REMUNOM
ISSN 2178-6925

Received: 29/04/2026 - **Accepted:** 08/06/2026
Vol: 13.12
DOI: 10.66104/2jsg1d58
Pages: 1-48

PANORAMA DO ETANOL AMILÁCEO NO BRASIL

OVERVIEW OF STARCHY ETHANOL IN BRAZIL

PANORAMA DEL ETANOL DE ALMIDÓN EN BRASIL

Samanta Gabriela Souza da Silva
Doutoranda em Biotecnologia, Universidade Federal do Amazonas, Brasil
E-mail: samantasouzas@gmail.com

Edson Júnior do Carmo
Doutor em Biotecnologia, Universidade Federal do Amazonas, Brasil
E-mail: ejcarmo@ufam.edu.br

Spartaco Astolfi Filho
Doutor em Ciências, Universidade Federal do Amazonas, Brasil
E-mail: spartaco.biotec@gmail.com

Resumo

A crescente busca por biocombustíveis influenciada por questões ambientais e econômicas é uma realidade global. Nesse sentido, o Brasil é um dos pioneiros na diversificação de sua matriz energética. Esse artigo tem o objetivo de avaliar o atual cenário do etanol produzido a partir de amido no Brasil por meio de revisão narrativa da literatura utilizando bases de dados, documentos técnicos e sites do setor de biocombustíveis. As informações obtidas apontam para um aumento da produção de etanol amiláceo oriundo do milho, embora a viabilização e consolidação de outras biomassas como a mandioca, batata-doce, trigo e sorgo necessitem de investimentos, políticas públicas, estratégias logísticas e avanços tecnológicos. Diante do exposto, o Brasil tem demonstrado seu compromisso com a diversificação de sua matriz energética utilizando biomassas renováveis que contribuem para a redução da necessidade de combustíveis fósseis.
Palavras-chave: sustentabilidade; etanol; amido; amilases; biocombustíveis

Abstract

The growing demand for biofuels, driven by environmental and economic concerns, is a global reality. In this regard, Brazil is one of the pioneers in diversifying its energy mix. This article aims to assess the current landscape of starch-based ethanol production in Brazil through a narrative literature review using databases, technical documents, and websites from the biofuels sector. The information obtained points to an increase in the production of starch-based ethanol derived from corn, although the viability and consolidation of other biomass sources, such as cassava, sweet potatoes, wheat, and sorghum, require investments, public policies, logistical strategies, and technological advances. In light of the above, Brazil has demonstrated its commitment to diversifying its energy mix by utilizing renewable biomass that contributes to reducing the need for fossil fuels.
Keywords: sustainability; ethanol; starch; amylases; biofuels

REMUNOM
ISSN 2178-6925

Received: 29/04/2026 - **Accepted:** 08/06/2026
Vol: 13.12
DOI: 10.66104/2jsg1d58
Pages: 1-48

Resumen

La creciente demanda de biocombustibles, impulsada por cuestiones medioambientales y económicas, es una realidad mundial. En este sentido, Brasil es uno de los pioneros en la diversificación de su matriz energética. El objetivo de este artículo es evaluar la situación actual del etanol producido a partir de almidón en Brasil mediante una revisión narrativa de la bibliografía, utilizando bases de datos, documentos técnicos y sitios web del sector de los biocombustibles. La información obtenida apunta a un aumento de la producción de etanol amiláceo procedente del maíz, aunque la viabilidad y la consolidación de otras biomasas, como la yuca, la batata, el trigo y el sorgo, requieren inversiones, políticas públicas, estrategias logísticas y avances tecnológicos. En vista de lo anterior, Brasil ha demostrado su compromiso con la diversificación de su matriz energética mediante el uso de biomasa renovable que contribuye a reducir la dependencia de los combustibles fósiles
Palabras clave: sostenibilidad; etanol; almidón; amilasas; biocombustibles

1. Introdução

A crescente preocupação com meio ambiente e a busca pela redução na emissão de CO_2 proveniente da combustão de combustíveis fósseis incentivaram o desenvolvimento de tecnologias renováveis como os biocombustíveis, e que podem ser usados parcialmente ou totalmente em substituição de derivados do petróleo (UNEM, 2021).

O bioetanol é um dos biocombustíveis cujo interesse cresceu significativamente ao redor do mundo e, diversos países têm investido em tecnologias que aumentem o rendimento do etanol e a eficiência do processo produtivo, promovam a sustentabilidade através do reaproveitamento de resíduos, gerem coprodutos de alto valor agregado e apoiem modelos de bioeconomia circular (Kumar *et al*., 2025).

Para produção de bioetanol podem ser usadas diversas matérias-primas classificadas em quatro gerações: primeira geração (1G) emprega como matéria-prima biomassas de origem vegetal que também são usadas para consumo alimentício como cana-de-açúcar, milho, mandioca, trigo; etanol de segunda geração (2G), também conhecido como etanol lignocelulósico, utiliza como matéria-prima os resíduos das biomassas lignocelulósicas; terceira geração (3G) utiliza a biomassa das algas como matéria-prima; na quarta geração (4G) a obtenção do combustível ocorre através da conversão de dióxido de carbono por culturas fotossintéticas, plantas ou algas, modificadas geneticamente (Devi *et al*., 2023; Alexandre *et al*., 2026).

O cenário mundial de biocombustíveis é dinâmico e inovações tecnológicas

REMUNOM
ISSN 2178-6925

Received: 29/04/2026 - **Accepted:** 08/06/2026
Vol: 13.12
DOI: 10.66104/2jsg1d58
Pages: 1-48

têm aumentado a competitividade entre os países. O etanol de amido (1G) tem ganhado destaque no Brasil principalmente pela grande disponibilidade de grãos, extensão de safras de culturas amiláceas como o milho nas regiões Nordeste e Centro-Oeste e possibilidade de processamento conjunto com a cana-de-açúcar em unidades *flex* (Vidal, 2024).

Embora o etanol amiláceo venha ganhando relevância no Brasil, sua consolidação não ocorre de maneira homogênea entre as diferentes biomassas, o que evidencia a necessidade de uma análise crítica que vá além do potencial teórico e considere entraves logísticos, econômicos, tecnológicos e regulatórios.

1.1 Objetivos Gerais

O presente artigo tem o objetivo de analisar o panorama atual da produção de etanol amiláceo no Brasil, com ênfase nas principais matérias-primas, rotas tecnológicas, expansão produtiva, limitações e perspectivas de diversificação da matriz bioenergética.

Nesse sentido, este estudo propõe os objetivos específicos:

- Contar brevemente a história do etanol de amido no País;
- Comparar matérias-primas amiláceas utilizada na produção de etanol;
- Descrever as etapas tecnológicas de conversão do amido em etanol;
- Contextualizar o cenário do etanol de amido no Brasil.

2. Metodologia

Nesse sentido este artigo é enquadrado como revisão narrativa de literatura, conforme Cavalcante e Oliveira (2020) pois a revisão narrativa descreve um tema de forma ampla, atual e não sistemática (Cavalcante; Oliveira, 2020).

Segundo Ogassavara *et al*., (2025) a revisão narrativa é um instrumento de aperfeiçoamento de conhecimento no campo educacional e de desenvolvimento tecnológico disseminando a comunicação científica a comunidade de forma acessível (Ogassavara *et al*., 2025).

Mesmo diante da flexibilidade própria de revisões narrativas de literatura as informações e documentos obtidos foram estruturados em categorias conforme

REMUNOM
ISSN 2178-6925

Received: 29/04/2026 - **Accepted:** 08/06/2026
Vol: 13.12
DOI: 10.66104/2jsg1d58
Pages: 1-48

apresentado no Quadro 1.

Quadro 1 - Categorização dos documentos utilizados como referência neste artigo.

Categorias	Descrição dos Elementos	Função
Literatura Científica	Artigos científicos, livros, teses e dissertações pesquisados em base de dados SCOPUS, Portal de Periódicos da CAPES, Scielo, PubMed, Web of Science e Google Scholar	Fundamentos e evidências técnicas
Literatura Cinzenta	Documentos governamentais e relatórios técnicos	Dados públicos
Dados setoriais	Sites especializados do setor	Informações de mercado e capacidade produtiva

Fonte: Elaborado pelos autores (2026).

Os termos descritivos de busca utilizados foram biocombustíveis, fermentação, sacarificação, etanol, milho, mandioca, trigo, sorgo, batata-doce, amido, amilases, *Saccharomyces cerevisiae* e Brasil encontrados no título, resumo ou palavras-chave. Não houve delimitação de período para literatura científica, documentos governamentais e relatórios técnicos, para os dados setoriais obtidos em portais especializados priorizou – se informações atualizadas a partir do ano de 2024.

Para fins educativos, os autores declaram o uso de inteligência artificial, a ferramenta Gemini 3 – Nano Banana 2 para geração de imagens. As imagens foram revisadas pelos autores que assumem responsabilidade sobre o conteúdo final apresentado.

3. Revisão da Literatura

3.1 Histórico Da Produção Do Etanol

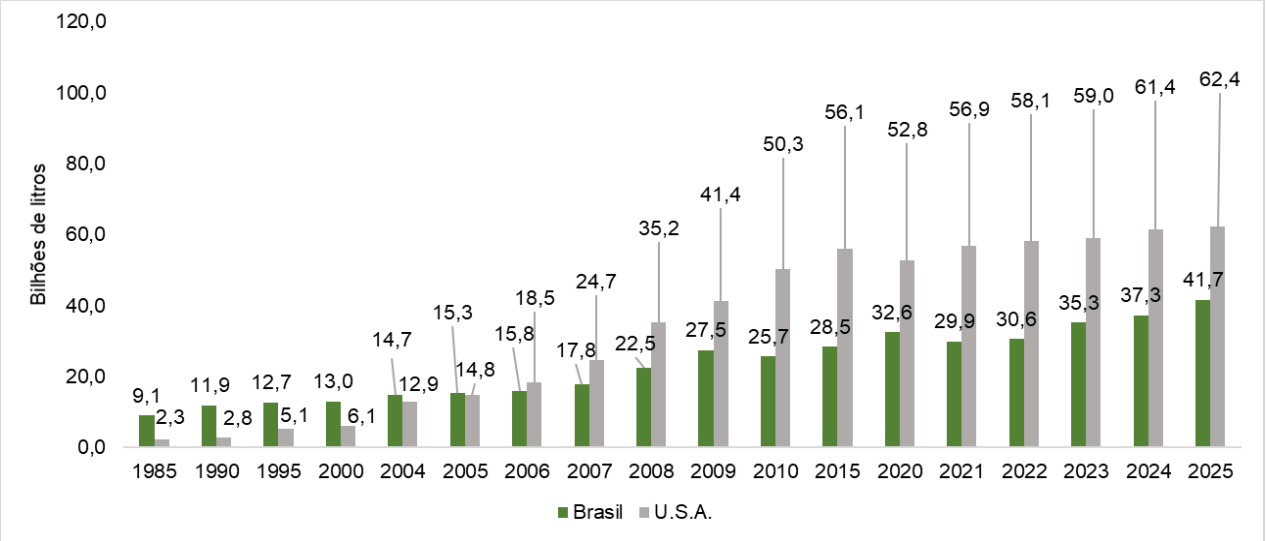
O desenvolvimento da indústria do etanol combustível no Brasil iniciou-se em 1975, que impulsionado pela crise dos altos preços do petróleo criou o Programa Nacional do Álcool (Proálcool), cujo objetivo era desenvolver a tecnologia nacional reduzindo a dependência dos combustíveis estrangeiros e fomentar o crescimento no País (Stolf; Oliveira, 2020).

Durante mais de uma década, o Brasil foi o maior produtor mundial de etanol, conforme panorama do crescimento da produção de etanol apresentado na figura 1.

REMUNOM
ISSN 2178-6925

Received: 29/04/2026 - **Accepted:** 08/06/2026
Vol: 13.12
DOI: 10.66104/2jsg1d58
Pages: 1-48

Figura 1: Comparativo do histórico da produção de etanol entre Brasil e Estados Unidos.



Fonte: Elaborado pelos autores com base em Brasil – Empresa de Pesquisas Energéticas (2024a); Piva (2025); Renewable Fuels Association (2026); UNICA (2026).

A figura 1 apresenta o panorama da produção de etanol de primeira geração (1G) ao longo de 40 anos dos dois principais produtores mundiais: Estados Unidos e Brasil, que juntos possuem 80% do mercado mundial da produção de bioetanol (Piva, 2025). Nota-se que até 2005 o Brasil dominava a produção mundial de etanol e, em 2006 passou a ocupar o segundo lugar, perdendo a liderança para os Estados Unidos. Mesmo diante da redução na produção mundial em 2020/2021, consequência da Covid-19, Estados Unidos e Brasil mantiveram suas posições no ranking, primeiro e segundo lugar respectivamente.

Embora os dados da figura 1 não façam distinção a respeito das matérias-primas usadas para produção de etanol, as informações apresentadas ressaltam a trajetória do Brasil como um dos principais *players* mundiais no setor de biocombustíveis e, mostram o crescimento do mercado de etanol ao longo dos anos.

Neste contexto, o desenvolvimento da indústria do etanol tem início com a cana-de-açúcar (*Saccharum officinarum* L.) cultura proeminente no País (Silva *et al*., 2023) e, após a instituição do Proálcool pelo decreto n°76.593, o País vivenciou o desenvolvimento energético fomentado pelos governos federal e estaduais e, em

REMUNOM
ISSN 2178-6925

Received: 29/04/2026 - **Accepted:** 08/06/2026
Vol: 13.12
DOI: 10.66104/2jsg1d58
Pages: 1-48

parte, pela iniciativa privada. Diversos pesquisadores e núcleos científicos contribuíram para o incremento de produtividade e rendimento da produção de etanol através de melhorias ao longo de todo o processo produtivo do açúcar (Gimenez *et al*., 2018).

Em meados dos anos 80, o aumento na oferta e demanda internacional por açúcar e a redução nos preços do petróleo geraram desinteresse do governo brasileiro pelo etanol, acarretando a queda na oferta de etanol para o consumidor e um aumento na demanda interna de petróleo. Este cenário expõe a crise que o etanol enfrentou nos anos seguintes no Brasil, com a mudança de governos e desregulamentação de mercado no setor (Puerto Rico *et al*., 2010; Stolf, Oliveira; 2020).

