

UNIVERSIDADE TECNOLÓGICA FEDERAL DO PARANÁ

LEONARDO MIARA FRIZON GREVETTI

**PRODUÇÃO DE ETANOL A PARTIR DO MILHO: REVISÃO BIBLIOGRÁFICA
DOS PROCESSOS TECNOLÓGICOS E COMPARAÇÃO COM A CANA-DE-
AÇÚCAR NO CONTEXTO ENERGÉTICO BRASILEIRO**

PONTA GROSSA

2025

LEONARDO MIARA FRIZON GREVETTI

**PRODUÇÃO DE ETANOL A PARTIR DO MILHO: REVISÃO BIBLIOGRÁFICA
DOS PROCESSOS TECNOLÓGICOS E COMPARAÇÃO COM A CANA-DE-
AÇÚCAR NO CONTEXTO ENERGÉTICO BRASILEIRO**

**Ethanol production from corn: a literature review of technological processes
and comparison with sugarcane in Brazilian energy context**

Trabalho de Conclusão de Curso de Graduação
apresentado como requisito para obtenção do título
de Bacharel em Engenharia de Bioprocessos e
Biotecnologia, da Universidade Tecnológica
Federal do Paraná (UTFPR).
Orientador: Luis Alberto Chavez Ayala.

**PONTA GROSSA
2025**



[4.0 Internacional](https://creativecommons.org/licenses/by-nc-sa/4.0/)

Esta licença permite remixe, adaptação e criação a partir do trabalho, para fins não comerciais, desde que sejam atribuídos créditos ao(s) autor(es) e que licenciem as novas criações sob termos idênticos. Conteúdos elaborados por terceiros, citados e referenciados nesta obra não são cobertos pela licença.

LEONARDO MIARA FRIZON GREVETTI

**PRODUÇÃO DE ETANOL A PARTIR DO MILHO: REVISÃO BIBLIOGRÁFICA
DOS PROCESSOS TECNOLÓGICOS E COMPARAÇÃO COM A CANA-DE-
AÇÚCAR NO CONTEXTO ENERGÉTICO BRASILEIRO**

Trabalho de Conclusão de Curso de Graduação
apresentado como requisito para obtenção do título
de Bacharel em Engenharia de Bioprocessos e
Biotecnologia, da Universidade Tecnológica
Federal do Paraná (UTFPR).

Data de aprovação: 24/junho/2026

Luis Alberto Chavez Ayala
Mestre em Tecnologia de Alimentos
Universidade Tecnológica Federal do Paraná

Suelen Ávila
Doutora em Engenharia de Alimentos
Universidade Tecnológica Federal do Paraná

Luciano Fernandes
Doutor em Química
Universidade Tecnológica Federal do Paraná

PONTA GROSSA

2026

Resumo

A crescente demanda por fontes de energia renovável e a necessidade de redução das emissões de gases de efeito estufa têm impulsionado o debate sobre a diversificação das rotas tecnológicas para a produção de etanol no Brasil. Tradicionalmente baseado na cana-de-açúcar, o setor sucroenergético brasileiro vem incorporando progressivamente o milho como matéria-prima complementar, especialmente em regiões com alta produção de grãos. Este trabalho teve como objetivo analisar os principais processos tecnológicos envolvidos na produção de etanol a partir do milho, comparando-os com a rota tradicional da cana-de-açúcar no contexto energético brasileiro. Foi realizada uma revisão bibliográfica sistematizada, de caráter qualitativo, exploratório e descritivo, com buscas em bases científicas e fontes institucionais. As referências foram selecionadas segundo critérios predefinidos de inclusão e exclusão e analisadas por síntese narrativa, considerando indicadores tecnológicos, energéticos, ambientais e econômicos relacionados à produção de etanol de milho e de cana-de-açúcar. Os resultados indicam que a produção de etanol de cana-de-açúcar apresenta melhor desempenho nos indicadores de eficiência energética e emissões de gases de efeito estufa, enquanto a rota baseada em milho apresenta vantagens relacionadas à disponibilidade contínua da matéria-prima, operação durante a entressafra integração com usinas flex e geração de coprodutos de elevado valor agregado. As evidências sugerem que a integração dessas duas rotas pode contribuir para a ampliação da capacidade produtiva, fortalecimento da segurança energética e a diversificação regional do setor de biocombustíveis no Brasil.

Palavras-chave: etanol; cana-de-açúcar; milho; bioenergia; produção sustentável.

Abstract

The growing demand for renewable energy sources and the need to reduce greenhouse gas emissions have intensified the debate on the diversification of technological pathways for ethanol production in Brazil. Traditionally based on sugarcane, the Brazilian sugar-energy sector has progressively incorporated corn as a complementary feedstock, especially in regions with high grain production. This study aimed to analyze the main technological processes involved in ethanol production from corn, comparing them with the traditional sugarcane-based pathway within the Brazilian energy context. A systematized literature review with a qualitative, exploratory, and descriptive approach was conducted through searches in scientific databases and institutional sources. The references were selected according to predefined inclusion and exclusion criteria and analyzed through narrative synthesis, considering technological, energy, environmental, and economic indicators related to corn and sugarcane ethanol production. The results indicate that sugarcane ethanol production performs better in terms of energy efficiency and greenhouse gas emissions, whereas the corn-based pathway presents advantages related to the continuous availability of feedstock, operation during the sugarcane off-season, integration with flex plants, and the generation of high-value coproducts. The evidence suggests that the integration of these two production pathways may contribute to expanding production capacity, strengthening energy security, and promoting regional diversification of the biofuel sector in Brazil.

Keywords: ethanol; sugarcane; corn; bioenergy; sustainable production.

SUMÁRIO

1 INTRODUÇÃO	7
2 OBJETIVOS.....	9
2.1 Objetivo geral	9
2.2 Objetivos específicos.....	9
3 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA.....	10
3.1 Histórico da produção de etanol no Brasil	10
3.2 Aspectos tecnológicos da produção de etanol	11
3.2.1 Processo de produção de etanol a partir da cana-de-açúcar.....	11
3.2.2 Processo de produção de etanol a partir do milho	12
3.2.3 Processo de produção de etanol de milho por moagem via seca	13
3.3 Tecnologias aplicadas na produção de etanol de milho	14
3.4 Balanço energético e coprodutos.....	16
3.5 Impactos ambientais e pegada de carbono	16
3.6 Viabilidade econômica e inserção na matriz energética brasileira.....	17
4 METODOLOGIA	19
5 RESULTADOS E DISCUSSÃO	26
5.1 Comparação tecnológica entre as rotas de produção	28
5.2 Comparação do balanço energético.....	29
5.3 Comparação dos impactos ambientais	30
5.4 Comparação da viabilidade econômica	31
5.5 Perspectivas futuras para o setor.....	32
5.6 Limitações da revisão e comparabilidade entre estudos	32
6 CONSIDERAÇÕES FINAIS	34
REFERÊNCIAS.....	35

1 Introdução

A busca por alternativas energéticas sustentáveis tem sido uma prioridade em diversos países, principalmente devido as crescentes preocupações com as mudanças climáticas, a volatilidade dos preços do petróleo e a necessidade de reduzir emissões de gases de efeito estufa (GEE). Nesse cenário, o Brasil destaca-se como um dos maiores produtores mundiais de biocombustíveis, especialmente do etanol, o qual, possui, historicamente, sua matriz energética baseada na cana-de-açúcar. A produção de etanol vindo da cana foi consolidada nas últimas décadas como um modelo bem-sucedido de energia renovável, com sua eficiência energética muito reconhecida, além de baixo custo e elevado potencial de redução de carbono no ar. (Goldemberg, 2007; Goldemberg *et al.*, 2008).

Nas últimas duas décadas, no entretanto, o setor energético brasileiro vem participando da expansão de uma nova rota tecnológica: o etanol produzido a partir do milho. Inicialmente mais comum em países como os Estados Unidos, essa alternativa começa a ganhar espaço no Brasil, principalmente a partir do ano de 2017, especialmente em estados do Centro-Oeste, como Mato Grosso e Goiás, onde a produção de grão é abundante e ocorre um excedente de milho na entressafra da cana (Donke *et al.*, 2017).

O surgimento de usinas do tipo *flex*, capazes de processar cana-de-açúcar e milho, representa uma inovação estratégica, pois permite o aproveitamento da infraestrutura industrial durante a entressafra da cana e possibilita maior continuidade produtiva, reduzindo a sazonalidade e a ociosidade industrial (Silva *et al.*, 2020).

Sob o ponto de vista técnico, a cana-de-açúcar apresenta um dos melhores balanços energéticos entre os biocombustíveis, com valores frequentemente relatados na literatura entre 8:1 e 10:1. Já o milho, embora apresente balanço energético inferior, tem demonstrado viabilidade em determinadas regiões do Brasil em razão da logística integrada, do armazenamento do grão, do uso de biomassa no suprimento energético das usinas e da geração de coprodutos, como DDG e óleo de milho (Goldemberg *et al.*, 2008; Donke *et al.*, 2017; Milanez *et al.*, 2014; Fernandes, 2019).

