



UNIVERSIDADE FEDERAL DE OURO PRETO  
ESCOLA DE MINAS  
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA DE  
PRODUÇÃO, ADMINISTRAÇÃO E ECONOMIA



**GABRIELA NAJM BORTOLETTO**

**ESTUDO SOBRE A EXPANSÃO DO ETANOL DE MILHO NO BRASIL E SUAS  
VANTAGENS E DESVANTAGENS FRENTE À CANA-DE-AÇÚCAR**

OURO PRETO

2025

GABRIELA NAJM BORTOLETTO

**ESTUDO SOBRE A EXPANSÃO DO ETANOL DE MILHO NO BRASIL E SUAS  
VANTAGENS E DESVANTAGENS FRENTE À CANA-DE-AÇÚCAR**

Monografia apresentada ao Curso de Engenharia de Produção da Universidade Federal de Ouro Preto como parte dos requisitos para a obtenção do Grau de Engenharia de Produção.

Orientadora: Prof. Dra. Bruna de Fátima P. G. Flausino

## SISBIN - SISTEMA DE BIBLIOTECAS E INFORMAÇÃO

B739e Bortoletto, Gabriela Najm.

Estudo sobre a expansão do etanol de milho e suas vantagens e desvantagens frente à cana-de-açúcar. [manuscrito] / Gabriela Najm Bortoletto. - 2025.

57 f.: il.: color., gráf., tab..

Orientadora: Profa. Dra. Bruna de Fatima Pedrosa Guedes Flausino.  
Monografia (Bacharelado). Universidade Federal de Ouro Preto. Escola de Minas. Graduação em Engenharia de Produção .

1. Álcool. 2. Alcool - Milho. 3. Matriz Energética - Biocombustíveis. 4. Alcool - Cana-de-açúcar. 5. Processos de fabricação- Usinagem. I. Flausino, Bruna de Fatima Pedrosa Guedes. II. Universidade Federal de Ouro Preto. III. Título.

CDU 658.5

Bibliotecário(a) Responsável: Maristela Sanches Lima Mesquita - CRB-1716



## FOLHA DE APROVAÇÃO

**Gabriela Najm Bortoletto**

### ESTUDO SOBRE A EXPANSÃO DO ETANOL DE MILHO NO BRASIL E SUAS VANTAGENS E DESVANTAGENS FRENTE À CANA-DE-AÇÚCAR

Monografia apresentada ao Curso de Engenharia de Produção da Universidade Federal de Ouro Preto como requisito parcial para obtenção do título de Engenheiro de Produção

Aprovada em 03 de setembro de 2025.

#### Membros da banca

[DSc.] - Bruna de Fátima Pedrosa Guedes Flausino - Orientador(a) (Universidade Federal de Ouro Preto)

[DSc.] - Magno Silvério Campos - (Universidade Federal de Ouro Preto)

[MSc.] - Cristiano Luis Turbino de Franca e Silva - (Universidade Federal de Ouro Preto)

Bruna de Fátima Pedrosa Guedes Flausino, orientadora do trabalho, aprovou a versão final e autorizou seu depósito na Biblioteca Digital de Trabalhos de Conclusão de Curso da UFOP em 03/09/2025.



Documento assinado eletronicamente por **Bruna de Fatima Pedrosa Guedes Flausino, PROFESSOR DE MAGISTERIO SUPERIOR**, em 03/09/2025, às 09:03, conforme horário oficial de Brasília, com fundamento no art. 6º, § 1º, do [Decreto nº 8.539, de 8 de outubro de 2015](#).



Documento assinado eletronicamente por **Cristiano Luis Turbino de Franca e Silva, PROFESSOR DE MAGISTERIO SUPERIOR**, em 03/09/2025, às 09:42, conforme horário oficial de Brasília, com fundamento no art. 6º, § 1º, do [Decreto nº 8.539, de 8 de outubro de 2015](#).



A autenticidade deste documento pode ser conferida no site [http://sei.ufop.br/sei/controlador\\_externo.php?acao=documento\\_conferir&id\\_orgao\\_acesso\\_externo=0](http://sei.ufop.br/sei/controlador_externo.php?acao=documento_conferir&id_orgao_acesso_externo=0), informando o código verificador **0972018** e o código CRC **A7DE413E**.

## **AGRADECIMENTOS**

Agradeço à minha família por sempre estar ao meu lado e me apoiar durante todos esses anos.

Agradeço também à Prof. Dra. Bruna de Fátima P. G. Flausino, minha orientadora neste trabalho de conclusão de curso, pela paciência e ensinamentos durante esses meses de orientação.

E, por último, agradeço à Escola de Minas e ao DEPRO pelo ensino público de qualidade e aos professores que me acompanharam ao longo dessa jornada.

## RESUMO

A produção nacional de etanol vem apresentando, nas últimas safras, uma crescente participação do milho como matéria prima, apesar do grande predomínio da cana-de-açúcar. Buscando entender um pouco mais sobre essa nova configuração na produção desse biocombustível, o presente trabalho tem como objetivo principal investigar a expansão do milho como matéria-prima para a produção de etanol no Brasil e sua importância na matriz energética nacional. A pesquisa baseou-se na análise e revisão bibliográfica de artigos científicos, relatórios oficiais de órgãos governamentais e documentos institucionais. O comparativo entre milho e cana-de-açúcar evidencia diferenças quanto à produtividade, custo de produção, disponibilidade regional e sustentabilidade. Além disso, existem vantagens e desvantagens do uso do milho na matriz energética brasileira, incluindo aspectos ambientais, logísticos e estratégicos. Os resultados apontaram que, embora a cana-de-açúcar mantenha sua posição hegemônica, o milho já representa quase 20% de todo o etanol produzido no país, sobretudo em regiões fora do tradicional eixo sucroalcooleiro como Mato Grosso, Mato Grosso do Sul e Goiás, consolidando-se como alternativa viável para diversificação e segurança energética, além de contribuir para a sustentabilidade do setor.

**Palavras-chave:** Etanol, Milho, Cana-de-açúcar, Matriz Energética, Usinas

## **ABSTRACT**

In recent harvests, Brazil's domestic ethanol production has shown a growing participation of corn as a raw material, despite the prevailing dominance of sugarcane. Seeking to better understand this new configuration in the production of this biofuel, the present study aims to investigate the expansion of corn as a feedstock for ethanol production in Brazil and its relevance within the national energy matrix. The research is based on an analysis and literature review of scientific articles, official government reports, and institutional documents. The comparison between corn and sugarcane reveals differences in productivity, production costs, regional availability, and sustainability. Furthermore, there are both advantages and disadvantages to the use of corn in Brazil's energy matrix, including environmental, logistical, and strategic aspects. The findings indicate that, although sugarcane maintains its hegemonic position, corn already accounts for nearly 20% of all ethanol produced in the country—especially in regions outside the traditional sugar-alcohol axis, such as Mato Grosso, Mato Grosso do Sul, and Goiás—thus establishing itself as a viable alternative for energy diversification and security, as well as contributing to the sector's sustainability.

**Keywords:** Ethanol, Corn, Sugarcane, Energy Matrix, Plants

## LISTA DE FIGURAS

Figura 1 – Componentes do grão de milho.....	14
Figura 2 - Tipos de usinas de etanol.....	27
Figura 3 - Esquema de compartilhamento de etapas em usinas flex.....	28
Figura 4 - Usinas de etanol de milho em operação no Brasil autorizadas pela ANP.....	29
Figura 5 - Safra da cana de açúcar: relação área plantada e produção nacional (2017-2025) .....	33
Figura 6 - Safra do milho: relação área plantada e produção nacional (2017-2025).....	35
Figura 7 - Expansão das instalações industriais do milho .....	37
Figura 8 - Evolução da área cultivada do milho (em milhões de hectares) e de produção do milho (em milhões de toneladas) .....	38
Figura 9 - Evolução da moagem de milho para a produção de etanol.....	39
Figura 10 - Presença do milho como matéria prima na região Centro-Oeste .....	39
Figura 11 - Produção de etanol de milho (em milhões de metros cúbicos) no Brasil por tipo de produto.....	42

## SUMÁRIO

<b>1 INTRODUÇÃO</b> .....	8
<b>2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA</b> .....	11
<b>2.1. A preparação da matéria-prima amilácea</b> .....	11
<b>2.2 A moagem do milho</b> .....	12
<b>2.3 A hidrólise enzimática do amido</b> .....	16
<b>2.4 A fermentação alcoólica</b> .....	17
<b>2.5 A destilação alcoólica</b> .....	20
<b>2.6 Comparativo agrônomo entre as culturas do milho e da cana-de-açúcar na produção de etanol</b> .....	22
<b>2.7. Configuração das usinas produtoras de etanol de milho no Brasil e sua distribuição no território nacional</b> .....	26
<b>2.8 O papel do etanol na matriz de transporte veicular brasileira: contribuição dos veículos flex</b> .....	29
<b>3 METODOLOGIA</b> .....	31
<b>4 RESULTADOS E DISCUSSÕES: ANÁLISE DA EXPANSÃO DO MILHO NA PRODUÇÃO DE ETANOL E IMPACTO NA MATRIZ ENERGÉTICA BRASILEIRA</b> .....	33
<b>4.1 Breve comparativo da safra do milho e da cana de açúcar entre 2017 e 2025</b> .....	33
<b>4.2 Crescimento do setor do milho na produção de etanol</b> .....	36
<b>4.3 Vantagens e desvantagens do uso do milho na produção de etanol em comparação à cana-de-açúcar</b> .....	44
<b>5 CONSIDERAÇÕES FINAIS</b> .....	49
<b>REFERÊNCIAS</b> .....	51

## 1 INTRODUÇÃO

A demanda por fontes energéticas renováveis e sustentáveis tem impulsionado transformações estruturais na matriz energética mundial, impondo novos paradigmas à produção de biocombustíveis. Nesse cenário, o Brasil – tradicionalmente reconhecido como referência global na produção de etanol a partir da cana-de-açúcar – assiste, na última década, à ascensão de uma alternativa promissora: o etanol produzido a partir do milho. Contudo, o fenômeno emergente da produção de etanol a partir do milho, enquanto alternativa complementar à histórica hegemonia da cana-de-açúcar na matriz bioenergética brasileira, precisa ser analisado sob diversas frentes, dada sua complexidade estrutural e suas múltiplas implicações no cenário agrícola, industrial, ambiental e econômico. Ou seja, não se trata apenas de uma nova estratégia para a organização do setor bioenergético, mas de um modelo produtivo que, embora relativamente recente no Brasil, tem despertado atenção estratégica por parte de investidores, formuladores de políticas públicas e instituições de pesquisa, exigindo uma abordagem crítica e tecnicamente fundamentada quanto a seus benefícios e limitações.

### 1.1 Justificativa

A escolha do milho como objeto central desta investigação decorre da relevância dessa cultura no contexto da diversificação da matriz bioenergética brasileira. Nos últimos anos, sua utilização como matéria-prima para a produção de etanol tem se expandido de forma significativa, especialmente em regiões onde a cadeia sucroenergética apresenta limitações de disponibilidade de matéria-prima ou sazonalidade na oferta de cana-de-açúcar (Graziano, 2023).

No Brasil, o Centro-Oeste destaca-se como uma das principais regiões produtoras de etanol de milho, concentrando unidades industriais de grande porte, dotadas de avançados recursos tecnológicos e operando com estratégias de integração de cadeias produtivas e complementaridade entre safras (UNEM, 2024). Tais plantas industriais têm contribuído para agregar valor à produção agrícola regional e ampliar a competitividade do setor bioenergético.

Observa-se ainda que a consolidação do etanol de milho envolve a combinação de múltiplos fatores estruturais, econômicos, tecnológicos e geográficos que, em

sinergia, conferem viabilidade à sua cadeia produtiva. Em primeiro plano, destaca-se a expansão da fronteira agrícola no Centro-Oeste, região que concentra elevada disponibilidade de matéria-prima, com forte produção de milho de segunda safra (safrinha), aliada a uma infraestrutura logística que favorece o escoamento eficiente da produção. Além disso, o desenvolvimento de plantas industriais com alto nível de automação, flexibilidade operacional e integração com a cadeia agropecuária, tem ampliado a eficiência dos processos, assegurando competitividade frente a outras fontes de biocombustíveis.

## 1.2 Objetivos

### 1.2.1 Objetivo geral

Investigar a expansão do milho como matéria-prima para a produção de etanol no Brasil e sua importância na matriz energética nacional.

### 1.2.2 Objetivos específicos

- Analisar as etapas do processo de produção do etanol a partir do milho, considerando os aspectos tecnológicos envolvidos, as especificidades bioquímicas da matéria-prima e as exigências industriais do processamento;
- Mapear os principais polos produtores de etanol de milho no território brasileiro, identificando os estados com maior representatividade, as tendências de crescimento regional e os agentes econômicos que impulsionam esse segmento do setor sucroenergético;
- Examinar a configuração das usinas produtoras de etanol de milho no Brasil, distinguindo entre usinas dedicadas exclusivamente ao processamento de milho (*full corn*) e aquelas com capacidade flexível de adaptação (usinas flex), e suas respectivas implicações logísticas e econômicas;
- Comparar as culturas do milho e da cana-de-açúcar como fontes para a produção de etanol, observando suas implicações agrônomicas, ciclos de cultivo, disponibilidade geográfica e potencial de complementaridade na rotatividade agrícola;

- Avaliar as vantagens e desvantagens do uso do milho na produção de etanol, considerando fatores como eficiência energética, custos operacionais, impactos ambientais, sazonalidade da oferta e competitividade frente à cana-de-açúcar.

## 2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

### 2.1. A preparação da matéria-prima amilácea

O aproveitamento eficiente do milho como insumo para a produção de etanol requer um conjunto de etapas preliminares que envolvem desde a seleção criteriosa, a limpeza, a secagem até o armazenamento adequado do grão, a fim de assegurar tanto a integridade da matéria-prima quanto a eficiência dos processos subsequentes. A preparação do milho, nesse sentido, constitui um vetor determinante na qualidade do produto final e no rendimento da fermentação alcoólica, sendo objeto de constante aprimoramento nas plantas industriais que operam com esse insumo.

Segundo Giordano e Nascimento (2005), a seleção dos grãos deve considerar parâmetros como teor de umidade, presença de impurezas e integridade física. Isto porque grãos avariados, contaminados por microrganismos ou por resíduos de pesticidas e metais pesados podem comprometer o desempenho da etapa fermentativa, além de ocasionar a formação de subprodutos indesejáveis, como outros tipos de álcoois e ácidos orgânicos. Por isso, é imperativo que o milho destinado à produção de etanol seja submetido a um rigoroso controle de qualidade, incluindo análises físico-químicas que atestem sua aptidão para o uso industrial.

