

BEZERGIANI, S.; CHRYSIKOU, L.P. Application of Life-Cycle Assessment in Biorefineries. In: **Waste Biorefinery: integrating biorefineries for waste valorisation**. Amsterdã: Elsevier, 2020.

BICALHO, T.; SAUER, I.; PATIÑO-ECHEVERRI, D. Quality of data for estimating GHG emissions in biofuel regulations is unknown: A review of default values related to sugarcane and corn ethanol. **Journal of Cleaner Production**, v.239, p.e117903, 2019.

BRASIL. **Lei nº 12.305, de 2 de agosto de 2010**. Institui a Política Nacional de Resíduos Sólidos. Brasília: Presidência da República, [2010]. Disponível em: https://www.planalto.gov.br/ccivil_03/_ato2007-2010/2010/lei/l12305.htm. Acesso em 19 jun. 2024.

BRESSANIN, J.M.; GUIMARÃES, H.R.; CHAGAS, M.F.; SAMPAIO, I.L.D.M.; KLEIN, B.C.; WATANABE, M.D.B.; BONOMI, A.; MORAIS, E.R.D.; CAVALETT, O. Advanced technologies for electricity production in the sugarcane value chain are a strategic option in a carbon reward policy context. **Energy Policy**, v.159, p.e112637, 2021.

CAI, H.; WANG, M.Q. Consideration of black carbon and primary organic carbon emissions in life-cycle analysis of Greenhouse gas emissions of vehicle systems and fuels. **Environmental Science and Technology**, v.48, n.20, p.12445-12453, 2014.

CARVALHO, J.L.N.; OLIVEIRA, B.G.; CANTARELLA, H.; CHAGAS, M.F.; GONZAGA, L.C.; LOURENÇO, K.S.; BORDONAL, R.O.; BONOMI, A. Implications of regional N₂O–N emission factors on sugarcane ethanol emissions and granted decarbonization certificates. **Renewable and Sustainable Energy Reviews**, v.149, p.e111423, 2021.

CHAGAS, M.F.; FERREIRA, G.F.; GOMES, L.C.M.; ZANPHORLIN, L.M.; MARTINS, L.Z.O.; SAMPAIO, I.L.M.; HERNANDES, T.A.D.; JUNQUEIRA, T.L.; MORAIS, E.R. From enzyme to cell-factory: Economic and environmental assessment of biobased pathways to unlock the potential of long-haul transportation biofuels. **Chemical Engineering Journal**, v.469, p.e143878, 2023.

CHUM, H.L.; WARNER, E.; SEABRA, J.E.A.; MACEDO, I.C. A comparison of commercial ethanol production systems from Brazilian sugarcane and US corn. **Biofuels, Bioproducts and Biorefining**, v.8, n.2, p.205-223, 2014.

COLLET, P.; LARDON, L.; STEYER, J.-P.; HÉLIAS, A. How to take time into account in the inventory step: A selective introduction based on sensitivity analysis. **International Journal of Life Cycle Assessment**, v.19, n.2, p.320-330, 2014.

CONAB - COMPANHIA NACIONAL DE ABASTECIMENTO. **Acompanhamento da safra brasileira: cana-de-açúcar**, 2024. Disponível em: <https://www.conab.gov.br/component/k2/item/download/52865_512de23d6dc21b5812590113d57c516e>. Acesso em: 19 jun. 2024.

CONFEDERAÇÃO NACIONAL DA INDÚSTRIA. **Economia circular: oportunidades e desafios para a indústria brasileira**. Brasília : CNI, 2018.

FARIAS, Alen Ralcineide Brandão Porto de. **Gerenciamento de riscos na cadeia de suprimentos baseado em sistemas dinâmicos**. 2020. 48f. Trabalho de Conclusão de Curso (Engenharia de Produção) - Universidade Federal de Pernambuco, Caruaru, 2020.

GUIMARÃES, H.R.; BRESSANIN, J.M.; MOTTA, I.L.; CHAGAS, M.F.; KLEIN, B.C.; BONOMI, A.; FILHO, R.M.; WATANABE, M.D.B. Decentralization of sustainable aviation fuel production in Brazil through Biomass-to-Liquids routes: A techno-economic and environmental evaluation. **Energy Conversion and Management**, v.276, p.e116547, 2023.

