



UNIVERSIDADE FEDERAL DE LAVRAS
CAMPUS SEDE (LAVRAS)
DEPARTAMENTO DE CIÊNCIA DOS ALIMENTOS (DCA)

CARLOS JUNIOR MARAFON

Revisão Bibliográfica sobre a Produção de Etanol de Milho: Avanços,
Desafios e Perspectivas

Lavras

2023

CARLOS JUNIOR MARAFON

Revisão Bibliográfica sobre a Produção de Etanol de Milho: Avanços,
Desafios e Perspectivas

Trabalho de Conclusão de Curso
apresentado à Universidade Federal de
Lavras, como parte dos requisitos
necessários à obtenção do título de
Bacharel em Engenharia de Alimentos.

Orientador: Prof. Dr. José Guilherme Lembi Ferreira Alves

Lavras
2023

CARLOS JUNIOR MARAFON

Revisão Bibliográfica sobre a Produção de Etanol de Milho: Avanços,
Desafios e Perspectivas

Trabalho de Conclusão de Curso
apresentado à Universidade Federal de
Lavras, como parte dos requisitos
necessários à obtenção do título de
Bacharel em Engenharia de Alimentos.
Lavras, 7 de Dezembro de 2023.

BANCA EXAMINADORA

Professor orientador
Prof. Dr. José Guilherme Lembi Ferreira Alves
Universidade Federal de Lavras

Prof^a. Dra. Joelma Pereira
Universidade Federal de Lavras

Prof. Dr. Roney Alves da Rocha
Universidade Federal de Lavras

AGRADECIMENTOS

A conclusão deste trabalho representa não apenas o encerramento de uma etapa acadêmica mas também a realização de um esforço coletivo. Agradeço a todos que, de alguma forma, contribuíram para o desenvolvimento deste trabalho, seja por meio de incentivos, orientações, ou pelo suporte emocional.

Expresso minha gratidão aos professores que compartilharam seus conhecimentos e experiências, proporcionando um ambiente propício para o aprendizado e o crescimento acadêmico. Aos amigos e colegas de curso, agradeço pela troca de ideias, colaboração e apoio mútuo ao longo dessa jornada.

À minha família, que esteve sempre ao meu lado, oferecendo compreensão, incentivo e amor incondicional, dedico uma gratidão especial. Suas palavras de estímulo foram fundamentais para superar desafios e seguir em frente.

Este trabalho é o resultado de esforços conjuntos, e cada contribuição, por menor que seja, foi essencial para o seu desenvolvimento. Agradeço a todos que, de alguma maneira, fizeram parte desta trajetória acadêmica.

RESUMO

Este trabalho teve como objetivo elaborar uma revisão bibliográfica sobre a produção de etanol a partir do milho, explorando seus processos, impactos socioeconômicos e ambientais, bem como suas perspectivas futuras. A indústria do etanol de milho desempenha um papel fundamental na matriz energética global, contribuindo para a segurança energética e a redução das emissões de carbono. A revisão destacou avanços tecnológicos na produção, incluindo práticas sustentáveis e inovações que aumentam a eficiência. Além disso, foram analisados os impactos econômicos, como a geração de empregos e a contribuição para o desenvolvimento regional, bem como os impactos ambientais e as medidas de sustentabilidade adotadas pela indústria. Os desafios, como a competição por recursos naturais e questões regulatórias, foram discutidos, e as perspectivas futuras da produção de etanol de milho foram exploradas em um contexto de transição para fontes de energia mais limpas e renováveis. Conclui-se que o etanol de milho desempenha um papel crucial na busca por uma matriz energética mais sustentável, mas requer esforços contínuos para superar os desafios e promover a inovação na indústria.

Palavras-chave: Biocombustível; etanol de milho; sustentabilidade; tecnologias de produção; pegada de carbono.

ABSTRACT

This undergraduate thesis aimed to elaborate a literature review on corn-based ethanol production, exploring its processes, socio-economic and environmental impacts, as well as its future prospects. The corn ethanol industry plays a fundamental role in the global energy matrix, contributing to energy security and the reduction of carbon emissions. The review highlighted technological advances in production, including sustainable practices and innovations that enhance efficiency. Additionally, economic impacts such as job creation and contributions to regional development were analyzed, along with environmental impacts and sustainability measures adopted by the industry. Challenges, such as competition for natural resources and regulatory issues, were discussed, and the future prospects of corn ethanol production were explored in the context of transitioning to cleaner and renewable energy sources. It is concluded that corn ethanol plays a crucial role in the pursuit of a more sustainable energy matrix but requires continuous efforts to overcome challenges and promote innovation in the industry.

Keywords: Biofuel; corn ethanol; sustainability; production technologies; carbon footprint.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1: Rotas tecnológicas para produção de etanol.....	13
Figura 2: Moagem de milho por via úmida	15
Figura 3: Moagem de milho por via seca.....	17
Figura 4: Processo de extração de etanol a partir do milho e coprodutos gerados (WDG, WDGS, DDG, DDGS E CDS).....	24
Figura 5: Processo de extração de etanol a partir do milho com a separação da fibra antes da etapa de fermentação e formação de coprodutos (WDBS, DDBS, CDS, HPDG).....	25

SUMÁRIO

1. INTRODUÇÃO.....	8
1.1 JUSTIFICATIVA.....	8
2. OBJETIVO.....	9
2.1 OBJETIVO GERAL.....	9
2.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS.....	10
3. MATERIAL E MÉTODOS.....	10
4. REFERENCIAL TEÓRICO.....	11
4.1. PRODUÇÃO DE CANA-DE-AÇÚCAR E DE MILHO NO BRASIL.....	11
4.2. PROCESSOS E TECNOLOGIAS NA PRODUÇÃO DE ETANOL DE MILHO...12	12
4.3. COPRODUTOS DA PRODUÇÃO DE ETANOL DE MILHO.....	22
4.4. DADOS DE MERCADO DE ETANOL DE MILHO NO BRASIL.....	25
5. CONCLUSÃO.....	28
6. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....	30

1. INTRODUÇÃO

O etanol de milho, também conhecido como etanol de grãos, é uma forma de biocombustível produzido a partir da fermentação de amido de milho. Esse biocombustível desempenha um papel crucial no cenário global de energia, desafiando os paradigmas tradicionais e contribuindo para uma matriz energética mais sustentável.

O desenvolvimento da indústria do etanol de milho remonta às décadas de 1970 e 1980 nos Estados Unidos, quando o país estava em busca de alternativas aos combustíveis fósseis em meio a preocupações com a dependência do petróleo estrangeiro. Nessa época, o governo americano implementou políticas de estímulo à produção de biocombustíveis, incluindo o etanol de milho, como parte de sua estratégia de segurança energética.

Tal biocombustível logo se estabeleceu como uma fonte de energia renovável e uma maneira de reduzir as emissões de gases de efeito estufa, uma vez que sua queima produz menos CO₂ do que os combustíveis fósseis. O uso misturado de etanol à gasolina (como o E10, contendo 10% de etanol) se tornou uma prática comum em muitos países, impulsionando ainda mais a demanda por etanol de milho.

1.1 JUSTIFICATIVA

O estudo do etanol de milho se faz importante devido às necessidades ambientais e socioeconômicas. Visto que sua produção e uso desempenham um papel fundamental na redução das emissões de CO₂ e na mitigação das mudanças climáticas. Ao contrário dos combustíveis fósseis, o etanol de milho é considerado neutro em carbono, uma vez que as plantas de milho absorvem dióxido de carbono da atmosfera durante o crescimento, compensando as emissões liberadas durante o processo de produção e combustão. Isso o torna uma escolha atraente para governos e empresas que buscam reduzir sua pegada de carbono.

Ele também desempenha um papel crucial na segurança energética, reduzindo a dependência de combustíveis fósseis importados. Sua produção doméstica contribui para a estabilidade do suprimento de energia, tornando os países menos vulneráveis a choques nos mercados de petróleo. Além disso, a diversificação da matriz energética com o uso de biocombustíveis como o estudado aumenta a resiliência do país em face de interrupções no fornecimento de petróleo.

A indústria do etanol de milho também tem um impacto econômico significativo, criando empregos nas áreas de agricultura, processamento de alimentos e produção de biocombustíveis. Isso é particularmente importante em regiões agrícolas, onde a produção de milho para etanol pode fornecer uma fonte estável de renda para agricultores e impulsionar a economia local.

Dessa forma, o etanol de milho é mais do que apenas um biocombustível; é um componente fundamental na transição para uma matriz energética mais limpa e sustentável. Sua produção contribui para a segurança energética, a redução das emissões de carbono e o desenvolvimento econômico. Com a crescente conscientização sobre as mudanças climáticas e a necessidade de reduzir a dependência de combustíveis fósseis, o etanol de milho continuará a desempenhar um papel vital no futuro da energia global. Sendo assim, é fundamental que haja mais pesquisas a respeito, visando promover um futuro mais sustentável e responsável para as próximas gerações.

2. OBJETIVO

2.1 OBJETIVO GERAL

O objetivo geral deste trabalho foi realizar uma revisão bibliográfica abrangente sobre a produção de etanol a partir do milho, visando compreender seus processos, impactos socioeconômicos e ambientais, além de identificar perspectivas futuras para essa indústria. O trabalho buscou reunir informações atualizadas sobre o tema, contribuindo para uma compreensão mais completa do papel do etanol de milho na matriz energética global.