Nesse sentido, a limpeza da matéria-prima é objeto de atenção e, conforme descrito por Gaur *et al.* (2010), envolve a remoção de impurezas sólidas como palhas, pedras, partículas metálicas e sementes de outras espécies, utilizando-se equipamentos como peneiras vibratórias, desintegradores magnéticos e sistemas de aspiração. Esta etapa previne danos aos equipamentos industriais, bem como evita a diluição do substrato fermentável, contribuindo para um processamento mais eficiente. Ademais, a retirada de corpos estranhos minimiza o risco de contaminações biológicas e químicas que poderiam afetar negativamente a conversão de amido em açúcares fermentáveis.

Do mesmo modo, a secagem é outro componente fundamental do preparo do milho, sobretudo em regiões com elevada umidade relativa do ar, como observado no Centro-Oeste brasileiro, a maior região produtora de milho. De acordo com Silva *et al.* (2020), o teor de umidade ideal para o armazenamento do milho destinado à produção de etanol situa-se entre 12% e 14%. Acima desse patamar, há um aumento

exponencial na atividade microbiológica, favorecendo a proliferação de fungos produtores de micotoxinas, como as espécies do gênero *Aspergillus*. Para minimizar o problema, utiliza-se a secagem automatizada, que pode ser realizada por meio de secadores contínuos, com controle de temperatura e fluxo de ar, assegurando a preservação das características bioquímicas do grão.

Após a secagem, o milho deve ser acondicionado em silos apropriados, preferencialmente metálicos e herméticos, com sistema de ventilação e monitoramento da temperatura e umidade interna. Segundo Lobo e Silva (2003) a estabilidade da matéria-prima durante o armazenamento é essencial para evitar a retrogradação do amido<sup>1</sup> e a perda do potencial fermentativo. A armazenagem deficiente pode induzir processos oxidativos e degradativos, prejudicando a solubilização do amido durante a hidrólise e, por conseguinte, o rendimento alcoólico.

Cabe ressaltar ainda que a logística de abastecimento das usinas com milho deve ser estrategicamente planejada, de modo a alinhar a sazonalidade da colheita com a capacidade de armazenamento e o fluxo contínuo de produção. Para Garrido e Baldini (2020), o dimensionamento logístico adequado reduz perdas econômicas e promove a sustentabilidade do sistema, mitigando desperdícios e emissões associadas ao transporte e manejo de grãos.

Sendo assim, a eficácia dessa etapa de preparação reflete-se diretamente na estabilidade operacional das fases subsequentes, exigindo investimentos em infraestrutura, automação e controle de qualidade, conforme apontam os estudos recentes da EMBRAPA (2021). A precisão com que essa fase é executada pode ser considerada um dos principais indicadores da maturidade tecnológica das usinas que adotam o milho como substrato bioenergético.

## **2.2 A moagem do milho**

A etapa de moagem do milho representa uma das fases mais determinantes, uma vez que é por meio dela que se viabiliza o acesso às frações energéticas do grão,

---

<sup>1</sup> Fenômeno físico-químico no qual as moléculas de amido gelatinizado (principalmente a amilose e, em menor grau, a amilopectina) reassociam-se por meio de ligações de hidrogênio, reorganizando-se em estruturas cristalinas mais estáveis e menos solúveis. Esse processo reduz a disponibilidade do amido para hidrólise enzimática, afetando a eficiência da conversão em açúcares fermentescíveis e, conseqüentemente, diminuindo o rendimento alcoólico do processo.

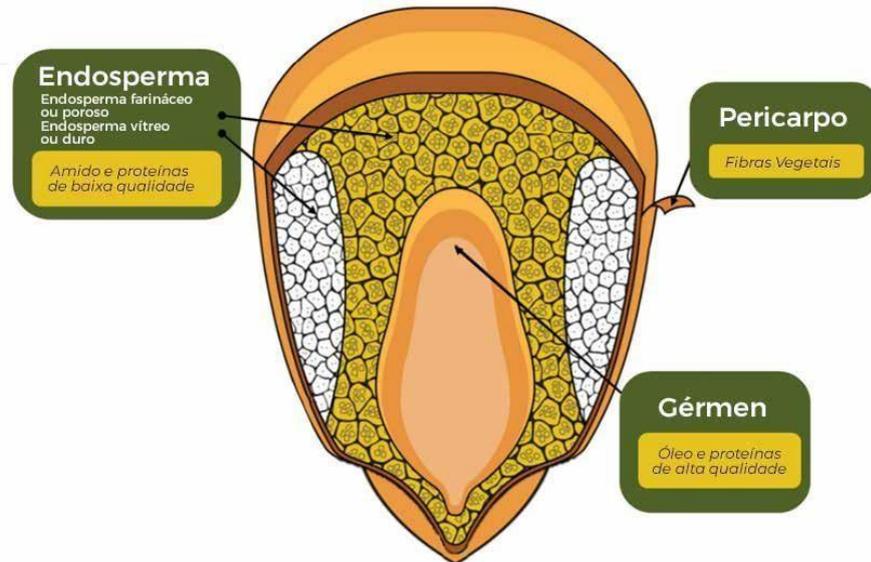
especialmente o amido, principal substrato para a fermentação alcoólica. A escolha entre os processos de moagem seca (*dry milling*) e moagem úmida (*wet milling*) implica variações significativas na configuração das plantas industriais, nos produtos coprocessados e nos índices de conversão bioquímica, sendo objeto de extensos estudos e inovações tecnológicas nas últimas décadas.

A moagem seca consiste, em um processo simplificado no qual o milho é triturado integralmente, sem separação prévia de seus componentes, sendo eles germen, glúten, fibra e amido. Após a moagem, o material passa por um processo de cozimento e liquefação do amido, sendo posteriormente encaminhado à etapa de sacarificação e fermentação (Ribeiro, 2023). De acordo com Evangelista (2022) esta abordagem apresenta como vantagem a menor complexidade operacional, menor custo de implantação e maior rendimento de etanol por tonelada de milho processada, especialmente quando o foco da usina está concentrado na maximização da produção bioenergética.

Entretanto, a moagem seca gera coprodutos limitados, sendo o principal deles o *distillers dried grains with solubles* (DDGS), um farelo proteico utilizado como suplemento na alimentação animal. Segundo estudo de Bruce *et al...* (2008) o DDGS contém cerca de 27% a 30% de proteína bruta, além de fibras e lipídios, o que o torna um produto valioso em termos nutricionais, embora de menor valor agregado quando comparado aos derivados da moagem úmida. Adicionalmente, o processo de moagem seca apresenta restrições quanto à separação de compostos de maior pureza, como óleo de milho ou amido industrial, o que reduz seu potencial de diversificação produtiva.

Por outro lado, a moagem úmida é um processo mais complexo e dispendioso, que envolve a embebição dos grãos em água, geralmente enriquecida com dióxido de enxofre (SO<sub>2</sub>), por um período de 24 a 48 horas, com o objetivo de amolecer o pericarpo e facilitar a dissociação dos componentes estruturais do milho (Serna-Saldivar, 2018). Em linhas gerais, e conforme ilustrado no diagrama abaixo, o grão de milho é composto pelas seguintes estruturas principais: pericarpo, endosperma, camada de alérone e embrião (ou gérmen) – Figura 1.

Figura 1 – Componentes do grão de milho



Fonte: Associação Internacional de Soja Responsável - RTRS (2021)

A camada externa do grão de milho, denominada pericarpo, representa aproximadamente 5 a 6 % do peso seco do grão e concentra cerca de 55 % das fibras totais, conforme indicado por estudo de Leme (2007). Essa estrutura atua como barreira física eficaz contra microrganismos, sendo sua integridade fundamental para promover a eficiência de processos como a hidrólise enzimática, pois a ruptura do pericarpo facilita a penetração da água e das enzimas nos tecidos internos.

Já o endosperma constitui a maior fração do grão, correspondendo a cerca de 83 % do peso seco. É composto principalmente por amido, aproximadamente 88 %, organizado em grânulos, além de proteínas de reserva, como as prolaminas (zeínas), que representam cerca de 8 % dessa fração (Araujo, 2021). Essa composição torna o endosperma a parte mais relevante para a produção de etanol, em virtude da disponibilidade de amido para o processo fermentativo.

O embrião, ou gérmen, corresponde a aproximadamente 10 a 14 % do peso do grão e é um componente nutricionalmente valioso. Ele concentra cerca de 83 % dos lipídeos (incluindo óleo e vitamina E), assim como 78 % dos minerais do grão, além de aproximadamente 26 % das proteínas e significativas quantidades de açúcares (Paes, s/d). Devido a seu elevado conteúdo de nutrientes, o gérmen é considerado um subproduto de alto valor agregado no processamento do milho (Araujo, 2021).

A estrutura conhecida como *tip cap*, que conecta o grão ao sabugo, permite a entrada de água e nutrientes durante o processo de maceração, etapa essencial da moagem úmida do milho. Embora essa parte represente uma fração pequena do grão, sua função é relevante para o fluxo de umidade e a uniformidade da hidrólise e separação das frações na produção de etanol (Araujo, 2021). Essas partes desempenham papéis distintos no processamento do grão, especialmente na moagem úmida para produção de etanol.

Retomando o processo de moagem úmida, de acordo com Serna-Saldivar (2018) essa técnica permite a separação física e química dos principais constituintes do grão. O amido, uma vez isolado, segue para as etapas de conversão enzimática e fermentação (conforme apresentado em 2.3), enquanto os demais subprodutos são destinados a diferentes cadeias industriais, como a produção de óleo, ração animal e biomateriais.

A principal vantagem da moagem úmida reside em sua capacidade de gerar uma gama de coprodutos com alto valor agregado, o que pode aumentar a rentabilidade do empreendimento mesmo em cenários de baixa no preço do etanol. Segundo Bruce *et al...* (2008), usinas baseadas em moagem úmida são, portanto, mais versáteis e integradas a diferentes setores econômicos, como o alimentício, químico e de bioplásticos. No entanto, esse modelo exige maior investimento inicial, maior consumo energético e hídrico, e uma operação técnica mais exigente, o que pode limitar sua adoção por empresas de menor porte.

Em todo caso, mesmo com o alto valor agregado dos coprodutos, no contexto brasileiro, observa-se predominância do modelo de moagem seca nas usinas de etanol de milho instaladas principalmente na região Centro-Oeste, em razão de sua maior adaptabilidade à infraestrutura sucroalcooleira ao perfil de produção focado no biocombustível e no DDGS. Segundo a União Nacional do Etanol de Milho (UNEM, 2020), mais de 85% das plantas industriais em operação utilizam o sistema *dry milling*, embora haja crescente interesse pela diversificação tecnológica com unidades híbridas ou adaptáveis a processos úmidos em determinadas etapas.

É importante destacar que ambas as modalidades apresentam desafios e potencialidades que devem ser avaliados conforme os objetivos econômicos, a disponibilidade de capital e os mercados de destino dos produtos. Na análise de Grippa (2012), a escolha do tipo de moagem repercute tanto no desempenho

industrial, como nos indicadores ambientais do empreendimento, como a emissão de gases de efeito estufa e o consumo de recursos naturais, reforçando a necessidade de uma abordagem sistêmica na tomada de decisões estratégicas.

Dessa forma, a moagem do milho, seja pela via seca ou pela via úmida, configura-se como um elo decisivo no arranjo tecnológico da produção de etanol, sendo fundamental que sua escolha esteja embasada em critérios técnicos rigorosos, estudos de viabilidade econômica e projeções de mercado, a fim de garantir a sustentabilidade e a competitividade da cadeia produtiva do biocombustível.

### **2.3 A hidrólise enzimática do amido**

A hidrólise enzimática, de natureza eminentemente biotecnológica, requer condições físico-químicas rigorosamente controladas, bem como o emprego de catalisadores enzimáticos otimizados, a fim de maximizar a eficiência da sacarificação e, por conseguinte, o rendimento alcoólico da fermentação subsequente.

O amido, polissacarídeo composto por cadeias de amilose e amilopectina, apresenta uma estrutura cristalina que, por si só, é recalcitrante à ação hidrolítica. Assim, antes da ação enzimática propriamente dita, é necessário que o substrato passe por um processo de gelatinização, geralmente obtido por meio do aquecimento do mosto a temperaturas superiores a 80 °C, promovendo a desorganização das micelas de amido e a disponibilização dos sítios de ataque enzimático. Conforme relatado por Najafi (2005), essa desestruturação molecular é indispensável para que as enzimas possam atuar de forma eficaz sobre os grânulos de amido.

A hidrólise propriamente dita ocorre, de modo geral, em duas fases principais: a liquefação e a sacarificação. Na etapa de liquefação, emprega-se a enzima  $\alpha$ -amilase, cuja função é romper as ligações  $\alpha$ -1,4 glicosídicas que unem as unidades de glicose, reduzindo o amido a oligossacarídeos e dextrinas solúveis. Essa enzima atua de forma endoenzimática, ou seja, realiza cortes aleatórios no interior das cadeias, gerando uma mistura de polímeros de comprimento reduzido e diminuindo, assim, a viscosidade do meio (Najafi, 2005).

Em seguida, na fase de sacarificação, adiciona-se a enzima glucoamilase (ou amiloglucosidase), a qual catalisa a conversão dos oligossacarídeos resultantes da liquefação em unidades monoméricas de glicose. Esta enzima atua preferencialmente

nas extremidades não redutoras das cadeias, clivando tanto ligações  $\alpha$ -1,4 quanto, em menor intensidade,  $\alpha$ -1,6, característica esta que confere elevada eficiência à produção de glicose fermentável (Bruce *et al.*..., 2008).

Nos últimos anos, inovações significativas têm sido introduzidas no campo da engenharia enzimática, permitindo o desenvolvimento de enzimas recombinantes mais estáveis e tolerantes a condições adversas. Tais avanços têm contribuído para a redução dos custos industriais da etapa de hidrólise, uma vez que permitem maior reutilização dos biocatalisadores e menor dependência de reagentes auxiliares, como estabilizantes ou tamponantes. Além do mais, a crescente incorporação de enzimas termoestáveis, oriundas de microrganismos extremófilos, tem ampliado a janela operacional do processo, conferindo maior robustez ao sistema produtivo (Bon, 2008).