Nos anos 2000, uma grave crise do setor elétrico fez com que o Brasil retomasse o Proálcool repensando sua matriz energética; essa realidade trouxe uma oportunidade para o etanol integrando-o na geração nacional de energia elétrica que anteriormente era usado apenas como aditivo no combustível automotivo (Gimenez *et al*., 2018).

Em 2003, chegaram ao País os veículos movidos a combustíveis *flex*. Essa tecnologia possibilitava o abastecimento dos automóveis com etanol ou gasolina em proporções variadas permitindo que o consumidor final escolhesse o que lhe era vantajoso. Desse modo, a demanda pelo etanol aumentou no mercado nacional com sucesso e, em 2008 somente no primeiro semestre o total de veículos leves com a tecnologia *flex* biocombustível chegou a 87,4% de vendas (Brasil, 2008).

Devido à crise econômica mundial iniciada em 2008, a produção de etanol não teve crescimento significativo nos anos seguintes, 2009 a 2012. O Brasil foi diretamente afetado e as usinas de cana-de-açúcar adquiriram dívidas altas por causa de empréstimos internacionais, além disso as circunstâncias climáticas da época ocasionaram a redução da safra da cana-de-açúcar impactando negativamente a produção de etanol (Moreira *et al*., 2014).

Com o aumento da destinação da cana-de-açúcar para produção de açúcar, o Brasil encontrou na cultura do milho (*Zea mays* L.) uma opção viável e sustentável para produção de etanol (Brasil, 2024a).

REMUNOM
ISSN 2178-6925

Received: 29/04/2026 - **Accepted:** 08/06/2026
Vol: 13.12
DOI: 10.66104/2jsg1d58
Pages: 1-48

O Brasil é um dos maiores produtores e exportadores de milho no mundo e tem aumentado a produção do grão a cada safra, mesmo diante de adversidades recentes em função das mudanças climáticas (Coêlho, 2025).

A produção de etanol de milho está conquistando espaço no Brasil principalmente pela crescente demanda em biocombustíveis e necessidade de diversificação na matriz energética oportunizada pela Política Nacional de Biocombustíveis (RenovaBio) (Dompieri *et al*., 2024).

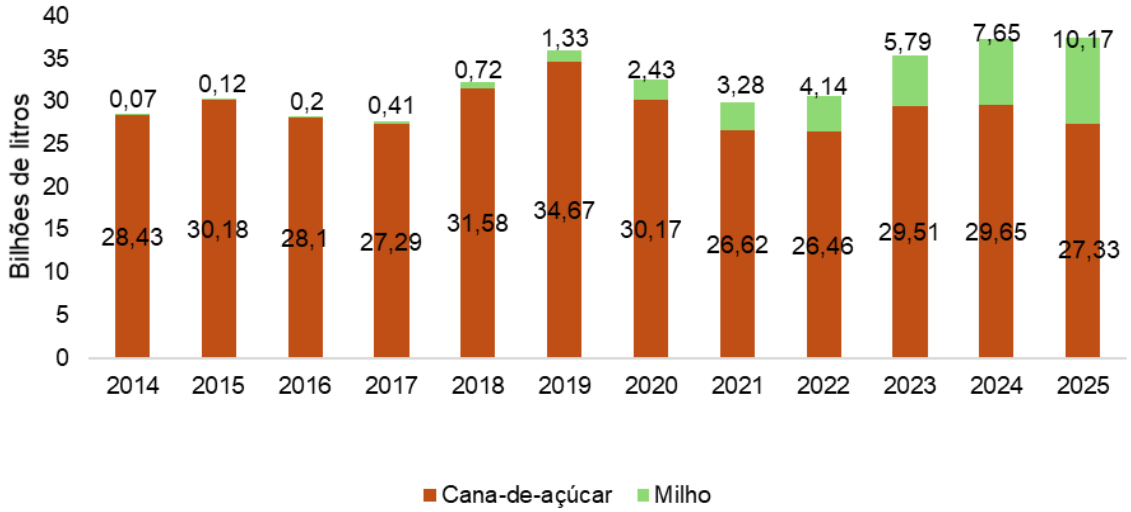
A participação do milho na fabricação de etanol no Brasil inicia em meados de 2012 como alternativa para entressafra da cana-de-açúcar a fim de reduzir a ociosidade das usinas, logo os produtores identificaram outras vantagens econômicas no uso do milho para produção de etanol como a geração de coprodutos de alto valor agregado como DDGS (*Dried Distillers Grain with Solubles*) e WGDS (*Wet Distillers Grain with Solubles*) (Sampaio *et al*., 2023). A partir de então, a produção de etanol de milho tem crescido continuamente, passando de 0,01 bilhões em 2013 para 5,79 bilhões de litros em 2023 (Brasil, 2024a).

Na figura 2 vemos o panorama da produção de etanol 1G no Brasil entre os anos de 2014 a 2025 das duas principais biomassas usadas no País: cana-de-açúcar e milho. Observa-se o crescimento do etanol oriundo do milho ao longo dos anos, indicando que essa cultura energética está estabelecida no País.

REMUNOM
ISSN 2178-6925

Received: 29/04/2026 - **Accepted:** 08/06/2026
Vol: 13.12
DOI: 10.66104/2jsg1d58
Pages: 1-48

Figura 2: Produção de etanol (1G) proveniente de cana-de-açúcar e milho no Brasil 2014-2025.



Fonte: Elaborado pelos autores com base em Brasil - Empresa de Pesquisas Energéticas – EPE (2024a); UNICA (2026).

Além do milho, o País possui culturas amiláceas que podem ser potencialmente utilizadas para produção de etanol: sorgo (*Sorghum bicolor* (L.), trigo (*Triticum aestivum* L.), batata-doce (*Ipomoea batatas* L.) e mandioca (*Manihot esculenta* Crantz), além de seus subprodutos e resíduos industriais.

A batata-doce é uma das culturas que tem sido estudada por pesquisadores brasileiros que desenvolveram cultivares melhorados capazes de alcançar rendimentos entre 120 a 199 litros de etanol por tonelada de raiz, representando 60% em relação a cultivares convencionais. Essa tecnologia é capaz de oportunizar a geração de etanol como alternativa para agricultura familiar (Silveira *et al*., 2008). Além do uso dos tubérculos de batata-doce para produção de etanol de 1° geração, os resíduos gerados podem ser usados como incremento na produção de etanol lignocelulósico de 2° geração (Camargo *et al*., 2016).

No contexto da produção de etanol, a mandioca é uma matéria-prima utilizada principalmente em países como Tailândia e Indonésia (Mordor Intelligence, 2025). No Brasil, o histórico de uso da mandioca na produção de etanol vem desde a década de 70 com o Proálcool, em que a cultura foi apresentada com grande potencial para produção de etanol que culminou na construção de seis usinas pela Petrobras; entretanto a iniciativa foi abandonada por apresentar resistência interna em setores

REMUNOM
ISSN 2178-6925

Received: 29/04/2026 - **Accepted:** 08/06/2026
Vol: 13.12
DOI: 10.66104/2jsg1d58
Pages: 1-48

da Petrobras, instalações em locais não tradicionais, plantações feitas no final do ciclo da mandioca e falta de qualidade da mandioca fornecida para produção de etanol, todos esses fatores contribuíram para demonstrar o desconhecimento de caráter técnico em etapas fundamentais do processo produtivo que findaram por inviabilizar a produção de etanol a partir da mandioca (Gordinho, 2010; Machado; Abreu, 2006; Castro; Schwartzman, 2008).

Mesmo com o sucesso da cana-de-açúcar como principal biomassa na produção de etanol, o País manteve o interesse no desenvolvimento de etanol a partir da mandioca como alternativa especialmente para as regiões Norte e Nordeste (Machado; Abreu, 2006; Felipe; Alves, 2007; Vítor *et al*., 2024).

Nesse sentido, o desenvolvimento do etanol de amiláceo no Brasil está profundamente ligado a produção de álcool a partir da cana-de-açúcar, tendo em vista que a utilização dessa cultura foi fundamental para o desenvolvimento estratégico, tecnológico, industrial e regulatório do etanol no País.

Portanto, não há como desvencilhar o atual progresso do etanol amiláceo no Brasil, do uso histórico da cana-de-açúcar como matéria-prima para produção de etanol.

Sob essa perspectiva, o avanço do etanol de milho no Brasil não pode ser explicado apenas por características intrínsecas da biomassa, mas também pela existência de condições estruturais favoráveis, como armazenamento, transporte, integração com a pecuária e aproveitamento da capacidade industrial ociosa.

3.2 Matéria-Prima Amilácea

Tradicionalmente, o Brasil utiliza a cana-de-açúcar como fonte principal para produção de etanol. Entretanto, o crescente cultivo de milho, especialmente na região Centro-Oeste do País, nos estados do Mato Grosso e Goiás, tem fomentado o uso desta biomassa como uma alternativa de sucesso para produção de bioetanol (Brasil, 2024a).

O milho (*Zea mays* L.) é uma planta de cultura anual e robusta que pode atingir até 4 metros de altura, é tolerante a períodos de secas e suas variedades estão amplamente distribuídas pelo Brasil (Embrapa, 2002).

REMUNOM
ISSN 2178-6925

Received: 29/04/2026 - **Accepted:** 08/06/2026
Vol: 13.12
DOI: 10.66104/2jsg1d58
Pages: 1-48

Uma das principais vantagens da utilização do amido de milho na produção de etanol é a possibilidade de armazenamento do grão, possibilitando seu uso por um período maior quando comparado com a cana-de-açúcar (Brasil, 2024b).

A liderança do milho no segmento amiláceo brasileiro parece resultar menos de uma superioridade absoluta da biomassa e mais da convergência entre escala agrícola, facilidade logística, geração de coprodutos e adaptação do parque industrial.

Além do milho, o País possui outros cultivos como a mandioca que apesar de ter sido desconsiderada como principal biomassa para produção de etanol no Brasil, continua sendo trabalhada em pequenas usinas, especialmente em agricultura familiar, apresenta como principal vantagem a possibilidade de cultivo ao longo do ano, bem como a resistência ao estresse hídrico e baixa temperatura de gelatinização (Machado; Abreu, 2006; Felipe; Alves, 2007; Janket *et al*., 2018; Vítor *et al*., 2024).

A mandioca (*Manihot esculenta* Crantz) é um tubérculo de fácil cultivo e resistente, adaptado a diversos tipos de solo e temperatura é encontrado em todas as regiões do Brasil. Possui grande importância econômica e social no País, principalmente por ser rica em amido de excelente qualidade nutricional (De Paula *et al*., 2024). O Brasil é um dos maiores produtores mundiais de mandioca sendo o maior produtor das Américas (Sergipe, 2025).

Embora a mandioca reúna atributos agronômicos relevantes, sua conversão em base estruturante do setor depende menos do rendimento teórico e mais da superação de entraves logísticos, organizacionais e territoriais que ainda restringem sua competitividade frente ao milho.

Assim como a mandioca, a batata – doce é frequentemente aliada à agricultura familiar e seu uso para produção de etanol tem como vantagens o alto teor de açúcares fermentescíveis e baixo teor de fibras assegurando baixa viscosidade para produção de etanol (Silveira *et al*., 2008; Jin *et al*., 2012).

A batata-doce (*Ipomoea batatas* L.) é uma hortaliça rústica, tolerante a diversos tipos de solo e climas e de fácil cultivo (Andrade Júnior *et al*., 2012). Em virtude de sua adaptação, no Brasil é cultivada de Norte a Sul garantindo o título de

REMUNOM
ISSN 2178-6925

Received: 29/04/2026 - **Accepted:** 08/06/2026
Vol: 13.12
DOI: 10.66104/2jsg1d58
Pages: 1-48

maior produtor de batata-doce da América Latina (Santana *et al*., 2013; França *et al*., 2024).

Na produção brasileira de etanol o trigo e o sorgo são culturas energéticas emergentes. O trigo (*Triticum aestivum* L.) é uma das culturas mais antigas do mundo sendo fundamental para alimentação mundial (Shaheen *et al*., 2026). É uma planta sensível ao clima e estresse hídrico e requer manejo adequado para manter a qualidade e produtividade (Galon *et al*., 2021). No Brasil, é cultivado nos estados do Mato Grosso do Sul, Goiás, Minas Gerais, São Paulo, Paraná, Santa Catarina e Rio Grande do Sul (Conab, 2025b).

No contexto produtivo de bioetanol, o trigo tem ganhado relevância no Rio Grande do Sul, maior produtor de trigo no País, e possui cenário favorável que possibilita a integração na matriz de biocombustíveis nacional conforme analisado por Noskoski e colaboradores (2026).

O sorgo (*Sorghum bicolor* L.) assim como o trigo é um dos cereais mais importantes na alimentação humana especialmente em regiões áridas e semiáridas, conhecida por ser uma cultura resiliente (Kumari *et al*., 2025). No Brasil, o sorgo é utilizado entressafras especialmente por seu crescimento rápido nos estados de Goiás, Minas Gerais, Mato Grosso, Mato Grosso do Sul, Rio Grande do Sul, São Paulo e Bahia (Barcelos *et al*., 2011; Landau; Martins Netto, 2015).

Em 2011, Barcelos e colaboradores apontaram esta biomassa como alternativa para produção de etanol após obtenção de 99,3% de eficiência de conversão global usando baixas cargas enzimáticas (Barcelos *et al*., 2011).

Nesse contexto, batata-doce, trigo e sorgo devem ser interpretados menos como substitutos diretos do milho e mais como alternativas de inserção regional, cuja viabilidade depende de arranjos produtivos específicos, disponibilidade local de matéria-prima e integração com cadeias já estabelecidas.

O quadro 2 apresenta as diferenças entre as biomassas amiláceas que compõem a matriz de biocombustíveis brasileira como o milho, assim como mostra a possibilidade de integração de outras culturas em ascensão como o sorgo e o trigo e as culturas tradicionais familiares como a mandioca e batata-doce.