2.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS

- **Analisar os Processos de Produção:** Investigar detalhadamente os processos envolvidos na produção de etanol de milho, desde o cultivo do milho até a destilação do etanol, destacando inovações tecnológicas e práticas sustentáveis.
- **Avaliar os Impactos Socioeconômicos:** Examinar os impactos econômicos da indústria do etanol de milho, incluindo a geração de empregos, o desenvolvimento regional e a contribuição para a economia local e nacional.
- **Analisar os Impactos Ambientais e Sustentabilidade:** Investigar os impactos ambientais da produção de etanol de milho, como uso de terra e água, bem como analisar as medidas de sustentabilidade adotadas pela indústria para mitigar esses impactos.
- **Identificar Desafios e Barreiras:** Identificar os principais desafios enfrentados pela indústria do etanol de milho, como competição por recursos naturais e questões regulatórias, e analisar as barreiras que afetam o seu crescimento.
- **Explorar Perspectivas Futuras:** Investigar as perspectivas futuras da produção de etanol de milho, considerando as tendências tecnológicas e as mudanças no mercado de biocombustíveis, especialmente no contexto da transição para fontes de energia mais limpas e renováveis.
- **Contribuir para o Conhecimento sobre Energia Sustentável:** Contribuir para o avanço do conhecimento sobre energia sustentável, fornecendo informações relevantes para tomadores de decisão, pesquisadores e a sociedade em geral, com o objetivo de promover uma matriz energética mais sustentável e consciente do meio ambiente.

3. MATERIAL E MÉTODOS

Para alcançar os propósitos delineados nesta pesquisa, foi empregada uma abordagem metodológica fundamentada na revisão bibliográfica. Essa abordagem envolveu a meticulosa coleta, seleção e análise crítica de uma

ampla gama de fontes, incluindo artigos científicos, publicações de livros, relatórios técnicos e outros recursos pertinentes, todos relacionados ao tema do etanol de milho. Através de uma busca sistemática por meio de bases de dados científicas, como Scopus, Web of Science e Google Scholar, utilizando palavras-chave relacionadas ao tema, como “etanol de milho”, “biocombustível”, “gestão de resíduos agrícolas”, “agricultura sustentável” e “biotecnologia agrícola”.

Os artigos e fontes escolhidos passaram por uma avaliação crítica, na qual foram minuciosamente examinados em busca das informações cruciais, conceitos, teorias e abordagens ligados ao etanol de milho. A partir dessa análise, foi possível realizar uma síntese dos pontos centrais destacados na literatura, ao mesmo tempo que se identificaram lacunas no conhecimento, tendências e desafios relacionados ao assunto em questão. Portanto, foi realizada uma análise e discussão das informações advindas da revisão bibliográfica, abrangendo as contribuições significativas, as limitações identificadas e as potenciais direções para investigações futuras correlatas ao tema.

4. REFERENCIAL TEÓRICO

4.1. PRODUÇÃO DE CANA-DE-AÇÚCAR E DE MILHO NO BRASIL

A participação da agricultura brasileira na economia tem crescido significativamente, refletindo no aumento do Produto Interno Bruto (PIB) do agronegócio do país. De acordo com dados do Centro de Estudos Avançados em Economia Aplicada (CEPEA) em colaboração com a Confederação da Agricultura e Pecuária do Brasil (CNA), prevê-se um incremento no PIB do agronegócio brasileiro para o atual ano. Diante desse cenário, levando em consideração o desempenho global da economia do Brasil, é estimado que o agronegócio possa representar 24,4% do PIB nacional em 2023.

Segundo os dados de produção do Foreign Agricultural Service (FAS) fornecidos pelo Departamento de Agricultura dos Estados Unidos (USDA), o Brasil é o terceiro maior produtor mundial de milho, atrás apenas dos Estados

Unidos e da China. Com dados do Levantamento Sistemático Da Produção Agrícola (2001) e com boletim da safra de grão da CONAB (2023), a produção de milho que, no início da década de 2000, era de 33,9 milhões de toneladas, teve um salto para 131 milhões de toneladas produzidas na safra 2022/2023. Esse aumento da produção evidencia-se devido principalmente ao aumento da produtividade, ou seja, a quantidade produzida por unidade de área. Esses ganhos têm contribuído significativamente para colocar o Brasil entre os principais produtores agrícolas do mundo, principalmente, devido à incorporação de novas tecnologias aos sistemas de produção, as quais proporcionam aumento da produção sem a necessidade de incorporação de áreas com vegetação nativa aos sistemas produtivos (LAMAS, 2023).

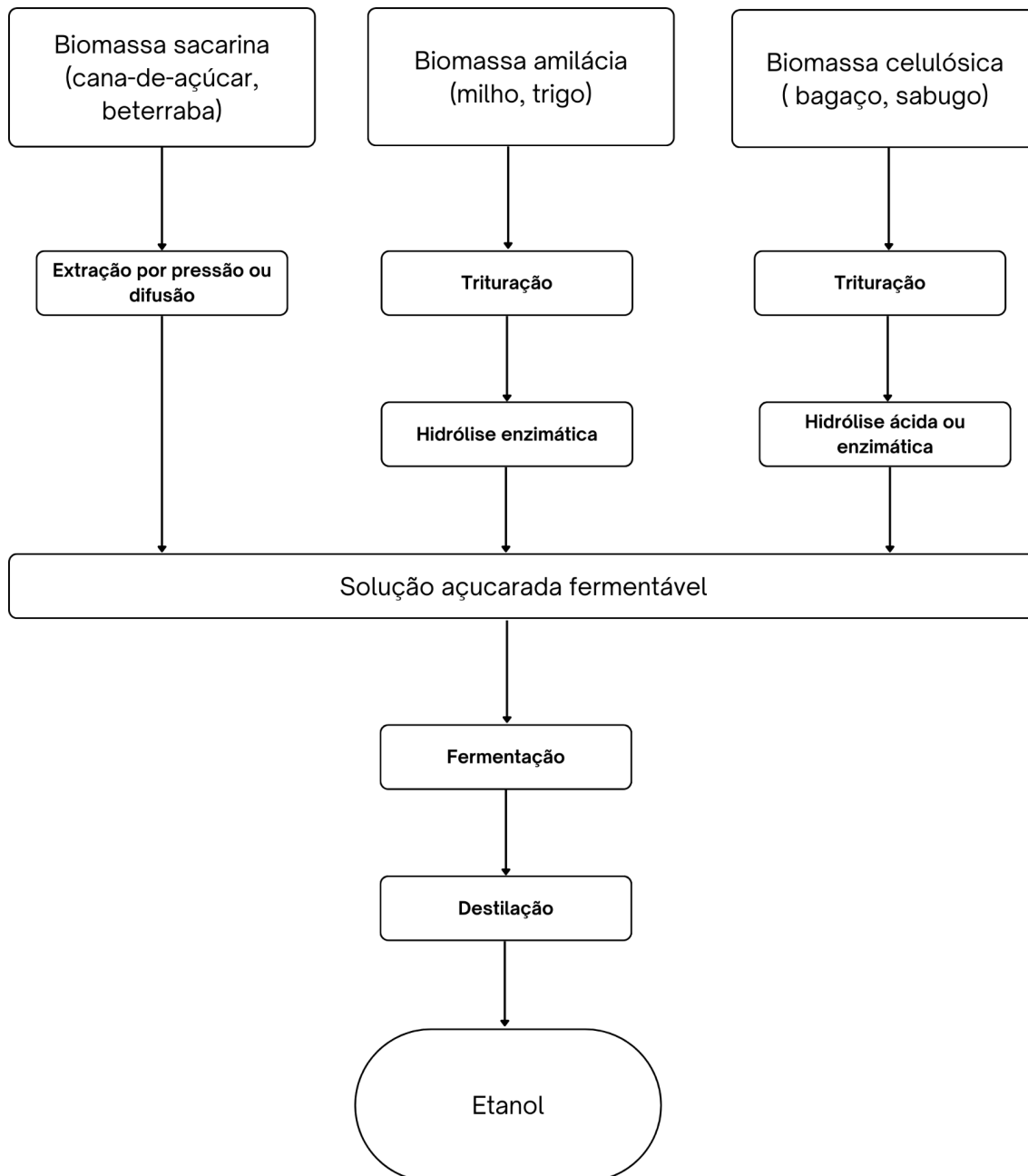
Já a produção de cana-de-açúcar é evidenciada por ser a atividade econômica que acompanha o Brasil desde sua colonização, por possuir terras tropicais ideais para o cultivo, diversos incentivos à produção tornaram o Brasil o maior produtor mundial de cana-de-açúcar (hEDGEpoint Global Markets). A produção de cana-de-açúcar passou por grandes mudanças nas últimas quatro décadas, com a criação do Proálcool (Programa Nacional do Álcool), nos anos 1970, que consistia em minimizar os impactos causados pela crise do petróleo na época, houve então uma grande expansão da capacidade produtiva com desenvolvimento de técnicas e aperfeiçoamento dos insumos para a produção de etanol. De acordo com os dados de produção da União da Indústria de Cana-de-açúcar e Bioenergia (UNICA) a safra brasileira de cana-de-açúcar em 1980/1981 foi de 123 milhões de toneladas, diante de todos os incentivos da indústria sucroalcooleira o Brasil foi capaz de produzir na safra 2022/2023, 610 milhões de toneladas de cana-de-açúcar.