Outro ponto de inflexão tecnológica refere-se à sinergia entre diferentes complexos enzimáticos. Estudos recentes, como os de Wang (2015) indicam que a coaplicação de  $\alpha$ -amilase, glucoamilase e isoamilase em proporções estrategicamente definidas pode aumentar a conversão de amido residual e reduzir o tempo total de processamento, otimizando o balanço energético do sistema. Além disso, tem-se observado a tendência de integrar a hidrólise enzimática com a fermentação em um único reator, configurando o sistema conhecido como *Simultaneous Saccharification and Fermentation* (SSF), que, embora mais complexo, reduz consideravelmente a inibição do produto e melhora a produtividade volumétrica.

De qualquer forma, no contexto das usinas brasileiras de etanol de milho, a escolha dos complexos enzimáticos é orientada por critérios como custo-benefício, compatibilidade com o perfil amido-glicídico do milho nacional e a adaptabilidade às condições climáticas e operacionais regionais. Conforme salienta Evangelista (2022), a importação de enzimas de alto desempenho, principalmente de multinacionais como *Novozymes* e *DuPont*, ainda representa uma parcela significativa dos custos operacionais, embora já se observam esforços no desenvolvimento de enzimas nacionais com desempenho competitivo.

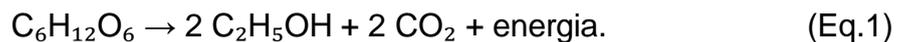
## **2.4 A fermentação alcoólica**

A fermentação alcoólica representa a conversão dos açúcares obtidos das etapas anteriores em etanol e dióxido de carbono por meio da ação de microrganismos fermentativos, notadamente leveduras do gênero *Saccharomyces*. Esta etapa, de

caráter metabolicamente complexa, demanda um atento controle dos parâmetros físico-químicos, a fim de assegurar a máxima conversão dos substratos em produto final, com minimização de subprodutos indesejáveis e inibição celular.

A levedura *Saccharomyces cerevisiae*, amplamente utilizada em processos industriais, é dotada de elevada tolerância ao etanol, capacidade adaptativa a ambientes hiperglucídicos e velocidade de fermentação elevada, o que a torna o microrganismo preferencial para processos alcoólicos em todo o mundo. Conforme Misawa (2009), a eficiência dessa levedura está diretamente associada à sua capacidade de realizar fermentação anaeróbica em condições de alta osmolaridade, convertendo glicose em etanol com rendimento teórico próximo de 90%, segundo a equação de Gay-Lussac.

A reação metabólica fundamental pode ser representada pela equação 1:



Nesse processo, uma molécula de glicose é convertida em duas moléculas de etanol e duas de dióxido de carbono, com liberação de energia sob a forma de ATP, a qual é utilizada pela célula para manter sua viabilidade e reprodução. Para a otimização da fermentação, diversos fatores devem ser monitorados de forma contínua, entre os quais se destacam a temperatura, o pH, a concentração de substrato, aeração residual e a carga microbiana. Segundo Pereira (2020), a temperatura ideal para o desempenho ótimo de *S. cerevisiae* situa-se entre 30 °C e 35 °C; valores superiores comprometem a viabilidade celular, enquanto temperaturas inferiores reduzem a velocidade de fermentação. O pH, por sua vez, deve manter-se em torno de 4,5, faixa na qual há máxima atividade enzimática intracelular e menor suscetibilidade à contaminação bacteriana.

A fermentação alcoólica pode ocorrer sob três principais regimes operacionais: *batch* (batelada), *fed-batch* (batelada alimentada) e contínuo. No regime batch, todos os nutrientes e o inóculo são inseridos no fermentador no início do processo, sem novas adições até o término da fermentação (Sha, 2020). Esse sistema apresenta vantagens como simplicidade operacional, menor risco de contaminação e adequada aplicabilidade em fases de desenvolvimento de processos ou seleção de cepas. No

entanto, é limitado por produtividade moderada e necessidade de longos intervalos de parada para limpeza e esterilização do equipamento.

Em contraste, o modelo *fed-batch* consiste na introdução gradual de nutrientes ao longo da fermentação, após a fase inicial de batelada. Esse método permite manter as concentrações de substrato em níveis controlados, evitando inibições metabólicas e favorecendo uma densidade celular elevada, o que resulta em maior rendimento de biomassa ou produto desejado (Sha, 2020).

Já a fermentação contínua caracteriza-se pela alimentação constante de meio fresco e retirada simultânea do caldo fermentado, mantendo o volume reacional praticamente estável. Essa estratégia assegura condições operacionais estacionárias por períodos prolongados, proporcionando maior produtividade volumétrica e controle do processo (Sha, 2020). Contudo, exige tecnologia avançada e apresenta maior exigência em monitoramento, com vulnerabilidade aumentada à contaminação.

Uma tendência contemporânea no setor é a aplicação de leveduras geneticamente modificadas, que apresentam maior resistência ao etanol, capacidade de fermentar pentoses<sup>2</sup> e maior estabilidade frente a inibidores presentes no meio. Segundo Pereira (2020), cepas transgênicas de *S. cerevisiae* são capazes de ampliar o escopo de conversão de açúcares, especialmente em sistemas híbridos com biomassa lignocelulósica, ainda que sua adoção em larga escala enfrente restrições regulatórias e comerciais em alguns países.

A presença de contaminantes bacterianos é um dos principais desafios durante a fermentação, pois espécies como *Lactobacillus* podem competir com as leveduras pelo substrato glicídico, reduzindo o rendimento de etanol e produzindo ácidos orgânicos que comprometem o crescimento celular. Segundo Wang (2015), o controle dessas contaminações pode ser realizado por meio de tratamento térmico do mosto, adição de agentes antimicrobianos seletivos e manutenção da integridade sanitária do ambiente fermentativo.

Outro aspecto relevante no contexto industrial é a reciclagem da biomassa de leveduras, prática amplamente utilizada tanto em usinas de etanol de cana-de-açúcar,

---

<sup>2</sup> *Pentoses* são monossacarídeos caracterizados por possuírem cinco átomos de carbono e a fórmula geral  $C_5H_{10}O_5$ . Entre as mais relevantes, destacam-se a ribose e a desoxirribose, componentes estruturais dos ácidos ribonucleico (RNA) e desoxirribonucleico (DNA), respectivamente. Essas moléculas podem ser classificadas em aldo-pentoses, quando apresentam grupo funcional aldeído, ou ceto-pentoses, quando possuem grupo cetona. Além disso, as pentoses podem existir tanto em forma linear quanto em estrutura cíclica, alternando-se conforme as condições da solução aquosa.

no denominado processo *Melle-Boinot*, quanto em plantas de etanol de milho, ainda que estas últimas apresentem particularidades operacionais que demandam ajustes. No caso do milho, o reaproveitamento do fermento por centrifugação e reinoculação visa reduzir custos e manter populações microbianas adaptadas ao meio fermentativo, conferindo maior estabilidade ao processo. Todavia, a presença de sólidos finos e componentes insolúveis no mosto de milho impõe desafios adicionais à eficiência das centrífugas convencionais, frequentemente utilizadas no processamento da cana-de-açúcar, exigindo sistemas de separação mais robustos ou etapas adicionais de clarificação (Evangelista, 2022).

A viabilidade dessa estratégia está diretamente associada à manutenção da vitalidade celular e à integridade da parede celular das leveduras, uma vez que sua degradação compromete a capacidade fermentativa e pode favorecer a ocorrência de autólise, com liberação de compostos intracelulares potencialmente inibitórios ao metabolismo alcoólico. Para mitigar esses riscos, recomenda-se a adoção de práticas como o monitoramento constante de viabilidade por coloração diferencial (azul de metileno ou fluorescência), a adequação das condições de centrifugação para evitar danos mecânicos e a utilização de tratamentos de acidificação controlada visando reduzir a carga bacteriana sem prejudicar a funcionalidade das células. Ademais, fatores como a composição físico-química do mosto, a concentração de etanol, a temperatura e o número de ciclos de reaproveitamento influenciam significativamente o desempenho das leveduras recicladas (Evangelista, 2022).

## **2.5 A destilação alcoólica**

A etapa de destilação compreende o momento de separação físico-química no processo de produção de etanol, no qual o álcool etílico formado durante a fermentação é purificado e concentrado a partir da mistura aquosa do mosto fermentado. Essa etapa é relevante para a qualidade do biocombustível final, influenciando sua pureza, teor alcoólico e conformidade com as normativas regulatórias vigentes (Alves, 2012).

Para a produção do etanol anidro, que é adicionado à gasolina no caso brasileiro, é necessário proceder à desidratação complementar do produto. Segundo Dutra (2017), essa desidratação do etanol proveniente da cana pode ser realizada por

diversos métodos, entre os quais se destacam a destilação azeotrópica com agentes desidratantes, o uso de peneiras moleculares (adsorção seletiva), ou, ainda, processos de extração com solventes, sendo este último menos comum na indústria brasileira devido ao seu elevado custo operacional.

O sistema mais comumente adotado nas usinas de etanol de milho no Brasil é o de destilação contínua, acoplado à fermentação em regime batelada ou semi-contínuo, permitindo a operação em fluxo integrado e a otimização energética do processo. Esse arranjo possibilita a recuperação do calor sensível dos vapores de etanol e sua reutilização no pré-aquecimento dos fluxos de alimentação, por meio de trocadores de calor, o que reduz substancialmente o consumo de energia térmica e eleva a eficiência global da planta (Dutra, 2017).

Vale ressaltar que a eficiência da destilação está intrinsecamente ligada ao projeto e à calibração das colunas, bem como à natureza do caldo fermentado. Altos teores de sólidos em suspensão, formação de espuma e presença de contaminantes voláteis podem comprometer o rendimento e a seletividade do processo, exigindo cuidados no pré-tratamento do mosto, como centrifugação, adição de antiespumantes e controle do pH. Lima *et al...* (2001). o controle da composição do vinho fermentado e a manutenção da estabilidade térmica ao longo da coluna são fundamentais para evitar perdas de etanol por arraste ou refluxo excessivo, fatores que também comprometem a produtividade final.

Outro elemento fundamental é o monitoramento da pureza do etanol ao longo das frações destiladas, pois medidores de densidade, sensores de índice de refração e cromatógrafos de gás são frequentemente utilizados para aferir, em tempo real, a composição dos efluentes da coluna, permitindo ajustes operacionais finos e resposta imediata a desvios do processo. A automação, nesse sentido, tem desempenhado papel central na modernização das unidades destiladoras, conforme ressaltado por Evangelista (2022), sobretudo com a incorporação de sistemas supervisórios de controle e aquisição de dados (SCADA) e algoritmos de inteligência artificial para otimização do balanço energético.

Além da obtenção do etanol purificado, a etapa de destilação também está associada à geração de subprodutos líquidos e gasosos, que devem ser corretamente tratados e/ou reaproveitados (Lima *et al...*, 2001). A vinhaça, efluente líquido resultante da destilação, é rica em potássio e compostos orgânicos, podendo ser

utilizada como biofertilizante em sistemas de fertirrigação, desde que tratados adequadamente para evitar contaminação do solo e das águas subterrâneas.

No entanto, é importante destacar que, embora o uso da vinhaça como biofertilizante em sistemas de fertirrigação represente uma alternativa relevante, tal prática não elimina integralmente os problemas ambientais associados. A elevada carga orgânica e o grande volume de vinhaça gerado (em média, cerca de 10 litros para cada litro de etanol produzido) exigem manejo rigoroso para evitar sobrecarga dos solos e contaminação de corpos hídricos subterrâneos e superficiais. Por isso, estratégias complementares, como o tratamento biológico anaeróbio visando à degradação da matéria orgânica e à produção de biogás, vêm sendo estudadas e implementadas, buscando aliar a mitigação de impactos à geração de energia renovável. Sendo assim, a fertirrigação, embora seja uma solução de reaproveitamento com potencial agrônomo, deve ser compreendida como parte de um conjunto integrado de ações voltadas à gestão sustentável dos efluentes da indústria do etanol Lima *et al...* (Lima *et al...*, 2001).

## **2.6 Comparativo agrônomo entre as culturas do milho e da cana-de-açúcar na produção de etanol**

Do ponto de vista botânico, a cana-de-açúcar (*Saccharum officinarum L.*) é uma gramínea perene de origem austro-asiática, adaptada ao clima tropical úmido, cuja propagação se dá predominantemente por meio de mudas vegetativas (colmos). Por sua vez, o milho (*Zea mays L.*) é uma gramínea anual de origem mesoamericana, cultivada amplamente em regime de sequeiro, com ampla adaptabilidade a distintos biomas brasileiros e propagação por sementes, o que lhe confere maior flexibilidade na implantação e rotação de culturas. Segundo Donke *et al...* (2016), essa diferença estrutural proporciona à cultura do milho uma maior plasticidade agrônoma, sobretudo em regiões do Cerrado e do Sul do Brasil.

Em termos de ciclo vegetativo, a cana-de-açúcar apresenta longos períodos de maturação, geralmente entre 12 e 18 meses (primeiro plantio), com possibilidade de rebrota por até cinco cortes consecutivos antes da renovação do canavial. Essa característica favorece economias de escala e reduz a frequência de replantio, mas também limita a dinâmica de uso da terra. O milho, em contrapartida, possui um ciclo mais curto, variando entre 3 a 4 meses, o que permite sua inserção em sistemas de produção mais intensivos, inclusive em regimes de safrinha (segunda safra), conforme

demonstram os dados da Companhia Nacional de Abastecimento – CONAB (2022). Essa flexibilidade torna o milho altamente atrativo para arranjos de cultivo rotacionado, consorciado ou em integração lavoura-pecuária, elevando sua eficiência agrônômica e seu papel na sustentabilidade do uso do solo.

A safrinha, também conhecida como, segunda safra é o cultivo realizado após a colheita da safra principal, ou seja, após a cultura de verão que é marcada pelas características chuvas regulares. Sendo assim, enquanto o milho safrinha ocorre em uma época de menor disponibilidade hídrica, o milho da safra principal é cultivado durante o período chuvoso. Todavia, mesmo que o milho safrinha seja caracterizado pelo cultivo em sequeiro e possa ter sua produtividade afetada pelas limitações da água e riscos climáticos, a safrinha de milho já consolidou sua importância no cenário nacional e segue crescendo, como apontado no 11º Boletim da Safra de Grãos 2024/2025 da Conab, em que a produção total de milho estimada para a safra foi cerca de 128,25 milhões de toneladas, mas com a segunda safra registrando uma expectativa de produção de aproximadamente 101 milhões de toneladas, o que representa um aumento de 12,2% em relação à safra anterior.