HAUSCHILD, M.; JESWIET, J.; ALTING, L.; From life cycle assessment to sustainable production: status and perspectives. **CIRP Annals - Manufacturing Technology**, v.54, n.2, p.1–21, 2005.

HENKELS, C. **A identificação de aspectos e impactos ambientais: proposta de um método de aplicação**. 2002. 139f. Tese (Mestrado), Programa de

Pós-Graduação em Engenharia de Produção, Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, 2002.

HINGSAMER, M.; JUNGMEIER, G. Biorefineries. *In: The Role of Bioenergy in the Emerging Bioeconomy: resources, technologies, sustainability and policy.* Amsterdã: Elsevier Inc. 2018.

JESWIET, J. **A Definition for Life Cycle Engineering.** Proceedings of the 36th International Seminar on Manufacturing Systems, p.17–20. Saarbrücken, Alemanha: 2003.

LAVRADOR, R.B.; TELES, B.A.D.S. Life cycle assessment of battery electric vehicles and internal combustion vehicles using sugarcane ethanol in Brazil: A critical review. **Cleaner Energy Systems**, v.2, p.e100008, 2022.

MACEDO, I. C. Situação atual e perspectivas do etanol. **Estudos Avançados**, v.21, n.59, p.157-165, 2007.

MAIA, R.G.T.; BOZELLI, H. The importance of GHG emissions from land use change for biofuels in Brazil: An assessment for current and 2030 scenarios. **Resources, Conservation and Recycling**, v.179, p.e106131, 2022.

MYHRE, G.; SHINDELL, D.; BRÉON, F.-M.; COLLINS, W.; FUGLESTVEDT, J.; HUANG, J.; KOCH, D.; LAMARQUE, J.-F.; LEE, D.; MENDOZA, B.; NAKAJIMA, T.; ROBOCK, A.; STEPHENS, G.; TAKEMURA, T.; ZHANG, H. Anthropogenic and Natural Radiative Forcing. *In: CLIMATE Change 2013 the Physical Science Basis: contribution of working group I to the fifth assessment report of the intergovernmental panel on climate change.* Cambridge University Press, Cambridge, United Kingdom and New York, NY, USA, 2013.

MORAES, B.S.; JUNQUEIRA, T.L.; PAVANELLO, L.G.; CAVALETT, O.; MANTELATTO, P.E.; BONOMI, A.; ZAIAT, M. Anaerobic digestion of vinasse from sugarcane biorefineries in Brazil from energy, environmental, and economic perspectives: Profit or expense? **Applied Energy**, v.113, p.825 - 835, 2014.

MORINI, A. A. **Pré-avaliação da energia incorporada e da pegada de carbono como requisitos para seleção de materiais nas fases iniciais do desenvolvimento de produto.** 2019. 189f. Tese (Doutorado), Programa de Pós-Graduação em Ciência e Engenharia de Materiais, Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, 2019.

NOGUEIRA, G.P.; CAPAZ, R.S.; FRANCO, T.T.; DIAS, M.O.S.; CAVALIERO, C.K.N. Enzymes as an environmental bottleneck in cellulosic ethanol production: Does on-site production solve it?. **Journal of Cleaner Production**, v.369, p.e133314, 2022.

NOGUEIRA, L.A.H.; SOUZA, G.M.; CORTEZ, L.A.B.; CRUZ, C.H.B. Biofuels for transport. *In: LETCHER, T. M. Future Energy: improved, sustainable and clean options for our planet.* Amsterdã: Elsevier, 2020.

OKOLI, C. A guide to conducting a standalone systematic literature review. **Communications of the Association for Information Systems**, v.37, n.1, p.879-910, 2015.

OMETTO, A. R.; HAUSCHILD, M.Z.; ROMA, W. N. L. Lifecycle assessment of fuel ethanol from sugarcane in Brazil. **International Journal of Life Cycle Assessment**, v.14, n.3, p. 236 - 247, 2009.

PEREIRA, L.G.; CAVALETT, O.; BONOMI, A.; ZHANG, Y.; WARNER, E.; CHUM, H.L. Comparison of biofuel life-cycle GHG emissions assessment tools: The case studies of ethanol produced from sugarcane, corn, and wheat. **Renewable and Sustainable Energy Reviews**, v.110, p.1-12, 2019.