4.2. PROCESSOS E TECNOLOGIAS NA PRODUÇÃO DE ETANOL DE MILHO

Na produção comercial de etanol, as matérias-primas são geralmente agrupadas em três categorias principais, com base em sua composição molecular. Estas categorias incluem: a) matérias-primas sacarinas; b) matérias-primas ricas em amido; e c) matérias-primas compostas principalmente de celulose (Eckert, 2016). Estas matérias-primas passam por

processos específicos para a extração de açúcares que serão posteriormente utilizados no processo de fermentação alcoólica.

Figura 1: Rotas tecnológicas para produção de etanol



Fonte: Adaptado de BANCO NACIONAL DE DESENVOLVIMENTO ECONÔMICO E SOCIAL (BRASIL)

Neste trabalho foi analisada a produção de etanol a partir do grupo de matérias-primas classificadas como amiláceas, com um foco específico no uso do milho como matéria-prima.

O início do processo de utilização do milho como matéria-prima envolve uma seleção cuidadosa da variedade que será cultivada. Normalmente, opta-se por variedades de milho com teores elevados de amido, uma vez que o amido é o componente fundamental que passará pela conversão em açúcares fermentáveis, posteriormente transformados em etanol. Além disso, leva-se em consideração a resistência da variedade escolhida a pragas e doenças, uma vez que isso desempenha um papel significativo na garantia de uma colheita robusta e produtiva.

Seu cultivo ocorre em extensas áreas de plantio, muitas vezes em sistemas de rotação com outras culturas. O período de crescimento do milho pode variar, mas em geral, leva de três a quatro meses desde o plantio até a colheita. Durante esse período de crescimento, é de extrema importância monitorar de perto as condições climáticas, garantir a irrigação adequada e aplicar fertilizantes de forma adequada, visando assegurar um rendimento saudável e de alta qualidade (NETO, 2015).

A colheita do milho ocorre quando os grãos atingem o teor de umidade apropriado, geralmente situando-se entre 18% e 20%. Essa colheita é realizada de maneira mecânica, com os grãos sendo separados das plantas e armazenados para as etapas subsequentes do processo. A escolha do momento preciso para a colheita é fundamental para assegurar a obtenção da máxima quantidade de amido disponível (MANTOVANI, 2015).

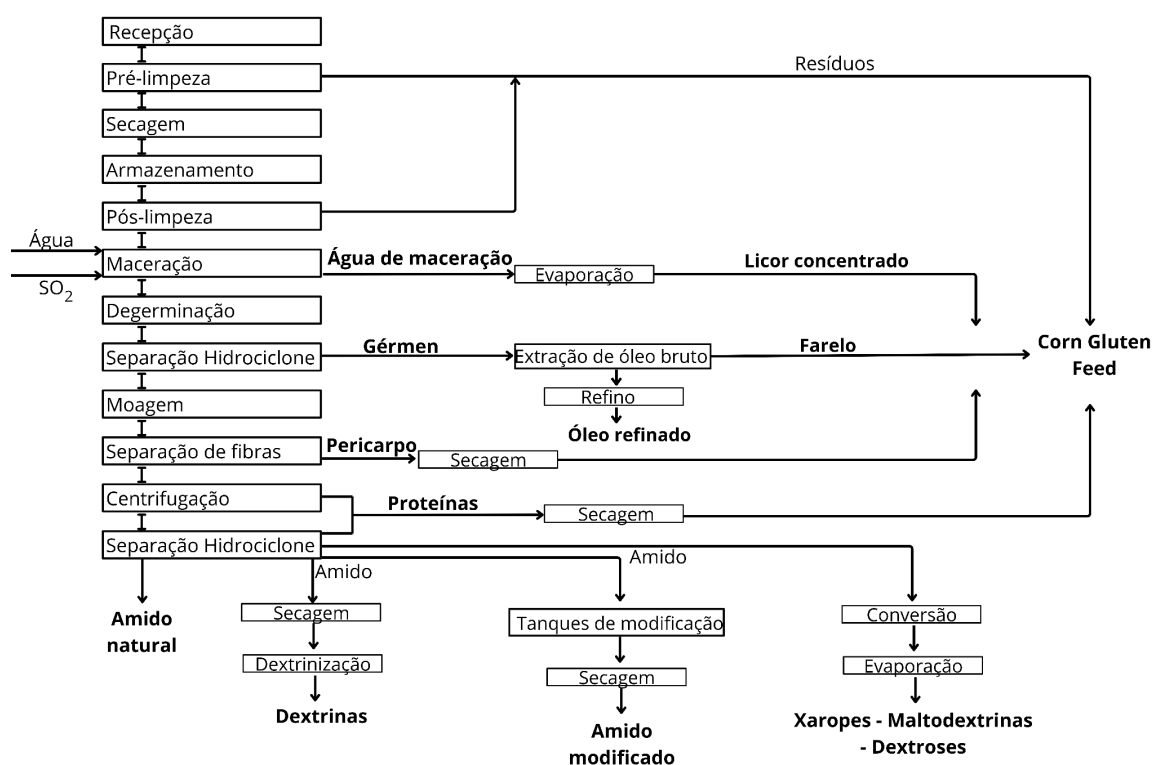
Após isso, o milho passa por uma fase de limpeza, secagem e armazenamento, em más condições de armazenamento, a concentração de amido pode ser reduzida pela ação de insetos e microrganismos contaminantes, a qualidade do milho para a produção de etanol também deve seguir os padrões de qualidade descritos pela Instrução Normativa 60/2011 estabelecidas pelo Ministério da agricultura e pecuária (MAPA) envolvendo parâmetros de odor, infestação por insetos, injúrias, umidade do grão, densidade do grão, danos físicos e matéria estranha. Isso é essencial para prevenir a contaminação devido à falta de higienização ou a variações no peso dos grãos. Após o controle da qualidade, o milho é acondicionado em silos, onde será direcionado para as próximas etapas do processo (GRIPPA, 2012).

A seguir, o milho passa por um processo de moagem, no qual é triturado para produzir um material conhecido como "grits" ou "farelo de milho". Essa etapa de moagem é executada em moinhos de martelo ou outros equipamentos de moagem apropriados. A eficiência desse processo de moagem é de suma importância, uma vez que é responsável por liberar o amido contido no milho, tornando-o acessível para as fases subsequentes do procedimento.

A moagem pode ser realizada por dois tipos de processos, via úmida e o outro a partir de moagem via seca. A escolha do modo é definida de acordo com o objetivo final de cada subproduto requerido e os valores agregados de cada planta de produção.

No método de processamento por via úmida, representado pela Figura 2, ocorre antes da moagem a etapa de maceração dos grãos.

Figura 2: Moagem de milho por via úmida



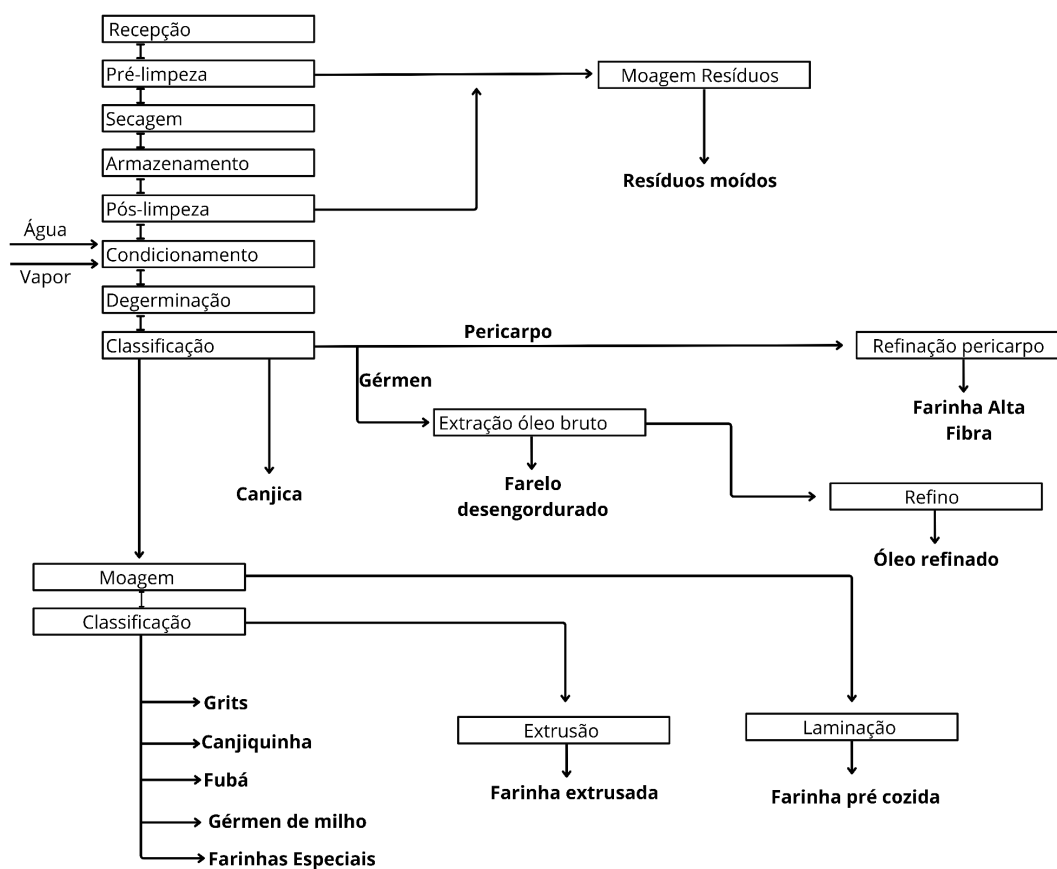
Fonte: Adaptado da Associação Brasileira das Indústrias do Milho (Abimilho).