No que tange à produtividade, os dados revelam contrastes marcantes. A cana-de-açúcar possui alta produtividade por hectare em termos de biomassa, com médias nacionais superiores a 75,45 toneladas/hectares, sendo rica em sacarose (Conab, 2025). Já a produtividade do milho, conforme a Conab (2024), registrou 6,1 toneladas por hectare na safra de 2023/2024 – um aumento de 11,6% em relação à safra anterior (2022/2023). No entanto, esta matéria-prima apresenta teores mais elevados de amido, que requer conversão enzimática prévia para liberação de glicose. A produtividade de etanol por tonelada de matéria-prima é, em média, superior na cana (cerca de 85 litros por tonelada) quando comparada ao milho (cerca de 400 litros por tonelada de grão), mas esta relação se inverte quando analisada em função do tempo e da possibilidade de múltiplas safras anuais com o milho.

Adicionalmente, para se produzir uma tonelada de grãos de milho, é necessário cultivar aproximadamente 0,16 hectare (equivalente a 1,6 mil m<sup>2</sup>), considerando a média nacional de produtividade de 6,1 t/ha – o que equivale à razão inversa entre produção e área ( $1 \text{ t} \div 6,1 \text{ t/ha} \approx 0,164 \text{ ha}$ ). Essa estimativa destaca a eficiência relativa em termos de uso da terra e sugere implicações importantes para o planejamento espacial e logístico na produção de etanol a partir do milho. Ou seja, apesar de o milho

render mais etanol por tonelada, a cana-de-açúcar possui uma produção por hectare maior.

A demanda hídrica também constitui uma variável crítica na comparação entre ambas as culturas, pois a cana-de-açúcar é conhecida por sua elevada exigência hídrica, podendo demandar até 2.000mm de água por ciclo, sobretudo em regiões do Sudeste e Nordeste. Em contrapartida, o milho, embora também dependente da regularidade pluviométrica, apresenta maior tolerância a déficits hídricos moderados, especialmente com o uso de cultivares melhoradas e técnicas de manejo conservacionista. Segundo estudo de Oliveira *et al...* (2021), a eficiência do uso da água no milho pode ser otimizada por meio da adoção de práticas como o plantio direto, a adubação equilibrada e o uso de sementes geneticamente adaptadas à seca.

No entanto, é importante ressaltar que o consumo hídrico nas usinas canavieiras tem sido alvo de estudos que evidenciam reduções significativas em virtude de avanços tecnológicos e modernização dos processos produtivos. Medidas como a substituição da lavagem úmida da cana por limpeza a seco e a implementação de desenhos mais eficientes nos sistemas de resfriamento podem reduzir o consumo de água nas usinas entre 11 % e 13 %, além de diminuir perdas associadas à refrigeração, que passam de 5–8 % para 1,5–3 % do balanço hídrico operacional (Paulosso; Marjotta-Maistro; Santos, 2023).

Além disso, o avanço da mecanização da colheita em regiões como São Paulo e Minas Gerais contribui indiretamente para a economia de água. Embora não trate diretamente do consumo hídrico, o Protocolo Agroambiental de 2007, ao incentivar a colheita mecanizada, permitiu uma redução nas perdas de solo e na queima da palha, o que, por sua vez, promove maior retenção de umidade no solo e melhora as condições de microclima e regulação hídrica na área colhida (Novaes *et al...*, 2011).

No tocante à fertilidade do solo, a cana-de-açúcar impõe exigências maiores em termos de macronutrientes, em especial potássio e fósforo, além de provocar processos de degradação física do solo após sucessivos ciclos de colheita mecanizada. O milho, embora igualmente exigente em nitrogênio, apresenta resposta mais eficiente à correção do solo e menor impacto mecânico sobre a estrutura edáfica.

Conforme ressaltam Parente *et al...* (2018), os sistemas de cultivo com milho favorecem a conservação do solo e o sequestro de carbono por meio da manutenção da cobertura vegetal e da rotação de culturas, pois a presença contínua de palhada

sobre o solo, garantida pelo plantio direto e pela adoção de culturas de cobertura entre safras, reduz a erosão hídrica e eólica, melhora a infiltração da água, reduz a evaporação e proporciona condições mais estáveis para a vida microbiana no perfil edáfico.

Essas práticas também promovem o acúmulo de matéria orgânica na superfície e no solo, favorecendo a retenção de água e a melhoria da estrutura física – fatores essenciais para o armazenamento de carbono orgânico, que pode ser  $5,42 \text{ Mg ha}^{-1}$  superior em sistemas com cobertura e plantio direto comparado ao sistema convencional pousio/milho. Vale mencionar também que a rotação de culturas interrompe o ciclo de pragas e doenças, equilibra a exploração de nutrientes e reduz a degradação do solo, contribuindo para sua fertilidade e estabilidade ao longo do tempo (Parente *et al.*..., 2018)

Sob a ótica da mecanização e do uso de insumos, ambas as culturas são altamente tecnificadas no Brasil. A produção de cana-de-açúcar, contudo, apresenta maior grau de verticalização, sendo dominada por grandes conglomerados agroindustriais que integram todo o processo, da moagem à fermentação. Já o milho é cultivado predominantemente por médios e pequenos produtores, com ampla dispersão territorial e comercialização por meio de cooperativas e tradings. Essa diferença estrutural impacta diretamente a logística de suprimento das usinas e a organização da cadeia produtiva de etanol a partir de cada insumo.

Um estudo da Mobilização Empresarial pela Inovação (2018) revela que o setor atrai considerável interesse de investidores, resultando em expectativas de investimentos que podem ultrapassar R\$ 40 bilhões até 2025. Este cenário evidencia que o crescimento do etanol de milho tem despertado atenção não apenas de atores locais, mas também de grandes produtores e capitais estrangeiros. Essas condições favorecem a formação de *joint ventures*, sobretudo com empresas internacionais que aportam tecnologia, escala e integração logística, consolidando o setor em direção a uma maior competitividade global.

Outro ponto a ser considerado é a possibilidade de integração entre ambas as culturas. Nos últimos anos, diversas usinas produtoras de etanol de cana vêm adotando sistemas industriais híbridos, com capacidade flexível de processamento tanto de cana quanto de milho, de forma alternada ou complementar. Segundo dados da UNEM (2020), a introdução do milho em períodos de entressafra da cana permite

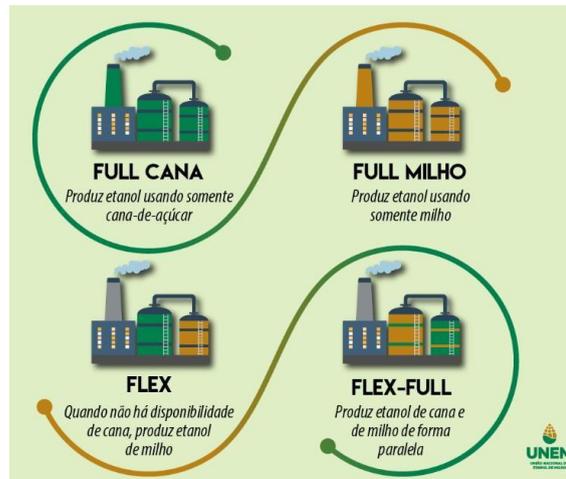
a continuidade da operação industrial ao longo de todo o ano, promovendo maior diluição dos custos fixos e utilização otimizada dos ativos industriais. Essa estratégia, além de economicamente vantajosa, contribui para a diversificação da matriz energética e para a resiliência do setor frente às oscilações climáticas e de mercado, valorizando ainda, a potencialidade de ambas as culturas.

Sendo assim, a análise comparativa entre milho e cana-de-açúcar indica que ambas as culturas possuem atributos singulares que as qualificam como importantes matrizes energéticas no contexto da bioeconomia brasileira. A escolha entre uma ou outra, não deve ser necessariamente formulada em termos excludentes, mas sim como parte de uma estratégia agrícola integrada, que considere fatores regionais, sazonais, tecnológicos e logísticos. A complementaridade entre milho e cana, quando adequadamente planejada, pode potencializar a produtividade territorial, a estabilidade do fornecimento de etanol e a sustentabilidade da cadeia bioenergética nacional.

## **2.7. Configuração das usinas produtoras de etanol de milho no Brasil e sua distribuição no território nacional**

Na dinâmica de produção do etanol de milho no Brasil há diferentes modelos de usinas que operam no país, sendo esses divididos em: *full*, *flex* e *flex-full*. A primeira é uma unidade que produz o etanol somente a partir do milho ou a partir da cana-de-açúcar. Já a segunda, é uma usina de cana que produz etanol de milho nos meses de entressafra da cana. E a terceira, é uma opção em que a indústria produz o combustível proveniente de ambas as matérias primas, milho e cana-de-açúcar, de forma paralela. A Figura 2 mostra a seguir os modelos que foram apresentados.

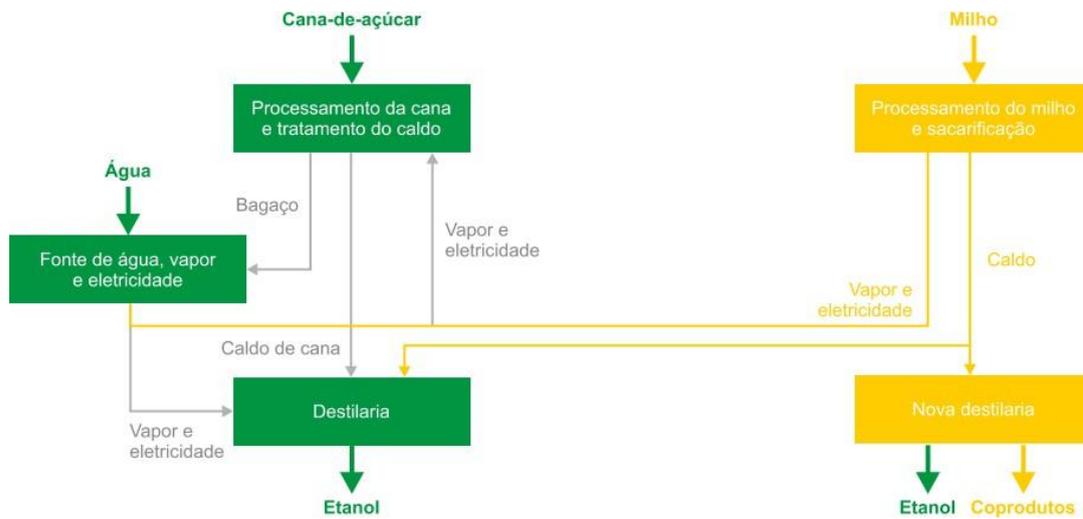
Figura 2 - Tipos de usinas de etanol



Fonte: (UNEM, 2021)

Para detalhamento, em termos de estrutura e tipo de investimento, em modelos de usinas *full* de cana-de-açúcar que optam por se tornar *flex*, instala-se uma pequena estrutura adjacente à planta atual, para o uso e aproveitamento de equipamentos e sistemas já existentes de produção. O segundo modelo, chamado *flex-full*, apesar da semelhança com o primeiro, irá se distinguir pela presença de equipamentos adicionais, específicos para o milho, que tornam a moagem do grão possível não apenas na entressafra, aproveitando etapas similares do processamento da cana para produção de etanol de milho durante o ano todo, conforme exemplificado na Figura 3. Além disso, vale ressaltar que muitas usinas do modelo *flex* tem alterado a dinâmica de produção para o modelo *flex-full*, principalmente em função dos baixos investimentos necessários para tornar a moagem do milho e a produção do etanol possíveis durante o ano todo (Neves *et al.*..., 2021).

Figura 3 - Esquema de compartilhamento de etapas em usinas flex-full



Fonte: (Silva, Santos, Nogueira Junior, & Vian, 2020)

Agora, quanto à distribuição territorial, há uma concentração significativa de usinas na região Centro-Oeste, onde em Mato Grosso se encontram 10 unidades, seguidas por Goiás com 5, além de pelo menos uma unidade operacional em cada um dos estados de São Paulo, Mato Grosso do Sul e Paraná, como se observa na Figura 4. Esse padrão reflete a crescente importância do milho em sistema de segunda safra (safrinha), bem como o reenquadramento dos ativos agroindustriais da região, tradicionalmente voltados ao milho e à pecuária.

Figura 4 - Usinas de etanol de milho em operação no Brasil autorizadas pela ANP



Fonte: Graziano, 2023.

Mato Grosso detém, sozinho, aproximadamente 77 % da capacidade nacional instalada de etanol de milho (Neves, 2021). Goiás, com sua infraestrutura adaptável de usinas *flex*, na safra 2020/21, respondeu por cerca de 513 milhões de litros, enquanto São Paulo e Paraná, que complementam o parque produtivo nacional, com capacidade conjunta em aproximadamente 1 bilhão de litros, distribuídos nos dois estados (Neves, 2021).

## 2.8 O papel do etanol na matriz de transporte veicular brasileira: contribuição dos veículos flex

O etanol ocupa posição estratégica na matriz energética brasileira aplicada ao transporte veicular, sobretudo pela sinergia estabelecida com a frota nacional composta majoritariamente por veículos com tecnologia *flex fuel*. Desde a implantação do Proálcool em 1975, o país consolidou um modelo de substituição parcial da gasolina por fontes renováveis de origem vegetal, inicialmente com a cana-de-açúcar, e mais recentemente com a incorporação do milho como matéria-prima relevante (Brasil Energia, 2025).

Segundo dados da Empresa de Pesquisa Energética (EPE, 2024), cerca de 85% da frota de veículos leves no Brasil é composta por modelos flex, o que confere ao país uma vantagem comparativa significativa frente a outras nações em termos de viabilidade para a substituição de combustíveis fósseis no curto prazo. A possibilidade de abastecimento com etanol hidratado ou gasolina misturada ao etanol anidro torna os veículos *flex* agentes centrais da política de descarbonização no setor de transportes. Essa característica representa uma oportunidade concreta de redução imediata das emissões de gases de efeito estufa, sem a necessidade de transformações estruturais profundas na frota circulante.

O relatório da Brasil Energia (2025), com base em entrevista com Henry Joseph, diretor técnico da Associação Nacional dos Fabricantes de Veículos Automotores (Anfavea), destaca que o simples aumento do uso de etanol na frota atual poderia tornar o Brasil líder global em descarbonização do transporte rodoviário.

Joseph argumenta que “se a frota brasileira passasse a utilizar etanol em 100% de sua operação, seria possível alcançar os maiores índices de redução de emissões do mundo, sem depender exclusivamente da eletrificação veicular” (Joseph, 2025, n.p.).