Em termos ambientais, estudos demonstram que o etanol de cana-de-açúcar brasileiro possui uma das menores pegadas de carbono do mundo, entre os

biocombustíveis, com emissões líquidas de GEE inferiores a 25g CO₂ eq/MJ, enquanto o etanol de milho pode emitir até 60 gCO₂ eq/MJ, dependendo da matriz energética utilizada (Goldemberg *et al.*, 2008; EPE, 2024). No entanto, estudos aplicados ao contexto brasileiro indicam que a utilização de biomassa no suprimento energético, a cogeração de energia, o aumento da eficiência industrial e o aproveitamento dos coprodutos podem melhorar o desempenho ambiental da produção de etanol de milho e das usinas flex, reduzindo a intensidade de emissões associada à rota produtiva (Milanez *et al.*, 2014).

Segundo os dados da Reuters (2025), o etanol de milho já representa 23% da produção nacional, e estima-se que esse número ultrapasse os 40% na próxima década. Essa expansão reflete, não apenas, a disponibilidade da matéria-prima e a evolução tecnológica, mas também as mudanças na política energética brasileira, que tem buscado ampliar a participação de combustíveis renováveis por meio de programas como o RenovaBio (política nacional de biocombustíveis que premia a produção mais sustentável com a emissão de créditos de descarbonização - CBIOS).

Além disso, o crescimento da frota de veículos híbridos e flex, aliado a retomada de discussões globais sobre a descarbonização dos transportes, reforça a relevância do etanol na matriz energética brasileira. Nesse contexto, a diversificação das fontes de produção, torna-se estratégica, pois reduz a dependência de uma única cultura agrícola, contribuindo para o desenvolvimento regional e fortalecendo a segurança energética nacional (EPE, 2024).

Diante desse cenário, este trabalho teve como objetivo analisar os principais processos tecnológicos envolvidos na produção de etanol a partir do milho, comparando-os com a rota tradicional da cana-de-açúcar no contexto energético brasileiro.

2 Objetivos

2.1 Objetivo geral

Este trabalho tem como objetivo analisar, por meio de revisão bibliográfica sistematizada, os aspectos tecnológicos, energéticos, ambientais e econômicos envolvidos na produção de etanol a partir do milho, comparando-os com a rota tradicional da cana-de-açúcar no contexto energético brasileiro.

2.2 Objetivos específicos

- Identificar e descrever os processos tecnológicos utilizados na produção de etanol a partir do milho e da cana-de-açúcar.
- Comparar o balanço energético e o aproveitamento de coprodutos nas rotas de produção de etanol de milho e cana-de-açúcar.
- Analisar os impactos ambientais associados às duas rotas, com ênfase nas emissões de gases de efeito estufa e na pegada de carbono.
- Contextualizar a inserção do etanol de milho na matriz energética brasileira, discutindo sua complementariedade em relação à cana-de-açúcar e seu papel no desenvolvimento regional.

3 Revisão bibliográfica

3.1 Histórico da produção de etanol no Brasil

A produção de etanol no Brasil ganhou forte impulso no contexto da crise do petróleo da década de 1970, quando o governo federal instituiu o Programa Nacional do Álcool (Proálcool), em 1975, como estratégia para reduzir a dependência do petróleo importado e ampliar a produção e o uso do etanol combustível. O programa estimulou a expansão da produção de etanol a partir da cana-de-açúcar e contribuiu para o desenvolvimento da cadeia sucroenergética brasileira (Stolf; Olivera, 2020)

Desde então, a cana-de-açúcar se consolidou como a principal matéria-prima para a produção de etanol no Brasil, devido a sua alta produtividade, eficiência no uso de recursos naturais e elevado balanço energético (Goldemberg, 2007). Além disso, o etanol de cana-de-açúcar apresenta vantagens ambientais significativas, como a baixa emissão de gases de efeito estufa (GEE), contribuindo para o cumprimento das metas de sustentabilidade no setor energético (Goldemberg *et al.*, 2008).

Um marco importante foi a introdução dos veículos *flex fuel* no mercado brasileiro, a partir de 2003. Essa tecnologia possibilitou ao consumidor utilizar gasolina, etanol hidratado ou diferentes proporções entre os combustíveis, contribuindo para o aumento da demanda doméstica por etanol e para a retomada de sua participação no mercado brasileiro de combustíveis (Baran; Esteves, 2012).

Nas últimas décadas, o milho tem se apresentado como uma alternativa viável, especialmente em regiões com forte produção de grãos, como o Centro-Oeste brasileiro. A partir de 2017, foram implementadas no Brasil, as primeiras usinas dedicadas exclusivamente ao milho ou com capacidade flex, que são capazes de processar tanto o milho quanto a cana, de acordo com a disponibilidade sazonal (Donke *et al.*, 2017). Essa transição tem permitido uma maior continuidade na produção de etanol ao longo do ano, atenuando a dependência das safras de cana.

Segundo Reuters (2025), o etanol de milho representa atualmente cerca de 23% da produção nacional e tende a crescer nos próximos anos, podendo atingir 40% da participação total. Essa expansão é impulsionada não apenas pela disponibilidade de matéria-prima, mas também pela viabilidade econômica das usinas, pelas logística favorável e pelo desenvolvimento de tecnologias de conversão mais eficientes. Além disso, o Brasil também tem se destacado como exportador de etanol, principalmente

para os Estados Unidos e a União Europeia, fortalecendo sua posição no cenário global de biocombustíveis.

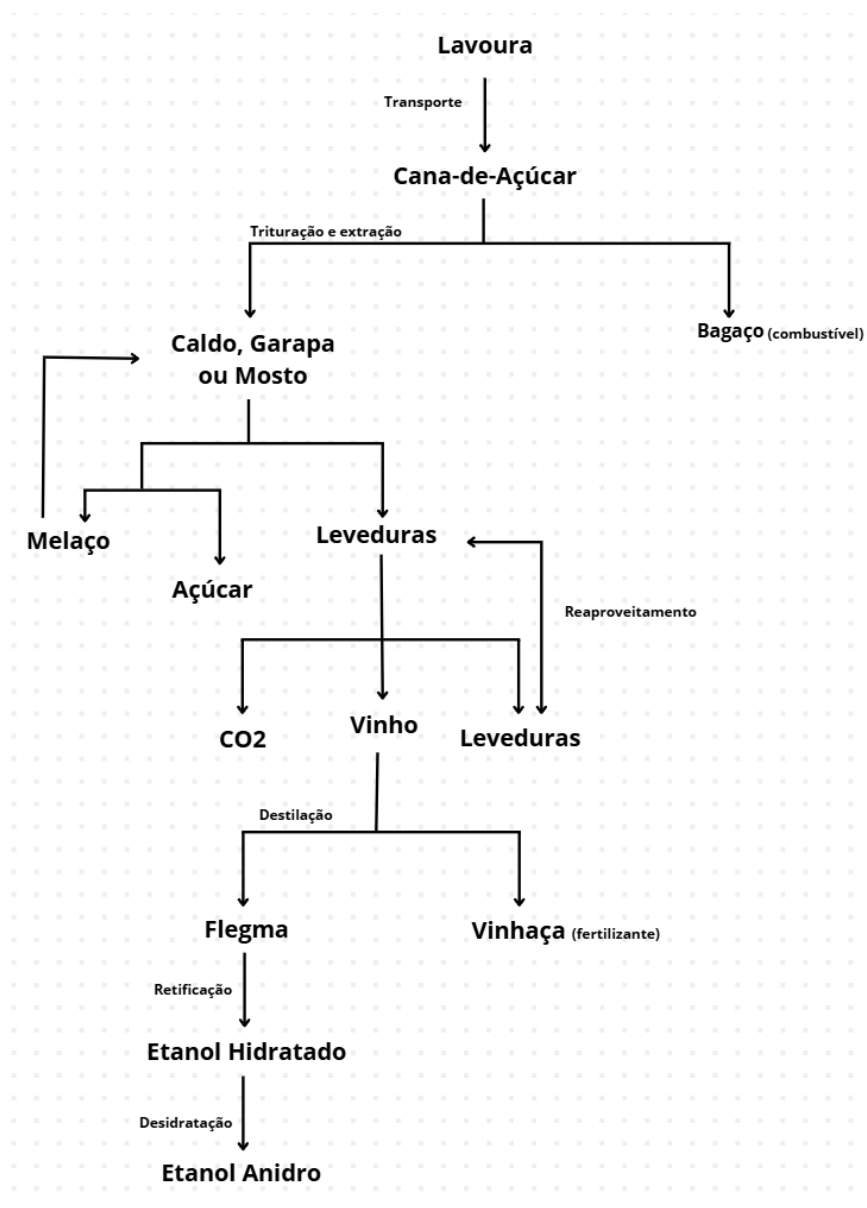
3.2 Aspectos tecnológicos da produção de etanol

A produção de etanol a partir do milho apresenta maior complexidade tecnológica, uma vez que o principal carboidrato presente no grão é o amido, que precisa ser convertido em açúcares fermentáveis antes da fermentação. Esse fator exige etapas adicionais, como moagem, cozimento, liquefação, sacarificação e uso de enzimas amilolíticas, aumentando a necessidade de controle operacional do processo (Fernandes, 2019; EMBRAPA, 2020).

3.2.1 Processo de produção de etanol a partir da cana-de-açúcar

A produção de etanol a partir da cana-de-açúcar segue uma sequência de etapas integradas que permitem a conversão dos açúcares presentes na matéria-prima em biocombustível. Inicialmente, a cana é colhida e transportada para a usina, onde ocorre a extração do caldo rico em sacarose. Em seguida, esse caldo é preparado para a fermentação alcoólica, processo no qual microrganismos convertem os açúcares em etanol. Posteriormente, o produto fermentado é submetido à destilação para obtenção do etanol hidratado e, quando necessário, à desidratação para produção do etanol anidro. Além do combustível, o processo gera subprodutos importantes, como o bagaço e a vinhaça, que podem ser aproveitados para geração de energia e aplicações agrícolas, contribuindo para a eficiência e a sustentabilidade da cadeia produtiva (Machado; Abreu, 2006), as principais etapas desse processo são apresentadas na Figura 1.