Na maceração, utiliza-se tanques onde é feita a imersão dos grãos de milho em água com recirculação e adição de dióxido de enxofre. A temperatura destes tanques é controlada de forma a ser mantida de 48 a 52°C por um período de 24 a 48 horas. O objetivo desta fase é o amaciamento do grão, possibilitando a moagem e fracionamento eficiente de seus componentes facilitando então a separação do amido e das proteínas presentes no milho, permitindo a recuperação de subprodutos essenciais, como amido modificado, dextrinas, xaropes, óleo refinado, licor concentrado, fibras e proteínas. Essa abordagem valoriza a industrialização do milho, aproveitando ao máximo seus componentes (JACKSON, 1995).

Contudo, segundo o Banco Nacional de Desenvolvimento Econômico e Social do Brasil em 2018, a metodologia via úmida vem sendo substituída pelo processo de via seca devido aos altos custos para a produção de etanol através dela.

A moagem por via seca (Figura 3), é realizada por um processo de quebra física do grão de milho. O teor de umidade do milho utilizado para moagem seca é elevado a aproximadamente 20%. O gérmen é removido em degerminadores para posterior extração de óleo, e o endosperma é direcionado a processos adicionais de moagem e classificação densimétrica para a obtenção de diversas frações, que variam em tamanho e composição, dando origem aos grits e farinhas que serão utilizados na produção de etanol (STRAZZI, 2015).

Figura 3: Moagem de milho por via seca



Fonte: Adaptado da Associação Brasileira das Indústrias do Milho (Abimilho).

Tanto o processo por via seca quanto por via úmida resultam em diversos subprodutos, o óleo refinado extraído do gérmem é um valioso subproduto oriundo da moagem do milho, sendo muito vantajoso na alimentação humana, uma vez que o óleo de milho é composto por ácidos graxos poliinsaturado, ácido graxo linoléico (ômega 6) e ácido graxo linolênico (ômega 3), considerados essenciais na nutrição humana, dada a incapacidade da síntese desses ácidos pelo organismo humano (EMBRAPA, 2004). Resíduos, licor concentrado, fibras e proteínas restantes do processo de extrusão do óleo são utilizados como ingredientes de alta qualidade na indústria de alimentação animal, como a produção das rações denominadas farinha de glúten de milho (corn gluten feed), sendo essa alimentação baseada em altas concentrações de proteínas, sólidos solúveis e fibras. Esses

subprodutos desempenham um papel crucial como suplemento proteico na alimentação animal, proporcionando uma forma adicional de agregar valor à produção de milho (Hoffman et al., 2010).

Ambos os métodos podem ser realizados utilizando a SGT, sigla para tecnologia de moagem seletiva (*selective grind technology*). Que tem como objetivo otimizar a extração de amido de milho ao produzir partículas de amido com dimensões ideais para maximizar a eficiência na conversão em açúcares fermentáveis durante a etapa subsequente de fermentação alcoólica (GRIPPA, 2012).

A etapa é de extrema importância, já que nela, são ajustadas a configuração dos moinhos para controlar o tamanho das partículas produzidas. É fundamental considerar o equilíbrio entre o tamanho das partículas e seu impacto nas diferentes etapas do processo e assim maximizar a eficiência global do processo de produção de etanol de milho.

Isso, pois, partículas menores de amido têm uma área de superfície maior, tornando-as mais acessíveis às enzimas durante a hidrólise subsequente, sendo vantajosas para a liquefação e o cozimento eficazes do amido, mas podem gerar complicações durante a separação dos grãos de destilarias. Por outro lado, partículas excessivamente grandes podem reduzir o rendimento da produção de etanol. No entanto, elas facilitam a separação nas centrífugas, promovendo uma corrente de reciclagem com teor reduzido de sólidos suspensos e otimizando as etapas subsequentes de cozimento e liquefação, as quais serão abordadas em detalhes posteriormente (GRIPPA, 2012).

Além de aumentar o rendimento, já que mais amido é convertido em açúcares fermentáveis, o que resulta em um rendimento maior de etanol por unidade de milho processado, a SGT também se concentra na minimização da presença de impurezas e resíduos no grão de milho resultante da moagem. Isso contribui para um mosto fermentado mais limpo e de maior qualidade.

Posteriormente à fase de moagem, procede-se à etapa de liquefação, na qual o material resultante passa por processos adicionais de preparação. Para

produzir etanol a partir de milho e outras matérias-primas ricas em amido, é essencial realizar uma conversão do amido em açúcares. Esse processo ocorre por meio de uma ação enzimática realizada em temperaturas elevadas devido à natureza insolúvel dos polissacarídeos (Donke, 2016). Esse desafio de tornar o substrato fermentável é um aspecto que confere uma complexidade adicional ao processo quando comparado com o da produção do etanol a partir da cana-de-açúcar, por exemplo.

Nesta etapa, os grits de milho passam por uma incorporação de água para formar uma substância conhecida industrialmente como "mingau". Posteriormente, é aplicado calor e enzimas amilolíticas para desdobrar o amido presente no milho em açúcares de menor complexidade. A rota industrial mais comum é a rota de catálise enzimática com α -amilase, seguida da catálise com amiloglucosidase, também conhecida como glucoamilase (GMS). A α -amilase promove uma ação endoenzimática na estrutura do amido, liberando produtos com mais sítios ativos que servirão de substrato para serem catalisados pela ação da GMS. Esse procedimento otimiza a conversão do amido em açúcares fermentáveis, preparando, desta maneira, o mingau de milho de forma apropriada para a etapa subsequente da fermentação alcoólica (MALDONADO, 1995).

A solução liquefeita é submetida a um resfriamento controlado para que a sacarificação ocorra. É importante destacar que a etapa de sacarificação pode ser realizada em conjunto com a fermentação nas dornas fermentadoras. Essa abordagem de sacarificação simultânea à fermentação oferece vantagens significativas, pois reduz os custos associados às operações unitárias adicionais e também encurta o tempo necessário para a produção de etanol. Essa sincronia no processo é viável devido à rápida liberação dos açúcares no início da sacarificação, embora a taxa diminua ao longo do tempo (AEHLE, 2007).

Na produção de etanol, a fermentação ocorre pela ação da levedura *Saccharomyces cerevisiae* que em seu metabolismo utilizam enzimas no processo. Após a ação da GMS, as enzimas da levedura por meio de sucessivas reações convertem a glicose em CO₂ e etanol (MISSAWA, 2009).

O processo de fermentação pode ser realizado de diversas formas, como por batelada, batelada alimentada, semicontínuo ou contínuo. A escolha entre os métodos depende das metas de produção, dos recursos disponíveis e das condições específicas da planta de produção de etanol de milho (COSTA, 2001).

Na fermentação por batelada, todo o material a ser fermentado é introduzido na dorna simultaneamente com o inóculo de levedura. Esse método é caracterizado pela simplicidade operacional, tornando-o ideal para pequenas instalações de produção de etanol de milho. Além disso, é fácil controlar as variáveis de processo, o que é uma vantagem significativa. No entanto, esse processo possui algumas desvantagens, como menor eficiência global, já que a dorna não é usada de forma contínua. Além disso, o tempo de produção é prolongado, uma vez que o processo ocorre em lotes sequenciais, e variações nas condições de fermentação entre os lotes podem afetar a qualidade do produto.

A fermentação por batelada alimentada difere da batelada simples devido à adição gradual de nutrientes ao longo do processo. Isso resulta em uma maior eficiência em comparação com a batelada simples, pois permite um controle mais preciso das condições de fermentação e reduz o tempo de produção. No entanto, essa abordagem é mais complexa operacionalmente, requerendo sistemas de alimentação e monitoramento adicionais, o que se traduz em custos operacionais mais elevados.

A fermentação semicontínua é caracterizada pela entrada na dorna a uma taxa menor do que a saída. Isso oferece um controle moderado das condições de fermentação e reduz o tempo de produção em comparação com a batelada simples. Embora possa ser uma alternativa eficiente em termos de custos, a fermentação semicontínua é menos flexível em comparação com a batelada.

Por fim, na fermentação contínua, a dorna é usada de forma contínua, o que resulta em eficiência máxima. Isso se traduz em menor tempo de produção e maior controle das condições de fermentação. No entanto, essa abordagem é

complexa operacionalmente e envolve custos iniciais e operacionais mais elevados, e também é menos flexível em comparação com os métodos de batelada.

Contudo, a fermentação dos açúcares é um processo composto por três etapas cruciais: a pré-fermentação, que envolve a adaptação da levedura ao meio no início do processo fermentativo; a fermentação, na qual ocorre a produção de etanol e dióxido de carbono; e, por fim, a pós-fermentação, caracterizada pela diminuição da atividade celular, evidenciada pela redução na produção de dióxido de carbono, sinalizando o término da fermentação.

Após a etapa de fermentação, o produto segue para as colunas de destilação, onde é obtido o etanol hidratado, com teor de aproximadamente 96% de álcool, que será vendido em postos de combustível (SUPER INTERESSANTE, 2008).

Para a recuperação do etanol, a destilação utiliza dos diferentes pontos de ebulição das diversas substâncias voláteis presentes no composto, separando-as .

O etanol hidratado pode ser comercializado já com o término do processo de destilação ou então passar por um processo de desidratação para a obtenção do álcool anidro.