Portanto, a manutenção e o estímulo ao uso do etanol como complemento à matriz de transporte brasileira transcendem a questão ambiental. Trata-se de uma decisão estratégica que articula soberania energética, dinamismo agrícola-industrial e viabilidade tecnológica imediata, considerando que a infraestrutura de abastecimento, a tecnologia veicular e a cultura de consumo já estão consolidadas no país. Essa realidade representa uma oportunidade concreta de protagonismo internacional do Brasil na transição energética de baixo carbono, especialmente em um cenário de limitação da eletrificação integral da frota em razão dos impactos ambientais e geopolíticos associados à cadeia de produção de baterias.

### 3 METODOLOGIA

A presente pesquisa adotou uma abordagem qualitativa, de cunho exploratório e descritivo, pautada na análise documental e na revisão bibliográfica sistemática, com o objetivo de investigar a expansão do milho como matéria-prima para a produção de etanol no Brasil e seus desdobramentos na matriz energética nacional. O estudo foi estruturado de forma a contemplar, em uma primeira etapa, o levantamento, a seleção e a análise criteriosa de fontes bibliográficas e documentos técnicos relevantes, e, em uma segunda etapa, a sistematização de dados secundários oriundos de instituições públicas e privadas reconhecidas pela confiabilidade e atualização de suas informações.

Para a condução da revisão bibliográfica, estabeleceram-se critérios rigorosos de seleção das obras, priorizando-se artigos científicos, relatórios técnicos, dissertações, teses e documentos institucionais publicados entre os anos de 2005 e 2025, com ênfase na produção acadêmica e institucional que abordasse os aspectos bioquímicos, tecnológicos, agrônômicos, econômicos, ambientais e logísticos do processo de produção de etanol a partir do milho. A seleção das fontes foi realizada em bases de dados científicas amplamente reconhecidas, tais como SciELO, Scopus, Web of Science, ScienceDirect, além do Portal de Periódicos da CAPES e da Biblioteca Digital Brasileira de Teses e Dissertações (BDTD). Também foram consultados documentos técnicos de instituições oficiais, como a Companhia Nacional de Abastecimento (CONAB), a Agência Nacional do Petróleo, Gás Natural e Biocombustíveis (ANP), a União Nacional do Etanol de Milho (UNEM), a Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária (EMBRAPA), a Empresa de Pesquisa Energética (EPE) e o Ministério de Minas e Energia (MME).

Na etapa seguinte, realizou-se a leitura exploratória e analítica dos textos selecionados, visando identificar convergências, divergências e lacunas presentes na literatura. A análise foi guiada por eixos temáticos previamente definidos, os quais nortearam a organização dos capítulos do trabalho, conforme se observa no sumário. Esses eixos abarcam desde as etapas técnicas de processamento industrial do milho para a produção de etanol (preparo, moagem, hidrólise, fermentação e destilação), até o estudo comparativo entre o milho e a cana-de-açúcar sob a perspectiva agrônômica e produtiva. Também foram objeto de análise o crescimento recente do

setor de etanol de milho no Brasil, seus impactos na matriz energética nacional, a distribuição geográfica das usinas, os modelos industriais empregados e os incentivos públicos relacionados à sua consolidação.

Complementarmente à revisão bibliográfica, a pesquisa se apoiou na análise documental de relatórios e boletins técnicos da CONAB, da EPE e da UNEM, em especial os levantamentos mais recentes das safras agrícolas de 2023/2024 e as projeções para 2025/2026. Esses dados permitiram uma análise empírica da evolução da produção de milho e de cana-de-açúcar, bem como da capacidade instalada de produção de etanol a partir de ambas as culturas. Tais informações foram sistematizadas em tabelas e gráficos a fim de favorecer a compreensão das tendências e facilitar a comparação entre as rotas tecnológicas avaliadas.

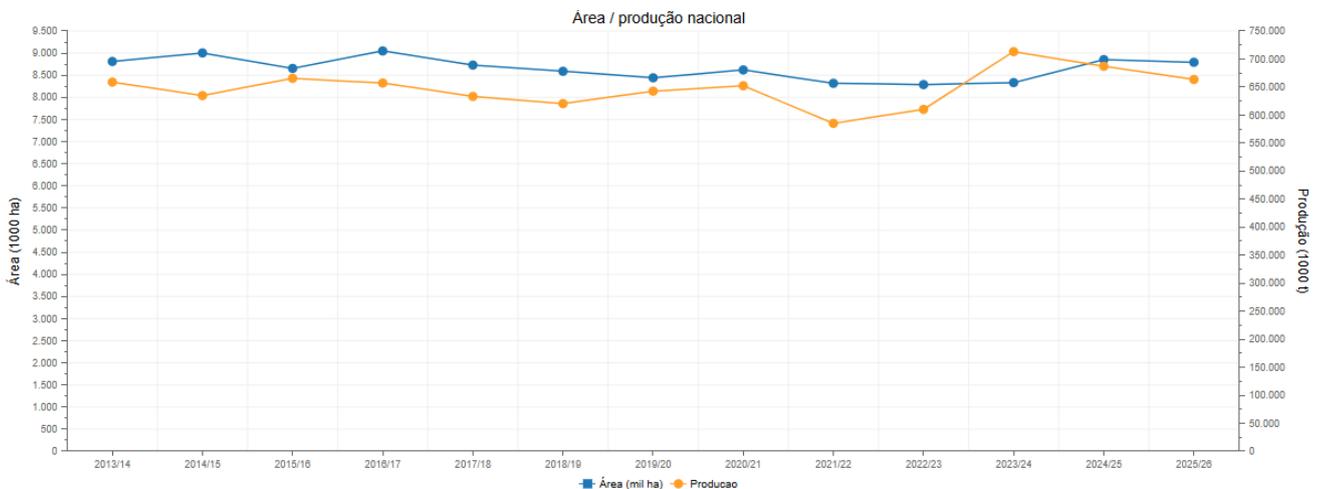
Por fim, destaca-se que, embora a pesquisa tenha se valido exclusivamente de fontes secundárias, a triangulação entre documentos técnicos, literatura científica e dados estatísticos garantiu robustez à análise empreendida. A opção por não realizar entrevistas ou visitas técnicas se deveu a limitações temporais e logísticas impostas ao desenvolvimento deste trabalho, o que, no entanto, não comprometeu a consistência metodológica da investigação.

## 4 RESULTADOS E DISCUSSÕES: ANÁLISE DA EXPANSÃO DO MILHO NA PRODUÇÃO DE ETANOL E IMPACTO NA MATRIZ ENERGÉTICA BRASILEIRA

### 4.1 Breve comparativo da safra do milho e da cana de açúcar entre 2017 e 2025

Segundo relatórios da Companhia Nacional de Abastecimento - CONAB, na série histórica da safra da cana-de-açúcar, apresentada na Figura 5, observa-se que a área cultivada se manteve relativamente estável, oscilando entre cerca de 8,0 e 8,9 milhões de hectares, com leve tendência de aumento até 2017/18, seguida por pequenas variações nos anos subsequentes. A produção nacional apresentou comportamento semelhante, situando-se entre aproximadamente 620 e 740 milhões de toneladas ao longo do período. A produtividade das safras variou de forma moderada, permanecendo próxima a 75 t/ha nas últimas safras, com a mais recente (2025/26) registrando 75,6 t/ha.

Figura 5 - Safra da cana de açúcar: relação área plantada e produção nacional (2017-2025)



Fonte: CONAB, 2025.

A partir da Figura 5, observa-se também que o ciclo 2021/22 representou um ponto de inflexão significativo. Isso devido a uma combinação de seca prolongada e geadas na região Centro-Sul que provocou expressiva redução na produtividade. A Conab registrou retração de cerca de 3,5% na área produtiva (reduzindo dos aproximados 8,6 milhões ha para 8,3 milhões ha) e estimativas apontaram recuo de até 12,8% na produtividade por hectare, que passou de 86,1 t/ha (pré-crise) para

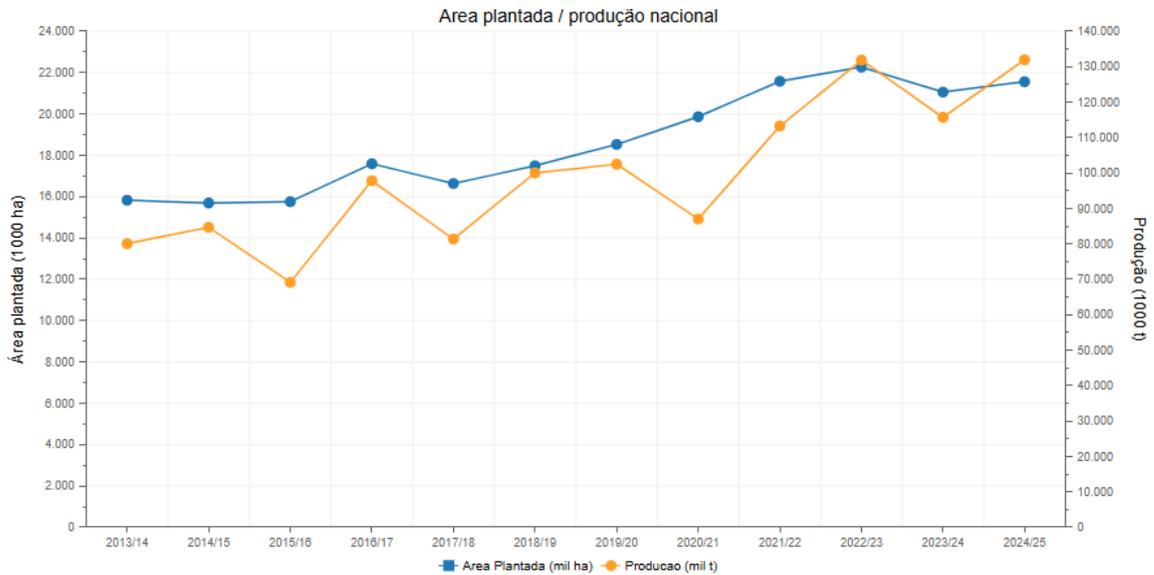
patamares inferiores, sobretudo na região afetada (CONAB, 2022). A UNICA (2023) descreveu o período como de “quebra histórica”, com moagem em torno de 523 milhões de toneladas e queda de 13,36% na produção de etanol derivada da cana, relativamente ao ciclo anterior.

De todo modo, após esse choque climático, o setor mostrou-se resiliente, com safras apresentando progressiva recomposição de produtividade e produção total, resultando um volume recorde em 2023/24. Para a safra 2025/26, a projeção indica aproximadamente 663,4 milhões de toneladas, com área levemente superior (8,79 milhões ha - acréscimo de 0,3%), mas com leve queda de produtividade (-2,3%), principalmente em decorrência das condições climáticas adversas registradas em 2024 nos principais centros produtores (Silva *et al...*, 2024).

Este padrão demonstra a elevada sensibilidade climática da cana-de-açúcar, sobretudo em regiões com elevado índice de mecanização e monocultivos extensivos, o que impacta diretamente a oferta de etanol em cenários desfavoráveis.

No que diz respeito a área plantada de milho, conforme Figura 6, esta apresentou crescimento mais expressivo e contínuo ao longo do período analisado. Em 2013/14, a área estava em torno de 15 milhões de hectares, avançando de forma gradual até alcançar 21,559 milhões de hectares na safra 2024/25. A produção nacional mostrou oscilações mais marcantes, mas com tendência de crescimento, partindo de cerca de 80 milhões de toneladas e atingindo 131,973 milhões de toneladas na última safra. A produtividade apresentou maior variabilidade, mas a média manteve-se acima de 5 t/ha, atingindo 6,1 t/ha em 2024/25.

Figura 6 - Safra do milho: relação área plantada e produção nacional (2017-2025)



Fonte: CONAB, 2025.

Como observado, nas últimas safras, o milho no Brasil tornou-se um dos principais vetores de expansão agrícola. Esse crescimento pode ser atribuído a três justificativas interligadas: avanços tecnológicos associados à safrinha, efetiva intensificação produtiva (efeito “poupa-terra”), e dinâmica de mercado com alta demanda interna e externa.

Em primeiro lugar, a adoção do sistema de segunda safra (“safrinha”) – plantio realizado após a colheita da soja – foi crucial para o salto produtivo do milho. Desde 2008/09, a safrinha passou de uma prática marginal a elemento central da produção nacional: representou mais de 30% da área plantada e da produção de milho, chegando a 77,6% da área cultivada no Centro-Oeste, com rendimento superior à safra principal (4.489 kg/ha vs. 4.042 kg/ha), conforme dados da Embrapa (2021). A safra do milho tolera clima seco e é estrategicamente alinhada ao calendário temporal, elevando a produtividade anual da cultura.

Ademais, a intensificação tecnológica desempenhou papel essencial. Nos últimos 30 anos, o Brasil quadruplicou sua produção de milho de cerca de 30 para mais de 100 milhões de toneladas, principalmente pelas melhorias na produtividade. Esse avanço foi possível graças a portfólio de cultivares híbridas modernas, manejo agrônomo eficiente e inovações como o plantio direto, densidades de semeadura aprimoradas e fertilização balanceada — fenômeno apelidado de “poupa-terra”, já que exige menos área para sustentar a expansão da produção (Miranda *et al...*, 2021).

Por fim, o mercado interno e externo impulsionou o setor. A agroindústria de rações (abastecendo avicultura, suinocultura e bovinocultura) exigiu volumes crescentes de milho, criando um mercado receptivo à expansão da produção. Além disso, o Brasil tem elevado sua participação na exportação global do grão, beneficiado pelos avanços tecnológicos e pela eficiência produtiva. Assim, a incrementos em área e produtividade foram sustentados por uma forte demanda e preços relativamente favoráveis (Miranda *et al...*, 2021).

Importante destacar que, ainda que eventos climáticos extremos impactem todas as culturas, o milho tem se mostrado mais resiliente comparado à cana-de-açúcar. A possibilidade de duas safras anuais permite ajustar o plantio conforme as janelas climáticas, mitigando efeitos de secas ou geadas pontuais, ao contrário da cana, que possui ciclo mais longo e área fixa.

#### **4.2 Crescimento do setor do milho na produção de etanol**

Além do crescimento da produção de milho, o Brasil vem experimentando um crescimento expressivo no número de instalações industriais dedicadas à produção de etanol derivado do milho. Dados recentes da União Nacional do Etanol de Milho (UNEM) mostraram que, ao final de 2023, o país já contava com um total de 25 biorrefinarias em operação, plenamente integradas na cadeia bioenergética nacional. Adicionalmente, encontram-se autorizadas pela Agência Nacional do Petróleo, Gás Natural e Biocombustíveis (ANP) 10 novas unidades e há previsão de construção de mais 20 plantas para os próximos anos, reforçando o dinamismo do setor (Figura 7).