Figura 1 – Fluxograma simplificado da produção de etanol a partir da cana-de-açúcar



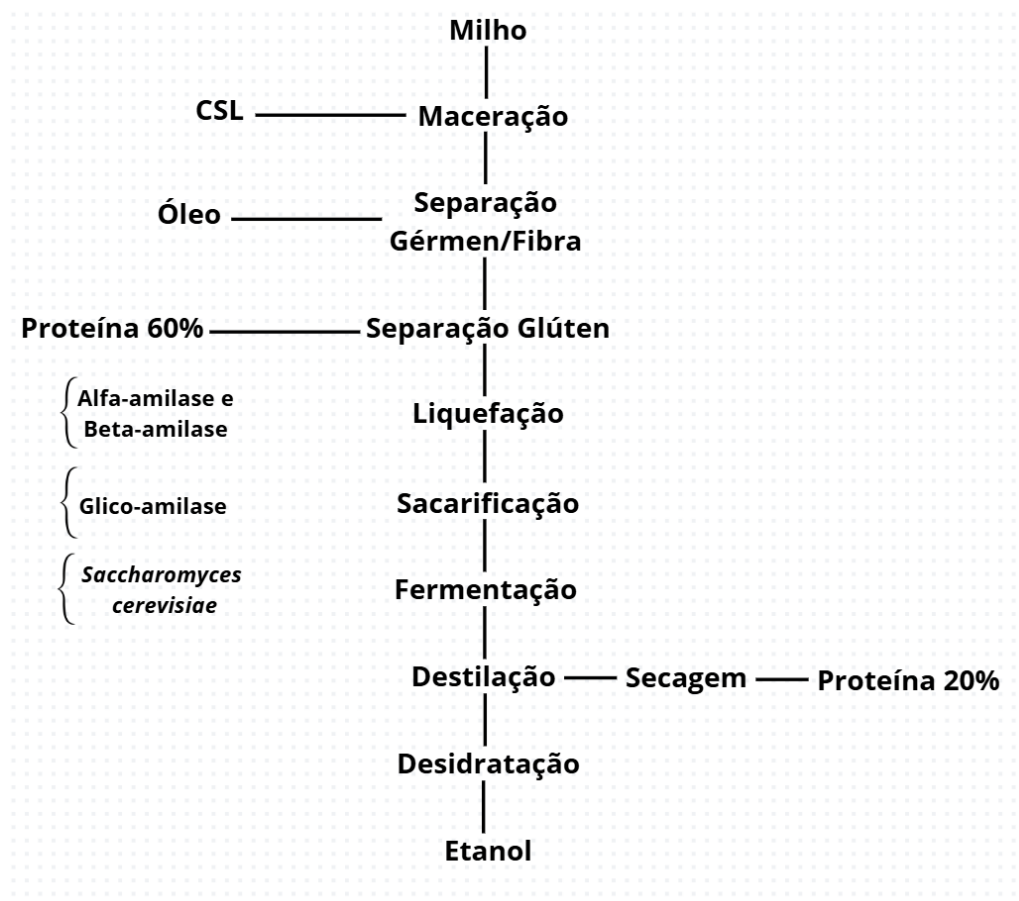
Fonte: Malajovich (2016).

3.2.2 Processo de produção de etanol a partir do milho

A produção de etanol de milho por moagem via úmida caracteriza-se pela separação prévia dos principais componentes do grão antes da fermentação. Nesse processo, o milho passa por etapas de maceração e fracionamento, permitindo a recuperação de diferentes frações, como gérmen, amido, glúten e fibras. O amido separado pode então ser destinado à conversão em açúcares fermentáveis e à posterior produção de etanol. Apesar da maior complexidade operacional e da

necessidade de equipamentos específicos, a moagem via úmida possibilita a obtenção de diferentes coprodutos de valor comercial, como óleo de milho e produtos derivados das frações proteicas (Ramirez *et al.*, 2008). A Figura 2 apresenta um fluxograma simplificado da produção de etanol de milho por moagem via úmida.

Figura 2 – Fluxograma da produção de etanol de milho por moagem via úmida



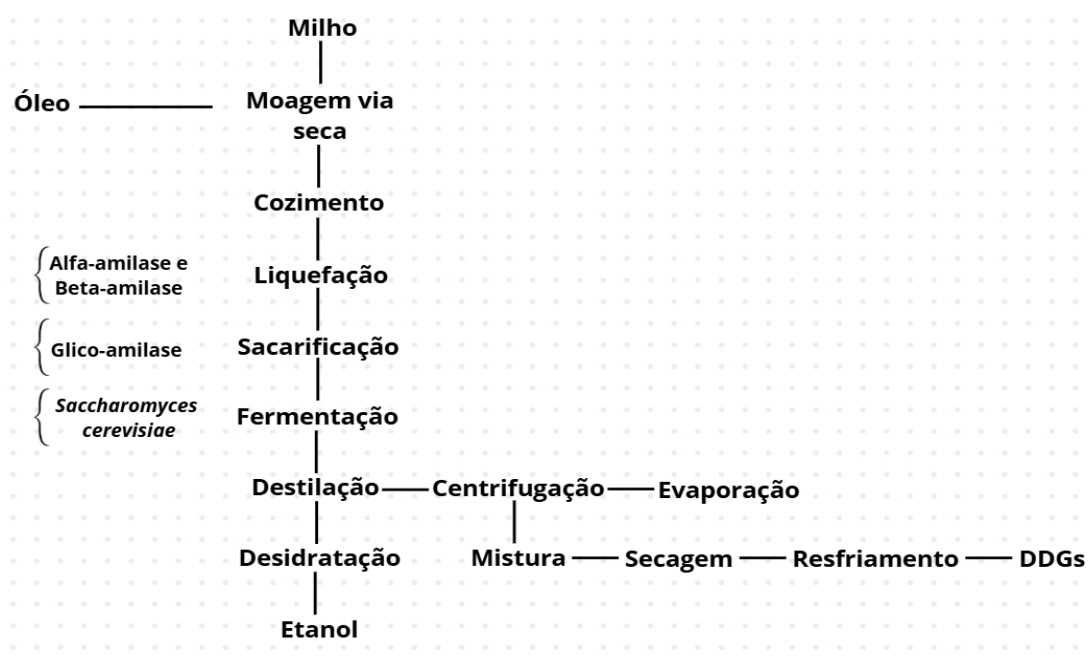
Fonte: Fernandes (2019).

3.2.3 Processo de produção de etanol de milho por moagem via seca

A moagem via seca é atualmente a tecnologia mais utilizada na produção de etanol de milho devido à sua simplicidade operacional e aos menores custos iniciais. Nesse processo, o grão é integralmente moído e misturado com água e enzimas, formando uma suspensão que passa pelas etapas de liquefação e sacarificação, nas quais o amido é convertido em açúcares fermentáveis. Em seguida, ocorre a fermentação alcoólica, seguida das etapas de separação e purificação do etanol combustível (EMBRAPA, 2020).

Além da produção de etanol, a moagem via seca permite a geração de importantes coprodutos industriais, como o DDGS (Dried Distillers Grains with Solubles), amplamente utilizado na alimentação animal, e o óleo de milho, que possui valor comercial agregado. A geração desses coprodutos, associada à disponibilidade regional da matéria-prima, contribui para a competitividade e para a expansão da produção de etanol de milho no Brasil, principalmente nas regiões produtoras de grãos (EMBRAPA, 2020; EPE, 2024). A Figura 3 apresenta um fluxograma simplificado da produção de etanol de milho por moagem via seca.

Figura 3 – Fluxograma da produção de etanol de milho por moagem via seca



Fonte: Fernandes (2019).

3.3 Tecnologias aplicadas na produção de etanol de milho

A produção de etanol a partir do milho vem apresentando crescimento significativo no Brasil, principalmente em razão da elevada disponibilidade do grão e do avanço tecnológico das usinas produtoras. O milho destaca-se como uma matéria-prima amilácea de elevado potencial fermentativo, contendo aproximadamente 70% de amido em base seca, característica que favorece sua utilização na produção de etanol combustível (Fernandes, 2019).

A cadeia produtiva do milho destinada à produção de etanol envolve etapas agrícolas e industriais integradas, incluindo cultivo, colheita, armazenamento, moagem, hidrólise do amido, fermentação e destilação. No processo industrial, o etanol pode ser produzido principalmente por moagem via seca ou via úmida. A moagem via seca é atualmente a mais utilizada devido ao menor custo operacional e maior simplicidade do processo, enquanto a moagem via úmida possibilita maior aproveitamento dos componentes do grão e geração de coprodutos industriais (Fernandes, 2019).

O processo de produção de etanol de milho por moagem via úmida está representado na Figura 2, enquanto o processo por moagem via seca está representado na Figura 3. Essa distinção é importante porque a via úmida prioriza a separação prévia das frações do grão, enquanto a via seca utiliza o grão integral moído, apresentando menor complexidade operacional e maior uso industrial para produção de etanol combustível (Fernandes, 2019; EMBRAPA, 2020).