SAMPAIO, R. F.; MANCINI, M, C. Estudos de revisão sistemática: um guia para síntese criteriosa da evidência científica. **Revista Brasileira de Fisioterapia**, São Carlos, v. 11, n.1, p.83-89, 2007.

SILVA, A. R. **O diagrama sistêmico e o modelo de maturidade na adoção da economia circular**. 2021. 67f. Tese (Mestrado), Programa de Pós-Graduação em Administração, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2021.

SILVA, C.R.U.; FRANCO, H.C.J.; JUNQUEIRA, T.L.; VAN OERS, L.; VAN DER VOET, E.; SEABRA, J.E.A. Long-term prospects for the environmental profile of advanced sugar cane ethanol. **Environmental Science and Technology**, v.48, n.20, p.12394-12402, 2014.

SOUZA, D. T. de; ROCHA, J. D.; OSHIRO, O. T.; MINGOTI, R. Perspectivas das exportações de etanol no Brasil. **Revista de Política Agrícola**, ano 32, n. 1, p. 76-89, 2023.

SOUZA, N.R.D.; CAVALETT, O.; JUNQUEIRA, T.L. Techno-economic and environmental assessment of bioenergy and livestock integrated systems in Brazil. **Sustainable Production and Consumption**, v.32, p.580-592, 2022.

SOUZA, N.R.D.; FRACAROLLI, J.A.; JUNQUEIRA, T.L.; CHAGAS, M.F.; CARDOSO, T.F.; WATANABE, M.D.B.; CAVALETT, O.; FILHO S.P.V.; DALE, B.E.; BONOMI, A.; CORTEZ, L.A.B. Sugarcane ethanol and beef cattle integration in Brazil. **Biomass and Bioenergy**, v.120, p.448-457, 2019.

SOUZA, S.P.; GOPAL, A.R.; SEABRA, J.E.A. Life cycle assessment of biofuels from an integrated Brazilian algae-sugarcane biorefinery. **Energy**, v.81, p.373-381, 2015.

SOUZA, S.P.; SEABRA, J.E.A. Integrated production of sugarcane ethanol and soybean biodiesel: Environmental and economic implications of fossil diesel displacement. **Energy Conversion and Management**, v.87, p.1170-1179, 2014.

TSIROPOULOS, I.; FAAIJ, A.P.C.; LUNDQUIST, L.; SCHENKER, U.; BRIOIS, J.F.; PATEL, M.K. Life cycle impact assessment of bio-based plastics from sugarcane ethanol. **Journal of Cleaner Production**, v.90, p.114-127, 2015.

TSIROPOULOS, I.; FAAIJ, A.P.C.; SEABRA, J.E.A.; LUNDQUIST, L.; SCHENKER, U.; BRIOIS, J.-F.; PATEL, M.K. Life cycle assessment of sugarcane ethanol production in India in comparison to Brazil. **International Journal of Life Cycle Assessment**, v.19, n.5, p.1049-1067, 2014.

U.S. ENERGY INFORMATION ADMINISTRATION, 2018. **International Energy Outlook**, Washington, DC: Energy Information Administration - EIA. 2018

UUSITALO, V.; HORN, R.; MAIER, S.D. Assessing Land Use Efficiencies and Land Quality Impacts of Renewable Transportation Energy Systems for Passenger Cars Using the LANCA® Method. **Sustainability (Switzerland)**, v.14, n.10 p.e6144, 2022.

WANYAMA, W.; ERTAS, A.; ZHANG, H. C.; EKWARO-OSIRE. Life-cycle engineering: Issues, tools and research. **International Journal of Computer Integrated Manufacturing**, v.16, n.4-5, p.307-316, 2003.

ZANON, L. G. **Avaliação de fornecedores centrada no cliente: proposição de um modelo de decisão multicritério combinando análise de sentimentos baseada em aspectos e inferência fuzzy**. 2022. 167f. Tese (Doutorado) Departamento de Engenharia de Produção – Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, São Carlos, 2022.