Diferente do etanol carburante hidratado, o etanol carburante anidro ou álcool etílico anidro carburante (AEAC), é praticamente puro, com um teor alcoólico entre 99,3%(m/m) e 99,8%(m/m). É utilizado como um aditivo que aumenta o teor de oxigenados na gasolina (SCANDIFFIO 2005). Em síntese, a partir da fermentação e destilação surge o álcool hidratado com teor em torno de 96%(v/v) de etanol, devido a característica azeotrópica, em que a mistura álcool-água se comporta como uma substância pura em relação ao ponto de ebulição, apresentando assim, um comportamento não ideal de ebulição, impedindo a separação dos componentes pelo método tradicional de destilação. Dessa forma os métodos convencionais empregados para obtenção do etanol pelo processo de desidratação são: destilação azeotrópica, extrativa ou por adsorção.

Na destilação azeotrópica é usado ciclohexano, em um processo que envolve uma coluna de desidratação. Essa abordagem permite a formação de uma mistura ternária (azeótropo) com etanol e água, com um ponto de ebulição de 63°C.

Na destilação extrativa com monoetilenoglicol (MEG), o MEG tem a capacidade de absorver e arrastar a água para o fundo da coluna, permitindo que os vapores de etanol anidro saiam pelo topo. A mistura resultante, contendo água, MEG e uma pequena quantidade de etanol, é direcionada para uma coluna de recuperação de MEG, que retorna ao processo de desidratação. No entanto, o MEG precisa ser purificado devido à concentração das impurezas removidas do etanol, tornando-se mais corrosivo. Para isso, é necessário fazê-lo passar por uma coluna de resinas de troca iônica, que retém os sais e reduz a acidez.

Por fim, na desidratação por adsorção com peneira molecular, o etanol é vaporizado e superaquecido antes de entrar nas colunas de desidratação, que contêm uma substância de microporos chamada zeólita. Essa zeólita absorve a água, permitindo que os vapores de etanol passem e sejam posteriormente condensados como etanol anidro. Periodicamente, a zeólita é regenerada por meio da passagem de vapores alcoólicos sob vácuo, que são subsequentemente destilados para recuperar o etanol. É importante destacar que apenas algumas empresas fabricam esse equipamento, e seu custo é relativamente alto (BRASIL, 2008).

4.3. COPRODUTOS DA PRODUÇÃO DE ETANOL DE MILHO

O material de fundo dos destiladores é enviado às centrifugas que separam as partes sólidas da solução no objetivo de serem enviadas aos secadores, assim obtendo diversos coprodutos.

Durante o processo de centrifugação, uma considerável quantidade de óleo é emulsionada, e as cinzas, na maioria dos casos, encontram-se solúveis, constituindo a fração líquida, também conhecida como destilados condensados

(CDS). Isso resulta na concentração da maior parte da proteína na fração sólida (LIU, 2011).

Ele pode ser combinado com os grãos úmidos para formar o WDGS, que também pode ser submetido à secagem, resultando no DDGS (KIM et al., 2008).

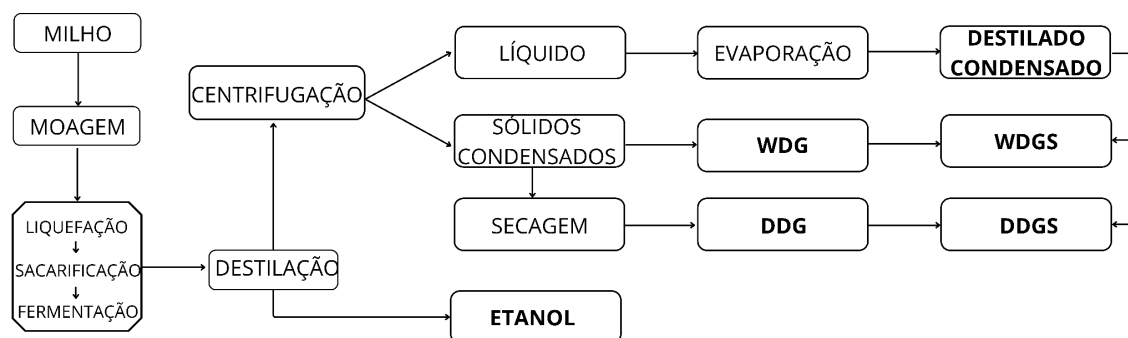
Os WDGS, ou grãos Úmidos de destilaria com Solventes, são um coproduto obtido durante a destilação, sendo ricos em proteínas, fibras e gorduras, devido à conversão do amido do milho em etanol. Este produto é amplamente utilizado na alimentação animal, particularmente para gado de corte e leiteiro, contribuindo para sua nutrição. Além disso, os WDGS promovem a reciclagem de subprodutos, tornando a produção de etanol mais sustentável. O uso de WDGS reduz a dependência de alimentos concentrados, proporcionando benefícios econômicos e ambientais (KLOPFENSTEIN et al., 2008).

A produção de DDGS, os grãos secos de destilarias com solventes, segue o mesmo processo que o WDGS, no entanto, uma etapa adicional de secagem é incluída. Tal etapa adicional tem como benefícios aprimorar a uniformidade do produto e prolongar seu prazo de validade. Isso facilita o transporte para locais distantes, como confinamentos (BOTHAST e SCHLICHER, 2004). O valor alimentar do DDGS é menor em comparação ao WDGS. No entanto, ele apresenta um aumento de 12% em seu valor alimentar de proteínas e fibras quando comparado ao milho laminado, silagem de grão úmido ou a combinação de ambos (BREMER et al., 2011).

A composição de nutrientes do WDGS e do DDGS pode variar com base na quantidade de solúveis condensados adicionados ao WDG e ao DDG. Devido à remoção do amido, os teores de proteína, óleo e cinzas nesses coprodutos são significativamente maiores do que no milho, em média, cerca de três vezes superiores (LIU, 2011).

Dessa forma, tais produtos podem ser utilizados na alimentação animal, já que possuem alto teor proteico e poder energético (RAUSCH e BELYEA, 2006).

Figura 4: Processo de extração de etanol a partir do milho e coprodutos gerados (WDG, WDGS, DDG, DDGS E CDS).

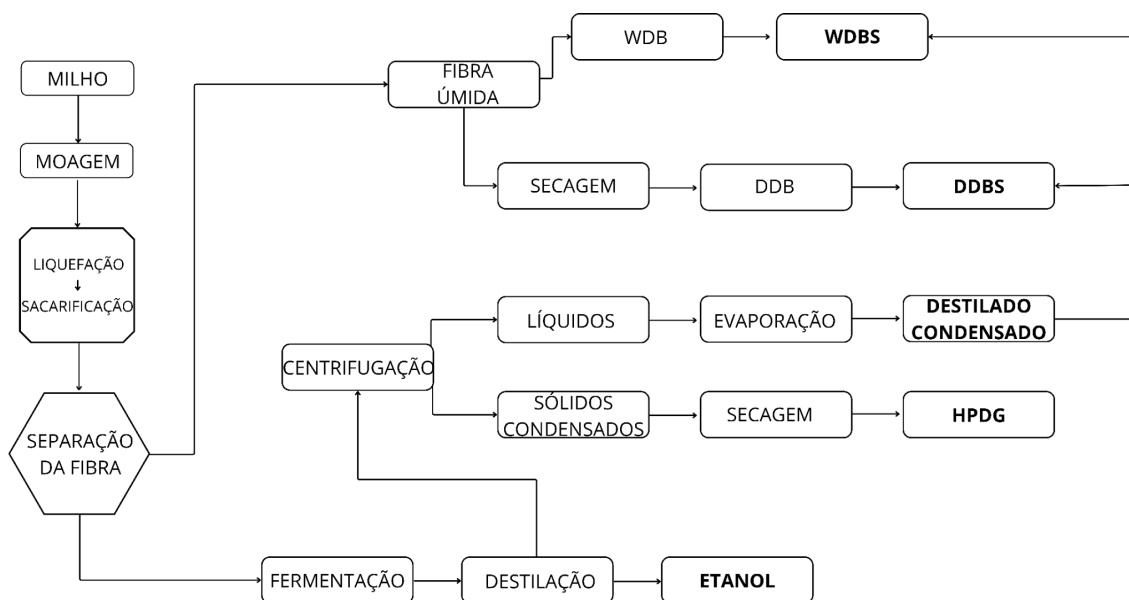


Fonte: Adaptado de MacDonalds (2018).

As Fibras mais Solúveis (Bran plus Solubles), são formadas a partir dos resíduos do processo de fermentação alcoólica, que incluem parte dos sólidos remanescentes após a extração do etanol. O farelo (fibra) removido do grão pode ser combinado aos solúveis extraídos durante a centrifugação (CDS) da vinhaça dos grãos úmidos, resultando no produto (GARLAND et al., 2019). O material pode ser fornecido úmido (WDBS - Water Digestible Basis Solubles) ou seco (DDBS - Digestible Dry Basis Solubles) aos animais.

O Grão Destilado com Alta Proteína (HPDG) é um valioso coproduto que surge no decorrer do processo de fracionamento do grão seco e passagem pela etapa de fermentação. O grande destaque do HPDG é seu teor proteico elevado. Essa característica é obtida graças à eliminação da fibra antes da fermentação e à extração parcial do óleo durante a centrifugação após a fermentação. Como resultado dessas etapas, o HPDG apresenta um conteúdo de proteína notavelmente superior em comparação com outros coprodutos, como WDGS, DDGS e DDBS, sendo vantajoso quando se busca fornecer proteína de qualidade superior aos animais (GARLAND et al., 2019).