Figura 7 - Expansão das instalações industriais do milho



Outro levantamento, divulgado em 2023, indicava que o Brasil contava com 18 usinas ativas de etanol de milho, segundo dados da ANP e da UNEM (ANP, 2023; UNEM, 2023). Essa diferença entre os números revela a rapidez com que novas plantas entraram em operação recentemente, refletindo estratégias de expansão em regiões com alta disponibilidade de milho e acesso logístico facilitado. Observa-se ainda, conforme Figura 4, que a região Amazônica é uma das apostas para o vetor de crescimento do milho.

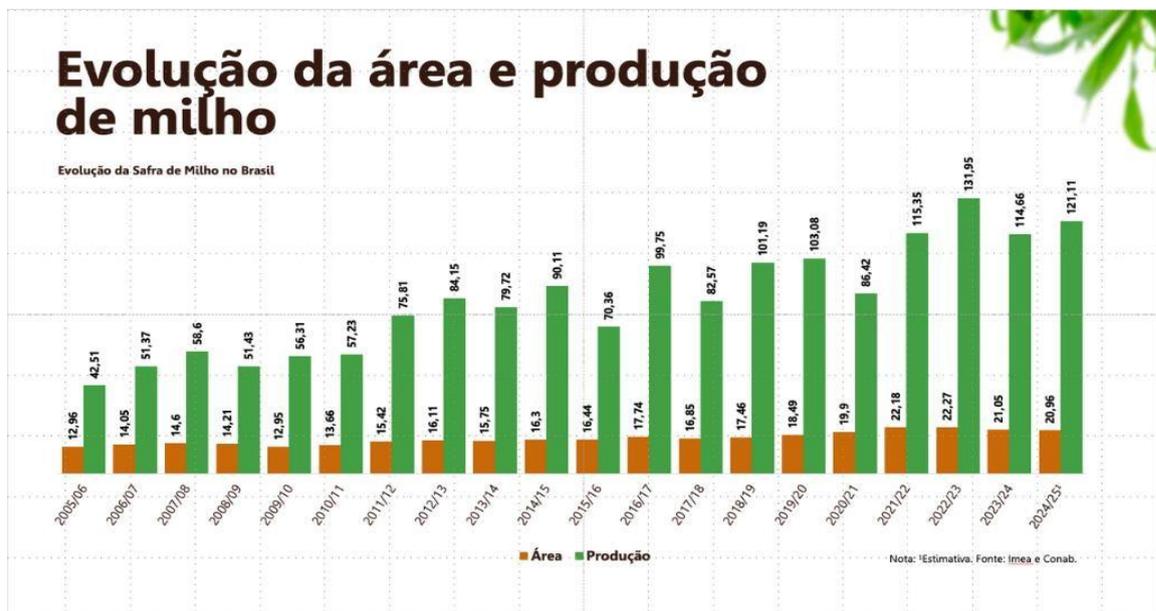
Quanto à evolução das biorrefinarias de etanol de milho no Brasil, nas últimas décadas, pode ser considerada um dos processos de transformação mais significativos da matriz bioenergética nacional. O avanço tecnológico, aliado à mudança no perfil produtivo agrícola, reconfigurou os fluxos de produção e a geopolítica industrial do setor de biocombustíveis. E em menos de uma década, a indústria de etanol de milho contribuiu para uma revolução estrutural no mercado de bioenergia e no setor de proteína animal, tornando-se uma alternativa estratégica ao modelo tradicionalmente centrado na cana-de-açúcar (UNEM, 2025).

Atualmente, o Brasil ocupa a terceira posição no ranking mundial de produção de milho, ficando atrás apenas dos Estados Unidos e da China. Nos últimos dez anos, a produção brasileira do grão apresentou um crescimento superior a 40%, resultado de investimentos maciços em tecnologias agrícolas, melhoramento genético, manejo sustentável de solos e expansão da área cultivada (UNEM, 2025). Esse crescimento

substancial viabilizou o direcionamento de parte desse excedente para a indústria de biocombustíveis, criando um ciclo virtuoso de agregação de valor, sustentabilidade ambiental e geração de emprego.

Na Figura 8 é possível visualizar com propriedade o crescimento e a evolução da área plantada e da produção de milho no Brasil, segundo a UNEM (2025). Nota-se uma curva ascendente notável, especialmente a partir da safra de 2010/2011, quando a produção saltou de cerca de 57 milhões de toneladas para mais de 131 milhões de toneladas em 2023/2024. Esse incremento de quase 130% na produção nacional de milho reforça o crescimento da relevância do milho como matéria-prima energética.

Figura 8 - Evolução da área cultivada do milho (em milhões de hectares) e de produção do milho (em milhões de toneladas)



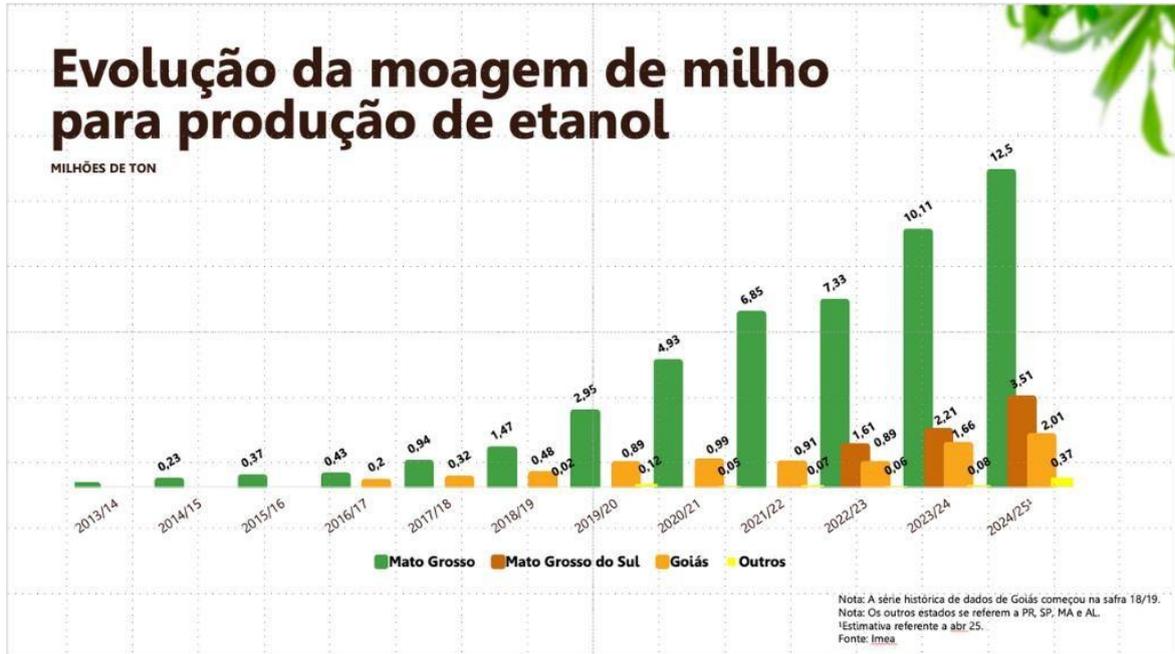
Fonte: UNEM, 2025.

A partir do gráfico da Figura 8, reitera-se o que foi dito anteriormente acerca do milho ter se tornado um dos principais vetores de expansão agrícola e, atualmente, possui a safrinha em mais de 30% da área plantada e cultivada. Além da ampliação da importância da safrinha, esse fenômeno ocorre também devido, e principalmente, aos avanços tecnológicos, a efetiva intensificação produtiva e, sobretudo, a dinâmica de mercado com alta demanda interna e externa.

Já entre 2013 e 2024, observou-se um crescimento exponencial da capacidade de moagem do milho, passando de pouco mais de 0,2 milhão de toneladas para aproximadamente 13,5 milhões de toneladas anuais (Figura 6). O estado do Mato

Grosso lidera esse processo nacional com larga margem, seguido por Mato Grosso do Sul, Goiás e, em menor escala, outros estados como São Paulo, Paraná e Alagoas.

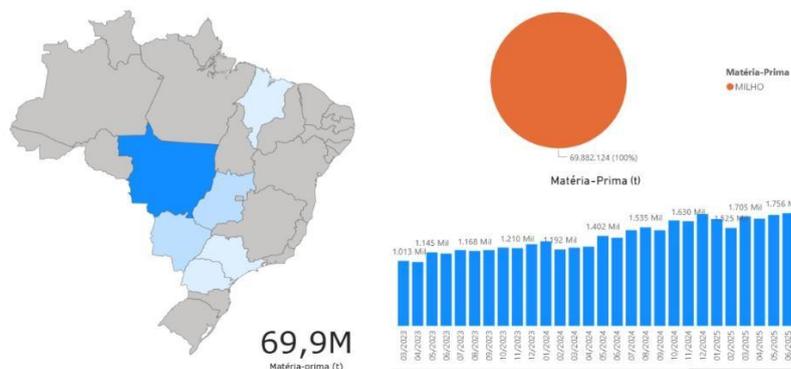
Figura 9 - Evolução da moagem de milho para a produção de etanol



Fonte: UNEM, 2025.

Com base no gráfico da Figura 9, observa-se um crescimento expressivo da moagem de milho para a produção de etanol a partir da safra de 2016/17, impulsionado pela entrada de novos estados no circuito industrial, como Mato Grosso do Sul e Goiás, estabelecendo, portanto, ainda mais a presença da Região Centro-Oeste neste mercado. Esta presença pode ser verificada através da Figura 10.

Figura 10 - Presença do milho como matéria prima na região Centro-Oeste



Fonte: Conab, 2025.

É seguro apontar que a consolidação da segunda safra de milho representou um dos principais marcos para essa expansão territorial, pois estados como Goiás e Mato Grosso do Sul, que tradicionalmente integravam a rota da soja, passaram a registrar excedentes relevantes de milho na entressafra da oleaginosa. Esse contexto criou condições favoráveis para a instalação de biorrefinarias nas proximidades das áreas produtoras, favorecendo a verticalização da cadeia produtiva e reduzindo a dependência de centros tradicionais como o estado do Mato Grosso. A possibilidade de dispor de matéria-prima em abundância, associada à infraestrutura logística já consolidada, como rodovias, ferrovias e armazéns, foi determinante para esse novo arranjo territorial.

Nesta altura, é importante frisar que o ritmo acelerado de expansão das usinas deve-se a diversos fatores. Primeiramente, ao desenvolvimento da infraestrutura logística, incluindo terminais ferroviários e portuários no Centro-Oeste, facilitando o escoamento tanto de grãos como de etanol puro ou hidratado. Embora o Porto do Itaqui (MA) seja referência nacional na movimentação de milho e etanol, o traçado da Ferrovia Norte-Sul em direção a Goiás e Mato Grosso vem consolidando uma rede multimodal estruturante, que reduz custos de transporte e tempo de entrega.

Um dos pilares estratégicos por trás do acelerado desenvolvimento das biorrefinarias de etanol de milho também reside na confluência entre a modernização tecnológica do setor e um marco regulatório robusto. A implementação do RenovaBio (Lei nº 13.576/2017), em vigor desde dezembro de 2017, instituiu um sistema estruturado de metas de descarbonização, ancorado na formulação e negociação de Créditos de Descarbonização (CBIOS) por tonelada de CO<sub>2eq</sub> evitada. Essa articulação incentivou a justificativa econômica para os investimentos nas plantas industriais e passou a conferir previsibilidade e segurança jurídica, reduzindo a percepção de risco regulatório e promovendo modernizações nos processos produtivos. Em relatos da Agência Nacional de Petróleo, Gás Natural e Biocombustíveis - ANP e produtores de Mato Grosso, destaca-se que o RenovaBio viabilizou investimentos consideráveis voltados à rastreabilidade e à eficiência energética, especialmente em usinas de etanol de milho, consideradas estratégicas dentro da política nacional de transição energética.

Simultaneamente, o programa “Milho do Paiol ao Etanol”, desenvolvido pela ANP, oferece mecanismos adicionais de incentivo fiscal e operacional às empresas que iniciam ou expandem operações com etanol de milho. A iniciativa contempla reduções tarifárias, facilitação de licenciamento ambiental e capacitação técnica, além de um sistema de pontuação diferenciado no acesso à linha de financiamento agrícola industrial (Graziano, 2023). Esse conjunto de medidas reduz as barreiras de entrada e fortalece a atratividade dos projetos, sobretudo em regiões como o Centro-Oeste, onde a disponibilidade de matéria-prima e a logística favorável já colocam o etanol de milho como alternativa competitiva frente à cana.

De modo complementar, o RenovaBio estabelece uma exigência de certificação e transparência do ciclo de produção, o que tem induzido as biorrefinarias a investirem em sistemas avançados de monitoramento, como rastreabilidade do grão, uso de sensores IoT (Internet das Coisas) e plataformas integradas de logística (SCADA). A rigorosidade normativa para comprovação da redução efetiva de emissões tem favorecido a competitividade no mercado nacional.

Por fim, a segurança e previsibilidade derivadas dessas políticas têm permitido às empresas estruturar modelos financeiros de longo prazo, com financiamentos atrelados a metas ambientais e linhas de crédito verdes do BNDES e de bancos multilaterais, como o Banco Mundial e o BID. Essa solução financeira híbrida – que combina retorno econômico com retorno ambiental – reforça o etanol de milho como uma alternativa sustentável e financeiramente viável dentro da estratégia energética nacional e de inserção internacional do agronegócio brasileiro.

Essa articulação entre política industrial e energética começou a atrair olhares e recursos externos. A concretização de *joint ventures* envolvendo empresas norte-americanas com grupos agroenergéticos brasileiros em Mato Grosso e Goiás é um exemplo dessa dinâmica. Essas parcerias estão voltadas à instalação de plantas *full corn* com tecnologia norte-americana de ponta, que incluem biorreatores de segunda geração<sup>3</sup> e sistemas de cogeração termelétrica mais eficientes (Neves, 2021). Esses investimentos, em grande parte condicionados à capacidade de emitir CBIOs e de

---

<sup>3</sup> Biorreatores de segunda geração são equipamentos utilizados na produção de biocombustíveis a partir de matérias-primas como palha de milho, bagaço de cana, resíduos florestais e outros materiais não comestíveis. Diferentemente dos biorreatores de primeira geração, que operam com substratos alimentares ricos em amido ou sacarose, os de segunda geração envolvem processos mais complexos de hidrólise enzimática e fermentação, permitindo maior aproveitamento da biomassa residual e contribuindo para uma matriz energética mais sustentável e menos competitiva com a cadeia alimentar.

usufruir dos incentivos do plano da ANP, evidenciam o impacto direto do ambiente regulatório sobre a atração de capital estrangeiro.