Apêndice A - Tabelas com dados detalhados sobre o setor sucroalcooleiro brasileiro

TABELA 1 - ÁREA, PRODUTIVIDADE E PRODUÇÃO DE CANA-DE-AÇÚCAR

Região/UF	ÁREA (Em mil ha)			PRODUTIVIDADE (Em kg/ha)			PRODUÇÃO (Em mil t)		
	Safra 2022/23	Safra 2023/24	VAR. %	Safra 2022/23	Safra 2023/24	VAR. %	Safra 2022/23	Safra 2023/24	VAR. %
NORTE	47,3	48,9	3,5	80.862	80.608	(0,3)	3.823,0	3.943,0	3,1
AM	3,8	3,9	0,3	56.653	78.736	39,0	218,0	304,0	39,4
PA	15,5	16,9	8,7	79.131	75.700	(4,3)	1.227,0	1.276,0	4,0
TO	27,9	28,2	1,0	85.160	83.797	(1,6)	2.378,0	2.363,0	(0,6)
NORDESTE	875,5	883,0	0,9	64.950	63.959	(1,5)	56.866,5	56.477,8	(0,7)
MA	28,3	29,3	3,5	76.231	70.909	(7,0)	2.158,1	2.078,2	(3,7)
PI	21,2	20,3	(4,1)	68.866	64.072	(7,0)	1.459,0	1.302,0	(10,8)
RN	66,1	66,7	0,9	55.370	52.756	(4,7)	3.662,3	3.519,6	(3,9)
PB	123,0	125,6	2,1	61.546	60.539	(1,6)	7.569,9	7.605,7	0,5
PE	238,8	233,7	(2,1)	61.583	59.099	(4,0)	14.703,2	13.810,2	(6,1)
AL	301,5	298,7	(0,9)	67.266	65.878	(2,1)	20.281,1	19.675,8	(3,0)
SE	39,6	43,1	8,6	59.929	58.901	(1,7)	2.375,2	2.535,9	6,8
BA	57,0	65,7	15,2	81.695	90.637	10,9	4.657,7	5.950,5	27,8
CENTRO-OESTE	1.767,5	1.778,8	0,6	74.347	81.537	9,7	131.406,8	145.035,7	10,4
MT	174,7	194,1	11,1	90.883	90.989	0,1	15.876,6	17.663,3	11,3
MS	636,0	629,9	(1,0)	70.174	80.609	14,9	44.627,1	50.771,7	13,8
GO	956,8	954,8	(0,2)	74.102	80.227	8,3	70.903,1	76.600,6	8,0
SUDESTE	5.127,1	5.098,8	(0,6)	75.629	91.987	21,6	387.755,3	469.026,8	21,0
MG	896,4	929,2	3,7	78.686	87.579	11,3	70.537,9	81.376,5	15,4
ES	47,5	48,7	2,5	58.082	57.796	(0,5)	2.759,7	2.815,6	2,0
RJ	35,5	29,7	(16,3)	44.442	47.968	7,9	1.578,2	1.425,3	(9,7)
SP	4.147,6	4.091,2	(1,4)	75.436	93.715	24,2	312.879,5	383.409,5	22,5
SUL	475,4	524,4	10,3	65.115	73.860	13,4	30.953,1	38.730,9	25,1
PR	475,4	524,4	10,3	65.115	73.860	13,4	30.953,1	38.730,9	25,1
NORTE/NORDESTE	922,8	931,9	1,0	65.765	64.833	(1,4)	60.689,5	60.420,8	(0,4)
CENTRO-SUL	7.369,9	7.402,0	0,4	74.643	88.192	18,2	550.115,3	652.793,3	18,7
BRASIL	8.292,7	8.333,9	0,5	73.655	85.580	16,2	610.804,8	713.214,1	16,8

Fonte: CONAB (2024).
Nota: Estimativa em abril/2024.