As regiões Centro-Oeste e Sul concentram a maior parte da produção nacional de milho, destacando-se principalmente os estados de Mato Grosso, Paraná, Goiás e Mato Grosso do Sul. O estado de Mato Grosso possui grande relevância no setor de etanol de milho, destacando-se pela elevada concentração de usinas e pela expressiva participação na produção nacional de etanol de milho (UNEM, 2023). Segundo a Companhia Nacional de Abastecimento (CONAB, 2024), a produção brasileira de milho apresentou crescimento expressivo nos últimos anos, impulsionada principalmente pela expansão da segunda safra, conhecida como “safrinha”. Esse aumento da produtividade agrícola contribuiu diretamente para a expansão das usinas de etanol de milho no Brasil, permitindo maior aproveitamento do excedente produtivo e fortalecendo o setor de biocombustíveis.

Além da produção de etanol, o processamento do milho gera importantes coprodutos industriais, como DDG (Dried Distillers Grains), óleo de milho e dióxido de carbono, que agregam valor econômico ao processo produtivo. Dessa forma, o avanço das tecnologias aplicadas ao etanol de milho tem contribuído para ampliar a eficiência industrial, fortalecer a cadeia agroindustrial do milho e diversificar as fontes renováveis da matriz energética brasileira (CONAB, 2024; EPE, 2024).

3.4 Balanço energético e coprodutos

O balanço energético é um indicador essencial na avaliação da sustentabilidade de biocombustíveis. A rota da cana-de-açúcar apresenta um balanço altamente favorável, com valores que podem variar entre 8:1 e 10:1, ou seja, para cada unidade de energia fóssil utilizada, geram-se até dez unidades de energia renovável (Goldemberg *et al.*, 2008). Isso se deve a alta produtividade da cana, ao uso do bagaço para a geração de energia (bioeletricidade) e ao aproveitamento de quase toda a planta no processo.

Em contraste, o etanol de milho possui balanço energético inferior ao da cana-de-açúcar, variando conforme a eficiência agrícola, o tipo de energia utilizada no processamento industrial, a distância logística e a forma de alocação dos coprodutos. Estudos aplicados ao contexto brasileiro indicam que o uso de biomassa e a integração com a produção de DDG podem melhorar o desempenho energético e ambiental da rota do milho (Donke *et al.*, 2017; Milanez *et al.*, 2014; Fernandes, 2019).

Entretanto, o milho apresenta vantagens relacionadas à geração de coprodutos, como o DDGS (*Dried Distillers Grains with Solubles*), utilizado na alimentação animal, além do óleo de milho, que possui valor econômico para as usinas. A literatura técnica indica que, dependendo do processo e das condições consideradas, podem ser obtidos cerca de 380 kg de DDGS por tonelada seca de milho processado (BNDES; CGEE, 2008). A comercialização do DDGS e do óleo de milho contribui para a receita das unidades produtoras e pode representar parcela relevante do resultado econômico do processamento industrial (EPE, 2024).

Na rota da cana-de-açúcar, coprodutos e resíduos, como o bagaço, a vinhaça e a torta de filtro, podem ser aproveitados para fins energéticos e agrícolas, contribuindo para maior aproveitamento da matéria-prima (BNDES; CGEE, 2008). Além disso, o etanol de segunda geração utiliza materiais lignocelulósicos, incluindo resíduos da cana-de-açúcar e do milho, como alternativa para ampliar o aproveitamento da biomassa (Lima, 2011).

3.5 Impactos ambientais e pegada de carbono

Do ponto de vista ambiental, o etanol de cana-de-açúcar é amplamente reconhecido por sua baixa pegada de carbono. Estudos indicam emissões da ordem de 16 a 25gCO₂eq/MJ, o que representa uma redução superior a 80% em relação a gasolina (Goldemberg *et al.*, 2008; EPE, 2024). Além disso, práticas sustentáveis de

cultivo, como a mecanização da colheita e o reaproveitamento da vinhaça como fertilizante, contribuem para a redução dos impactos ambientais. A substituição da queima da palha, prática comum em anos anteriores, por colheita mecanizada, também resultou em ganhos ambientais significativos.

O milho, por sua vez, tende a apresentar emissões médias superiores às da cana-de-açúcar quando são considerados sistemas dependentes de energia fóssil e uso intensivo de fertilizantes nitrogenados. Entretanto, no contexto brasileiro, a utilização de biomassa como fonte energética, a cogeração de energia e a alocação ambiental dos coprodutos podem reduzir significativamente a intensidade de carbono dessa rota produtiva (Donke *et al.*, 2017; Milanez *et al.*, 2014; EPE, 2024).

Entretanto, o aproveitamento da biomassa como fonte de bioenergia e a integração entre lavouras, pecuária e cadeias agroindustriais são apontados como estratégias capazes de reduzir a dependência de recursos externos e poluentes, além de favorecer a descarbonização e a circularidade dos sistemas produtivos (Lopes, 2022).

3.6 Viabilidade econômica e inserção na matriz energética brasileira

A viabilidade econômica do etanol de cana-de-açúcar é favorecida, principalmente, pelo baixo custo de produção, pela infraestrutura consolidada e pela forte demanda interna, especialmente em estados como São Paulo, Minas Gerais e Paraná. Além disso, a previsibilidade de mercado e os incentivos do programa RenovaBio, que valoriza produções com menor emissão de carbono por meio dos CBIOS (créditos de descarbonização), reforçam sua competitividade (EPE, 2024).

O milho por sua vez, apresenta maior custo inicial de instalação industrial, mas permite produção em regiões antes não atendidas pela cana, como o Centro-Oeste e o Norte. A logística reversa com a produção de ração animal, a possibilidade de produção durante o ano inteiro e os preços competitivos do milho em algumas safras favorecem sua inserção no mercado (Donke *et al.*, 2017).

Estimativas setoriais indicam que o custo operacional do etanol de milho pode variar conforme a localidade, o preço do grão, o custo da energia, o preço das enzimas e a valorização de coprodutos, como DDG e óleo de milho. Levantamentos divulgados pelo setor apontam maior competitividade em polos produtores de milho, como Mato Grosso, especialmente quando há disponibilidade regional de matéria-prima e mercado consumidor para ração animal (NovaCana, 2025; Milanez *et al.*, 2014).

A diversificação das fontes de produção de etanol contribui para ampliar a segurança energética nacional e reduzir a dependência de combustíveis fósseis. Além disso, a expansão das rotas produtivas associadas à cana-de-açúcar e ao milho favorece o desenvolvimento regional e o fortalecimento do setor de biocombustíveis no Brasil (EPE, 2024).

4 Metodologia

Este trabalho foi desenvolvido por meio de uma abordagem qualitativa, exploratória e descritiva, utilizando como método uma revisão bibliográfica sistematizada. Optou-se pela expressão revisão bibliográfica sistematizada porque o estudo adotou critérios explícitos de busca, seleção e análise das fontes, mas não realizou metanálise estatística nem aplicação integral de todos os requisitos de uma revisão sistemática com protocolo registrado.

A organização da busca e da seleção dos materiais foi orientada por princípios de transparência metodológica semelhantes aos recomendados pelo modelo PRISMA 2020, especialmente quanto ao registro das etapas de identificação, triagem, elegibilidade e inclusão dos estudos. O uso desse modelo teve finalidade de organização e rastreabilidade do processo de revisão, permitindo que o leitor compreenda como as fontes foram localizadas, avaliadas e selecionadas.

As buscas foram realizadas em diferentes fontes de informação. As bases de dados bibliográficas consultadas foram Scopus. Também foi utilizada a plataforma de periódicos científicos ScienceDirect, além da biblioteca eletrônica SciELO e da ferramenta de busca acadêmica Google Scholar, com o objetivo de ampliar a recuperação de estudos relevantes. Complementarmente, foram consultadas fontes institucionais e documentais, incluindo relatórios técnicos, painéis estatísticos e publicações oficiais da EPE, ANP, CONAB, MAPA, IEA, UNEM e UNICA, para obtenção de dados atualizados sobre produção, mercado, políticas públicas e matriz energética brasileira.

A estratégia de busca utilizada, incluindo as fontes consultadas, os campos pesquisados, os termos empregados, os filtros aplicados e a finalidade de cada fonte na revisão, estão apresentados no Quadro 1.

Quadro 1 - Estratégia de busca utilizada na revisão bibliográfica

Fonte consultada	Campos pesquisados	Termos e combinações utilizados	Filtros aplicados	Finalidade na revisão
Scopus	Título, resumo e palavras-chave	"corn ethanol" AND Brazil; "sugarcane ethanol" AND "energy balance"; "biofuel production" AND ethanol	2014-2025; artigos e revisões; inglês e português	Identificar artigos científicos sobre balanço energético, tecnologias e impactos ambientais.
ScienceDirect	Título, resumo e palavras-chave	"corn ethanol" AND Brazil; "sugarcane ethanol" AND "energy balance"; "biofuel production" AND ethanol	2014-2025; artigos e revisões; inglês e português	Identificar artigos científicos sobre balanço energético, tecnologias e impactos ambientais.
Google Scholar	Título, resumo e texto completo	"etanol de milho" AND Brasil; "etanol de cana-de-açúcar" AND "pegada de carbono"; "usinas flex" AND etanol	2014-2025; ordenação por relevância; exclusão de materiais sem autoria ou sem dados técnicos	Ampliar a busca e localizar dissertações, documentos técnicos e estudos brasileiros.
SciELO	Título, resumo e palavras-chave	"biocombustíveis" OR "etanol" AND "cana-de-açúcar"; "etanol de milho"	Português/inglês; 2014-2025	Localizar publicações nacionais relacionadas a bioenergia e sustentabilidade.
Fontes institucionais	Relatórios, painéis e documentos técnicos	EPE, ANP, CONAB, MAPA, IEA, UNEM, UNICA, RenovaBio, produção de etanol, matriz energética	Documentos oficiais e setoriais publicados até 2025	Atualizar dados de produção, mercado, matriz energética, políticas públicas e expansão regional.