Figura 5: Processo de extração de etanol a partir do milho com a separação da fibra antes da etapa de fermentação e formação de coprodutos (WDBS, DDBS, CDS, HPDG).



Fonte: Adaptado de MacDonalds (2018).

Tais coprodutos gerados no processo de produção de etanol de milho desempenham um papel fundamental na promoção da sustentabilidade ambiental, evitando o desperdício de resíduos.

Além disso, esses coprodutos são reconhecidos por seu alto valor nutricional e sua ampla utilização na alimentação animal, beneficiando diretamente a indústria pecuária.

Ao serem incorporados às rações dos animais, contribuem para a redução da dependência de alimentos concentrados, como o milho, o que resulta em economias tanto econômicas quanto ambientais.

Esses coprodutos fornecem uma fonte de proteína e energia de alta qualidade, desempenhando um papel crucial na promoção da saúde e produtividade dos animais.

Portanto, esses coprodutos desempenham um papel essencial na melhoria da eficiência e sustentabilidade tanto na indústria de biocombustíveis quanto na agricultura como um todo.

4.4. DADOS DE MERCADO DE ETANOL DE MILHO NO BRASIL

Dentro do contexto brasileiro, o etanol, historicamente derivado da cana-de-açúcar, está atualmente considerando uma alternativa promissora: o etanol de milho. O Brasil tem solidificado sua posição como um importante fornecedor global de alimentos, exportando uma variedade de produtos agrícolas. Nesse cenário, o agronegócio desempenha um papel de destaque na economia do país, e o cultivo de milho tem se destacado em termos de produtividade, como indicado por dados da Companhia Nacional de Abastecimento (CONAB, 2018). Nas últimas duas décadas, houve um aumento notável de 193,55% na área destinada ao cultivo de milho no Brasil (CONAB, 2018).

A crescente produção de milho no Brasil, aliada aos preços competitivos desse grão, à redução de custos associada a tecnologias avançadas e à crescente preferência por materiais e produtos mais sustentáveis, cria um ambiente favorável para o desenvolvimento da produção de etanol de milho no país. Essa tendência não apenas atende à crescente demanda por biocombustíveis, mas também resulta na geração de subprodutos e coprodutos valiosos com alto teor proteico, o que contribui para a redução dos custos de proteína na alimentação animal.

A produção de etanol de milho pode complementar o fornecimento de biocombustível no Brasil, especialmente considerando as projeções que indicam um aumento na demanda impulsionado pelo esperado aumento no número de veículos flex fuel, que correspondiam a 80% da frota em 2020, representarão cerca de 89% em 2031 (EPE, 2021). Esse investimento no uso do milho como matéria-prima para a produção de etanol tem o potencial de gerar impactos positivos na indústria de combustíveis, no mercado de trabalho e no setor agrícola, consolidando o milho como uma alternativa viável para a

produção de etanol no Brasil, apesar dos desafios logísticos que precisam ser superados (OZAKI, 2018).

De acordo com o Instituto Mato-grossense de Economia Aplicada (IMEA), o estado de Mato Grosso está se preparando para avançar nesse cenário de mercado e continuar investindo no milho como matéria-prima para a produção de etanol. A ociosidade na produção de etanol, que pode chegar a até sete meses durante a entressafra da cana-de-açúcar, representa um desafio significativo em termos de lucratividade nas operações de produção de etanol, a menos que haja flexibilidade com o milho (OZAKI, 2018).

Sob a perspectiva do processo de industrialização, o uso do milho oferece um retorno substancialmente superior, estimado em cerca de 10 bilhões de reais, em comparação com a simples exportação do grão (FERNANDES, 2019). Esse investimento de grande envergadura impulsiona não apenas o setor de combustíveis, mas também setores correlatos, como o cultivo de eucalipto para a geração de energia em usinas, a criação de novos postos de trabalho e o aumento da demanda por matérias-primas no mercado agrícola. Essa análise destaca que, mesmo diante de desafios logísticos, o uso do milho se configura como uma alternativa viável e promissora para a produção de etanol no Brasil (FERNANDES, 2019).

Além disso, conforme dados da ANP (2023), o Brasil conta atualmente com a autorização para operação de dezoito usinas destinadas à produção de etanol de milho. Adicionalmente às unidades já em funcionamento, há nove usinas em processo de construção, quatro em fase de ampliação de sua capacidade produtiva, e três usinas de cana-de-açúcar em vias de implementação do modelo Flex. As projeções da Empresa de Pesquisa Energética (2022) indicam a perspectiva de que, até o ano de 2031, o país possa contar com mais quarenta novas usinas dedicadas à produção de etanol de milho. Dessa forma, é visível o crescimento da área e como o etanol de milho está cada vez mais consolidado no cenário sucroenergético brasileiro.

Diante das projeções o Brasil se encontra no ranking mundial de biocombustíveis como o segundo maior produtor de etanol do mundo, ficando

atrás somente dos Estados Unidos, que juntos representam a produção de mais de 80% do biocombustível no planeta (RFA, 2022). De acordo com os dados da CONAB (2023) na safra 2022/2023, o Brasil produziu 4,4 bilhões de litros de etanol de milho, volume que representa 15% do total de etanol produzido no país.

O etanol de milho começou a ser produzido inicialmente no Brasil em 2012, no Mato Grosso, e teve como iniciativa oferecer aos agricultores maiores opções para escoar o produto, agregar valor ao produto in natura, além de gerar impostos, empregos e demandas diretas e indiretas de outras cadeias de produção e setores do comércio (IEA, 2018). De acordo com um estudo realizado pela EPE (Empresa de Pesquisa Energética) a produção de etanol de milho estimada para 2031 é de mais de 8 bilhões de litros, esse aumento se dá principalmente pela expansão das usinas em planta full (exclusivo) de destilação de milho no país, fazendo com que o volume produzido de etanol de milho passe a representar 20% do etanol total produzido.

A produção de etanol de milho possui algumas particularidades quando comparada à produção a partir da cana-de-açúcar, em termos de rendimentos uma tonelada de cana-de-açúcar produz entre 80 e 90 litros de etanol, enquanto a mesma quantidade de milho produz de 390 a 410 litros. Além do etanol, os coprodutos da destilação do milho também são fabricados: aproximadamente 110,6 kg de DDG (grãos secos por destilação) ou 112,8 kg de WDG (grãos úmidos por destilação) e cerca de 13,7 litros de óleo de milho bruto. Se por um lado o milho produz mais etanol, por outro é necessário maior área de plantio, isso porque a cana produz em média 77 ton/ha enquanto o milho 6 ton/ha (MARINHO, 2016).

Ainda relacionando o etanol de milho com o de cana-de-açúcar, os custos da produção do etanol de milho ainda são considerados altos. Devido ao processo de sacarificação do cereal, as despesas operacionais do etanol de milho são maiores comparativamente às da cana. Esse excedente deriva do fato de que o processo de sacarificação do milho precisa ser induzido por enzimas, enquanto a cana-de-açúcar já tem sacarose disponível. Segundo levantamento realizado pelo Instituto de Economia Agrícola (IEA, 2018) o custo

de produção do etanol de milho na safra 2018 foi maior que o da cana, R\$1,23 ante a R\$1,13 por litro.

5. CONCLUSÃO

Diante da análise detalhada do processo produtivo de etanol de milho, este estudo proporcionou uma compreensão abrangente das suas diversas etapas, desde a preparação do insumo até a separação dos coprodutos. Assim como a relevância dos coprodutos do etanol de milho também foi destacada, não apenas como uma valiosa fonte de receita para a indústria, mas também como uma potencial contribuição para a diversificação na nutrição animal no cenário agropecuário brasileiro e para uma maior sustentabilidade.

No contexto nacional, embora o Brasil tenha se notabilizado globalmente na produção de etanol a partir da cana-de-açúcar, observa-se nos últimos anos a consolidação do etanol de milho como um protagonista no cenário brasileiro de biocombustíveis. Motivado pela capacidade de armazenamento de grãos e pela oportunidade de reduzir a ociosidade operacional das usinas de cana-de-açúcar, o etanol de milho se destaca como uma alternativa estratégica. O crescimento expressivo das super safras de milho tem contribuído para atender às demandas crescentes por combustíveis, além de absorver os excedentes de produção.

A trajetória ascendente da produtividade do etanol de milho a cada safra reflete a viabilidade e a resiliência desse setor no Brasil. As perspectivas otimistas indicam um crescimento contínuo, especialmente na região Centro-Oeste, onde a abundância de milho e a demanda dos grãos de destilaria para nutrição animal convergem de maneira favorável. Embora relativamente novo no país, o notável crescimento observado nos últimos anos corrobora a posição do etanol de milho como uma alternativa sólida e promissora para o setor sucroenergético brasileiro.

Para um melhor direcionamento da produção, seria benéfico a realização de estudos a fim de aprofundar a análise em áreas específicas, como otimização de processos, impactos econômicos e ambientais dos

coprodutos, e explorar estratégias inovadoras para a expansão sustentável do setor, contribuindo assim para um entendimento mais abrangente e aprimorado do cenário do etanol de milho no Brasil.

6. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

Agência nacional do petróleo. ANP. **Autorização para produção de biocombustíveis**: Relatório Dinâmico de Autorizações. Atualizado em: 16 de jan. de 2023. Disponível em: < <https://www.gov.br/anp/pt-br/assuntos/producao-e-fornecimento-de-biocombustiveis/autorizacao-para-producao-de-biocombustiveis> >. Acesso em: 20 Set. 2023.