TABELA 2 - PRODUTOS DA INDÚSTRIA SUCROALCOOLEIRA - ESTIMATIVA DA PRODUÇÃO DE AÇÚCAR - SAFRAS 2022/23 E 2023/24

Região/UF	Produção de açúcar (em mil t)						
	Safra 2022/23 (a)	Safra 2023/24 Lev. Anterior (b)	Safra 2023/24 Lev. Atual (c)	Variação		Variação	
				Absoluta (c-a)	% (c/a)	Absoluta (c-b)	% (c/b)
NORTE	72,3	99,1	99,3	26,9	37,3	0,2	0,2
AM	12,1	20,2	20,4	8,4	69,4	0,2	0,9
PA	60,3	78,8	78,8	18,6	30,9	-	-
NORDESTE	3.204,8	3.559,9	3.293,1	88,3	2,8	(266,8)	(7,5)
MA	26,1	19,5	19,5	(6,7)	(25,5)	-	-
PI	101,0	111,0	97,5	(3,5)	(3,5)	(13,5)	(12,2)
RN	206,9	218,7	218,7	11,8	5,7	-	-
PB	125,0	214,8	228,0	103,0	82,4	13,2	6,1
PE	982,7	1.145,5	969,5	(13,2)	(1,3)	(176,0)	(15,4)
AL	1.545,8	1.571,4	1.495,3	(50,6)	(3,3)	(76,1)	(4,8)
SE	129,8	129,0	133,5	3,7	2,9	4,5	3,5
BA	87,5	150,0	131,2	43,7	49,9	(18,8)	(12,5)
CENTRO-OESTE	4.165,0	5.215,6	5.468,0	1.303,0	31,3	252,4	4,8
MT	501,6	538,3	539,3	37,7	7,5	1,0	0,2
MS	1.500,3	2.097,4	2.209,5	709,2	47,3	112,1	5,3
GO	2.163,1	2.579,9	2.719,2	556,1	25,7	139,4	5,4
SUDESTE	27.146,0	35.448,7	33.927,7	6.781,7	25,0	(1.521,0)	(4,3)
MG	4.501,9	5.289,6	5.481,6	979,7	21,8	192,0	3,6
ES	127,8	150,6	150,6	22,8	17,9	-	-
RJ	28,7	62,0	33,7	5,0	17,3	(28,4)	(45,7)
SP	22.487,6	29.946,5	28.261,9	5.774,3	25,7	(1.684,7)	(5,6)
SUL	2.218,8	2.557,4	2.890,6	671,8	30,3	333,2	13,0
PR	2.218,8	2.557,4	2.890,6	671,8	30,3	333,2	13,0
NORTE/NORDESTE	3.277,1	3.659,0	3.392,4	115,3	3,5	(266,6)	(7,3)
CENTRO-SUL	33.529,8	43.221,7	42.286,3	8.756,5	26,1	(935,4)	(2,2)
BRASIL	36.806,9	46.880,7	45.678,7	8.871,8	24,1	(1.202,0)	(2,6)

Fonte: CONAB (2024).

Nota: Estimativa em abril/2024.