REMUNOM
ISSN 2178-6925

Received: 29/04/2026 - **Accepted:** 08/06/2026
Vol: 13.12
DOI: 10.66104/2jsg1d58
Pages: 1-48

Quadro 2 - Principais características das fontes de amido produtoras de etanol

Matéria-prima	Teor de Amido % (massa seca) [1]	Rendimento Médio Etanol (L/ton) [1]	Vantagens Agronômicas	Vantagens Industriais	Desafios Econômicos/Logísticos
Milho	70-75% [2]	537	Possibilidade de armazenamento dos grãos	Coprodutos de alto valor agregado (WDGS e DDGS).	Desenvolvimento das lavouras pode ser afetado pelo excesso e escassez de chuvas.
Batata-doce	~60% [3]	180-208	Resistente a pragas	Possibilidade de sinergia com a cana-de-açúcar	Baixo volume produtivo por estar baseada em agricultura familiar
Mandioca	~27,5%	165-200	Disponibilidade de plantio anual e resistente a secas, pragas e doenças	Baixo preço, processo de extração de amido simples	Rápida decomposição da matéria-prima
Sorgo	~79%[2]	436	Resistente a altas temperaturas e baixa umidade	Geração de coprodutos	Necessidade de adequação dos métodos de conversão de etanol
Trigo	55 - 75%[2]	340	Em rotação de cultura melhora a qualidade do solo	Geração de coprodutos	Necessidade de importação de matéria-prima

Fonte: Elaborado pelos autores com base em Uda *et al*., (2008); Barcelos *et al*., (2011); Nogueira (2017); Kolling *et al*., 2020; Kim; Kim (2021); Komlaga *et al.,* (2022); Wang *et al*., (2022); Prado *et al*., (2023); Ribeiro (2023); Pergoraro *et al*., (2026).

[1] Os dados se referem a média do teor de amido sem considerar informações sobre condições agronômicas, variedade, região das culturas amiláceas apresentadas;
[2] Os dados se referem ao teor de amido de base seca presente nos grãos;
[3] Os dados se referem ao teor de amido de base seca presente nas raízes;

Apesar das matérias-primas listadas no quadro acima apresentarem potencial de compor a matriz brasileira de biocombustíveis, os desafios expostos indicam a necessidade de investimentos de ordem tecnológica, operacional e logística que perpassam toda a cadeia produtiva.

3.3 Estrutura Do Amido

O amido ($C_6H_{10}O_5$) (Figura 3) é um polissacarídeo abundante na natureza encontrado em formato de grânulos como forma de reserva de carboidratos em vegetais, sendo também uma das principais fontes de energia na dieta humana. É um polímero de glicose estruturado em amilose com ligações lineares α-1,4 (Figura

REMUNOM
ISSN 2178-6925

Received: 29/04/2026 - **Accepted:** 08/06/2026
Vol: 13.12
DOI: 10.66104/2jsg1d58
Pages: 1-48

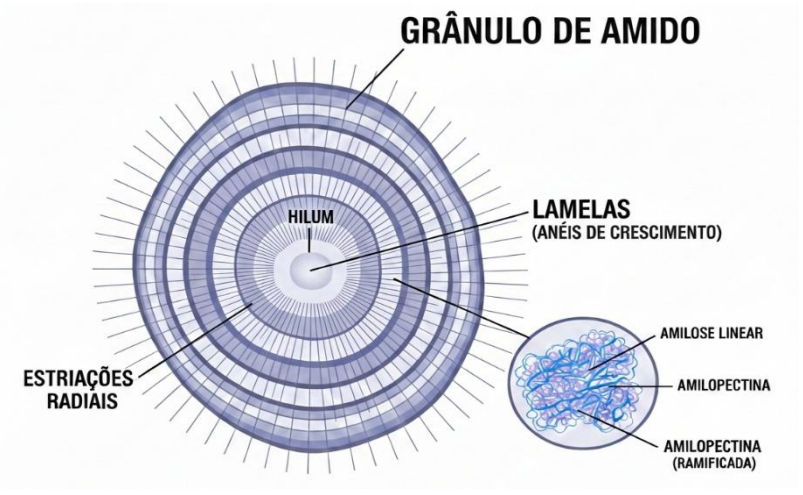
4) e amilopectina com ramificações α-1,6 (Figura 5) que compõem aproximadamente 98% da matéria seca do grânulo. Além de amilose e amilopectina, o grânulo de amido possui em sua composição lipídios, proteínas e minerais (Ferreira; Almeida, 2022; Zou *et al*., 2023; Figueroa-Flórez *et al*., 2023).

Os grânulos de amido podem distinguir em tamanho, composição e morfologia de acordo com a fonte botânica influenciando diretamente suas propriedades físico – químicas e funcionais (Compart *et al*., 2021; Zhiguang *et al*., 2025).

O amido nativo é encontrado em formato de elipse, circular, oval polígono, lenticular e túbulo irregular; com tamanhos variando de 1 - 100 μm e distribuído de tamanho unimodal, bimodal e trimodal (Ferreira; Almeida, 2022).

Internamente, os grânulos de amido possuem uma região central chamado hilo ao qual se originam anéis de crescimento formados por blocos de lamelas semicristalinas contendo porções cristalinas, regiões amorfas e ramificadas com cadeias de amilose e amilopectina (Vanier *et al*., 2017) conforme visto na figura 3.

Figura 3: Representação esquemática do grânulo de amido evidenciando as estruturas internas e em destaque as regiões lineares de amilose e ramificadas de amilopectina gerada com Gemini 3.



Fonte**:** Elaboradora pelos autores com base em Vanier *et al.,* (2017).

Uma das principais propriedades físico-química da molécula do amido é a retrogradação. Este processo acontece após a gelatinização do amido, em que amilose e amilopectina são reorganizadas formando géis fortes e resistentes, isso

REMUNOM
ISSN 2178-6925

Received: 29/04/2026 - **Accepted:** 08/06/2026
Vol: 13.12
DOI: 10.66104/2jsg1d58
Pages: 1-48

pode ocorrer por diversos fatores como estruturas e proporção de amilose e amilopectina, temperatura, composição e concentração de amido na espécie botânica (Jacobson *et al*., 1997; Pérez; Bertoft; 2010).

Em diversos setores industriais como os alimentícios e produção de etanol esse efeito é indesejável pois interfere diretamente na atividade das enzimas amilolíticas afetando a hidrólise e a disponibilidade de açúcar fermentescível (Wang *et al*., 2015).

3.4 Amilose

A amilose (Figura 4) possui estrutura linear de unidades de glicose com ligações α-1,4 glucopiranosil (Vanier *et al*., 2017); poucas ramificações e baixo peso molecular aproximadamente 10^6 Daltons (Zhu *et al*., 2020; Apriyanto *et al*., 2022).

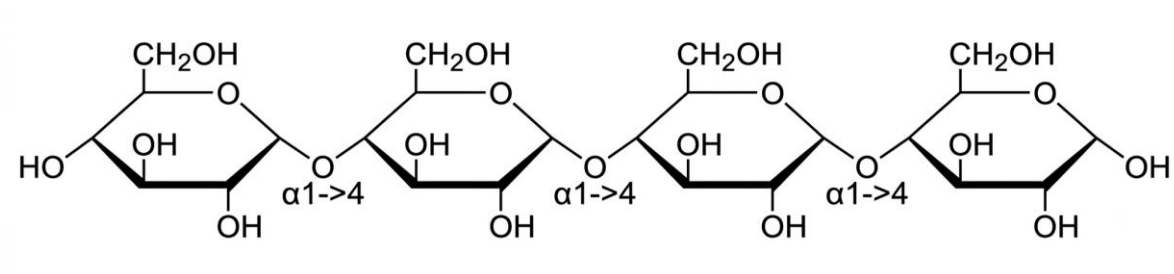
Compreende menos que 35% do peso total do amido normal, porém essa proporção pode variar de acordo com sua origem botânica, sua presença influencia na estabilidade dos anéis de crescimento do grânulo (Tester *et al*., 2004; Seung, 2020; Zhiguang *et al*., 2025). Está intrinsicamente ligada a amilopectina pois sua síntese e armazenamento ocorrem no interior do grânulo semicristalino (Seung, 2020).

Na figura 4 é apresentada a representação da estrutura da amilose destacando as ligações glicosídicas α-1,4 que unem as unidades de glicose. Esses pontos de ligação são fundamentais no processo de hidrólise enzimática, pois durante a etapa de liquefação a enzima α-amilase fará a quebra dessas ligações gerando produtos como as dextrinas que serão utilizadas nas etapas seguintes de sacarificação e fermentação.

REMUNOM
ISSN 2178-6925

Received: 29/04/2026 - **Accepted:** 08/06/2026
Vol: 13.12
DOI: 10.66104/2jsg1d58
Pages: 1-48

Figura 4: Estrutura esquemática da amilose composta por unidades de glicose unidas exclusivamente por ligações glicosídicas α-1,4 formando uma cadeia linear, imagem gerada com Gemini 3.



Fonte: Elaborado pelos autores com base em Denardin; Silva (2009).

Na natureza, é possível encontrar cereais sem a presença de amilose chamados ‘waxy’ bem como mutantes com alto nível de amilose (Vandeputte *et al*., 2003; Denardin; Silva, 2009).

3.5 Amilopectina

A amilopectina (Figura 5) é composta por ligações α-1,4 de unidades de glicose com ramificações laterais α-1,6 e extremidades não-redutoras (Myers *et al*., 2000); peso molecular com cerca 10^8 Daltons (Apriyanto *et al*., 2022).

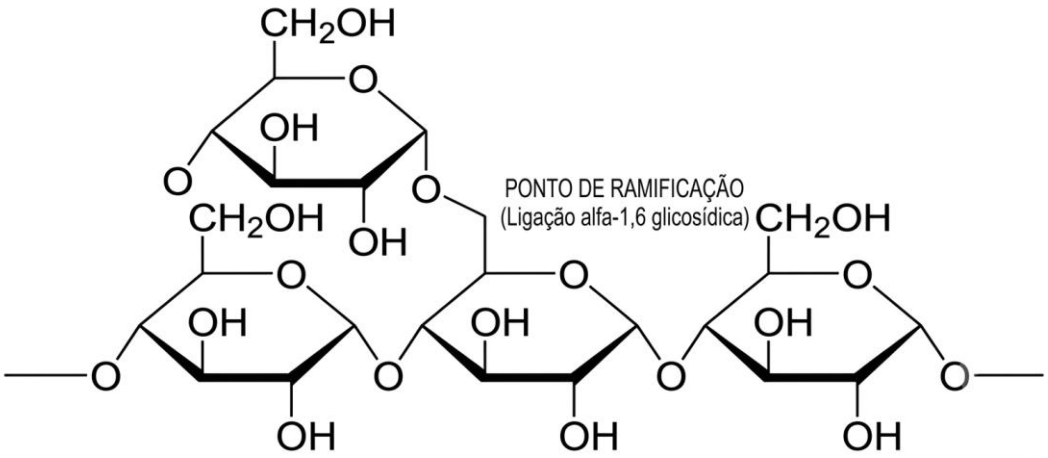
Comumente pode constituir até 75% do peso total do amido (Wu *et al*., 2013) possui cadeias laterais curtas e é fundamental para o caráter semicristalino dos grânulos (Tester *et al*., 2004; Zhiguang *et al*., 2025).

Na figura 5, a representação esquemática da amilopectina mostra a estrutura ramificada através de ligações α-1,6 bem como as ligações glicosídicas α-1,4 que unem a região interna da molécula do amido. Assim como na amilose, essas ligações são fundamentais durante a hidrólise enzimática, pois na etapa de sacarificação a enzima glucoamilase hidrolisará a molécula do amido utilizando essas regiões como alvo para geração de glicose para posterior fermentação pela levedura.

REMUNOM
ISSN 2178-6925

Received: 29/04/2026 - **Accepted:** 08/06/2026
Vol: 13.12
DOI: 10.66104/2jsg1d58
Pages: 1-48

Figura 5: Representação estrutural da amilopectina composta por unidades de glicose unidas predominantemente por ligações glicosídicas α-1,4, com pontos de ramificação formados por ligações α-1,6 gerado com Gemini 3.



Fonte: Elaborado pelos autores com base em Myers *et al*., 2000; Apriyanto *et al*., 2022.

A estrutura da amilopectina é descrita em dois modelos distintos: modelo de cluster e conceito de blocos de construção. Os dois modelos concordam sobre o agrupamento dos pontos de ramificação e, consequente formação de duplas hélices de forma perpendicular, entretanto discordam quanto à orientação das longas cadeias (Compart *et al*., 2021).

Nos grânulos de amido, a amilopectina participa da organização cristalina (Thakur *et al*., 2019) e, quando em altas concentrações interagem entre si dificultando a solubilidade do amido em água reduzindo suas propriedades mecânicas e funcionais (Bertoft *et al*., 2016; Thakur *et al*., 2019).

Embora a composição estrutural do amido seja um determinante central da susceptibilidade à hidrólise, sua conversão eficiente em escala industrial depende da interação entre características da biomassa, condições operacionais e custo enzimático, o que limita generalizações entre diferentes matérias-primas.

3.6 Pré-Tratamento Do Amido

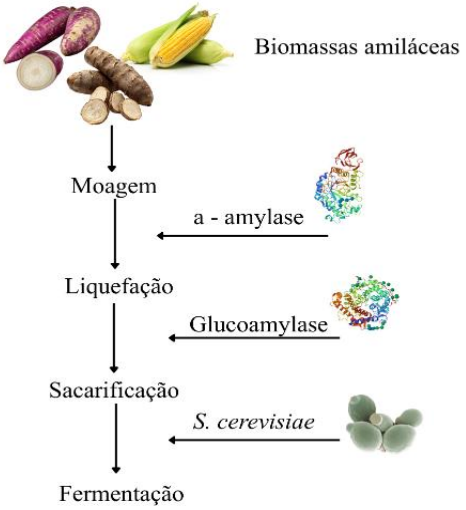
A utilização de biomassas amiláceas para produção de etanol necessita de um pré-tratamento cujo objetivo é disponibilizar o açúcar fermentescível para as leveduras (Ramos *et al*., 2022).

REMUNOM
ISSN 2178-6925

Received: 29/04/2026 - **Accepted:** 08/06/2026
Vol: 13.12
DOI: 10.66104/2jsg1d58
Pages: 1-48

Usualmente, as biomassas de origem amilácea, como o milho, mandioca e batata-doce passam por etapas de preparo (lavagem, corte e secagem), moagem, cozimento, liquefação, resfriamento, sacarificação, fermentação e destilação. Cada etapa é feita com as correções de pH, temperatura e tempo necessárias (Nogueira *et al*., 2023; Dong *et al*., 2024) conforme esquema geral do processo observado na figura 6.