AEHLE, Wolfgang. **Enzymes in Industry: Production and Applications**. 3ed. ed. rev. Países Baixos: WILEY-VCH, 2007. 517 p. ISBN 978-3-527-31689-2.

ANTUNES, Silvio Luis. **Inclusão de novos coprodutos derivados do processo de produção de etanol de milho em dietas de terminação de bovinos**. 2020. Tese de Doutorado. Universidade de São Paulo.

Associação brasileira das indústrias do milho. ABIMILHO. **situação atual da indústria de moagem de milho para consumo humano**. Nelson Arnaldo Kowalski. 2010.

BANCO NACIONAL DE DESENVOLVIMENTO ECONÔMICO E SOCIAL (BRASIL). CENTRO DE GESTÃO E ESTUDOS ESTRATÉGICOS. **Bioetanol de cana-de-açúcar: energia para o desenvolvimento sustentável**. 1 ed. Rio de Janeiro: Banco Nacional de Desenvolvimento Econômico e Social, 2008. 314 p. ISBN 9788587545244

BREMER, M. L., C. J. Bittner, D. B. Burken, G. E. Erickson, and J. C. MacDonald. 2015. **Response to increasing concentrations of de-oiled**

modified distillers' grains plussolubles in beef feedlot diets. Neb. Beef Cattle Rep. 74-76.

BORTOLETTO, A. M.; ALCARDE, A. R. Dominante nos EUA, etanol de milho é opção, no Brasil, para safra excedente. **Visão Agrícola**, Piracicaba, n. 13, p. 135-137, jul./dez. 2015.

BOTHAST, R. J., & Schlicher, M. A. (2004). Biotechnological processes for conversion of corn into ethanol. **Applied Microbiology and Biotechnology**, 67(1), 19–25. doi:10.1007/s00253-004-1819-8

BURHOOP, J.E., Jolly-Breithaupt, M.L., Gramkow, J.L., Luebbe, M.K., MacDonald, J.C., and Erickson, G.E. 2018. Impact of Feeding Distillers Grains with or Without Oil Removal as Well as Supplemental Corn Oil on Nutrient Digestibility by Finishing Cattle. 2018 **Nebraska Beef Cattle Report**. MP105:105-108.

CARLSON, Z. E. 2017. **Evaluation of protein and fiber from distillers grains plus solubers in finishing beef cattle diets.** Master theses. Univ. of Nebraska – Lincoln.

CASTELLUCCI, Ana Carolina Leme; d'ARCE, Marisa Aparecida Bismara Regitano-; SPOTO, Maria Helena Fillet. **Processamento e industrialização do milho para alimentação humana, Visão Agrícola:** Milho. Brasil amplia cultivo para atender demanda crescente, Piracicaba/SP, 2015. Disponível em: http://www.esalq.usp.br/visaoagricola/sites/default/files/VA_13_Industrializacaoartigo2.pdf. Acesso em: 19 Out. 2023.

CEPEA. Centro de Estudos Avançados em Economia Aplicada. **PIB DO AGRONEGÓCIO BRASILEIRO.** Disponível em: <https://www.cepea.esalq.usp.br/br/pib-do-agronegocio-brasileiro.aspx>. Acesso em: 20 out. 2023.

CONAB. Companhia Nacional de Abastecimento. **Diagnóstico da produção de etanol em Mato Grosso:** binômio cana-de-açúcar/milho. Cuiabá, 2018. (Compêndio de Estudos Conab, v.17). Disponível em: <https://www.conab.gov.br/institucional/publicacoes/compendio-de-estudos->

da-conab/item/10556-compendio-de-estudos-da-conab-v-17-diagnostico-da-producao-de-etanol-em-mato-grosso-binomio-cana-de-acucar-milho> . Acesso em: 15 Out. 2023.

CONAB. Companhia Nacional de Abastecimento. **Safra Brasileira de Grãos**. Disponível em: <<https://www.conab.gov.br/info-agro/safras/graos/boletim-da-safra-de-graos>> . Acesso em: 18 Out. 2023.

COSTA, Aline C.; ATALA, Daniel, I.P.; MAUGERI, Francisco.; MACIEL, Rubens. **Factorial design and simulation for the optimization and determination of control structures for an extractive alcoholic fermentation**. Process Biochemistry, 2001. [https://doi.org/10.1016/S0032-9592\(01\)00188-1](https://doi.org/10.1016/S0032-9592(01)00188-1).

DA SILVA, H., SANTOS, P., NOGUEIRA JUNIOR, E., VIAN, C. Aspectos técnicos e econômicos da produção de etanol de milho no Brasil. **Revista de Política Agrícola**, 29, dez. 2020. Disponível em: <https://seer.sede.embrapa.br/index.php/RPA/article/view/1567>. Acesso em: 28 Set. 2023.

DONKE, A. C. G. et al. Usina Flex: comparação dos desempenhos ambiental e energético do etanol de cana-de-açúcar, milho e sorgo. In: **Congresso Brasileiro em Gestão de Ciclo de Vida**, 5, Fortaleza, 2016. p. 364-370. Disponível em: < <https://www.alice.cnptia.embrapa.br/handle/doc/1064075>>. Acesso em: 23 Set. 2023.

EMPRESA BRASILEIRA DE PESQUISA AGROPECUÁRIA. EMBRAPA. **Óleo de milho, aspectos químicos e nutricionais**. 2004. Disponível em: <<https://www.infoteca.cnptia.embrapa.br/bitstream/doc/489408/1/Oleomilho.pdf>> . Acesso em: 10 Nov. 2023.

EMPRESA DE PESQUISA ENERGETICA. EPE. **DEMANDA DE ENERGIA DOS VEÍCULOS LEVES: 2022-2031**. Disponível em: <https://www.epe.gov.br/sites-pt/publicacoes-dados-abertos/publicacoes/PublicacoesArquivos/publicacao-331/topico-607/Demanda_Ve%C3%ADculos_Leves_2022_2031.pdf>. Acesso em: 22 nov. 2023.

ECKERT, C.T. **Avaliação da produção de etanol a partir de distintos híbridos de milho na região oeste do Paraná.** 2016. 61p. Dissertação (Mestrado) – Universidade Estadual do Oeste do Paraná, Cascavel. Disponível em: <<https://tede.unioeste.br/handle/tede/800>>. Acesso em: 19 set. 2023.

EMPRESA DE PESQUISA ENERGÉTICA. **ANP espera sete novas usinas de etanol em 2022; no total, 23 estão em construção.** Disponível em: <https://www.novacana.com/n/industria/usinas/anp-espera-novas-usinas-de-etanol-2022-23-construcao-080322>. Acesso em: 30 Set. 2023.

EMPRESA DE PESQUISA ENERGÉTICA. **Estudos do Plano Decenal de Expansão de Energia 2031. Oferta de Biocombustíveis.** Disponível em: <chrome-extension://efaidnbnmnibpcajpcglclefindmkaj/https://www.epe.gov.br/sites-pt/publicacoes-dados-abertos/publicacoes/PublicacoesArquivos/publicacao-607/topico-591/PDE%202031%20-%20Oferta%20de%20Biocombustiveis_06dez2021.pdf>. Acesso em: 09/11/2023

ESTADOS UNIDOS. Department of Agriculture. **USDA.gov - United States Department of Agriculture.** Disponível em: <<https://apps.fas.usda.gov/psdonline/app/index.html#/app/downloads>>. Acesso em: 28 out. 2023.

FERNANDES, Ricardo. **Avaliação da produção de etanol empregando milho como matéria-prima.** 2019. 35 f. Trabalho de Conclusão de Curso (Graduação em Engenharia Química) – Universidade Federal de Uberlândia, Uberlândia, 2019. Disponível em: <https://repositorio.ufu.br/handle/123456789/27653>. Acesso em: 15. Out. 2023.

GARLAND, S.A., Boyd, B.M., Hilscher, F.H., Erickson, G.E., MacDonald, J.C., and Mass, R.A. 2019. Evaluation of fractionated distillers' grains (high protein and bran plus solubles) on performance and carcass characteristics in finishing diets. 2019 **Nebraska Beef Cattle Report**. MP106:88-90

GRIPPA, Mario José Cacho. **PLANTA FLEX NO MATO GROSSO.** Orientador: Prof. Dr. João Padilha Júnior. 2012. 63 p. Trabalho de Conclusão Curso (Pós-Graduação MBA - Gestão do Agronegócio) - Universidade Federal do

Paraná, Curitiba, 2012. Disponível em: <https://acervodigital.ufpr.br/bitstream/handle/1884/44422/R%20-%20E%20-%20MARIO%20JOSE%20CACHO%20GRIPPA.pdf?sequence=1&isAllowed=y>. Acesso em: 29 set. 2023

HEDGEpoint Global Markets. **Mercado do açúcar: qual a situação e perspectivas futuras?**. Disponível em: <https://hedgepointglobal.com/pt-br/blog/mercado-do-acucar-qual-a-situacao-e-perspectivas-futuras/>. Acesso em: 09 nov. 2023.

Hoffman, L. ; Baker, A., 2010. Market issues and prospects for U. S. Distillers' Grains supply, use and price relationships. USDA, Economic research service. Disponível em: <http://www.ers.usda.gov/>. Acesso em: 10 Nov. 2023

Instituto de Economia Agrícola. **Situação Atual e Perspectivas da Produção Brasileira de Etanol de Milho**. IEA, 2018. Disponível em: <http://www.iea.sp.gov.br/out/verTexto.php?codTexto=14464.> Acesso em 9 Nov. 2023.