TABELA 3 - ESTIMATIVA DA PRODUÇÃO DE ETANOL TOTAL A PARTIR DA CANA-DE-AÇÚCAR - SAFRAS 2022/23 E 2023/24

Região/UF	Produção de etanol de cana-de-açúcar (em m3)						
	Safra 2022/23 (a)	Safra 2023/24 Lev. Anterior (b)	Safra 2023/24 Lev. Atual (c)	Variação		Variação	
				Absoluta (c-a)	% (c/a)	Absoluta (c-b)	% (c/b)
NORTE	263.151,0	249.471,0	250.161,0	(12.990,0)	(4,9)	690,0	0,3
AM	5.586,0	7.000,0	7.805,0	2.219,0	39,7	805,0	11,5
PA	52.427,0	49.762,0	49.762,0	(2.665,0)	(5,1)	-	-
TO	205.138,0	192.709,0	192.594,0	(12.544,0)	(6,1)	(115,0)	(0,1)
NORDESTE	2.074.997,6	2.020.283,4	2.022.276,5	(52.721,1)	(2,5)	1.993,2	0,1
MA	158.968,0	160.687,8	160.687,8	1.719,8	1,1	-	-
PI	45.031,0	44.029,0	47.161,0	2.130,0	4,7	3.132,0	7,1
RN	127.576,5	137.398,6	136.623,6	9.047,1	7,1	(775,0)	(0,6)
PB	466.019,0	347.439,0	363.057,0	(102.962,0)	(22,1)	15.618,0	4,5
PE	398.287,1	328.872,0	331.837,4	(66.449,7)	(16,7)	2.965,5	0,9
AL	451.949,0	444.611,0	476.020,4	24.071,4	5,3	31.409,4	7,1
SE	102.501,0	139.400,0	111.139,0	8.638,0	8,4	(28.261,0)	(20,3)
BA	324.666,0	417.846,0	395.750,3	71.084,3	21,9	(22.095,7)	(5,3)
CENTRO-OESTE	8.264.530,2	8.842.200,2	8.729.473,9	464.943,7	5,6	(112.726,3)	(1,3)
MT	1.075.045,0	1.084.820,1	1.104.145,9	29.100,9	2,7	19.325,8	1,8
MS	2.632.351,5	2.936.502,1	2.875.736,4	243.384,9	9,2	(60.765,7)	(2,1)
GO	4.557.133,7	4.820.878,0	4.749.591,6	192.457,9	4,2	(71.286,4)	(1,5)
SUDESTE	14.828.334,1	15.653.120,4	17.328.018,6	2.499.684,5	16,9	1.674.898,2	10,7
MG	2.639.510,1	3.050.216,9	3.306.033,5	666.523,4	25,3	255.816,6	8,4
ES	110.542,0	115.230,0	115.230,0	4.688,0	4,2	-	-
RJ	109.622,0	63.204,6	82.005,0	(27.617,0)	(25,2)	18.800,4	29,7
SP	11.968.660,0	12.424.468,9	13.824.750,2	1.856.090,2	15,5	1.400.281,3	11,3
SUL	1.091.807,0	1.221.365,5	1.359.613,6	267.806,6	24,5	138.248,1	11,3
PR	1.091.807,0	1.221.365,5	1.359.613,6	267.806,6	24,5	138.248,1	11,3
NORTE/NORDESTE	2.338.148,6	2.269.754,4	2.272.437,5	(65.711,1)	(2,8)	2.683,2	0,1
CENTRO-SUL	24.184.671,3	25.716.686,1	27.417.106,1	3.232.434,9	13,4	1.700.420,0	6,6
BRASIL	26.522.819,9	27.986.440,5	29.689.543,6	3.166.723,8	11,9	1.703.103,2	6,1

Fonte: CONAB (2024).

Nota: Estimativa em abril/2024.

TABELA 4 - ESTIMATIVA DA PRODUÇÃO DE ETANOL A PARTIR DO MILHO - SAFRAS 2022/23 E 2023/24

Região/UF	Etanol Anidro (Em mil l)				Etanol Hidratado (Em mil l)				Etanol Total (Em mil l)			
	Safra 2022/23	Safra 2023/24	Variação		Safra 2022/23	Safra 2023/24	Variação		Safra 2022/23	Safra 2023/24	Variação	
			Absoluta	%			Absoluta	%			Absoluta	%
NORDESTE	-	-	-	-	1,3	14,8	13,5	1.040,0	1,3	14,8	13,5	1.040,0
AL	-	-	-	-	1,3	14,8	13,5	1.040,0	1,3	14,8	13,5	1.040,0
CENTRO-OESTE	1.524.075,8	2.213.581,2	689.505,4	45,2	2.903.921,1	3.677.918,7	773.997,6	26,7	4.427.996,8	5.891.499,9	1.463.503,1	33,1
MT	1.329.099,9	1.559.200,0	230.100,1	17,3	1.939.438,1	2.654.800,0	715.361,9	36,9	3.268.538,0	4.214.000,0	945.462,0	28,9
MS	142.896,0	538.382,0	395.486,0	276,8	571.583,0	467.760,0	(103.823,0)	(18,2)	714.479,0	1.006.142,0	291.663,0	40,8
GO	52.079,8	115.999,2	63.919,4	122,7	392.900,0	555.358,7	162.458,7	41,3	444.979,8	671.357,9	226.378,1	50,9
SUL	14.135,0	28.614,0	14.479,0	102,4	7.226,0	47,0	(7.179,0)	(99,3)	21.361,0	28.661,0	7.300,0	34,2
PR	14.135,0	28.614,0	14.479,0	102,4	7.226,0	47,0	(7.179,0)	(99,3)	21.361,0	28.661,0	7.300,0	34,2
NORTE/NORDESTE	-	-	-	-	1,3	14,8	13,5	1.040,0	1,3	14,8	13,5	1.040,0
CENTRO-SUL	1.538.210,8	2.242.195,2	703.984,4	45,8	2.911.147,1	3.677.965,7	766.818,6	26,3	4.449.357,8	5.920.160,9	1.470.803,1	33,1
BRASIL	1.538.210,8	2.242.195,2	703.984,4	45,8	2.911.148,4	3.677.980,5	766.832,1	26,3	4.449.359,1	5.920.175,7	1.470.816,6	33,1