Figura 6: Esquema geral do processamento de biomassas amiláceas através da hidrólise enzimática. Compreende as etapas principais de moagem, liquefação pela ação de α-amilase, sacarificação pela ação da glucoamilase, fermentação e produção de etanol.



Fonte: Elaborado pelos autores com base em Aleshin *et al.*, (1994); Fujimoto *et al*., (1998) via Protein Data Bank.; Nogueira *et al*., 2023; Dong *et al*., 2024.

No que se refere ao milho, o processamento inicia com a moagem cuja finalidade é a redução da granulometria da biomassa e, pode ser feita de duas formas distintas: via seca ou úmida. Na via seca os grãos são previamente triturados, misturados em água até formar uma pasta que é aquecida. Na via úmida, os grãos inteiros são imersos em água, misturados com ácido sulfúrico para separação do óleo, fibras, glúten e amido; ambas as metodologias geram coprodutos que podem ser utilizados como ração animal, entretanto a moagem por via úmida produz maior variedade de subprodutos como óleos e farinha de glúten (Jain; Kumar, 2024).

REMUNOM
ISSN 2178-6925

Received: 29/04/2026 - **Accepted:** 08/06/2026
Vol: 13.12
DOI: 10.66104/2jsg1d58
Pages: 1-48

Quando se usa mandioca como matéria-prima, antes de seguir para moagem, é necessária uma preparação prévia de ralagem, secagem e desidratação para evitar a degradação da biomassa (Komlaga *et al*., 2022).

Após a moagem, são feitos ajustes de pH e o material é fervido; em seguida são adicionadas α-amilases para gelatinização ou liquefação do material e liberação de unidades menores de açúcares como maltose e maltotriose; a pasta obtida durante a liquefação é então resfriada e acrescentada a enzima glucoamilase para sacarificação, o material obtido nesse processo é chamado de mosto e é rico em glicose. A fermentação do mosto acontece após a adição da levedura fermentadora, que converterá o açúcar livre em etanol e CO_2. Por fim, o mosto é destilado e o etanol é recuperado (Alcantara *et al*., 2020).

3.7 Hidrólise Do Amido

Após a moagem, a biomassa triturada é submetida à fervura e resfriamento para posteriormente ser utilizada no processo de hidrólise. Esses tratamentos são necessários para modificar a estrutura do amido possibilitando o uso de um catalisador. Na hidrólise, o amido é convertido a açúcares fermentescíveis que são utilizados no processo de fermentação pelas leveduras (Görgens *et al*., 2015). Os processos de hidrólise comumente usados são: hidrólise ácida e enzimática (Azhar *et al*., 2017).

3.8 Hidrólise Ácida

A hidrólise ácida é uma modificação química em que são empregadas soluções ácidas, normalmente, de ácido clorídrico (HCl) e ácido sulfúrico (H_2SO_4) (Hoover, 2000).

O processo inicial consiste na liquefação do amido através da diluição de 40% de amido em concentrações variadas de ácido, nesta etapa podem ser empregadas temperaturas entre 25 e 120°C que influenciarão diretamente o tempo do processo podendo variar entre horas ou dias. Após obtenção da viscosidade desejada é feita a neutralização da suspensão e, o amido liquefeito é recuperado por meio de lavagens, centrifugação e secagem. Durante a hidrólise ácida, fatores como

REMUNOM
ISSN 2178-6925

Received: 29/04/2026 - **Accepted:** 08/06/2026
Vol: 13.12
DOI: 10.66104/2jsg1d58
Pages: 1-48

viscosidade da pasta e consistência do gel influenciam diretamente nas condições aplicadas no processo (Hoover, 2000).

A cinética da hidrólise ácida possui duas fases: na primeira fase, mais rápida, a porção amorfa do grânulo é degradada e, na segunda fase, mais lenta, a porção cristalina é afetada; em ambas as fases a amilose e amilopectina são atingidas simultaneamente (Chen *et al*., 2017).

Os grânulos de amido tratados com ácidos sofrem alteração na estrutura granular e propriedades físico-químicas como viscosidade e textura do gel alterando suas características funcionais (Pinto *et al*., 2021).

O emprego da hidrólise ácida é antigo e, apesar de ser barato sua aplicação é limitada devido às questões ambientais (Din *et al*., 2017) pois a neutralização da hidrólise gera sais em volumes significativos que precisam ser removidos do xarope de açúcar pois afetam sua qualidade (Surmely *et al*., 2003).

3.9 Hidrólise Enzimática

A hidrólise enzimática do amido consiste no emprego de enzimas amilases em duas etapas: liquefação e sacarificação. Assim como na hidrólise ácida, a primeira etapa é a liquefação do amido. Na hidrólise enzimática, o amido é liquefeito com auxílio de enzimas α-amilases termofílicas que atuam sobre a biomassa em temperaturas próximas de 90°C e geram principalmente maltodextrinas e oligossacarídeos de glicose. Para a etapa de sacarificação, adiciona-se a enzima glucoamilase, que atua nas extremidades não redutoras das dextrinas, em temperaturas em torno de 60 °C, liberando glicose, a qual é posteriormente utilizada pelas leveduras durante a fermentação (Ramos *et al*., 2022; Silva *et al*., 2022).

Esse ajuste de temperatura para atender as atividades específicas de cada enzima durante o processamento do amido é desvantajoso, por este motivo pesquisadores têm buscado otimizar enzimas termoestáveis que possibilitem a ação em paralelo de α-amilases e glucoamilases ou enzimas amilases que atacam amido cru conhecidas como RSDE (Raw Starch Degrading Enzymes) (Wong *et al*., 2007; Myat; Ryu, 2014; Slavic *et al*., 2023; Kholikov *et al*., 2025).

REMUNOM
ISSN 2178-6925

Received: 29/04/2026 - **Accepted:** 08/06/2026
Vol: 13.12
DOI: 10.66104/2jsg1d58
Pages: 1-48

3.10 Enzimas Amilolíticas: Alfa Amilase E Glucoamilase

As α-amilases (E.C. 3.2.1.1) são endoamilases que catalisam a hidrólise de α-1,4 ligações glicosídicas internas do amido gerando produtos como dextrinas, glicose e maltose, também são conhecidas α-1,4-glucano-4-glucanohidrolases (Souza; Magalhães, 2010; Movahedpour *et al*., 2022) e, são acrescentadas para produção de etanol na etapa de liquefação.

As α-amilases, majoritariamente, pertencem a principal família de glicosil hidrolases (GH) 13 e, em sua maioria possuem três domínios distintos A, B e C como estrutura terciária (Božić *et al*., 2020; Farias *et al*., 2021).

É uma metaloenzima e sua atividade é dependente da presença de íons de cálcio (Ca^{2+}) (Tiwari *et al*., 2015). A massa molecular das α-amilases oriundas de microrganismos pode variar de 10 a 210 kDa, sendo relatado 10 kDa para *Bacillus caldolyticus* e 210 kDa para *Chloroflexus auranticus* (Gupta *et al*., 2003).

Em sua maioria, as enzimas α-amilases industriais são oriundas de bactérias do gênero *Bacillus* com destaque para *B. licheniformis*, *B. subtilis* e *B. amyloliquefaciens,* estas duas últimas possuem status GRAS (Farias *et al*., 2021).

O emprego de enzimas de diferentes microrganismos em processos industriais requer atenção às características individuais das enzimas como pH, temperatura e possíveis inibidores pois estas propriedades interferem na aplicação na indústria.

Para as α-amilases produzidas por *Bacillus*, a faixa de pH relatada na literatura pode variar de 4 a 10 e atuação em temperaturas variando de 37°C a 135°C (Tiwari *et al*., 2015; Farias *et al*., 2021).

Na etapa de sacarificação, são usadas enzimas glucoamilases (E.C. 3.2.1.3) exoamilases que hidrolisam ligações glicosídicas α-1,4 partindo de extremidades não-redutoras e, lentamente nas ligações α-1,6 da molécula do amido, também chamadas de glucano 1,4-α-glucosidase ou amiloglucosidase (Norouzian *et al*., 2006).

Pertencente à família das glicosil-hidrolases (GH) 15 são enzimas compostas, em sua maioria, por três estruturas em sua forma nativa: domínio catalítico (DC) com

REMUNOM
ISSN 2178-6925

Received: 29/04/2026 - **Accepted:** 08/06/2026
Vol: 13.12
DOI: 10.66104/2jsg1d58
Pages: 1-48

formato barril α/α_6, domínio de ligação ao amido (DLS) e um espaçador (L) glicosilado (Vaidya *et al*., 2015; Polizeli *et al*., 2016; Wayllace *et al*., 2021).

Naturalmente em *Aspergillus awamori*, apresenta duas isoformas: glucoamilase 1 – é a forma completa com as três estruturas nativas funcionais e possui 616 aminoácidos com aproximadamente 75 kDa; glucoamilase 2 – é a isoforma que não tem o domínio de ligação ao substrato e apresenta 514 aminoácidos com aproximadamente 54 kDa (Pavezzi, 2006; Carmo, 2010; Pavezzi, 2011).

Diferentemente da α-amilase, a glucoamilase comumente aplicada em escalas industriais pertence aos fungos filamentosos *A. niger, A. awamori* e *Rhizopus oryzae* (Pavezzi *et al*., 2008). A aplicação de suas enzimas é frequentemente relatada em ambientes ácidos com pH 3.5 a 5 e, em alguns casos pH 6; com atuação em temperaturas variando de 50 – 70°C (Das *et al*., 2024).

O processo de hidrólise enzimática é amplamente utilizado em plantas produtivas de bioetanol uma vez que geram coprodutos de alto valor agregado durante todo o processo produtivo como grão seco de destilaria - DDG, grão úmido de destilaria – WDG, grão seco de destilaria com solúveis – DDGS e grão úmido de destilaria com solúveis – WDGS, estes coprodutos são conhecidos por apresentarem alto valor nutricional pois possuem proteínas, fibras e lipídeos usados na alimentação animal (Vieira *et al*., 2021).

3.11 Fermentação Etanólica

A fermentação etanólica é o processo químico em que o açúcar disponível é convertido em etanol e CO_2 pela ação de microrganismos (Igwebuike *et al*., 2024). O principal microrganismo utilizado na fermentação é a *Saccharomyces cerevisiae* (Coutinho *et al*., 2020).

Saccharomyces cerevisiae é uma levedura ascomiceta unicelular encontrada em diversos nichos especialmente associados a ambientes fermentativos, largamente utilizada em indústrias de bebidas e panificação e, na biotecnologia por ser um microrganismo GRAS (*generally regarded as safe*) possibilitando seu uso em grande escala. Uma das principais aplicações para *S. cerevisiae* no âmbito dos

REMUNOM
ISSN 2178-6925

Received: 29/04/2026 - **Accepted:** 08/06/2026
Vol: 13.12
DOI: 10.66104/2jsg1d58
Pages: 1-48

processos fermentativos etanólicos, é na indústria de bioetanol de primeira geração (1G) proveniente da cana-de-açúcar e de produtos amiláceos como milho, batata-doce e mandioca (Suh *et al*., 2006; Dujon *et al*., 2017; Lian *et al*., 2018; Turner *et al*., 2018; Almeida; Nascimento, 2021).

Naturalmente, *S. cerevisiae* é uma excelente fermentadora e, por este motivo, é a levedura usada nas etapas de fermentação etanólica. Apesar de não produzir enzimas amilolíticas, através de técnicas de engenharia genética é possível manipular *S. cerevisiae* para que ela seja capaz de produzir amilases e fermentar de forma simultânea ou separada para melhorar o rendimento do processo fermentativo (Moraes *et al*., 1995; Görgens *et al*., 2015).

A fermentação é a etapa final na conversão do amido à etanol. Nos processos industriais podem ser empregados três sistemas distintos: hidrólise e fermentação separadas (SHF), sacarificação e fermentação simultâneas (SSF), e o bioprocesso consolidado (CBP) (Devi *et al*., 2023) que resultarão na fermentação para obtenção de etanol conforme observado no quadro 3.

No sistema hidrólise e fermentação separadas (SHF), as etapas de hidrólise e de fermentação acontecem separadamente em reatores diferentes mantendo o controle de pH e temperatura (Afezdi; Parakulsuksatid, 2023). É uma metodologia clássica amplamente empregada, sendo vantajosa em relação a otimização das temperaturas de trabalho durante a hidrólise sem afetar o microrganismo durante a fermentação (Santos *et al*., 2010). Entretanto, para esse sistema são necessários equipamentos adicionais, pois cada etapa é realizada separadamente (Singh *et al*., 2022) em temperaturas e pH diferentes o que pode representar um alto custo no processo de produção.

Para sacarificação e fermentação simultâneas (SSF) toda a operação ocorre simultaneamente em único biorreator com temperatura constante, a glicose liberada é imediatamente consumida e convertida a etanol pelo microrganismo (Sewsynker-Sukai; Kana, 2018). Neste processo, as principais vantagens são redução de custo com equipamentos pois é usado reator único e maior rendimento de etanol quando comparado ao sistema SHF (Aydemir *et al*., 2014).

REMUNOM
ISSN 2178-6925

Received: 29/04/2026 - **Accepted:** 08/06/2026
Vol: 13.12
DOI: 10.66104/2jsg1d58
Pages: 1-48

No esquema de bioprocesso consolidado (CBP) são utilizados microrganismos geneticamente engenheirados para realizar todo o processo: produção das enzimas pelos microrganismos, sacarificação e fermentação simultâneas em reator único com temperatura branda (Li *et al*., 2022). Essa abordagem está em desenvolvimento tanto para o etanol de primeira geração (1G) quanto de segunda geração (2G) e visa a redução de custos operacionais diminuindo a necessidade de enzimas adicionais no processo (Tanimura *et al*., 2015; Malherbe *et al*., 2023). No entanto, é frequentemente relatada a dificuldade de obtenção de uma linhagem modificada com alto número de cópias recombinantes no genoma indicando a necessidade de otimização para o uso em ambientes industriais (Cripwell *et al*., 2020; Malherbe *et al*., 2023; Wang *et al*., 2024).