No entanto, apesar do crescimento consistente, persistem desafios de dimensionamento e sustentabilidade. A dependência de tecnologias importadas – especialmente enzimas para hidrólise e equipamentos de destilação –, assim como a variabilidade dos preços internacionais do milho, impõem riscos ao balanceamento econômico dos projetos. Entretanto, a robustez da estrutura instalada, tanto na forma *full* quanto *flex*, demonstra a consolidação de um parque industrial tecnológico capaz de responder à crescente demanda interna por etanol e à necessidade de manutenção da produção durante a entressafra da cana.

Como consequência dos investimentos no setor de cultivo do milho e na expansão industrial, a produção de etanol propriamente dita também apresentou crescimento substancial. Em 2013/2014, o volume produzido foi de meros 0,03 milhões de metros cúbicos (MMm<sup>3</sup>). A projeção para a safra 2024/2025 aponta para um salto expressivo, com a expectativa de alcançar 8 MMm<sup>3</sup>, com tendência de dobrar até 2033/2034, atingindo cerca de 16,6 MMm<sup>3</sup> (UNEM, 2025) – Figura 11.

Figura 11 - Produção de etanol de milho (em milhões de metros cúbicos) no Brasil por tipo de produto



Fonte: UNEM, 2025.

Vale destacar ainda que, de acordo com a Empresa de Pesquisa Energética - EPE, em seu último Balanço Energético Nacional - BEN 2025, ano base 2024, atesta a consolidação do milho como insumo relevante na matriz de produção de etanol brasileiro. Segundo o documento, em 2024 o grão respondeu por 20,2% do etanol anidro e 19,5% do etanol hidratado produzidos no país, o que corresponde a aproximadamente 7,55 milhões de m<sup>3</sup>, representando 19,8% do total de etanol produzido no Brasil.

É digno de nota também que a produção de etanol de milho no Brasil para o ciclo 2033/34 em 16,63 milhões de metros cúbicos (MMm<sup>3</sup>) expressa na Figura 9 representa um possível marco histórico para a indústria bioenergética nacional. Esse volume, caso confirmado, implicaria mais do que o dobro da produção registrada para o ciclo de 2024/25, que alcançou 8,00 MMm<sup>3</sup>, somando-se os volumes de etanol anidro e hidratado. Essa perspectiva de crescimento não é aleatória, mas encontra respaldo nas tendências consolidadas ao longo da última década, conforme apresentado anteriormente.

Entre 2013/14 e 2024/25, o Brasil passou de uma produção de 0,03 MMm<sup>3</sup> para um patamar industrial significativo, com expansão anual média acelerada e investimentos concentrados em estados-chave como Mato Grosso, Goiás e Mato Grosso do Sul. O salto projetado para 2033/34 é coerente com a curva ascendente dos últimos anos e reflete uma ampliação da capacidade de moagem e destilação, e uma reconfiguração estrutural do papel do milho na matriz de biocombustíveis do país. Caso os investimentos previstos se concretizem, especialmente em novas unidades industriais e aprimoramento tecnológico, o Brasil poderá consolidar-se como o segundo maior produtor mundial de etanol de milho, atrás apenas dos Estados Unidos. Adicionalmente, esse avanço tende a posicionar o milho como peça-chave no cumprimento das metas nacionais de descarbonização, dada sua crescente participação na geração de créditos de descarbonização (CBIOs) e na oferta de combustíveis alternativos como o SAF (Combustível Sustentável de Aviação), recentemente reconhecido pela OACI (Organização da Aviação Civil Internacional).

O crescimento da participação do etanol de milho também está alinhado às diretrizes das políticas públicas federais de incentivo aos biocombustíveis. A introdução da mistura E30 (30% de etanol na gasolina, vigente a partir de agosto/25) é apontada pelo Ministério de Minas e Energia como um estímulo adicional para a

demanda, com potencial de atrair investimentos superiores a R\$ 10 bilhões para a cadeia produtiva. A expectativa oficial é de que, já em 2025, o milho responda por cerca de 23% de toda a produção nacional de etanol, reforçando seu papel estratégico na transição energética, na mitigação das emissões de gases de efeito estufa e na segurança energética do país.

De todo modo, vale mencionar que as biorrefinarias em funcionamento apresentam modelos adaptáveis às condições regionais e aos perfis de produção. Aproximadamente metade delas operam no chamado modelo “*full corn*” (ou seja, dedicadas exclusivamente ao trato para milho), enquanto a outra metade segue o formato “*flex*”, integrando a capacidade de processar cana-de-açúcar e milho de forma alternada – uma configuração que representa uma estratégia de maximizar o uso de infraestrutura instalada e manter a operação ao longo do ano.

Portanto, a projeção de 16,63 MMm<sup>3</sup> deve ser interpretada não como uma extrapolação otimista, mas como um desdobramento plausível da trajetória recente do setor, desde que sustentado por marcos institucionais estáveis, expansão da base agrícola, adoção de inovações industriais e viabilidade econômica dos coprodutos associados. Essa expectativa exige, contudo, atenção às variáveis climáticas, aos desafios logísticos e à concorrência com outros usos do milho, notadamente para alimentação e exportação. A manutenção do crescimento dependerá da capacidade do setor em equilibrar as demandas com eficiência produtiva e responsabilidade ambiental.

### **4.3 Vantagens e desvantagens do uso do milho na produção de etanol em comparação à cana-de-açúcar**

A produção de etanol a partir do milho tem se destacado no cenário bioenergético brasileiro como uma alternativa crescente em relação à rota tradicional baseada na cana-de-açúcar. Essa ascensão é resultado de fatores estruturais, agrônômicos, logísticos e institucionais que favorecem a inserção do milho em regiões onde a cana possui presença limitada, ao mesmo tempo em que responde à demanda por maior previsibilidade, diversificação de matérias-primas e estabilidade na oferta de biocombustíveis. No entanto, essa trajetória é marcada por um conjunto de vantagens e limitações que devem ser analisadas à luz dos indicadores produtivos, econômicos, ambientais e regulatórios.

A primeira diferença estrutural entre as duas culturas reside na área plantada e no comportamento de expansão. A cana-de-açúcar manteve relativa estabilidade em sua área cultivada entre 2017 e 2025, variando entre 8,0 e 8,9 milhões de hectares. Por outro lado, o milho apresentou crescimento progressivo, saltando de cerca de 15 milhões de hectares na safra 2013/2014 para 21,6 milhões na safra 2024/2025. Essa diferença reflete o fenômeno da segunda safra (safrinha), que permitiu a intensificação da produção sem necessidade de conversão significativa de novas áreas. Parente *et al...* (2020) destacam que a inserção do milho como cultura subsequente à soja tornou-se uma estratégia eficiente para ampliação da produção com base em infraestrutura já consolidada. Essa condição confere ao milho uma elasticidade que a cana, por sua própria morfologia e exigências de ciclo longo, não possui.

Do ponto de vista da produção total, a cana-de-açúcar oscilou entre 620 e 740 milhões de toneladas no período analisado, com destaque negativo para a quebra de safra em 2021/22, quando a produção caiu para 523 milhões de toneladas em razão de eventos climáticos extremos. Em contrapartida, a produção de milho saltou de 80 milhões para 132 milhões de toneladas entre 2013 e 2025, revelando uma tendência robusta de expansão. A produtividade da cana manteve-se em torno de 75 t/ha, com perdas significativas durante episódios de seca e geada. Já o milho, embora mais variável, alcançou 6,1 t/ha em 2024/2025, com desempenho superior na safrinha em virtude da melhor adaptação ao clima seco e ao uso de cultivares melhoradas.

As diferenças em termos de sensibilidade climática também são marcantes. A cana-de-açúcar apresenta alta vulnerabilidade a choques térmicos e hídricos, como se verificou na quebra histórica de 2021/22, quando a produtividade na região Centro-Sul recuou até 12,8% e cerca de 1 milhão de hectares foram afetados por geadas. A recuperação foi lenta, exigindo dois ciclos agrícolas completos para reposicionar os níveis produtivos. O milho, por sua vez, apresenta maior resiliência devido à possibilidade de se ajustar em dois ciclos por ano e à flexibilidade no calendário agrícola. A segunda safra, plantada após a colheita da soja, permite uma adaptação às janelas climáticas e mitiga os riscos associados a eventos pontuais. Essa capacidade de resposta é reforçada pela possibilidade de armazenamento do grão, que pode permanecer estocado por até dois anos em condições adequadas, diferentemente da cana, cujo processamento deve ocorrer imediatamente após o corte (Neves, 2021).

O desempenho relativo na produção de etanol também reflete a maturidade dessas cadeias. A cana respondeu por aproximadamente 80% do etanol produzido no Brasil em 2024, consolidando sua posição predominante. Entretanto, o milho atingiu 19,8% da produção naquele mesmo ano, com projeções que apontam para 23% em 2025, segundo dados do Balanço Energético Nacional (EPE, 2024). A consolidação do milho nessa cadeia deve-se, em parte, à sua maior eficiência em termos de rendimento por tonelada de matéria-prima, o que, aliado à operação contínua das usinas ao longo do ano, favorece a diluição de custos fixos e o aumento da produtividade anual.

O BEN 2025 destaca que o processo de produção de etanol de milho também tem gerado subprodutos de elevado valor econômico, como o DDG (grãos secos de destilaria), amplamente utilizado na formulação de rações, e o óleo de milho, insumo importante para a indústria alimentícia e oleoquímica. Essa característica aponta para a integração do setor energético com a cadeia da proteína animal, promovendo efeitos econômicos positivos para diversas regiões produtoras. Melo e Baccarin (2020) também apontam que essa integração confere maior estabilidade econômica às usinas de milho, que conseguem equilibrar perdas eventuais na venda de etanol com ganhos na comercialização de coprodutos.

Do ponto de vista ambiental, o milho apresenta desempenho competitivo, desde que cultivado em áreas já antropizadas e manejado de forma sustentável. Estudos de Silva *et al.* (2019) demonstram que, nesse cenário, a emissão de gases de efeito estufa pode ser inferior à registrada em rotas baseadas em combustíveis fósseis. No entanto, quando há expansão sobre áreas de vegetação nativa ou solos ricos em carbono, o tempo necessário para que o balanço líquido de emissões se torne positivo pode superar uma década, comprometendo a eficácia ambiental do sistema (Lima e Andrade, 2021). A cana, por sua vez, já possui sistemas de rastreabilidade mais consolidados, fruto de décadas de regulação ambiental e da experiência com o RenovaBio, embora ainda enfrente desafios com práticas degradantes em áreas de cultivo extensivo e altamente mecanizado.

No campo regulatório, ambas as rotas são beneficiadas pelas diretrizes do RenovaBio, que promove a redução das emissões de gases de efeito estufa e fomenta a competitividade dos biocombustíveis por meio dos créditos de descarbonização (CBIOs). Contudo, a expansão do milho enfrenta gargalos logísticos estruturais, como

a ausência de dutos especializados e a alta dependência do transporte rodoviário, o que encarece o escoamento para os principais centros consumidores e limita a competitividade do produto em mercados mais distantes (Neves e Castro, 2022). A cana, embora melhor posicionada em termos de infraestrutura, sofre com o envelhecimento do parque industrial e a estagnação da área cultivada, o que compromete sua capacidade de atender ao crescimento futuro da demanda.

Com o intuito de sintetizar as informações expressadas acima, segue o Quadro 1.

Quadro 1 – Quadro síntese dos aspectos comparativos entre cana-de-açúcar e milho

<b>Aspecto</b>	<b>Cana-de-Açúcar</b>	<b>Milho</b>
<b>Área plantada</b>	Estável entre 8,0 e 8,9 milhões ha no período 2017–2025, com pequenas variações.	Expansão contínua de ~15 milhões ha (2013/14) para 21,6 milhões ha (2024/25).
<b>Produção nacional (conforme a última safra)</b>	676,96 milhões de toneladas	345,2 milhões de toneladas
<b>Produtividade média (conforme a última produtividade)</b>	Em torno de 75,6 t/ha	Variável, mas acima de 4 t/ha
<b>Sensibilidade climática</b>	Alta vulnerabilidade a choques climáticos.	Maior resiliência: dois ciclos anuais permitem ajuste de calendário e mitigação de riscos.
<b>Número de usinas</b>	Atualmente, cerca de 432 unidades em operação, concentradas em São Paulo, Minas Gerais, Goiás e Mato Grosso do Sul.	25 usinas em operação em 2023 (18 reconhecidas pela ANP); atualmente, o número está entre 29 e 32, conforme a ANP.
<b>Produção de etanol</b>	Predominante: responde por cerca de 80% da produção nacional em 2024.	Em expansão: 7,55 bilhões de litros em 2024 (cerca de 20% do total nacional), com expectativa de atingir 23% em 2025.
<b>Principais estados produtores</b>	São Paulo, Minas Gerais, Goiás e Mato Grosso do Sul.	Mato Grosso, Goiás, Mato Grosso do Sul, Paraná e São Paulo.
<b>Coprodutos</b>	Bagaço e palha usados para cogeração elétrica; vinhaça para fertilização.	DDG (ração animal) e óleo de milho com alto valor agregado; cogeração em expansão.
<b>Vantagens competitivas</b>	Cadeia consolidada; alta produtividade por hectare; aproveitamento integral da biomassa.	Flexibilidade de cultivo (safrinha); maior rendimento em litros de etanol por tonelada; integração com a cadeia da proteína animal.
<b>Desafios</b>	Estagnação da área cultivada; envelhecimento dos canaviais; dependência climática.	Dependência de tecnologias importadas (enzimas); variabilidade do preço do grão; infraestrutura logística ainda limitada.
<b>Políticas e regulação</b>	Histórica integração ao Proálcool; participação central no RenovaBio; Lei dos Combustíveis do Futuro (14.993/2024).	Expansão estimulada pelo RenovaBio (CBIOs); reconhecimento internacional da safrinha pela OACI como fonte para SAF; Lei dos Combustíveis do Futuro (14.993/2024).

Fonte: própria autora.

Sendo assim, partindo dessas considerações, conclui-se que o milho ocupa um espaço complementar e estratégico dentro da matriz energética brasileira. Sua flexibilidade agronômica, integração produtiva e potencial de expansão o tornam uma alternativa viável, sobretudo em regiões de alta produção de grãos e infraestrutura agrícola avançada. Por outro lado, sua consolidação depende de avanços logísticos, investimentos em tecnologia e políticas públicas voltadas à sustentabilidade. A cana, por sua vez, mantém sua centralidade histórica, mas precisará modernizar sua estrutura e superar desafios climáticos e agronômicos para manter sua relevância em um cenário cada vez mais competitivo e orientado à descarbonização.