Fonte: CONAB (2024).
Nota: Estimativa em abril/2024.

Apêndice B - Resultados da busca de artigos na base de dados Scopus

Autor(es)	Título (em inglês)	Ano
Zanghelini G.M.; de Souza Junior H.R.A.; Kulay L.; Cherubini E.; Ribeiro P.T.; Soares S.R.	<i>A bibliometric overview of Brazilian LCA research</i>	2016
Chum H.L.; Warner E.; Seabra J.E.A.; Macedo I.C.	<i>A comparison of commercial ethanol production systems from Brazilian sugarcane and US corn</i>	2014
Bressanin J.M.; Guimarães H.R.; Chagas M.F.; Sampaio I.L.D.M.; Klein B.C.; Watanabe M.D.B.; Bonomi A.; Morais E.R.D.; Cavalett O.	<i>Advanced technologies for electricity production in the sugarcane value chain are a strategic option in a carbon reward policy context</i>	2021
Uusitalo V.; Horn R.; Maier S.D.	<i>Assessing Land Use Efficiencies and Land Quality Impacts of Renewable Transportation Energy Systems for Passenger Cars Using the LANCA® Method</i>	2022
Cabrera Camacho C.E.; Villanueva Perales A.L.; Alonso-Fariñas B.; Vidal-Barrero F.; Ollero P.	<i>Assessing the economic and environmental sustainability of bio-olefins: The case of 1,3-butadiene production from bioethanol</i>	2022
Shi R.; Guest J.S.	<i>BioSTEAM-LCA: An Integrated Modeling Framework for Agile Life Cycle Assessment of Biorefineries under Uncertainty</i>	2020
Battle E.A.O.; Julio A.A.V.; Santiago Y.C.; Palácio J.C.E.; Bortoni E.D.C.; Nogueira L.A.H.; Dias M.V.X.; González A.M.	<i>Brazilian integrated oilpalm-sugarcane biorefinery: An energetic, exergetic, economic, and environmental (4E) assessment</i>	2022
Pereira L.G.; Cavalett O.; Bonomi A.; Zhang Y.; Warner E.; Chum H.L.	<i>Comparison of biofuel life-cycle GHG emissions assessment tools: The case studies of ethanol produced from sugarcane, corn, and wheat</i>	2019
Cai H.; Wang M.Q.	<i>Consideration of black carbon and primary organic carbon emissions in life-cycle analysis of Greenhouse gas emissions of vehicle systems and fuels</i>	2014
Real Guimarães H.; Marcon Bressanin J.; Lopes Motta I.; Ferreira Chagas M.; Colling Klein B.; Bonomi A.; Maciel Filho R.; Djun Barbosa Watanabe M.	<i>Decentralization of sustainable aviation fuel production in Brazil through Biomass-to-Liquids routes: A techno-economic and environmental evaluation</i>	2023
Ocampo Battle E.A.; Escobar Palacio J.C.; Silva Lora E.E.; Da Costa Bortoni E.; Horta Nogueira L.A.; Carrillo Caballero G.E.; Vitoriano Julio A.A.; Escorcia Y.C.	<i>Energy, economic, and environmental assessment of the integrated production of palm oil biodiesel and sugarcane ethanol</i>	2021
Arcentales D.; Silva C.; Ramirez A.D.	<i>Environmental analysis of road transport: Sugarcane ethanol gasoline blend flex-fuel vs battery electric vehicles in Ecuador</i>	2023
Nogueira A.R.; Popi M.D.G.C.B.; Moore C.C.S.; Kulay L.	<i>Environmental and energetic effects of cleaner production scenarios on the Sodium Lauryl Ether Sulfate production chain</i>	2019
de Léis C.M.; Nogueira A.R.; Kulay L.; Tadini C.C.	<i>Environmental and energy analysis of biopolymer film based on cassava starch in Brazil</i>	2017
Nogueira G.P.; Capaz R.S.; Franco T.T.; Dias M.O.S.; Cavaliero C.K.N.	<i>Enzymes as an environmental bottleneck in cellulosic ethanol production: Does on-site production solve it?</i>	2022