Nesse sentido, a biotecnologia tem sido aplicada com o intuito de sanar esse obstáculo. Ao longo dos anos, os pesquisadores têm desenvolvido tecnologias que otimizam os processos através de modificações genéticas de microrganismos existentes bem como aprimoramento dos métodos fermentativos.

Assim, avanços em engenharia de leveduras e desenvolvimento enzimático representam importante fronteira tecnológica, mas sua transposição para o setor produtivo exige avaliação crítica da estabilidade, robustez e viabilidade econômica desses sistemas em condições industriais.

Quadro 3 - Métodos empregados para obtenção de etanol apresentando as principais vantagens e desvantagens de cada processo fermentativo

Sistema	Vantagens	Desvantagens
SHF	Otimização de temperatura de trabalho	Maquinário adicional gerando alto custo produtivo
SSF	Redução de custo com maquinário	Dificuldade na padronização de temperatura e pH no processo
CBP	Redução de custo com maquinário e enzimas	Linhagem recombinante com baixo número de cópias; Tecnologia em desenvolvimento.

Fonte: Elaborado pelos autores com base em Olofsson *et al*., (2008); Santos *et al*., (2010); Aydemir *et al*., (2014); Tanimura *et al*., (2015); Cripwell *et al*., (2020); Singh *et al*., (2022); Wang *et al*., (2024).

REMUNOM
ISSN 2178-6925

Received: 29/04/2026 - **Accepted:** 08/06/2026
Vol: 13.12
DOI: 10.66104/2jsg1d58
Pages: 1-48

De forma comparativa, observa-se que os processos SHF, SSF e CBP apresentam vantagens e limitações que devem ser analisadas à luz da viabilidade industrial do etanol amiláceo. O SHF se destaca pelo maior controle individual das etapas de hidrólise e fermentação, permitindo a operação em condições mais próximas do ótimo para enzimas e microrganismos, porém tende a demandar maior tempo de processo, mais equipamentos e maior custo operacional. O SSF, por sua vez, reduz etapas e pode minimizar a inibição por açúcares, tornando o processo mais integrado e potencialmente mais econômico, embora imponha um compromisso entre as condições ideais de sacarificação e fermentação. Já o CBP representa uma alternativa tecnologicamente mais avançada, ao propor a consolidação das etapas em um único sistema biológico, mas sua aplicação em escala industrial ainda é limitada por desafios relacionados à engenharia metabólica, estabilidade dos microrganismos e robustez do processo. Assim, embora o CBP seja frequentemente apontado como uma perspectiva promissora para o futuro, SHF e SSF ainda se apresentam como rotas mais maduras, sendo a escolha entre elas dependente do equilíbrio entre eficiência, custo, complexidade operacional e nível de desenvolvimento tecnológico disponível.

3.12 Cenário Da Produção De Etanol Do Amido No Brasil

A produção de etanol a partir de amido no Brasil, tem crescido cada vez mais impulsionada pela demanda energética, pela necessidade de redução de gases causadores do efeito estufa (GEE) e por políticas públicas como RenovaBio (Brasil, 2024b).

No Brasil, o milho pode ser cultivado em até três safras: primeira safra, também chamada de safra normal ou safra de verão acontece no período chuvoso, de outubro a dezembro; a segunda safra “antiga safrinha” ocorre nos meses de janeiro a março, geralmente após a safra da soja e a terceira safra, de setembro a dezembro, cuja produção acontece somente nas regiões Nordeste e Norte (Brasil, 2024a; Brasil, 2024c; Madeiro *et al*., 2024).

De acordo com dados da Companhia Nacional de Abastecimento (Conab), na primeira safra de milho 2024/2025 foram cultivados 3.772,6 mil hectares, redução de

REMUNOM
ISSN 2178-6925

Received: 29/04/2026 - **Accepted:** 08/06/2026
Vol: 13.12
DOI: 10.66104/2jsg1d58
Pages: 1-48

5% de área de plantio comparada a safra 2023/2024, entretanto a produção foi 8,6% superior ao ciclo anterior um total de 24.935,8 mil toneladas de milho. Na segunda safra, comparados ao ciclo anterior houve aumento de 5,3% de área plantada, totalizando 17.305 mil hectares com produção estimada em 109.567,2 mil toneladas de milho. Para a terceira safra, era esperada a produção de 2,5 milhões de toneladas de milho, entretanto houve aumento na produtividade e a produção foi de 2.993,6 milhões de toneladas (Conab, 2025a; Conab, 2025b; Conab, 2026).

A segunda safra do milho tem sido cada vez mais produtiva, superando as estimativas em 2025 a safra chegou a 113,2 milhões de toneladas de milho. Esse crescimento é liderado pelo estado do Mato Grosso que na segunda safra produziu 53,54 milhões de toneladas de milho, 49% da produção total da segunda safra no País, outros estados como Goiás, São Paulo, Distrito Federal, Maranhão, Bahia, Pará, Tocantins e Rondônia também tiveram aumento em sua produtividade (Conab, 2025a; Conab, 2025b).

Os investimentos crescentes no setor são fruto do aumento na exportação e a crescente demanda interna, que em 2023 chegou a 13,3 milhões de toneladas de milho destinados à produção de 5,8 bilhões de litros de etanol (Brasil, 2024a).

Segundo a Empresa de Pesquisa Energética (EPE), no período de 2025-2034 o Brasil estima investir R$ 17 bilhões na construção de plantas de etanol de milho e projeta aumento produtivo de 6,9 bilhões de litros, alcançando em 2034 14,3 bilhões de litros de etanol provenientes do milho (Brasil, 2024d).

Atualmente existem três modelos de usinas em funcionamento no Brasil, *full*, *flex e flex full.* As usinas *full* realizam exclusivamente o processamento do milho para produzir etanol como a Inpasa presente principalmente na região Centro-Oeste do País; as usinas *flex* geralmente processam cana-de-açúcar e na entressafra processam milho para produção de etanol; e a possibilidade de produção em paralelo em usinas *flex full* (Brasil, 2024d; INPASA, 2026).

O crescente aumento na demanda e os investimentos no setor sucroenergético fomentaram a busca por novas tecnologias que aumentem a produtividade brasileira, a biotecnologia tem buscado o melhoramento genético dos cultivares de milho adaptados as condições climáticas de diferentes regiões e a

REMUNOM
ISSN 2178-6925

Received: 29/04/2026 - **Accepted:** 08/06/2026
Vol: 13.12
DOI: 10.66104/2jsg1d58
Pages: 1-48

utilização de microrganismos engenheirados no processo produtivo, notadamente a levedura *Saccharomyces cerevisiae* (Brasil, 2024c; Devi *et al*., 2023).

No cenário de produção de etanol proveniente de culturas amiláceas, o Brasil tem a mandioca e batata-doce como culturas emergentes de grande importância socioeconômica e cultural, utilizadas principalmente por pequenos produtores, são alternativas viáveis e fundamentais que podem compor a matriz energética brasileira.

No contexto mundial, o Brasil é um dos maiores produtores de mandioca, sendo o maior produtor das Américas (Sergipe, 2025). O estado do Pará, na região Norte, se destaca como o maior produtor de mandioca com 21% da produção nacional, seguido do Paraná com 20,7% da produção, São Paulo e Mato Grosso do Sul, respectivamente, com 7,5% e 6,8% de participação (IBGE, 2025).

Entre os anos 2010 e 2013 foi realizada uma pesquisa intitulada Geração de energia elétrica com etanol de Mandioca na Amazônia, neste estudo foi avaliada a viabilidade técnica e econômica da obtenção de etanol na região Norte do Brasil. Os pesquisadores concluíram que apesar da falta de organização na região e dificuldades logísticas, a utilização da mandioca para produção de etanol era factível desde que houvesse o desenvolvimento dos setores envolvidos na cadeia produtiva da mandioca o que oportunizaria o crescimento econômico regional contribuindo para a preservação da Amazônia (Souza *et al*., 2013).

Apesar do avanço em pesquisas no uso de mandioca para produção de etanol, os incentivos governamentais ainda são irrisórios para o desenvolvimento em larga escala deste tipo de biomassa.

No âmbito produtivo da batata-doce, o Brasil expandiu a área plantada para 53,6% em 2023 atingindo 61 mil hectares com colheita de 925,6 mil toneladas neste período com destaque para os estados do Ceará, São Paulo e Rio Grande do Sul (Portal Do Agronegócio, 2025).

O panorama da batata-doce no Brasil é similar à mandioca, ainda que em pequena escala, a produção de etanol a partir de batata-doce se mostra viável.

Em 2025, uma usina situada em Presidente Prudente, interior de São Paulo, anunciou que começaria a utilizar o excedente da produção de batata-doce, bem

REMUNOM
ISSN 2178-6925

Received: 29/04/2026 - **Accepted:** 08/06/2026
Vol: 13.12
DOI: 10.66104/2jsg1d58
Pages: 1-48

como, os tubérculos que não atendem aos padrões de consumo humano para produção de etanol (BAND, 2025).

Em vista da diversificação da matriz de biocombustíveis, o trigo e o sorgo têm trilhado seus primeiros passos na produção etanol. Em janeiro de 2026, entrou em operação a primeira usina de etanol a partir do trigo no Brasil, localizada no Rio Grande do Sul, município de Santiago, com capacidade produtiva de 43 mil litros de etanol/dia e possibilidade de uso de outros cereais além do trigo na produção (Governo do Rio Grande do Sul, 2026).

A produção de etanol a partir do sorgo, assim como do trigo, tem sido empregada de forma pioneira por uma cooperativa localizada no estado de Alagoas. Após a fase de testes iniciada em 2023, a estimativa para 2026 é que sejam produzidos 35 milhões de litros de etanol a partir do sorgo aliado ao milho (Melloni, 2025; Jornal Cana, 2025).

Embora o crescimento do etanol amiláceo represente avanço na diversificação da matriz energética, sua distribuição territorial evidencia que tal expansão permanece condicionada à infraestrutura agroindustrial e logística já consolidada, o que limita sua replicabilidade imediata em diferentes regiões do país.

4. Desafios e Oportunidades na Diversificação da Matriz Energética Brasileira: O Papel das Biomassas Amiláceas

O cenário mundial de incertezas econômicas, mudanças climáticas e busca por energias sustentáveis tem direcionado os esforços de vários países para o etanol. Nesse sentido, o Brasil se destaca como um dos principais atores no desenvolvimento de tecnologias que visam a diversificação de sua matriz energética de forma sustentável.

A sustentabilidade do etanol amiláceo não deve ser presumida de forma homogênea, mas analisada à luz das especificidades agronômicas, logísticas e industriais de cada matéria-prima, bem como de sua inserção concreta nas políticas de descarbonização.

No quadro 4 estão listados os principais produtores mundiais de etanol e as matérias-primas utilizadas. Com exceção do Brasil, os países utilizam

REMUNOM
ISSN 2178-6925

Received: 29/04/2026 - **Accepted:** 08/06/2026
Vol: 13.12
DOI: 10.66104/2jsg1d58
Pages: 1-48

exclusivamente fontes amiláceas para produção de etanol.

Quadro 4: Principais produtores de etanol no mundo a partir de biomassas amiláceas.

Países	**Biomassas[1]**	**Produção de etanol (milhões de litros)[1]**	**Legislação vigente**
Estados Unidos	Milho, Trigo, Sorgo e Batata	58.1	Programa Padrão de Combustíveis Renováveis
Brasil	Cana-de-açúcar, Milho e Mandioca	4.1[2]	Política Nacional de Biocombustíveis (RenovaBio)
China	Milho, Trigo, Sorgo, Arroz, Batata-doce	3.4	Programa de Biocombustíveis Chinês
Tailândia	Mandioca	1.4	Plano Nacional de Energia

Fonte: Elaborado pelos autores com base em Li *et al*., (2022); Vidal (2024); Renewable Fuels Association (2026).

[1]- Os dados são referentes ao ano de 2022;
[2]- Refere – se a produção de etanol de milho.

A comparação internacional deve considerar que o desempenho do etanol amiláceo resulta não apenas da disponibilidade de matéria-prima, mas também do grau de integração entre política energética, infraestrutura logística, mercado de coprodutos e ambiente regulatório.

O quadro 4 mostra a dominância dos Estados Unidos no cenário mundial da produção de etanol de biomassas amiláceas em comparação ao Brasil e aos demais países listados. Esse fato se deve principalmente à política americana de estabelecimento de metas específicas e crescentes em relação aos combustíveis renováveis.

Com base no quadro acima o milho e o trigo são as principais matérias-primas amiláceas usadas para produção de etanol, entretanto são culturas muito importantes para alimentação humana. Para reduzir essa tensão, a diversificação da matriz energética é uma estratégia que minimiza a competição entre alimentos e os biocombustíveis (Li *et al*., (2022).

Em relação a diversidade das biomassas amiláceas, China e Estados Unidos destacam-se apresentando matriz energética heterogênea demonstrando o potencial tecnológico, produtivo e estratégico dessas biomassas. No cenário

REMUNOM
ISSN 2178-6925

Received: 29/04/2026 - **Accepted:** 08/06/2026
Vol: 13.12
DOI: 10.66104/2jsg1d58
Pages: 1-48

brasileiro, o milho é a principal estratégia adotada para diversificação da matriz energética. No entanto, outras biomassas amiláceas como o trigo e sorgo estão ingressando em escala piloto industrial evidenciando o interesse do País em reduzir sua dependência da cana-de-açúcar.

Nesse contexto, a Tailândia aparece na contramão. A carência de investimentos segundo Vidal (2024) é consequência da redução dos subsídios governamentais ao setor de biocombustíveis (Vidal, 2024).

Apesar da pluralidade de biomassas amiláceas para produção de etanol e da implementação do Programa de Biocombustíveis Chinês, a China é uma das principais consumidoras mundiais de combustíveis fósseis como carvão.

Diante dessa realidade, a preocupação mundial frente ao uso dos combustíveis fósseis tem crescido e motivado investimentos estratégicos no setor de biocombustíveis promovendo a criação de políticas públicas que assegurem sustentabilidade e competitividade em comparação aos tradicionais combustíveis fósseis.