## 5 CONSIDERAÇÕES FINAIS

Diante da análise realizada, constata-se que o objetivo geral deste trabalho foi plenamente alcançado, ao investigar de forma crítica e abrangente a expansão do milho como matéria-prima para a produção de etanol no Brasil, bem como sua inserção estratégica na matriz energética nacional. Foram examinadas as particularidades bioquímicas e industriais do processo produtivo, os principais polos geográficos de produção, a configuração das usinas (*full corn* e *flex*) e as vantagens e limitações do milho em comparação à tradicional cultura da cana-de-açúcar. Esses resultados permitiram evidenciar que o etanol de milho, embora ainda represente parcela reduzida da produção total de biocombustíveis no país, vem ganhando espaço com velocidade considerável, sobretudo em regiões do Centro-Oeste, com destaque para o estado de Mato Grosso, que representa 77% da capacidade nacional da produção de etanol de milho.

O trabalho também confirmou que o milho apresenta vantagens notáveis, como a possibilidade de estocagem, elevado rendimento industrial e aproveitamento econômico de seus coprodutos. No entanto, essas potencialidades convivem com limitações importantes: menor produtividade por hectare em comparação à cana-de-açúcar, que está em torno de 75,6t/ha, maior dependência de insumos industriais e desafios logísticos expressivos, sobretudo em relação à infraestrutura de escoamento e armazenamento. Soma-se a isso a complexidade do cenário agrícola nacional, no qual o milho concorre com a produção de alimentos e ração animal — segmentos que, em determinados momentos, demonstram maior lucratividade e estabilidade comercial do que a destinação energética.

Durante o desenvolvimento da pesquisa, enfrentaram-se algumas dificuldades relevantes, especialmente no que se refere à obtenção de dados atualizados e segmentados sobre o desempenho econômico das usinas *flex* em diferentes regiões, além da escassez de estudos acadêmicos consolidados sobre os impactos ambientais cumulativos da monocultura do milho voltada à produção de etanol. Tais limitações evidenciam a necessidade de continuidade da investigação científica sobre o tema, sobretudo com enfoque interdisciplinar que contemple aspectos econômicos, ambientais, sociais e tecnológicos.

Como proposta de desdobramento para estudos futuros, sugere-se a análise comparativa da performance econômica entre usinas full corn e usinas *flex* em contextos regionais distintos, bem como o aprofundamento da discussão sobre políticas públicas que promovam uma transição energética justa e sustentável. Adicionalmente, investigações que explorem o impacto do uso de milho geneticamente modificado no rendimento industrial e na pegada ecológica da produção de etanol também se mostram pertinentes e oportunas, considerando a crescente demanda por fontes renováveis de energia que estejam em consonância com os compromissos ambientais globais assumidos pelo Brasil.

Sendo assim, pode-se afirmar que a produção de etanol a partir do milho possui grande potencial de consolidação no cenário nacional, desde que acompanhada por mecanismos regulatórios e tecnológicos que assegurem seu equilíbrio com outras cadeias produtivas e a preservação dos recursos naturais. A sustentabilidade de sua expansão dependerá, portanto, da articulação entre inovação, governança e responsabilidade socioambiental.

## REFERÊNCIAS

- ARAÚJO, D. R. **Composição bromatológica e física de grãos de cultivares tradicionais de milho (*Zea mays* L.) cultivados no Vale do Juruá, Acre.** 2021. 74 f. Dissertação (Mestrado em Ciências e Inovação Tecnológica) – Universidade Federal do Acre, Rio Branco, 2021.
- ASSOCIAÇÃO INTERNACIONAL DE SOJA RESPONSÁVEL – RTRS. Fatores de conversão do milho. **Soy & Corn Footprint Calculator**, 2021.
- BON, E. P. S.; FERRARA, M. A.; CORVO, M. L. **Enzimas em biotecnologia: produção, aplicações e mercado.** Rio de Janeiro: Interciência, 2008.
- BRASIL ENERGIA. **Anfavea: 100% de etanol na frota flex lideraria descarbonização global.** 2025. Disponível em: <https://brasilenergia.com.br/brasilenergia/fenabio-2025/anfavea-100-de-etanol-na-frota-flex-lideraria-descarbonizacao-global>. Acesso em: 26 ago. 2025.
- BRUCE, S. D.; RODNEY, J. B.; NANCY, N. N.; COTTA, M. A. The U.S. corn ethanol industry: An overview of current technology and future prospects. USDA-ARS, National.
- COMPANHIA NACIONAL DE ABASTECIMENTO – CONAB. **Acompanhamento da safra brasileira de cana-de-açúcar, 4.º levantamento – safra 2022/23.** Brasília, abr. 2022.
- COMPANHIA NACIONAL DE ABASTECIMENTO – CONAB. **Acompanhamento da safra brasileira de cana de açúcar, v. 12, n. 4 – Quarto levantamento – safra 2024/25.** Brasília, DF, abr. 2024.
- COMPANHIA NACIONAL DE ABASTECIMENTO – CONAB. **Acompanhamento da safra brasileira de cana-de-açúcar: safra 2013/14.** Brasília: Companhia Nacional de Abastecimento, 2013-2025.
- DONKE, A. C. G. D.; WADT, R.; MATSUURA, M. I. S. F.; MAUAD, P. H. S.; KULAY, L. A. Usina Flex: comparação dos desempenhos ambiental e energético de etanol de cana-de-açúcar, milho e sorgo. In: CONGRESSO BRASILEIRO EM GESTÃO DO CICLO DE VIDA, 5., 2016, Fortaleza. Anais... Fortaleza: [s.n.], 2016. p. 364-372.
- DUTRA, M. de S. **Destilação de mostos da fermentação alcoólica para produção de etanol hidratado.** 2017. Monografia (Graduação em Engenharia Química) – Universidade Federal de Uberlândia, Uberlândia, 2017.
- EMPRESA BRASILEIRA DE PESQUISA AGROPECUÁRIA – EMBRAPA. **Tecnologias de produção de milho: região central do Brasil – 2021.** Brasília, DF: EMBRAPA Milho e Sorgo, 2021.

EMPRESA DE PESQUISA ENERGÉTICA – EPE. **Balço Energético Nacional 2024**. Brasília: MME/EPE, 2024.

EMPRESA DE PESQUISA ENERGÉTICA (EPE). **Balço Energético Nacional 2025: Ano base 2024**. Rio de Janeiro: EPE, 2025.

EVANGELISTA, B. D. **Análise da viabilidade da utilização do milho para a produção de etanol no Brasil**. 2022. Trabalho Acadêmico – Universidade Federal de Lavras, Lavras, 2022.

FAVA NEVES, Marcos; TROMBIN, Vinicius G.; CONSOLI, Matheus A.; PINTO, Marcelo J. A. **Etanol de milho no Brasil: evolução e perspectivas**. Ribeirão Preto: Markestrat, 2021.

FREITAS, T. R.; MOURA, A. A.; LIMA, P. R. Logística do etanol de milho no Brasil: desafios e oportunidades. **Cadernos de Agroenergia**, v. 14, n. 2, p. 55-72, 2021.

GARRIDO, R. N.; BALDINI, R. Eficiência logística das rotas de escoamento da produção de milho safrinha para as usinas de etanol. In: CONGRESSO DE INICIAÇÃO CIENTÍFICA DA UNICAMP, 28., 2020, Campinas. Anais... Campinas: Unicamp, 2020.

GAUR, P. M.; TRIPATHI, S.; GOWDA, C. L. L.; RANGA RAO, G. V.; SHARMA, H. C.; PANDE, S.; SHARMA, M. **Chickpea seed production manual**. Andhra Pradesh: International Crops Research Institute for the Semi-Arid Tropics, 2010.

GIORDANO, L. B.; NASCIMENTO, W. M. **Cícero (grão-de-bico), sabor e qualidade**. 2005. Folder demonstrativo. Embrapa.

GRAZIANO, X. Milho, do paiol ao etanol. Araçatuba: UDOP – União Nacional da Bioenergia, 2023.

GRIPPA, M. J. C. **Planta flex no Mato Grosso**. 2012. 63 p. Trabalho de Conclusão de Curso (MBA em Gestão do Agronegócio) – Universidade Federal do Paraná, Curitiba, 2012.

JOSEPH, Henry. Entrevista concedida à Brasil Energia. São Paulo: ANFAVEA, 2025. Disponível em: <https://brasilenergia.com.br/brasilenergia/fenabio-2025/anfavea-100-de-etanol-na-frota-flex-lideraria-descarbonizacao-global>. Acesso em: 26 ago. 2025.

LEME, A. C. **Avaliação e armazenamento de híbridos de milho verde visando à produção de pamonha**. 2007. 123 f. Dissertação (Mestrado em Ciências) – Escola Superior de Agricultura Luiz de Queiroz, Universidade de São Paulo, Piracicaba, 2007.

LIMA, J. P.; ANDRADE, L. P. Impactos ambientais e balanço de carbono na produção de biocombustíveis: o caso do milho no Centro-Oeste brasileiro. **Revista de Política Agrícola**, v. 30, n. 2, p. 34-49, 2021.

LIMA, U. D.; BASSO, L. C.; AMORIM, H. V. Produção de etanol. In: LIMA, U. D. *et al...* (Coord.). **Biotecnologia industrial: processos fermentativos e enzimáticos**. São Paulo: Edgard Blucher, 2001. v. 3. p. 1-43.

LOBO, A. R.; SILVA, G. M. L. Resistant starch and its physicochemical properties. **Revista de Nutrição**, Campinas, v. 16, n. 2, p. 219-226, 2003.

MELO, J. A.; BACCARI, F. C. Co-produtos da produção de etanol de milho: mercado e perspectivas. **Revista de Economia e Sociologia Rural**, v. 58, n. 3, p. 417-433, 2020.

MIRANDA, R. A. de; KARAM, D.; BORGHI, E.; GONTIJO NETO, M. M.; *et al...* **Aumento de produtividade e rentabilidade de milho com intensificação tecnológica**. Brasília, DF: EMBRAPA, 2021.

MISSAWA, S. K. **Modificação de linhagens industriais de *Saccharomyces cerevisiae* para o aumento da produtividade de álcool e floculação condicional**. 2009. 150 p. Tese (Doutorado em Genética e Biologia Molecular) – Universidade Estadual de Campinas, Campinas, 2009.

NAJAFI, M. F.; KEMBHAVI, A. One step purification and characterization of an extracellular  $\alpha$ -amylase from marine *Vibrio* sp. **Enzyme and Microbial Technology**, v. 36, p. 535-539, 2005.

NEVES, M. F. Cadeia de suprimento do etanol no Brasil: diversificação e eficiência. **Revista de Administração no Agronegócio**, v. 17, n. 1, p. 23-41, 2021.

NEVES, M. F.; CASTRO, L. G. Infraestrutura e competitividade do etanol de milho no Brasil. **Revista Brasileira de Logística Agroindustrial**, v. 9, n. 1, p. 14-29, 2022.

NOVAES, M. R. de; RUDOLF, B. F. T.; ALMEIDA, C. M. de; AGUIAR, D. A. de. Análise espacial da redução da queima na colheita da cana-de-açúcar: perspectivas futuras ao cumprimento do protocolo agroambiental. **Engenharia Agrícola**, Jaboticabal, v. 31, n. 3, p. 562-573, 2011.

OLIVEIRA, R. A.; SILVA, C. A. Produtividade e eficiência comparativa entre etanol de milho e de cana-de-açúcar. **Boletim Técnico da Embrapa Agroenergia**, n. 15, p. 1-8, 2021.

PARENTE, T. G.; RODRIGUES, A. C.; MOURA, F. N. Integração de culturas e uso da terra: perspectivas para o milho na segunda safra. **Revista de Ciências Agrárias**, v. 43, n. 2, p. 289-301, 2020.

PEREIRA, I. F. **Análise da influência da adição de nutrientes ao mosto de melaço de cana-de-açúcar sobre o rendimento de etanol**. 2020. 42 f. Monografia (Graduação) – Universidade Federal da Paraíba, João Pessoa, 2020.

RIBEIRO, L. M. L. **Etanol de milho: processo produtivo e contexto atual do mesmo no Brasil**. 2023. Trabalho de Conclusão de Curso (Graduação em Engenharia Química) – Universidade Federal de Uberlândia, Uberlândia, 2023.

SERNA-SALDIVAR, S. **Corn: chemistry and technology**. 3. ed. Boca Raton, FL: CRC Press, 2018.

SHA, M.; YANG, Y. **A beginner's guide to bioprocess modes – batch, fed-batch, and continuous fermentation**. Enfield, CT: Eppendorf, 2020. (Application Note, 408).

SILVA, Haroldo José Torres da; SANTOS, Peterson Felipe Arias; NOGUEIRA JUNIOR, Enilson Carlos; VIAN, Carlos Eduardo de Freitas. Aspectos técnicos e econômicos da produção de etanol de milho no Brasil. **Revista de Política Agrícola**, Brasília, Ano XXIX, n. 4, p. 148, out./dez. 2020.

SILVA, J. F. *et al...* Avaliação do ciclo de vida do etanol de milho no Brasil. **Journal of Cleaner Production**, v. 220, p. 237-246, 2019.

SILVA, M. J. T.; SANTOS, P. F. A.; NOGUEIRA JÚNIOR, C. C.; VIAN, C. E. F. Aspectos técnicos e econômicos da produção de etanol de milho no Brasil. **Política Agrícola**, Brasília, v. 29, n. 4, p. 142-158, 2020.

SILVA, R. R. da; OLINTO, T. M. G.; SILVA, H. L. M. da; SILVA, R. B. da; PONTIERI, M. H.; CEZAR, M. A. Análise comparativa dos parâmetros físico-químicos nos diferentes estágios de infecção da cana-de-açúcar pelo complexo broca-podridão. **Seven Publicações Acadêmicas (IEMS)**, João Pessoa, 2024.

SOUZA, A. P. *et al...* Comparação técnica e econômica entre etanol de cana e de milho no Brasil. **Revista Energia na Agricultura**, v. 37, n. 4, p. 322-336, 2022.

UNIÃO NACIONAL DO ETANOL DE MILHO – UNEM. **Cenários e perspectivas para etanol de milho**. Cuiabá, 2020.

WANG, C.; MAS, A.; ESTEVE-ZARZOSO, B. Interaction between *Hanseniaspora uvarum* and *Saccharomyces cerevisiae* during alcoholic fermentation. **International Journal of Food Microbiology**, v. 206, p. 67-74, 2015