Fonte: Elaborado pelo autor (2026).

Foram utilizadas palavras-chave em português e inglês, isoladas e combinadas por operadores booleanos. As principais expressões foram: "etanol de milho" OR "corn ethanol"; "etanol de cana-de-açúcar" OR "sugarcane ethanol"; "balanço energético" OR "energy balance"; "pegada de carbono" OR "carbon footprint"; "coprodutos do etanol" OR "ethanol coproducts"; "moagem via seca" OR "dry milling"; "moagem via úmida" OR "wet milling"; "usinas flex" OR "flex plants"; e "matriz energética brasileira" OR "Brazilian energy matrix".

O recorte temporal foi definido entre 2014 e 2025, de estudos compatíveis com a expansão brasileira do etanol de milho e com o avanço das usinas flex. Trabalhos anteriores a 2014 foram mantidos apenas quando considerados clássicos ou necessários para contextualização histórica, como estudos sobre a consolidação do etanol de cana-de-açúcar no Brasil. Dessa forma, referências clássicas não foram utilizadas isoladamente para sustentar conclusões atuais, mas como base histórica complementada por dados recentes.

Os critérios de inclusão foram: (i) estudos publicados entre 2014 e 2025, salvo referências clássicas de contextualização; (ii) artigos científicos, dissertações, teses, livros técnicos, relatórios institucionais e documentos setoriais com autoria identificada; (iii) materiais relacionados à produção de etanol de milho, etanol de cana-de-açúcar ou comparação entre rotas; (iv) presença de dados ou discussão sobre processo tecnológico, balanço energético, emissões, coprodutos, viabilidade econômica ou inserção na matriz energética; e (v) aplicabilidade ao contexto brasileiro ou possibilidade de comparação internacional.

Os critérios de exclusão foram: (i) registros duplicados; (ii) textos sem relação direta com os objetivos do trabalho; (iii) materiais opinativos sem dados técnicos; (iv) publicações sem autoria ou origem institucional verificável; (v) estudos sem descrição mínima de metodologia ou base de dados; (vi) fontes desatualizadas utilizadas para sustentar dados atuais; e (vii) documentos que tratavam de biocombustíveis sem abordar especificamente etanol de milho, etanol de cana-de-açúcar ou indicadores comparativos entre rotas.

O fluxo de identificação, triagem, leitura e seleção das fontes utilizadas na revisão está apresentado no Quadro 2, de modo a demonstrar a quantidade de registros avaliados e os procedimentos adotados em cada etapa.

Quadro 2 - Fluxo de identificação, triagem e seleção das fontes

Etapas	Número de registros/fontes	Procedimento adotado
Identificação	64	Registros localizados em bases científicas, Google Scholar e fontes institucionais.
Remoção de duplicatas e materiais repetidos	7	Exclusão de registros duplicados ou versões repetidas do mesmo documento.
Triagem por título e resumo	57 avaliados; 30 excluídos	Exclusão de trabalhos sem relação direta com etanol de milho, cana-de-açúcar, bioenergia ou indicadores comparativos.
Leitura integral	27	Leitura completa dos materiais potencialmente relevantes.
Exclusão após leitura integral	11	Exclusão de fontes sem dados úteis para os indicadores analisados ou sem rigor metodológico suficiente.
Fontes principais incluídas	16	Fontes utilizadas diretamente na comparação tecnológica, energética, ambiental e econômica.
Fontes complementares	Variável	Materiais utilizados para contextualização, metodologia, dados setoriais e figuras.

Fonte: Elaborado pelo autor (2026), adaptado da lógica de fluxo do PRISMA 2020.

Para cada fonte incluída, foram extraídas informações em planilha eletrônica contendo: autor ou instituição, ano, tipo de publicação, local ou abrangência do

estudo, matéria-prima analisada, tecnologia produtiva, indicadores considerados, principais resultados e limitações apontadas. Essa etapa permitiu organizar as evidências e reduzir o risco de que as conclusões fossem sustentadas apenas por referências clássicas ou por dados isolados.

As fontes principais selecionadas para a análise comparativa, bem como o motivo de sua inclusão e os dados utilizados em cada caso, estão apresentadas no Quadro 3.

Quadro 3 - Fontes principais selecionadas e justificativa de inclusão

Fonte	Ano	Tipo	Motivo da inclusão	Dados utilizados na análise
Goldemberg	2007	Artigo científico	Referência clássica sobre etanol e sustentabilidade energética.	Contextualização histórica e papel do etanol brasileiro.
Goldemberg et al.	2008	Artigo científico	Base clássica sobre sustentabilidade do etanol de cana-de-açúcar.	Balanço energético, emissões e vantagens da rota da cana.
Donke, Ortega e Fadigas	2017	Artigo científico	Estudo aplicado ao Brasil sobre energia e emissões do etanol de milho.	Balanço energético, emissões de GEE e comparação com sistemas brasileiros.
Milanez et al.	2014	Artigo técnico-científico BNDES	Analisa integração milho-safrinha, usinas flex e desempenho ambiental/econômico.	Complementaridade entre rotas, usinas flex e viabilidade regional.
Fernandes	2019	Trabalho acadêmico	Descreve processos de moagem via seca e via úmida do milho.	Etapas tecnológicas, enzimas, fermentação e coprodutos.
Embrapa	2020	Comunicado técnico	Apresenta aspectos de rendimento de etanol de grãos e diferenças tecnológicas.	Processos de moagem, rendimento e variabilidade entre matérias-primas amiláceas.

Fonte	Ano	Tipo	Motivo da inclusão	Dados utilizados na análise
EPE - BEN	2024	Relatório institucional	Fonte oficial sobre matriz energética brasileira.	Participação de renováveis, contexto energético e dados nacionais.
EPE - Biocombustíveis	2024	Relatório institucional	Atualiza cenário de biocombustíveis no Brasil.	Produção de etanol, tendências e políticas públicas.
ANP	2025	Painel oficial	Fonte regulatória para dados de produção e mercado.	Dados de biocombustíveis e acompanhamento setorial.
CONAB	2024	Relatório institucional	Fonte oficial sobre produção agrícola e safra de grãos.	Oferta de milho, safrinha e disponibilidade de matéria-prima.
MAPA	2024	Relatório institucional	Projeções do agronegócio brasileiro.	Tendências de produção agrícola e expansão regional.
IEA	2024	Relatório internacional	Contextualiza biocombustíveis na transição energética global.	Cenário internacional e papel dos biocombustíveis.
UNEM	2023/2025	Fonte setorial	Representa cadeia do etanol de milho e dados de expansão.	Capacidade instalada, produção e presença regional.
Reuters	2025	Notícia econômica com dados setoriais	Atualiza participação do etanol de milho na produção nacional.	Participação de 23% e projeção de 40% na próxima década.
NovaCana/DATAGRO	2025	Fonte setorial/econômica	Apresenta estimativas recentes de custo de produção.	Custos operacionais e competitividade econômica.
Malajovich	2016	Livro/material didático técnico	Fonte utilizada para o fluxograma de produção da cana-de-açúcar.	Etapas gerais da produção fermentativa de etanol de cana.

Fonte: Elaborado pelo autor (2026).

Nota: ANP – Agência Nacional do Petróleo, Gás Natural e Biocombustíveis; BEN – Balanço Energético Nacional; BNDES – Banco Nacional de Desenvolvimento Econômico e Social; CONAB – Companhia Nacional de Abastecimento; EMBRAPA – Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária;

EPE – Empresa de Pesquisa Energética; IEA – International Energy Agency (Agência Internacional de Energia); MAPA – Ministério da Agricultura e Pecuária; UNEM – União Nacional do Etanol de Milho.

A análise dos dados foi realizada por comparação temática e síntese narrativa. Os indicadores extraídos foram agrupados em quatro eixos: (i) tecnológico, envolvendo etapas produtivas, complexidade operacional e tecnologias empregadas; (ii) energético, envolvendo balanço energético, cogeração e uso de biomassa; (iii) ambiental, envolvendo emissões de GEE, uso de fertilizantes e aproveitamento de resíduos; e (iv) econômico, envolvendo custo de produção, logística, coprodutos, sazonalidade e inserção regional.

Para aumentar a reprodutibilidade, as conclusões foram construídas a partir da convergência entre diferentes tipos de fonte: artigos científicos, trabalhos acadêmicos, relatórios institucionais e dados setoriais. Quando os estudos apresentaram diferenças de escopo, ano, localidade ou método de cálculo, essas limitações foram consideradas na discussão, evitando generalizações absolutas sobre o desempenho de cada rota produtiva.