Sob essa ótica, em 2017 no Brasil foi instituída a Lei n° 13.576 intitulada Política Nacional de Biocombustíveis – RenovaBio, criada no âmbito do Acordo de Paris. Está fundamentada na segurança e desenvolvimento nacional, inclusão econômica e social, livre concorrência no setor dos biocombustíveis e preservação ambiental. Estes princípios estão divididos em quatro eixos estratégicos: regras de comercialização, papel dos combustíveis na matriz, novos combustíveis e sustentabilidade (Brasil, 2024e).

Com o RenovaBio, o Brasil institucionalizou a preocupação com as mudanças climáticas adotando medidas práticas para redução dos gases do efeito estufa (GEE) beneficiando a expansão dos biocombustíveis no País, essa abordagem permite que sejam desenvolvidas novas tecnologias que visam o cumprimento das metas. Nesse contexto, são observados crescentes investimentos em culturas amiláceas como o sorgo e o trigo e o aumento na mistura obrigatória do etanol na gasolina.

No que tange a sustentabilidade, é evidente que o Brasil tem buscado honrar o compromisso adotado no Acordo de Paris. Entretanto, é necessário que todos os

REMUNOM
ISSN 2178-6925

Received: 29/04/2026 - **Accepted:** 08/06/2026
Vol: 13.12
DOI: 10.66104/2jsg1d58
Pages: 1-48

atores envolvidos nessa cadeia exerçam seus papéis de forma assertiva para que o País possa atingir as metas propostas.

5. Considerações Finais

Desde o surgimento do Proálcool em 1975, o País tem empregado esforços para melhorar o rendimento de etanol em seus processos estabelecidos, caso da cana-de-açúcar, bem como instituir outras culturas qualificadas, por exemplo, as amiláceas como milho, mandioca e batata-doce. Assim como utilizar culturas menos comuns no País como trigo e o sorgo para produção de etanol principalmente em períodos de entressafras.

Os dados atuais apontam a preferência de investimentos e expansão do milho como biomassa para produção de etanol pois além do País ser um dos maiores produtores mundiais desse grão, existe a possibilidade dessa cultura ser trabalhada juntamente com a cana-de-açúcar. Sendo assim, é visível que essa cultura amilácea tem obtido autonomia e se tornou uma tecnologia estabelecida.

Mesmo com pouco investimento destinado às outras culturas amiláceas, a comunidade científica tem pesquisado estratégias para o desenvolvimento de tecnologias que viabilizem a fabricação de etanol utilizando matérias-primas alternativas como mandioca e batata-doce, acessíveis aos pequenos produtores.

Nesse sentido, a sustentabilidade do etanol amiláceo não deve ser presumida de forma homogênea, mas analisada à luz das especificidades agronômicas, logísticas e industriais de cada matéria-prima, bem como de sua inserção concreta nas políticas de descarbonização.

Em síntese, o panorama do etanol amiláceo no Brasil evidencia um setor em expansão, porém marcado por assimetrias tecnológicas, logísticas e territoriais. Embora diferentes biomassas apresentem potencial para produção de etanol, o milho se destaca atualmente como a rota mais consolidada, não apenas por suas características composicionais, mas pela convergência entre escala agrícola, facilidade de armazenamento, aproveitamento de coprodutos e adaptação do parque industrial. Em contrapartida, matérias-primas como mandioca, batata-doce, sorgo e trigo permanecem como alternativas relevantes, mas sua ampliação depende da

REMUNOM
ISSN 2178-6925

Received: 29/04/2026 - **Accepted:** 08/06/2026
Vol: 13.12
DOI: 10.66104/2jsg1d58
Pages: 1-48

superação de entraves relacionados à logística, estabilidade de oferta, viabilidade econômica regional e maturidade tecnológica dos processos. Assim, a consolidação do etanol amiláceo na matriz energética brasileira dependerá menos do reconhecimento de seu potencial teórico e mais da capacidade de articular inovação biotecnológica, planejamento territorial, políticas públicas e modelos industriais compatíveis com a diversidade produtiva do País.

Além disso, ressalta-se que a compreensão mais precisa do papel de cada biomassa no cenário nacional requer estudos futuros que integrem avaliação técnico-econômica, análise de ciclo de vida, desempenho industrial em escala comercial e especificidades regionais da cadeia produtiva.

Agradecimentos: O presente trabalho foi realizado com apoio financeiro da Fundação de Amparo à Pesquisa do Estado do Amazonas (FAPEAM) – Processo n° 006/2020 e da Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior - Brasil (CAPES) – Código de Financiamento 001.

Declaração de conflito de interesse: Os autores declaram não haver qualquer conflito de interesses em relação à publicação deste artigo científico.

Referências

AFEZDI, A.E.K.; PARAKULSUKSATID, P. Recent advances in process modifications of simultaneous saccharification and fermentation (SSF) of lignocellulosic biomass for bioethanol production. **Biocatalysis and Agricultural Biotechnology**, v. 54, 2023. DOI: https://doi.org/10.1016/j.bcab.2023.102961 .

ALCANTARA, G.U.; NOGUEIRA, L.C.; STRINGACI, L.A.; MOYA, S.M.; COSTA, G.H.G. Brazilian “flex mills”: Ethanol from sugarcane molasses and corn mash. **BioEnergy Research**., v. 13, p. 229-236, 2020. DOI: https://doi.org/10.1007/s12155-019-10052-3

ALESHIN, A.E.; HOFFMAN, C.; FIRSOV, L.M.; HONZATKO, R.B. Refined crystal structures of glucoamylase from *Aspergillus awamori* var. x100. PDB ID: 1GLM. **RSCB Protein Data Bank**, 1994. Disponível em: https://www.rcsb.org/structure/1GLM . Acesso em: 7 jan. 2026.

REMUNOM
ISSN 2178-6925

Received: 29/04/2026 - **Accepted:** 08/06/2026
Vol: 13.12
DOI: 10.66104/2jsg1d58
Pages: 1-48

ALEXANDRE, S. A., GRANJEIRO, P. A., DA SILVA, J. A., GONÇALVES, D. B. Renewable and Sustainable Biorefinery: A Patent Review**. Recent patents on biotechnology**, v. 20, n.1, p. 49–67, 2026. DOI: http://dx.doi.org/10.2174/0118722083343982250312192000

ALMEIDA, C.S.; NASCIMENTO, D.D. Revisão: leveduras utilizadas na produção de etanol de segunda geração. **Bioenergia em revista: diálogos**, v. 11, n. 1, p. 99-119, 2021.

ANDRADE JÚNIOR, V.C.; VIANA, D.J.S.; PINTO, N.A.V.D.; RIBEIRO, K.G.; PEREIRA, R.C.; NEIVA, I.P.; AZEVEDO, A.M.; ANDRADE, P.C.R. Características produtivas e qualitativas de ramas e raízes de batata-doce. **Horticultura Brasileira**, v. 30, n. 4, p. 584-589, 2012. DOI: https://doi.org/10.1590/S0102-05362012000400004 .

APRIYANTO, A.; COMPART, J.; FETTKE, J. A review of starch, a unique biopolymer – Structure, metabolism and planta modifications. **Plant Science**, n. 318, 2022. DOI: https://doi.org/10.1016/j.plantsci.2022.111223

AYDEMIR, E.; DEMIRCI, S.; DOGAN, A.; AYTEKIN, A.O.; SAHIN, F. Genetic modifications of *Saccharomyces cerevisiae* for ethanol production from starch fermentation: A review. **Journal of Bioprocessing & Biotecniques**, v. 4, n. 7, p. 1-8, 2014. DOI: https://doi.org/10.4172/2155-9821.1000180

AZHAR, S.H.M.; ABDULLA, R.; JAMBO, S.A.; MARBAWI, H.; GANSAU, J.A.; FAIK, A.A.M.; RODRIGUES, K.F. Yeasts in sustainable bioethanol production: A review. **Biochemistry and Biophysics Reports**, v. 10, p. 52–61, 2017. DOI: https://doi.org/10.1016/j.bbrep.2017.03.003 .

BAND. Usina usa batata doce para fabricar combustível e ração em SP. **AGROBAND**, 2025. Disponível em: https://www.band.com.br/agro/noticias/usina-passa-a-usar-batata-doce-para-fabricacao-de-combustivel-e-racao-animal-em-sp-202511270832 . Acesso em 3 jan. 2026.

BARCELOS, C.A.; MAEDA, R.N.; BETANCUR, G.J.V.; PEREIRA JR. N. Ethanol production from Sorghum grains [*Sorghum bicolor* (L.) Moench]: evaluation of the enzymatic hydrolysis and the hydrolysate fermentability. **Brazilian Journal of Chemical Engineering**, v. 28, n. 4, p. 597-604, 2011. DOI: https://doi.org/10.1590/S0104-66322011000400005 .

BOŽIĆ, N.; ROZEBOOM, H.J.; LONČAR, N.; SLAVIĆ, M.S.; JANSSEN, D.B.; VUJČIĆ, Z. Characterization of the starch surface binding site of *Bacillus*

REMUNOM
ISSN 2178-6925

Received: 29/04/2026 - **Accepted:** 08/06/2026
Vol: 13.12
DOI: 10.66104/2jsg1d58
Pages: 1-48

paralicheniformis α-amylase**. International Journal of Biological Macromolecules**, v. 165, n. 1, p. 1529-1539, 2020. DOI: http://dx.doi.org/10.1016/j.ijbiomac.2020.10.025

BRASIL. Ministério de Minas e Energia. Empresa de Pesquisa Energética. **Cadernos de energia EPE: perspectivas para o etanol no Brasil**. Brasília: MME/EPE, 2008. Disponível em: https://www.epe.gov.br/sites-pt/publicacoes-dados-abertos/publicacoes/PublicacoesArquivos/publicacao-250/topico-300/Cadernos%20de%20Energia%20-%20Perspectiva%20para%20o%20etanol%20no%20Brasil%5B1%5D.pdf .Acesso em: 17 dez. 2025.

BRASIL. Ministério de Minas e Energia. Empresa de Pesquisa Energética. **Nota técnica: Análise de conjuntura de biocombustíveis – Ano 2023**. Brasília:MME/EPE, 2024a. Disponível em: https://www.epe.gov.br/pt/publicacoes-dados-abertos/publicacoes/analise-de-conjuntura-dos-biocombustiveis-2023 . Acesso em: 17 dez. 2025.

BRASIL. Ministério de Minas e Energia. Empresa de Pesquisa Energética. **Plano decenal de expansão de energia 2034**. Brasília:MME/EPE, 2024b. Disponível em: https://www.epe.gov.br/pt/publicacoes-dados-abertos/publicacoes/plano-decenal-de-expansao-de-energia-2034 . Acesso em 17 dez. 2025.

BRASIL. Ministério da Agricultura e Pecuária. Secretária de Comércio e Relações Internacionais. **Exportações brasileiras – milho**. Brasília: MAPA, 2024c. Disponível em: https://www.gov.br/agricultura/pt-br/assuntos/relacoes-internacionais/documentos/Milho.pdf . Acesso em: 18 dez. 2025.

BRASIL. Ministério de Minas e Energia. Empresa de Pesquisa Energética. **Nota técnica: investimentos e custos operacionais e de manutenção no setor de biocombustíveis: 2025 – 2034**. Brasília: MME/EPE, 2024d. Disponível em: https://www.epe.gov.br/pt/imprensa/noticias/epe-publica-nota-tecnica-investimentos-e-custos-operacionais-e-de-manutencao-no-setor-de-biocombustiveis-2025-2034- . Acesso em: 10 jan. 2026.

BRASIL. Ministério de Minas e Energia. Empresa de Pesquisa Energética. **Política Nacional de Biocombustíveis (RenovaBio)**. Brasília: MME/EPE, 2024e. Disponível em: https://www.epe.gov.br/pt/publicacoes-dados-abertos/publicacoes/renovabio#collapse-750 . Acesso em: 20 maio 2026.

BERTOFT, E.; ANNOR, G.A.; SHEN, X.; RUMPAGAPORN, P.; SEETHARAMAN, K.; HAMAKER, B.R. Small differences in amylopectin fine structure may explain large functional differences of starch. **Carbohydrate Polymers**, v. 140, 2016. DOI: https://doi.org/10.1016/j.carbpol.2015.12.025 .

REMUNOM
ISSN 2178-6925

Received: 29/04/2026 - **Accepted:** 08/06/2026
Vol: 13.12
DOI: 10.66104/2jsg1d58
Pages: 1-48

CAMARGO, L.K.P.; RESENDE, J.T.V.; MÓGOR, A.F.; CAMARGO, C.K.; KURCHAIDT, S.M. Uso de índice de seleção na identificação de genótipos de batata doce com diferentes aptidões. **Horticultura Brasileira**, n. 34, v. 4, 2016. DOI: https://doi.org/10.1590/S0102-053620160410 .

CARMO, E.J. **Clonagem e expressão regulada do cDNA da glicoamilase de *Aspergillus awamori* em** *Pichia pastoris*. 2010. Dissertação (Mestrado em Genética, Conservação e Biologia Evolutiva) - Instituto Nacional de Pesquisas da Amazônia -INPA, Manaus, 2010.

CASTRO, M.H.M.; SCHWARTZMAN, S. **Tecnologia para indústria: a história do Instituto Nacional de Tecnologia**. Rio de Janeiro: Centro Edelstein de Pesquisas Sociais, 2008. DOI: https://doi.org/10.7476/9788599662540

CAVALCANTE, L.T.C.; OLIVEIRA, A.A.S. Métodos de revisão bibliográfica nos estudos científicos. **Psicologia em Revista**, v. 26, n. 1, p. 83-102, 2020. DOI: https://doi.org/10.5752/P.1678-9563.2020v26n1p82-100 .

CHEN, P.; XIE, F.; ZHAO, L. QIAO, Q.; LIU, X. Effect of acid hydrolysis on the multi-scale structure change of starch with different amylose content. **Food Hydrocolloids**, n. 69, p. 359-368, 2017. DOI: https://doi.org/10.1016/j.foodhyd.2017.03.003 .

COÊLHO, J.D. Milho. **Caderno Setorial ETENE**, Fortaleza, v. 10, n. 379, 2025. Disponível em: https://www.bnb.gov.br/revista/cse/article/view/3165 . Acesso em: 15 set. 2025.