JACKSON, D.S.; SHANDERA, D.L.JR. **Corn Wet Milling: Separation Chemistry and Technology**. Journal of Advances in Food and Nutrition Research, 1995.

KIM, Y., N. S. Mosier, R. Hendrickson, T. Ezeji, H. Blaschek, B. Dien, M. Cotta, B. Dale, and M. R. Ladisch. 43 2008. Composition of corn dry-grind ethanol byproducts: DDGS, wet cake, and thin stillage. **Bioresour. Technol.** 99:5165–5176.

KLOPFENSTEIN, T. J., G. E. Erickson, and V. R. Bremer. 2008. Board-Invited Review: Use of distiller's byproducts in the beef cattle feeding industry. **Journal Animal Science**. 86:1223-1231.

LAMAS, Fernando Mendes. Embrapa Agropecuária Oeste. **A produção brasileira de grãos – salto quantitativo**. Disponível em: https://www.embrapa.br/en/busca-de-noticias/-/noticia/84709032/artigo---a-producao-brasileira-de-graos--salto-quantitativo?p_auth=RB285cMZ. Acesso em: 20 out. 2023.

LEVANTAMENTO SISTEMÁTICO DA PRODUÇÃO AGRÍCOLA. **Prognóstico da Produção Agrícola para 2002 nas Regiões Sudeste, Sul, Centro-Oeste e em Rondônia, Maranhão, Piauí e Bahia** ; Rio de Janeiro : IBGE, dez. 2001.

Disponível em:
<chrome-extension://efaidnbmnnnibpcajpcgclefindmkaj/https://biblioteca.ibge.gov.br/visualizacao/periodicos/8/lspa_prog_2001_dez_supl.pdf>. Acesso em: 09 Nov. 2023.

LIMA, Urgel de Almeida; AQUARONE, Eugênio; BORZANI, Walter; SCHIMIDELL, Willibaldo. **Biotecnologia Industrial: Processos Fermentativos e Enzimáticos**. v.3. Ed. Edgar Blucher, Rio de Janeiro, 2001. ISBN 9788521202806

LIU K. **Chemical composition of distillers grains**: a review. *J Agr Food Chem* 2011; 59: 1508–1526.

LOPES, Luiz Fernando; MASCARENHAS SANTOS, Maria do Socorro; BATISTOTE, Margareth. A PRODUTIVIDADE DE MILHO NO BRASIL E AVALIAÇÃO DO TRATAMENTO GRANULOMÉTRICO PARA A PRODUÇÃO DE ETANOL. **DESAFIOS - Revista Interdisciplinar da Universidade Federal do Tocantins**, [S. l.], v. 9, n. 2, p. 107–116, 2022. DOI: 10.20873/uftv9-11103.

Disponível em:
<https://sistemas.uft.edu.br/periodicos/index.php/desafios/article/view/11103>.
Acesso em: 8 nov. 2023.

MACHADO, Cristina Maria Monteiro; ABREU, Frederique Rosa e. **Produção de álcool combustível a partir de carboidratos**. *Revista de Política Agrícola*, Brasília, ano 15, n. 3, 2006. Disponível em:
<https://ainfo.cnptia.embrapa.br/digital/bitstream/item/63360/1/Paginas-de-pol-agr-03-20062-p.-64-78.pdf>. Acesso em: 29 Set. 2023.

MALDONADO, Horácio Guzmán; LOPEZ, Octavio Paredes. **Amyolytic enzymes and products derived from starch**: a review. *Critical Reviews in Food Science and Nutrition*, 1995. Disponível em:
<<https://doi.org/10.1080/10408399509527706>>. Acesso em: 12 nov. 2023

MANTOVANI, Evandro Chartuni. Componentes do sistema de colheita devem atuar em perfeita sintonia. **Visão Agrícola: Milho**. Brasil amplia cultivo para atender demanda crescente, Piracicaba/SP, 2015. Disponível em: <<https://www.esalq.usp.br/visaoagricola/sites/default/files/Esalq-VA13-Milho.pdf>>. Acesso em: 20 out. 2023.

MARINHO, Ana Flávia. **Etanol de milho: vantagens e desvantagens**. Disponível em: <http://www.canalbioenergia.com.br/aproveitamento-maximo-do-milho/>. Acesso em: 12 Out. 2023.

MARQUES, Sidnei José Pereira; CUNHA, Magda Turini da. **Produção de Álcool Combustível utilizando milho**. UNOPAR, 2008.

MacDonald, J. 2018. **Does removing nutrient components from distillers grains affect the feeding value for beef cattle**. 22nd Annual Distillers Grains Symposium, Des Moines - Iowa - United States, 16–18 May, 2018. 30 slides. Disponível em <<https://distillersgrains.org/wp-content/uploads/2018/05/1-MacDonald-Nutrient-Components-Distillers-Grains-Beef-Cattle.pdf>>. Acesso em: 20 out. 2023.

MISSAWA, Silvia Kazue. **Modificação de linhagens industriais de Saccharomyces cerevisiae para o aumento da produtividade de álcool e floculação condicional**. Orientadores: Dr. Gonçalo Amarante Guimarães Pereira e Dr. Anderson Ferreira da Cunha. 2009. 150 p. Tese (Doutorado em Genética e Biologia Molecular) – Universidade Estadual de Campinas, Campinas, 2009. Disponível em: http://repositorio.unicamp.br/jspui/bitstream/REPOSIP/316777/1/Missawa_Silvia_Kazu_e_D.pdf. Acesso em: 12 nov. 2023.

NETO, Roberto Fritsche, MÔRO, Gustavo Vitti. Escolha do cultivar é determinante e deve considerar toda informação disponível. **Visão Agrícola: Milho**. Brasil amplia cultivo para atender demanda crescente, Piracicaba/SP, 2015. Disponível em: <<https://www.esalq.usp.br/visaoagricola/sites/default/files/Esalq-VA13-Milho.pdf>>. Acesso em: 20 out. 2023.

NEVES, M. F. et al. **Etanol de Milho: cenário atual e perspectivas para a cadeia no Brasil**. 1. ed. Ribeirão Preto: UNEM, 2021. 115 p. Disponível em: <https://www.sna.agr.br/wp-content/uploads/2021/05/Etanol-de-Milho-no-Brasil-Fava-Neves-et-al-2021_compressed.pdf>. Acesso em: 03 de set. de 2023.

OZAKI, PAULO MORAES. **Clusters de etanol de milho**. Disponível em: <https://www.imea.com.br/imea-site/view/uploads/estudos-customizados/Analise-ClusterEtanolMilho.pdf>. Acesso em: 12 Out. 2023.

PEREIRA, D; MACRI, R; GIMENEZ. A. **Fatores que afetam a fermentação alcoólica**. Revista ciência e tecnologia (Fatec – JB). Jabotical – SP. V.12. n. 1. 2020.

RAUSCH. K. D. and R. L. Belyea. 2006. **The future of co-products from corn processing**. App. Biochem. And Biotechnol. 128:47-86.

RENEWABLE FUELS ASSOCIATION. **Annual Ethanol Production**. Disponível em: <<https://ethanolrfa.org/markets-and-statistics/annual-ethanol-production>>. Acesso em: 16/11/2023.

RIBEIRO, Laura Márcia Lima. Etanol de milho: **Processo produtivo e contexto atual do mesmo no Brasil**. 2023. 48 f. Trabalho de Conclusão de Curso (Graduação em Engenharia Química) – Universidade Federal de Uberlândia, Uberlândia, 2023.

SÃO MARTINHO. **Produtos: óleo de milho**, c2018. Disponível em: <<https://www.saomartinho.com.br/show.aspx?idCanal=X6afrPDkMQjL2bJXyTYuyA==>>>. Acesso em: 03 nov. 2023.

SUPER INTERESSANTE. da Redação (Ed.). **Como é produzido o etanol?** 2008. Disponível em: <<https://super.abril.com.br/mundo-estranho/como-e-produzido-o-etanol/>>. Acesso em: 10 out. 2023.

SCANDIFFIO, M.I.G. **Análise Prospectiva do álcool combustível no Brasil - Cenários 2004-2024**. Campinas: Universidade de Campinas 2005, Tese de Doutorado.

UNEM. União Nacional de Etanol de Milho. **Desafios do etanol de milho no Mato Grosso - e no Brasil.** 2018. <<https://www.novacana.com/n/eventos/ricardo-tomczyk-unem-desafios-etanol-milho-mato-grosso-brasil030719>> Acesso em: 16 Set. 2023.

UNICA. União da Indústria de Cana-de-açúcar e Bioenergia. **Histórico de produção e moagem.** 1980-1981. Disponível em: <<https://unicadata.com.br/historico-de-producao-e-moagem.php?idMn=31&tipoHistorico=2&acao=visualizar&idTabela=2492&produto=cana&safralni=1980%2F1981&safraFim=1980%2F1981&estado=RS%2CSC%2CPR%2CSP%2CRJ%2CMG%2CES%2CMS%2CMT%2CGO%2CDF%2CBA%2CSE%2CAL%2CPE%2CPB%2CRN%2CCE%2CPI%2CMA%2CTO%2CPA%2CAP%2CRO%2CAM%2CAC%2CRR>>. Acesso em: 12. nov. 2023.

USDA - UNITED STATES DEPARTMENT OF AGRICULTURE. Foreign Agricultural Service. **Sugar: World Markets and Trade.** Disponível em: <<https://apps.fas.usda.gov/psdonline/app/index.html#/app/downloads>>. Acesso em: 09 nov. 2023.