5 Resultados e discussão

A análise das publicações incluídas nesta revisão permitiu comparar as principais características das rotas de produção de etanol a partir da cana-de-açúcar e do milho sob quatro eixos temáticos: tecnológico, energético, ambiental e econômico. A síntese comparativa dos principais indicadores tecnológicos, energéticos, ambientais e econômicos das duas rotas está apresentada no Quadro 4.

Quadro 4 - Síntese comparativa dos principais indicadores encontrados na literatura

Indicador	Cana-de-açúcar	Milho	Interpretação comparativa
Processo tecnológico	Açúcares fermentáveis disponíveis no caldo; menor necessidade de pré-tratamento.	Amido precisa ser convertido por liquefação e sacarificação; maior uso de enzimas.	A rota da cana é mais simples; a rota do milho exige maior controle operacional.
Balanco energético	Frequentemente relatado entre 8:1 e 10:1.	Inferior ao da cana, com desempenho dependente de energia industrial e coprodutos.	A cana mantém vantagem energética, mas o milho melhora quando usa biomassa e cogeração.
Emissões de GEE	Menor pegada de carbono, especialmente pelo uso do bagaço e cogeração.	Pode apresentar emissões superiores, influenciadas por fertilizantes e energia do processo.	A matriz energética da usina é decisiva para a comparação ambiental.
Coprodutos	Bagaço, vinhaça, torta de filtro e bioeletricidade.	DDG/DDGS, óleo de milho e CO ₂ .	O milho ganha competitividade econômica pela venda de coprodutos para ração e outros usos.
Sazonalidade e logística	Matéria-prima perecível, processada logo após a colheita.	Grão pode ser armazenado por longos períodos.	O milho permite produção mais contínua e complementa a entressafra da cana.

Indicador	Cana-de-açúcar	Milho	Interpretação comparativa
Viabilidade econômica	Cadeia consolidada, infraestrutura ampla e mercado estabelecido.	Mais sensível ao preço do grão, energia e enzimas, mas competitivo em regiões produtoras.	As rotas são complementares e dependem do contexto regional.

Fonte: Elaborado pelo autor (2026), com base em Goldemberg *et al.* (2008), Donke *et al.* (2017), Milanez *et al.* (2014), Fernandes (2019), EPE (2024), CONAB (2024) e Reuters (2025).

Nota: GEE – gases de efeito estufa; DDG – *Dried Distillers Grains* (grãos secos de destilaria); DDGS – *Dried Distillers Grains with Solubles* (grãos secos de destilaria com solúveis); CO₂ – dióxido de carbono.

A partir dessa síntese, observa-se que a superioridade da cana-de-açúcar em eficiência energética e desempenho ambiental não elimina a relevância do milho. A principal contribuição do milho está na complementaridade produtiva, na redução da sazonalidade, no aproveitamento de excedentes regionais de grãos e na geração de coprodutos com valor econômico (Goldemberg *et al.*, 2008; Milanez *et al.*, 2014; EPE, 2024).

A produção de etanol a partir da cana-de-açúcar é historicamente consolidada no Brasil, contando com ampla infraestrutura industrial, domínio tecnológico e elevada eficiência energética. Esses fatores contribuem para que essa rota continue sendo a principal fonte de etanol no país (Goldemberg *et al.*, 2008; EPE, 2024).

Por outro lado, o etanol de milho vem apresentando crescimento nos últimos anos, principalmente em regiões produtoras de grãos, como o Centro-Oeste. Esse avanço está relacionado à expansão da produção agrícola, à disponibilidade regional da matéria-prima, ao desenvolvimento das usinas flex e ao aperfeiçoamento dos processos tecnológicos empregados na conversão do milho em etanol (CONAB, 2024; Milanez *et al.*, 2014; EPE, 2024).

Os estudos analisados indicam que o crescimento do etanol de milho não representa necessariamente uma substituição da cana-de-açúcar, mas uma alternativa complementar. A integração entre essas duas matérias-primas pode contribuir para maior regularidade da produção ao longo do ano, melhor

aproveitamento da infraestrutura industrial e fortalecimento da oferta nacional de etanol (Milanez *et al.*, 2014; EPE, 2024).

5.1 Comparação tecnológica entre as rotas de produção

Os estudos analisados mostram que a principal diferença tecnológica entre a produção de etanol de cana-de-açúcar e de milho está na complexidade do processamento industrial.

No caso da cana-de-açúcar, o processo é considerado mais simples, pois a matéria-prima já possui açúcares fermentáveis em sua composição, principalmente sacarose. Isso permite que a produção ocorra com menos etapas industriais, reduzindo a necessidade de tratamentos adicionais antes da fermentação. Além disso, essa rota já se encontra amplamente consolidada no Brasil, com infraestrutura industrial desenvolvida e processos produtivos otimizados ao longo dos anos (Goldemberg, 2007).

Outro fator importante é o aproveitamento do bagaço para cogeração de energia elétrica e térmica dentro das próprias usinas. Esse reaproveitamento reduz custos operacionais e melhora a eficiência global do processo Goldemberg *et al.*, 2008).

Apesar dessa maior complexidade, a literatura mostra que os avanços tecnológicos têm tornado essa rota mais eficiente. O uso de automação industrial, monitoramento de processo, otimização do uso de enzimas e integração energética tem contribuído para ganhos produtivos e redução de perdas durante o processamento (Fernandes, 2019; EMBRAPA, 2020; Milanez *et al.*, 2014).

Além disso, o milho apresenta uma vantagem logística importante: pode ser armazenado por períodos prolongados sem perdas significativas de qualidade, ao contrário da cana-de-açúcar, que precisa ser processada rapidamente após a colheita. Isso permite maior flexibilidade operacional e produção contínua ao longo do ano.

Nesse cenário, as usinas flex vêm ganhando destaque por possibilitar o processamento de cana na safra e milho na entressafra, aumentando o aproveitamento da infraestrutura industrial e reduzindo a sazonalidade da produção (Donke *et al.*, 2017).

Assim, embora a cana-de-açúcar ainda apresente maior simplicidade e maturidade tecnológica, os avanços recentes indicam que o etanol de milho vem se

tornando uma alternativa cada vez mais competitiva no setor sucroenergético brasileiro.

5.2 Comparação do balanço energético

O desempenho energético é um dos principais parâmetros utilizados para avaliar a eficiência e a sustentabilidade de diferentes rotas de produção de biocombustíveis. Esse indicador considera a relação entre a energia renovável gerada e a energia fóssil consumida ao longo de todo o processo produtivo, incluindo etapas agrícolas, industriais e logísticas. A partir da literatura analisada, observou-se que a rota da cana-de-açúcar apresenta desempenho energético superior ao da rota do milho.

Os estudos apontam que o balanço energético do etanol produzido a partir da cana-de-açúcar pode variar entre 8:1 e 10:1, o que significa que, para cada unidade de energia fóssil consumida, podem ser geradas até dez unidades de energia renovável (Goldemberg *et al.*, 2008). Esse elevado desempenho está diretamente relacionado à alta produtividade agrícola da cana-de-açúcar, ao aproveitamento integral da biomassa e, principalmente, à utilização do bagaço como fonte de energia térmica e elétrica nas usinas.

A cogeração de energia a partir do bagaço representa um dos principais diferenciais da cadeia sucroenergética brasileira, pois permite que muitas usinas sejam autossuficientes em energia e, em alguns casos, exportem excedentes de eletricidade para a rede nacional. Além disso, o reaproveitamento de resíduos como a palha e a vinhaça contribui para aumentar a eficiência global do sistema produtivo.

Enquanto a literatura indica que o etanol de milho apresenta balanço energético inferior ao da cana-de-açúcar, mas com possibilidade de melhoria quando há uso de biomassa no suprimento térmico, cogeração de energia e aproveitamento de coprodutos. Assim, a comparação entre rotas deve considerar não apenas o rendimento direto em etanol, mas também a energia incorporada aos insumos agrícolas, o transporte, a matriz energética industrial e os créditos associados aos coprodutos (Donke *et al.*, 2017; Milanez *et al.*, 2014; Fernandes, 2019).

Outro fator que influencia negativamente o desempenho energético do milho é a utilização de fertilizantes sintéticos e combustíveis fósseis nas etapas agrícolas, aumentando a energia incorporada no processo. Entretanto, alguns estudos demonstram que o uso de biomassa ou outras fontes renováveis nas usinas de milho

podem melhorar significativamente esse indicador, tornando a rota mais competitiva em termos energéticos.

Além disso, a produção de coprodutos, como DDG e óleo de milho, deve ser considerada na avaliação do desempenho energético global dessa rota. Esses subprodutos agregam valor econômico e podem compensar parte da energia investida no processo, especialmente quando utilizados em cadeias produtivas integradas.

Os estudos também apontam que o avanço de tecnologias mais eficientes, como otimização enzimática, automação industrial e integração energética, tende a melhorar o desempenho energético do etanol de milho nos próximos anos. Dessa forma, embora a cana-de-açúcar ainda apresente clara superioridade nesse aspecto, a evolução tecnológica pode reduzir gradativamente essa diferença.

Assim, a análise da literatura permite concluir que o etanol de cana-de-açúcar apresenta maior eficiência energética e melhor aproveitamento da biomassa no cenário atual. No entanto, o etanol de milho apresenta potencial de melhoria e expansão, especialmente em sistemas produtivos integrados e sustentáveis.

5.3 Comparação dos impactos ambientais

A análise dos estudos demonstra que ambas as rotas de produção de etanol apresentam vantagens ambientais em relação aos combustíveis fósseis, especialmente pela redução das emissões de gases de efeito estufa. Entretanto, observam-se diferenças importantes entre o etanol produzido a partir da cana-de-açúcar e o produzido a partir do milho.