COMPANHIA NACIONAL DE ABASTECIMENTO (CONAB). **Acompanhamento da safra brasileira de grãos**: safra 2024/2025. Brasília, DF: Conab, v. 12, n. 11, ago. 2025a. Disponível em: https://www.gov.br/conab/pt-br/atuacao/informacoes-agropecuarias/safras/safra-de-graos/boletim-da-safra-de-graos/11o-levantamento-safra-2024-25/e-book_boletim-de-safras-11o-levantamento-2025.pdf . Acesso em: 2 dez. 2025.

COMPANHIA NACIONAL DE ABASTECIMENTO (CONAB). **Acompanhamento da safra brasileira de grãos:** safra 2025/2026. Brasília, DF: Conab, v. 13, n. 1, out. 2025b. Disponível em: https://www.gov.br/conab/pt-br/atuacao/informacoes-agropecuarias/safras/safra-de-graos/boletim-da-safra-de-graos/1o-levantamento-safra-2025-26/e-book_boletim-de-safras-1o-levantamento_2025.pdf . Acesso em: 29 dez. 2025.

REMUNOM
ISSN 2178-6925

Received: 29/04/2026 - **Accepted:** 08/06/2026
Vol: 13.12
DOI: 10.66104/2jsg1d58
Pages: 1-48

COMPANHIA NACIONAL DE ABASTECIMENTO (CONAB). **Acompanhamento da safra brasileira de grãos**: safra 2025/2026. Brasília, DF: Conab, v. 13, n. 5, fev. 2026. Disponível em: https://www.gov.br/conab/pt-br/atuacao/informacoes-agropecuarias/safras/safra-de-graos/boletim-da-safra-de-graos/5o-levantamento-safra-2025-26/e-book_boletim-de-safras-5o-levantamento_2026.pdf . Acesso em: 1 mar. 2026.

COMPART, J.; LI, X.; FETTKE, J. Starch – a complex and undeciphered bioploymer. **Journal of Plant Physiology**, v. 258-259, n. 153389, 2021. DOI: https://doi.org/10.1016/j.jplph.2021.153389

COUTINHO, U.T.C.; VASCO, R.C.; SILVA, S.S.V.; MELO, E.A.; SANTOS, A.M.P. Avaliação da capacidade fermentativa da *Saccharomyces cerevisiae* e *Saccharomyces pastoris* imobilizada para produção de cerveja: perfil fermentativo, ciclos e produtividade. **Brazilian Journal of Development**, v. 6, n. 6, p. 37877 – 37886, 2020. DOI: https://doi.org/10.34117/bjdv6n6-356 .

CRIPWELL, R.A.; FAVARO, L.; VILJOEN-BLOOM, M.; VAN ZYL, W.H. Consolidated bioprocessing of raw starch to ethanol by *Saccharomyces cerevisiae*: achievements and challenges. **Biotechnology advances**, v. 42, 2020. DOI: https://doi.org/10.1016/j.biotechadv.2020.107579 .

DAS, S.; CHANDUKISHORE, T.; SELVASEMBIAN, R.; PRABHU, A.A. Mixed food waste valorization using a thermostable glucoamylase enzyme produced by a newly isolated filamentous fungus: a sustainable biorefinary approach. **Chemosphere**, v. 352, 2024. DOI: https://doi.org/10.1016/j.chemosphere.2024.141480 .

DENARDIN, C.C.; SILVA, L.P. Estrutura dos grânulos de amido e sua relação com propriedades físico-químicas. **Ciência Rural**. v. 39, n. 3, 2009. DOI: https://doi.org/10.1590/S0103-84782009005000003 .

DE PAULA, M.T.; SOARES, L.C.R.; CASTRO, A.F.B.; SILVA, G.S.; NUNES, H.C.B.; LIMA, N.M.O. Aspectos socioeconômicos e agronômicos da cultura da mandioca (*Manihot esculenta* Crantz): uma revisão de literatura. **Brazilian Journal of Animal and Enviromental Research**, v. 7, n. 3, p. 1-9, 2024. DOI: https://doi.org/10.34188/bjaerv7n3-119 .

DEVI, A.; BAJAR, S.; SIHAG, P.; SHEIKH, Z.U.D.; SINGH, A.; KAUR, J.; BISHNOI, N.R.; PANT, D. A panoramic view of technological landscape for bioethanol production from various generations of feedstocks. **Bioengineered**, v. 14, n. 1, 2023. DOI: https://doi.org/10.1080/21655979.2022.2095702

REMUNOM
ISSN 2178-6925

Received: 29/04/2026 - **Accepted:** 08/06/2026
Vol: 13.12
DOI: 10.66104/2jsg1d58
Pages: 1-48

DIN, Z-U., XIONG, H., PENG, F. Physical and chemical modification of starches: a review. **Critical Reviews in Food Science and Nutrition**, v. 57, n.12, p. 2691-2705, 2017. DOI: https://doi.org/10.1080/10408398.2015.1087379

DOMPIERI, M.H.G.; SOUZA, D.T.; ROCHA, J.D.; SILVA, M.A.S. **Perspectivas para o etanol de milho brasileiro**. Campinas: Embrapa Territorial, 2024. (Boletim de Pesquisa e Desenvolvimento). Disponível em: http://www.infoteca.cnptia.embrapa.br/infoteca/handle/doc/1173364 . Acesso em: 20 nov. 2025.

DONG, J.; FAKHARI, M.; BAN, L.; POLHEMUS, K.; SHEHU, M.R.; DOUSTKHAHVAJARI, F.; KUKIELSKI, P.; VENIGALLA, A.; LASH, T.; SATHITSUKSANOH, N.; ZHANG, Y. High-efficiency conversion of corn bran to ethanol at 150L scale. **Bioresource Technology**, v. 408, 2024. DOI: https://doi.org/10.1016/j.biortech.2024.131216

DUJON, B.A.; LOUIS, E.J. Genome diversity and Evolution in the budding yeasts (Saccharomycotina). **Genetics**, v. 206, n. 2, p. 717-750, 2017. DOI: https://doi.org/10.1534/genetics.116.199216

EMPRESA BRASILEIRA DE PESQUISA AGROPECUÁRIA (EMBRAPA). Centro Nacional de Pesquisa de Milho e Sorgo. **Fisiologia do milho**. Sete Lagoas: Embrapa Milho e Sorgo, 2002. (Circular Técnica, 22). Disponível em: http://www.infoteca.cnptia.embrapa.br/infoteca/handle/doc/486995 . Acesso em: 5 maio 2025.

FARIAS, T.C.; KAWAGUTI, H.Y.; KOBLITZ, M.G.B. Microbial amylolytic enzymes in foods: technological importance of the *Bacillus genus*. **Biocatalysis and Agricultural Biotechnology**, v. 35, 2021. DOI: https://doi.org/10.1016/j.bcab.2021.102054

FELIPE, F.I.; ALVES, L.R.A. Considerações sobre o álcool de mandioca como fonte de energia. **Revista Raízes e Amidos Tropicais**, 2007.

FERREIRA, P.S.; ALMEIDA, E.L. Amido – Uma abordagem acerca da composição, estrutura, propriedades, modificação e aplicação. In: **Congresso Brasileiro de Produção animal e vegetal,** 2., 2022, Jardim do Seridó. Agron Food Academy**,** 2022. DOI: https://doi.org/10.53934/9786585062039-79

FIGUEROA-FLÓREZ, J.; CADENA-CHAMORRO, E.; RODRÍGUEZ-SANDOVAL, E.; SALCEDO-MENDOZA, J.; CIRO-VELÁSQUEZ, H. Hydrothermal processes and simultaneous enzymatic hydrolysis in the production of modified cassava starches with porous surfaces. **Heliyon**, v. 9, n. 7, 2023. DOI:

REMUNOM
ISSN 2178-6925

Received: 29/04/2026 - **Accepted:** 08/06/2026
Vol: 13.12
DOI: 10.66104/2jsg1d58
Pages: 1-48

https://doi.org/10.1016/j.heliyon.2023.e17742

FRANÇA, K.S.; OLIVEIRA, T.C.A.; ARAÚJO, N.O. Avaliação do desempenho agronômico de cultivares de batata-doce nas condições edafoclimáticas do município de Araguaína. **Revista FT**, n. 135, v. 28, 2024. Disponível em: https://revistaft.com.br/avaliacao-do-desempenho-agronomico-de-cultivares-de-batata-doce-nas-condicoes-edafoclimaticas-do-municipio-de-araguaina/

FUJIMOTO, Z.; MIZUNO, H.; TAKASE, K.; DOUI, N. Alpha-amylase from *Bacillus subtilis* complexed with maltopentaose. **RSCB Protein Data Bank**, 1998. PDB ID: 1BAG. Disponível em: https://www.rcsb.org/structure/1BAG . Acesso em: 7 jan. 2026.

GALON, L.; ULKOVSKI, C.; ROSSETTO, E.R.O.; CAVALETTI, D.C.; WEIRICH, S.N.; BRANDLER, D.; SILVA, A.M.L.; PERIN, G.F. Selectivity and efficacy of herbicides applied to the wheat crop. **Revista de Ciências Agroveterinárias,** v. 20, n. 3, p. 199-212, 2021. DOI: https://doi.org/10.5965/223811712032021199

GIMENEZ, A.R.; ALTOPIEDI, L.G.; CARBALLO, N.V.; SILVA, L.C.M.; LIRIA, C.W. The rise in productivity and search for excellence in the brazilian ethanol production: a success story. **Research, Society and Development**, v. 7, n. 2, 2018. DOI: https://doi.org/10.17648/rsd-v7i2.270

GORDINHO, M.C. **Do álcool ao etanol: trajetória única** = From alcohol to ethanol: a winning trajectory. São Paulo: Terceiro Nome, 2010.

GÖRGENS. J.F.; BRESSLER, D.C.; RENSBURG, E. Engineering *Saccharomyces cerevisiae* for direct conversion of raw, uncooked or granular starch to ethanol. **Critical Reviews in Biotechnology**, v. 35, n. 3, p. 369-391, 2015. DOI: https://doi.org/10.3109/07388551.2014.888048

GUPTA, R.; GIGRAS, P.; MOHAPATRA, H.; GOSWAMI, V.K.; CHAUHAN, B. Microbial α-amilases: a biotechnological perspective. **Process Biochemistry**, v. 38, n. 11, p. 1599-1616, 2003. DOI: https://doi.org/10.1016/S0032-9592(03)00053-0

HOOVER, R. Acid-treated starches. **Food Reviews International**, v. 16, n. 3, p. 369-392, 2000. DOI: https://doi.org/10.1081/FRI-100100292 .

INSTITUTO BRASILEIRO DE GEOGRAFIA E ESTATÍSTICA (IBGE). **Levantamento sistemático da produção agrícola:** estatística da produção agrícola. Rio de Janeiro: IBGE, 2025. Disponível em:

REMUNOM
ISSN 2178-6925

Received: 29/04/2026 - **Accepted:** 08/06/2026
Vol: 13.12
DOI: 10.66104/2jsg1d58
Pages: 1-48

https://ftp.ibge.gov.br/Producao_Agricola/Levantamento_Sistematico_da_Producao_Agricola_[mensal]/Fasciculo_Indicadores_IBGE/2025/estProdAgri_202509.pdf . Acesso em: 8 jan. 2026.

IGWEBUIKE, C.M.; AWAD, S.; ANDRÈS, Y. Renewable energy potential: Second-generation biomass as feedstock for bioethanol production. **Molecules**, v. 29, 2024. DOI: https://doi.org/10.3390/molecules29071619 .

INPASA. **Unidades**. 2026. Disponível em: https://www.inpasa.com.br/unidades/?pg=unidades . Acesso em:18 fev. 2026.

JACOBSON, M.R.; OBANNI, M.; BEMILLER, J.N. Retrogradation of starches from different botanical sources. **Cereal Chemistry**, v. 74, p. 511-518, 1997. DOI: https://doi.org/10.1094/CCHEM.1997.74.5.511

JAIN, S.; KUMAR, S. A comprehensive review of bioethanol production from diverse feedstocks: Current advancements and economic perspectives. **Energy**, v. 296, 2024. DOI: https://doi.org/10.1016/j.energy.2024.131130 .

JANKET, A.; VORASOOT, N.; TOOMSAN, B.; KAEWPRADIT, W.; BANTERNG, P.; KESMALA, T.; THEERAKULPISUT, P.; JOGLOY, S. Seasonal variation in starch accumulation and starch granule size in Cassava genotypes in a tropical savanna climate. **Agronomy**, v. 8, n. 297, 2018. DOI: https://doi.org/10.3390/agronomy8120297

JIN, Y.; FANG, Y.; ZHANG, G.; ZHOU, L.; ZHAO, H. Comparison of etanol production performance in10 varieties of Sweet potato at different growth stages. **Acta Oecologica**, v. 44, 2012. DOI: https://doi.org/10.1016/j.actao.2012.05.008

JORNAL CANA. **Usina flex da Cooperativa Pindorama divulga projeções**. 2025. Disponível em: https://jornalcana.com.br/mercado/usinas/usina-flex-da-cooperativa-pindorama-divulga-projecoes-saiba-mais/ . Acesso em: 7 abr. 2026.

KHOLIKOV, A.; VOKHIDOV, K.; MURTOZOYEV, A.; TÓTH, Z.S.; NAGY, G.N.; VÉRTESSY, B.G.; MAKHSUMKHANOV, A. Characterization of a thermostable α-amylase from *Bacillus licheniformis* 104.K for industrial applications. **Microorganisms**. v. 13, 2025. DOI: https://doi.org/10.3390/microorganisms13081757 .

KIM, K.H.; KIM, J.Y. Understanding wheat starch metabolism in properties, environmental stress condition, and molecular approaches for value-added utilization. **Plants**. v. 10, n. 2282, 2021. DOI:

REMUNOM
ISSN 2178-6925

Received: 29/04/2026 - **Accepted:** 08/06/2026
Vol: 13.12
DOI: 10.66104/2jsg1d58
Pages: 1-48

https://doi.org/10.3390/plants10112282

KOLLING, C.E.; NOZAKI, M.H.; CORRÊIA, A.F.; GONÇALVES, L.A.; RAMPIM, L. Contaminação por fungos e micotoxinas em grãos de trigo do Paraná importado do Paraguai. **Research, Society and Development**, v. 9, n. 9, 2020. DOI: https://doi.org/10.33448/rsd-v9i9.8111

KOMLAGA, G.A.; ODURO, I.; ELLIS, W.O.; DZIEDZOAVE, N.T.; AWUNYO VITOR, D.; DJAMEH, C. Profitability of bioethanol production using cassava (*Manihot esculenta* Crantz) and sweet potato (*Ipomoea batatas*) as raw material. **Afr. J. Food Agric. Nutr. Dev**. v. 22, n. 3, 2022. DOI: https://doi.org/10.18697/ajfand.108.20720 .