Chagas M.F.; Ferreira G.F.; Gomes L.C.M.; Zanphorlin L.M.; Martins L.Z.O.; Sampaio I.L.M.; Hernandez T.A.D.; Junqueira T.L.; Morais E.R.	<i>From enzyme to cell-factory: Economic and environmental assessment of biobased pathways to unlock the potential of long-haul transportation biofuels</i>	2023
Collet P.; Lardon L.; Steyer J.-P.; Hélias A.	<i>How to take time into account in the inventory step: A selective introduction based on sensitivity analysis</i>	2014
Carvalho J.L.N.; Oliveira B.G.; Cantarella H.; Chagas M.F.; Gonzaga L.C.; Lourenço K.S.; Bordonal R.O.; Bonomi A.	<i>Implications of regional N₂O–N emission factors on sugarcane ethanol emissions and granted decarbonization certificates</i>	2021
Souza S.P.; Seabra J.E.A.	<i>Integrated production of sugarcane ethanol and soybean biodiesel: Environmental and economic implications of fossil diesel displacement</i>	2014
Lavrador R.B.; Teles B.A.D.S.	<i>Life cycle assessment of battery electric vehicles and internal combustion vehicles using sugarcane ethanol in Brazil: A critical review</i>	2022
Souza S.P.; Gopal A.R.; Seabra J.E.A.	<i>Life cycle assessment of biofuels from an integrated Brazilian algae-sugarcane biorefinery</i>	2015
Tsiropoulos I.; Faaij A.P.C.; Seabra J.E.A.; Lundquist L.; Schenker U.; Briois J.-F.; Patel M.K.	<i>Life cycle assessment of sugarcane ethanol production in India in comparison to Brazil</i>	2014
Tsiropoulos I.; Faaij A.P.C.; Lundquist L.; Schenker U.; Briois J.F.; Patel M.K.	<i>Life cycle impact assessment of bio-based plastics from sugarcane ethanol</i>	2015
Ammous S.	<i>Lifecycle assessment of biofuel production: An overview</i>	2017
Da Silva C.R.U.; Franco H.C.J.; Junqueira T.L.; Van Oers L.; Van Der Voet E.; Seabra J.E.A.	<i>Long-term prospects for the environmental profile of advanced sugar cane ethanol</i>	2014
Bicalho T.; Sauer I.; Patiño-Echeverri D.	<i>Quality of data for estimating GHG emissions in biofuel regulations is unknown: A review of default values related to sugarcane and corn ethanol</i>	2019
de Souza N.R.D.; Fracarolli J.A.; Junqueira T.L.; Chagas M.F.; Cardoso T.F.; Watanabe M.D.B.; Cavalett O.; Venzke Filho S.P.; Dale B.E.; Bonomi A.; Cortez L.A.B.	<i>Sugarcane ethanol and beef cattle integration in Brazil</i>	2019
Souza N.R.D.D.; Cavalett O.; Junqueira T.L.	<i>Techno-economic and environmental assessment of bioenergy and livestock integrated systems in Brazil</i>	2022
Maia R.G.T.; Bozelli H.	<i>The importance of GHG emissions from land use change for biofuels in Brazil: An assessment for current and 2030 scenarios</i>	2022

Apêndice C - 60 Palavras mais frequentes

A frequência está em ordem, logo, a primeira palavra é a mais frequente dentre os 20 textos analisados e a última palavra é a última palavra é a sexagésima mais frequente.

Production ethanol energy sugarcane emissions cycle electricity environmental life based biomass scenarios system assessment fuel impacts impact brazil systems scenario used economic process land results sugar analysis higher carbon biofuels brazilian corn also study data using plant table potential products available fossil costs biodiesel renewable emission bagasse produced generation change integrated total global consumption different palm fuels cane however vehicle.