Os resultados encontrados na literatura indicam que o etanol de cana-de-açúcar apresenta menor pegada de carbono e maior eficiência ambiental no cenário brasileiro. Isso ocorre principalmente devido ao elevado aproveitamento energético da biomassa e à utilização do bagaço para cogeração de energia nas usinas (Goldemberg *et al.*, 2008). Além disso, a mecanização da colheita e o reaproveitamento de resíduos agrícolas contribuíram para reduzir impactos ambientais associados ao processo produtivo.

Em contrapartida, o etanol de milho pode apresentar emissões mais elevadas de gases de efeito estufa quando o processo depende de energia fóssil e fertilizantes nitrogenados. Contudo, estudos sobre usinas flex e sistemas brasileiros indicam que o uso de biomassa, a cogeração e a integração com cadeias agroindustriais podem reduzir a pegada ambiental da rota do milho, tornando-a mais competitiva do que

sistemas internacionais tradicionais baseados em matriz fóssil (Donke *et al.*, 2017; Milanez *et al.*, 2014; EPE, 2024).

Outro aspecto relevante observado na literatura é que o aproveitamento de coprodutos, como DDG e óleo de milho, contribui para aumentar a eficiência global da cadeia produtiva do milho, reduzindo perdas e agregando valor econômico ao processo.

5.4 Comparação da viabilidade econômica

A viabilidade econômica é um fator essencial para a expansão e consolidação das rotas de produção de etanol, pois está diretamente relacionada aos custos de produção, à disponibilidade de matéria-prima, à infraestrutura industrial e às condições de mercado. A partir da literatura analisada, observou-se que tanto a cana-de-açúcar quanto o milho apresentam potencial econômico, porém em contextos regionais distintos.

A produção de etanol a partir da cana-de-açúcar apresenta elevada competitividade econômica no Brasil devido à infraestrutura já consolidada, à alta produtividade agrícola e ao aproveitamento energético de resíduos, como o bagaço. Esses fatores contribuem para a redução dos custos operacionais e para maior estabilidade na produção. Além disso, a cadeia produtiva da cana já está amplamente integrada ao mercado nacional, favorecendo sua comercialização e distribuição (Goldemberg *et al.*, 2008).

Em contrapartida, a produção de etanol de milho apresenta custos mais sensíveis à variação do preço do grão, ao custo das enzimas utilizadas no processo e ao consumo energético industrial. Entretanto, em estados como Mato Grosso, Goiás e Mato Grosso do Sul, onde há elevada produção de milho e logística favorável, essa rota vem demonstrando crescente viabilidade econômica (CONAB, 2024).

Outro fator importante na competitividade do etanol de milho é a geração de coprodutos, como DDG (Distillers Dried Grains) e óleo de milho, que agregam valor ao processo produtivo e contribuem para a rentabilidade das usinas. Em alguns casos, a comercialização desses subprodutos pode representar parcela significativa da receita industrial.

Além disso, políticas públicas como o programa RenovaBio têm incentivado a produção de biocombustíveis com menor intensidade de carbono, por meio da comercialização de Créditos de Descarbonização (CBIOS). Esse mecanismo aumenta

a atratividade econômica tanto da cana quanto do milho, estimulando investimentos no setor.

5.5 Perspectivas futuras para o setor

A literatura analisada aponta que o setor sucroenergético brasileiro tende a passar por um processo de expansão e diversificação nos próximos anos, impulsionado pelo aumento da demanda por combustíveis renováveis, pelo avanço tecnológico e pelo fortalecimento de políticas ambientais.

No caso do etanol de milho, a tendência observada é de crescimento contínuo da produção nacional, principalmente nas regiões Centro-Oeste e Sul do país. Esse crescimento está relacionado à disponibilidade de matéria-prima, à expansão das usinas flex e ao desenvolvimento de tecnologias mais eficientes de processamento industrial (EPE, 2024).

As usinas flex representam uma importante inovação para o setor, pois permitem o processamento de cana-de-açúcar durante a safra e de milho na entressafra, garantindo maior regularidade na produção ao longo do ano e melhor aproveitamento da infraestrutura industrial.

Além disso, o desenvolvimento do etanol de segunda geração (2G), produzido a partir de resíduos lignocelulósicos como palha, bagaço, sabugo e fibras vegetais, apresenta grande potencial para aumentar a eficiência produtiva e reduzir os impactos ambientais do setor.

Nesse contexto, os estudos indicam que a tendência futura não é de substituição da cana-de-açúcar pelo milho, mas sim de complementaridade entre essas matérias-primas. Essa integração pode fortalecer a matriz energética brasileira, aumentar a segurança no abastecimento e reduzir a dependência de combustíveis fósseis.

5.6 Limitações da revisão e comparabilidade entre estudos

Uma limitação importante desta revisão é que os estudos analisados utilizam diferentes metodologias, fronteiras de sistema, unidades funcionais, condições agrícolas, matrizes energéticas e formas de alocação de coprodutos. Por esse motivo, os indicadores de balanço energético, emissões de GEE e custos de produção não

devem ser interpretados como valores absolutos e universais, mas como faixas comparativas dependentes do contexto produtivo.

Outra limitação refere-se à combinação de fontes científicas e institucionais. Os artigos revisados por pares fornecem maior rigor metodológico, enquanto relatórios de órgãos oficiais e fontes setoriais oferecem dados mais recentes sobre produção, mercado e expansão regional. Assim, as conclusões foram construídas buscando equilíbrio entre rigor científico e atualidade dos dados, evitando que resultados atuais fossem sustentados apenas por estudos clássicos ou por fontes antigas.

Além disso, a ausência de metanálise impede a obtenção de médias estatísticas consolidadas para todos os indicadores. Ainda assim, a sistematização em quadros permite visualizar convergências e divergências entre as fontes, tornando a comparação mais transparente e reprodutível para o leitor.

6 Considerações finais

As duas matérias-primas possuem funções estratégicas distintas e complementares na matriz nacional de biocombustíveis. A cana-de-açúcar permanece como a rota mais consolidada no Brasil, apresentando maior simplicidade tecnológica, elevada eficiência energética, ampla infraestrutura industrial e menor pegada de carbono em comparação com sistemas convencionais de etanol de milho. Esses fatores explicam sua permanência como referência nacional em bioenergia e sustentabilidade.

O milho, por outro lado, destaca-se pela possibilidade de armazenamento da matéria-prima, pela produção ao longo da entressafra da cana, pela expansão em regiões produtoras de grãos e pela geração de coprodutos economicamente relevantes, como DDG/DDGS e óleo de milho. Assim, sua importância não está em substituir a cana-de-açúcar, mas em complementar a oferta nacional de etanol e reduzir a sazonalidade produtiva.

A análise comparativa também demonstrou que os resultados energéticos, ambientais e econômicos dependem fortemente das condições regionais, da matriz energética utilizada nas usinas, das tecnologias industriais empregadas, da distância logística e da forma de aproveitamento dos coprodutos. Por isso, a comparação entre as rotas deve considerar não apenas o rendimento direto de etanol, mas o desempenho integrado da cadeia produtiva.

Como contribuição metodológica, a revisão passou a apresentar critérios explícitos de busca, seleção, inclusão, exclusão e extração dos dados, além de quadros de síntese que indicam quais fontes foram utilizadas e porque foram selecionadas. Com isso, o leitor passa a ter maior clareza sobre o caminho metodológico seguido e sobre a origem das conclusões apresentadas.

Recomenda-se que pesquisas futuras incorporem abordagens quantitativas para avaliar a viabilidade econômica, desempenho ambiental, intensidade de carbono, eficiência logística regional e o potencial de integração do etanol de segunda geração, considerando diferentes configurações tecnológicas e cenários regionais de produção de milho e cana-de-açúcar no Brasil.

REFERÊNCIAS

AGÊNCIA NACIONAL DO PETRÓLEO, GÁS NATURAL E BIOCOMBUSTÍVEIS (ANP). Painéis Dinâmicos sobre Combustíveis, Infraestrutura, Qualidade e RenovaBio. [S. l.]: ANP, [s. d.]. Disponível em: <https://www.gov.br/anp/pt-br/centrais-de-conteudo/paineis-dinamicos-da-anp/paineis-dinamicos-sobre-combustiveis>.

Acesso em: 10 jul. 2026.

BARAN, P. H.; ESTEVES, H. B. B. O novo marco regulatório para o etanol combustível no Brasil. In: RIO OIL & GAS EXPO AND CONFERENCE, 2012, Rio de Janeiro. Anais [...]. Rio de Janeiro: IBP, 2012. Disponível em: <https://www.gov.br/anp/pt-br/centrais-de-conteudo/notas-e-estudos-tecnicos/estudos-tecnicos/arquivos/2012/novo-marco-regulatorio-etanol-2012.pdf>. Acesso em: 10 jul. 2026.

BANCO NACIONAL DE DESENVOLVIMENTO ECONÔMICO E SOCIAL (BRASIL); CENTRO DE GESTÃO E ESTUDOS ESTRATÉGICOS. Bioetanol de cana-de-açúcar: energia para o desenvolvimento sustentável. 1. ed. Rio de Janeiro: BNDES, 2008. 314 p. ISBN 978-85-87545-24-4. Disponível em: <https://web.bndes.gov.br/bib/jspui/handle/1408/2002>. Acesso em: 10 jul. 2026.

CARDOSO, W. S.; PAES, M. C. D.; DIAS, S. R.; CAMPOREZI, J. D.; MODOLO, M. U.; PINHEIRO, F. de A. Metodologia científica: determinação do rendimento de produção de etanol de grãos de milho por via seca em escala laboratorial. Sete Lagoas, MG: Embrapa Milho e Sorgo, 2020. 17 p. (Comunicado Técnico, 246). Disponível em: <https://www.infoteca.cnptia.embrapa.br/infoteca/handle/doc/1126607>. Acesso em: 10 jul. 2026.

COMPANHIA NACIONAL DE ABASTECIMENTO (CONAB). Acompanhamento da Safra Brasileira de Grãos: safra 2024/25. Brasília, DF: Conab, 2024. Disponível em: <https://www.gov.br/conab/pt-br/atuacao/informacoes-agropecuarias/safras/safra-de-graos>. Acesso em: 10 jul. 2026.

DONKE, A. C. G.; NOGUEIRA, A. R.; MATAI, P. H. L. dos S.; KULAY, L. A. Environmental and energy performance of ethanol production from the integration of sugarcane, corn, and grain sorghum in a multipurpose plant. *Resources*, v. 6, n. 1, art. 1, p. 1-19, 2017. DOI: 10.3390/resources6010001. Disponível em: <https://doi.org/10.3390/resources6010001>. Acesso em: 10 jul. 2026.

EMPRESA DE PESQUISA ENERGÉTICA (EPE). Balanço Energético Nacional 2024: ano base 2023. Rio de Janeiro: EPE, 2024. Disponível em: <https://www.epe.gov.br/pt/publicacoes-dados-abertos/publicacoes/balanco-energetico-nacional-2024>. Acesso em: 10 jul. 2026.

EMPRESA DE PESQUISA ENERGÉTICA (EPE). Cenários de oferta de etanol e demanda de ciclo Otto 2025-2034. Rio de Janeiro: EPE, 2024. (Nota Técnica EPE/DPG/SDB/2024/09). Disponível em: <https://www.epe.gov.br/sites-pt/publicacoes-dados-abertos/publicacoes/PublicacoesArquivos/publicacao->

255/topico-735/NT-EPE-DPG-SDB-2024-09_Cenarios_de_oferta_de_etanol_2034.pdf. Acesso em: 10 jul. 2026.

EMPRESA DE PESQUISA ENERGÉTICA (EPE). Análise de Conjuntura dos Biocombustíveis 2024. Rio de Janeiro: EPE, 2025. Disponível em: <https://www.epe.gov.br/pt/publicacoes-dados-abertos/publicacoes/analise-de-conjuntura-dos-biocombustiveis-2024>. Acesso em: 10 jul. 2026.

FERNANDES, Ricardo. Avaliação da produção de etanol empregando milho como matéria-prima. 2019. Trabalho de Conclusão de Curso (Graduação em Engenharia Química) – Universidade Federal de Uberlândia, Uberlândia, 2019. Disponível em: <https://repositorio.ufu.br/handle/123456789/27653>. Acesso em: 10 jul. 2026.

GOLDEMBERG, J. Ethanol for a sustainable energy future. *Science*, v. 315, n. 5813, p. 808-810, 2007. DOI: 10.1126/science.1137013. Disponível em: <https://doi.org/10.1126/science.1137013>. Acesso em: 10 jul. 2026.

GOLDEMBERG, J.; COELHO, S. T.; GUARDABASSI, P. The sustainability of ethanol production from sugarcane. *Energy Policy*, v. 36, n. 6, p. 2086-2097, 2008. DOI: 10.1016/j.enpol.2008.02.028. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.enpol.2008.02.028>. Acesso em: 10 jul. 2026.

INTERNATIONAL ENERGY AGENCY (IEA). Renewables 2024: analysis and forecast to 2030. Paris: IEA, 2024. Disponível em: <https://www.iea.org/reports/renewables-2024>. Acesso em: 10 jul. 2026.

LIMA, A. M. de. Estudos recentes e perspectivas da viabilidade técnico-econômica da produção de etanol lignocelulósico. Brasília, DF: Embrapa Agroenergia, 2011. 10 p. (Circular Técnica, 5). Disponível em: <https://www.infoteca.cnptia.embrapa.br/infoteca/handle/doc/890268>. Acesso em: 10 jul. 2026.

LOPES, Maurício Antônio. Descarbonização e circularidade: respostas dos sistemas alimentar e agroindustrial aos Objetivos de Desenvolvimento Sustentável. Brasília, DF: Embrapa Agroenergia, 2022. 82 p. (Documentos, 47). Disponível em: <https://www.infoteca.cnptia.embrapa.br/infoteca/handle/doc/1149409>. Acesso em: 10 jul. 2026.

MACHADO, C. M. M.; ABREU, F. R. Produção de álcool combustível a partir de carboidratos. *Revista de Política Agrícola*, v. 15, n. 3, p. 64-78, 2006. Disponível em: <https://rpa.sede.embrapa.br/RPA/article/view/510>. Acesso em: 10 jul. 2026.

MALAJOVICH, M. A. Biotecnologia. 2. ed. atual. Rio de Janeiro: Educação Biotecnologia, 2016. E-book. ISBN 978-85-921077-0-3. Disponível em: <https://educbiotecnologia.com/sobre>. Acesso em: 10 jul. 2026.

MINISTÉRIO DA AGRICULTURA E PECUÁRIA (MAPA). Projeções do Agronegócio: Brasil 2023/24 a 2033/34: projeções de longo prazo. Brasília, DF: MAPA, 2024. Disponível em: <https://www.gov.br/agricultura/pt-br/assuntos/politica-agricola/todas-publicacoes-de-politica-agricola/projecoes-do-agronegocio/projecoes-do-agronegocio-2022-2023-a-2032-2033.pdf>. Acesso em: 10 jul. 2026.

MILANEZ, A. Y. et al. A produção de etanol pela integração do milho-safrinha às usinas de cana-de-açúcar: avaliação ambiental, econômica e sugestões de política. *Revista do BNDES*, Rio de Janeiro, n. 41, p. 147-207, jun. 2014. Disponível em: <https://web.bndes.gov.br/bib/jspui/handle/1408/2496>. Acesso em: 10 jul. 2026.

NOVA CANA. Milho redesenha o mapa da produção de etanol no Brasil, diz Plínio Nastari. NovaCana, 21 out. 2025. Disponível em: <https://www.novacana.com/noticias/milho-redesenha-mapa-producao-etanol-brasil-plinio-nastari-211025>. Acesso em: 10 jul. 2026.

PAGE, M. J. et al. The PRISMA 2020 statement: an updated guideline for reporting systematic reviews. *BMJ*, v. 372, n71, 2021. DOI: 10.1136/bmj.n71. Disponível em: <https://doi.org/10.1136/bmj.n71>. Acesso em: 10 jul. 2026.

RAMIREZ, E. C.; JOHNSTON, D. B.; McALOON, A. J.; YEE, W.; SINGH, V. Engineering process and cost model for a conventional corn wet milling facility. *Industrial Crops and Products*, v. 27, n. 1, p. 91-97, 2008. DOI: 10.1016/j.indcrop.2007.08.002. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.indcrop.2007.08.002>. Acesso em: 10 jul. 2026.

REUTERS. Brazil corn ethanol boom covers demand as country hikes biofuel mandate. Reuters, 27 jun. 2025. Disponível em: <https://www.reuters.com/sustainability/climate-energy/brazil-corn-ethanol-boom-covers-demand-country-hikes-biofuel-mandate-2025-06-27/>. Acesso em: 10 jul. 2026.

SILVA, H. J. T. da; SANTOS, P. F. A.; NOGUEIRA JUNIOR, E. C.; VIAN, C. E. de F. Aspectos técnicos e econômicos da produção de etanol de milho no Brasil. *Revista de Política Agrícola*, v. 29, n. 4, p. 142-159, 2020. Disponível em: <https://rpa.sede.embrapa.br/RPA/article/view/1567>. Acesso em: 10 jul. 2026.

STOLF, R.; OLIVEIRA, A. P. R. The success of the Brazilian Alcohol Program (Proálcool): a decade-by-decade brief history of ethanol in Brazil. *Engenharia Agrícola*, v. 40, n. 2, p. 243-248, 2020. DOI: 10.1590/1809-4430-Eng.Agric.v40n2p243-248/2020. Disponível em: <https://doi.org/10.1590/1809-4430-Eng.Agric.v40n2p243-248/2020>. Acesso em: 10 jul. 2026.

UNIÃO NACIONAL DO ETANOL DE MILHO (UNEM). Unem projeta alta de 36% na produção de etanol de milho. Brasília, DF: UNEM, 2023. Disponível em: <https://etanoldemilho.com.br/unem-projeta-alta-de-etanol-de-milho/>. Acesso em: 10 jul. 2026.

UNIÃO NACIONAL DO ETANOL DE MILHO (UNEM). Projeções da produção de etanol de milho no Brasil. Brasília, DF: UNEM, 2023. Apresentação. Disponível em: <https://www.gov.br/anp/pt-br/centrais-de-conteudo/apresentacoes-palestras/2023/arquivos/3-seminario-sbq/28-03-2023-tema9-unem.pdf>. Acesso em: 10 jul. 2026.