KUMAR, D.; THAKUR, G.; SINGH, P.; DUTT, S.; MANGAL, V.; KUMAR, D.; SINGH, B. Biofuel production from starchy crops: advanced technology and current perspectives. **Archives of Microbiology**, v. 207, n. 9, 2025. DOI: https://doi.org/10.1007/s00203-025-04428-7

KUMARI, V.V.; DEO, A.; BORA, K.; RAMA RAO, C.A.; RAJU, B.M.K.; SARATH CHANDRAN, M.A.; SRIRAM, K.; SINGH, V.K.; AGGARWAL, P.K. Adapting sorghum and other millets to climate challenges: an integrated bibliometric and meta-analysis of global literature. **Journal of Agriculture and Food Research**, v. 21, 2025. DOI: https://doi.org/10.1016/j.jafr.2025.101987

LANDAU, E. C.; MARTINS NETTO, D.A. **Expansão potencial da produção de sorgo granífero no Brasil no sistema de rotação com soja considerando o zoneamento de risco climático 2015/16**. Sete Lagoas, MG: Embrapa Milho e Sorgo, 2015. (Boletim de Pesquisa e Desenvolvimento 125). Disponível em: https://www.gov.br/agricultura/pt-br/assuntos/riscos-seguro/programa-nacional-de-zoneamento-agricola-de-risco-climatico/estudos_observatorio-do-zarc/estudos-2015/2015-elena-charlotte-landau-expansao-potencial-da-producao-de-sorgo-granifero-no-brasil-no-sistema-de-rotacao-com-soja-considerando-o-zoneamento-de-risco-climatico-2015-16.pdf . Acesso em: 12 fev. 2026.

LIAN, J.; MISHRA, S.; ZHAO, H. Recent advances in metabolic engineering of *Saccharomyces cerevisiae*: New tools and their applications**. Metabolic Engineering**, v. 50, p. 85-108, 2018. DOI: https://doi.org/10.1016/j.ymben.2018.04.011

LI, J.; ZHAO, R.; XU, Y.; WU, X.; BEAN, S.R.; WANG, D. Fuel ethanol production from starchy grain and other crops: An overview on feedstocks, affecting factors, and technical advances. **Renewable energy**, v. 188, p. 223-239, 2022. DOI: https://doi.org/10.1016/j.renene.2022.02.038

REMUNOM
ISSN 2178-6925

Received: 29/04/2026 - **Accepted:** 08/06/2026
Vol: 13.12
DOI: 10.66104/2jsg1d58
Pages: 1-48

MACHADO, C.M.M.; ABREU, F.R. Produção de álcool combustível a partir de carboidratos. **Revista de Política Agrícola,** n. 3, v. 15, 2006. DOI: https://rpa.sede.embrapa.br/RPA/article/view/510

MADEIRO, I.I.C.; PELUZIO, J.M.; REINA, E.; MONTEIRO, F.J.F.; SANTOS, D.B.R.; SANTOS, W.F.; HACKENHAAR, C.; SANTOS, L.F.S. Populações de plantas de milho cultivado na safra e safrinha visando produção de etanol. **Revista Observatorio de la Economía Latinoamericana**, v. 22, n. 6, 2024. DOI: https://doi.org/10.55905/oelv22n6-155

MALHERBE, S.J.M.; CRIPWELL, R.A.; FAVARO, L.; VAN ZYL, W.H.; VILJOEN-BLOOM, M. Triticale and sorghum as feedstock for bioethanol production via consolidated bioprocessing. **Renewable Energy**, v. 206, p. 498-505, 2023. DOI: https://doi.org/10.1016/j.renene.2023.02.047

MELLONI, E. **Primo pobre do milho, sorgo é promessa na produção de etanol**. Revista Brasil Energia, 2025. Disponível em: https://brasilenergia.com.br/brasilenergia/acoes-em-transicao-energetica/primo-pobre-do-milho-sorgo-e-promessa-na-producao-de-etanol . Acesso em: 7 abr. 2026.

MORAES, L.M.P.; ASTOLFI-FILHO, S.; OLIVER, S.G. Development of yeast strains for the efficient utilization of starch: evaluation of constructs that express α-amylase and glucoamylase separately or as bifunctional fusion proteins. **Applied Microbiology and Biotechnology**., v. 43, n.6, p. 1067-1076, 1995. DOI: https://doi.org/10.1007/bf00166927

MORDOR INTELLIGENCE. **Análise do tamanho e participação de mercado da mandioca** – tendências de crescimento e previsão (2025 – 2030). 2025. Disponível em: https://www.mordorintelligence.com/pt/industry-reports/cassava-market . Acesso em: 13 jan. 2026.

MOREIRA, J.R.; PACCA, S.A.; PARENTE, V. The future of oil and bioethanol in Brazil. **Energy Policy**, v. 65, p. 7-15, 2014. DOI: https://doi.org/10.1016/j.enpol.2013.09.055

MOVAHEDPOUR, A.; ASADI, M.; KHATAMI, S.H.; TAHERI-ANGANEH, M.; ADELIPOUR, M.; SHABANINEJAD, Z.; AHMADI, N.; IRAJIE, C.; MOUSAVI, P. A brief overview on the application and sources of α-amylase and expression hosts properties in order to production of recombinant α-amylase. **Biotechnology and Applied Biochemistry**, v. 69, p. 650-659, 2022. DOI:

REMUNOM
ISSN 2178-6925

Received: 29/04/2026 - **Accepted:** 08/06/2026
Vol: 13.12
DOI: 10.66104/2jsg1d58
Pages: 1-48

https://doi.org/10.1002/bab.2140

MYAT, L.; RYU, G-H. Effect of thermostable α-amylase injection on mechanical and physiochemical properties for saccharification of extruded corn starch. **J.Sci. Food Agric**., v. 94, p. 288-295, 2014. DOI: https://doi.org/10.1002/jsfa.6252

MYERS, A.M.; MORELL, M.K.; JAMES, M.G.; BALL, S.G. Recent progress toward understanding biosynthesis of the amylopectin crystal. **Plant Physiology**, v. 122, p. 989-997, 2000.

NOGUEIRA, C.U. **Batata-doce irrigada para produção de etanol**. 2017. Tese (Doutorado em Engenharia Agrícola) – Universidade Federal de Santa Maria (UFSM), Santa Maria, 2017.

NOGUEIRA, L.C.; FERREIRA, O.E.; ALCANTARA, G.U.; COSTA, G.H.G. Avaliação do processamento de três híbridos de milho na produção de etanol. **Revista em Agronegócio e Meio Ambiente – RAMA**, v. 16, n. 4, 2023. Disponível em: https://www.proquest.com/openview/7a3ccfba130b229080940009ad2388a3/1.pdf?pq-origsite=gscholar&cbl=2032621#

NOROUZIAN, D.; AKBARZADEH, A.; SCHARER, J.M.; YOUNG, M.M. Fungal glucoamylases. **Biotechnology Advances**, v. 24, p. 80-85, 2006. DOI: https://doi.org/10.1016/j.biotechadv.2005.06.003.

NOSKOSKI, L.E.C; WEIMER, M.R.M.; TANARO, L.F.; PINTO, N.G.M.; GRAEF, N.D.; LAGO, A.; CHRISTOFARI, L.F.; ALVES, E.C. Biocombustíveis no Brasil: uma revisão narrativa sobre a produção de etanol de cereais no Rio Grande do Sul. **REMUNOM**, v. 2, n. 1, p. 1-25, 2026. DOI: https://doi.org/10.61164/5555zn48

OGASSAVARA, D.; FERREIRA, T.S.; TERTULIANO, I.W.; BARTHOLOMEU, D.; COSTA, J.F.; MONTIEL, J.M. Trilhas metodológicas para a revisão narrativa: orientações pragmáticas para sua elaboração. **Ensino & Pesquisa**, v. 23, n. 3, p. 308-318, 2025. DOI: https://doi.org/10.33871/23594381.2025.23.3.10317

OLOFSSON, K.; BERTILSSON, M.; LIDÉN, G. A short review on SSF – an interesting process option for ethanol production from lignocellulosic feedstocks. **Biotechnology for Biofuels**, v. 1, n. 7, 2008. DOI: https://doi.org/10.1186/1754-6834-1-7

PAVEZZI, F.C. **Produção e caracterização de glucoamilases termoestáveis de *Aspergillus awamori* obtidos por PCR mutagênico e expressas em *Saccharomyces cerevisiae***. 2006. Dissertação (Mestrado em Engenharia de

REMUNOM
ISSN 2178-6925

Received: 29/04/2026 - **Accepted:** 08/06/2026
Vol: 13.12
DOI: 10.66104/2jsg1d58
Pages: 1-48

Alimentos) – Instituto de Biociências, Letras e Ciências Exatas, Universidade Estadual Paulista (UNESP), São José do Rio Preto – São Paulo, 2006.

PAVEZZI, F.C.; GOMES, E.; DA SILVA, R. Production and characterization of glucoamylase from fungus *Aspergillus awamori* expressed in yeast *Saccharomyces cerevisiae* using different carbon sources. **Brazilian Journal of Microbiology**, v. 39, n. 1, 2008. DOI: https://doi.org/10.1590/S1517-83822008000100024

PAVEZZI, F.C. **Glucoamilases mutantes termoestáveis do fungo** *Aspergillus awamori* **expressas em levedura** *Saccharomyces cerevisiae*: **sequenciamento do gene, produção e purificação das enzimas obtidas por fermentação submersa**. 2011. Tese (Doutorado em Microbiologia Aplicada) - Universidade Estadual Paulista (UNESP), Rio Claro, 2011.

PERGORARO, R.; GIANEZINI, M.; YAMAGUCHI, C.K. Inovação na produção de bioenergia a partir do trigo e milho em uma cooperativa industrial de Santa Catarina. **Revista de Gestão e Secretariado**, v. 17, n. 1, p. 1-15, 2026. DOI: http://doi.org/10.7769/gesec.v17i1.5524

PÉREZ, S.; BERTOFT, E. The molecular structures of starch components and their contribution to the architecture of starch granules: A comprehensive review. **Starch**, v. 62, p. 389-420, 2010. DOI: https://doi.org/10.1002/star.201000013

PINTO, V.Z.; ALVES, V.; AMORIN, S.G.; SANTOS, G.H.F.; DEON, V.G. Pré-hidrólise enzimática na produção de amido modificado. **Revista Brasileira de Agrotecnologia**, v.11, n. 2, p. 1033-1042, 2021. DOI: https://doi.org/10.18378/REBAGRO.V12I2.8844

PIVA, A. **Trump aposta no etanol para abastecer os EUA**. Revista Oeste. Disponível em: https://revistaoeste.com/agronegocio/trump-aposta-no-etanol-para-abastecer-os-eua/ Acesso em: 2 maio 2025.

POLIZELLI, M.L.T.M.; SILVA, T.M. **Amilases microbianas**. São Paulo: Universidade de São Paulo, 2016, 268 p.

PRADO, E.T.A.; VILLWOCK, A.P.S.; FOSSÁ, J.L. Riscos e programas de transferência de riscos na produção de milho no semiárido sergipano. **Revista Grifos,** v. 32, n. 60, 2023. DOI: https://doi.org/10.22295/grifos.v32i60.7307

PORTAL DO AGRONEGÓCIO. **Produção de batata-doce cresce 76% no Brasil, mas Paraná registra queda**. 2025. Disponível em:

REMUNOM
ISSN 2178-6925

Received: 29/04/2026 - **Accepted:** 08/06/2026
Vol: 13.12
DOI: 10.66104/2jsg1d58
Pages: 1-48

https://www.portaldoagronegocio.com.br/agricultura/outros/noticias/producao-de-batata-doce-cresce-76-no-brasil-mas-parana-registra-queda . Acesso em: 30 jan. 2026.

PUERTO RICO, J.A.; MERCEDES, S.S.P.; SAUER, I.L. Genesis and consolidation of the Brazilian bioethanol: a review of policies and incentive mechanisms. **Renewable and Sustainable Energy Reviews**, v. 14, n.7, p. 1874-1887, 2010. DOI: https://doi.org/10.1016/j.rser.2010.03.041

RAMOS, M.D.N.; MILESSI, T.S.; CANDIDO, R.G.; MENDES, A.A.; AGUIAR, A. Enzymatic catalysis as a tool in biofuels production in Brazil: Current status and perspectives. **Energy for Susteinable Development**, v. 68, p. 103-119, 2022. DOI: https://doi.org/10.1016/j.esd.2022.03.007

RENEWABLE FUELS ASSOCIATION (RFA). **Annual ethanol production**. 2026. Disponível em: https://ethanolrfa.org/markets-and-statistics/annual-ethanol-production . Acesso em: 16 abr. 2026.

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

RIO GRANDE DO SUL. **Primeira usina de etanol de trigo do país entra em operação em Santiago com financiamento do governo do Estado**. 2026. Disponível em: https://www.estado.rs.gov.br/primeira-usina-de-etanol-de-trigo-do-pais-entra-em-operacao-em-santiago-com-financiamento-do-governo-do-estado . Acesso em: 07 abr. 2026.

SAMPAIO, C.; ASSIS, D.R. Etanol de milho: novas perspectivas do mercado brasileiro. **Interface Tecnológica**, v. 20, n. 2, 2023. DOI: https://doi.org/10.31510/infa.v20i2.1746

SANTANA, W.R.; MARTINS, L.P.; SILVEIRA, M.A.; SANTOS, W.F.; GONÇALVES, R.C.; SOUZA, F.R.; RESPLANDES, G.R.S.; LIMA, M.M. Identificação agronômica de genótipos de batata-doce em banco de germoplasma para fins industriais de etanol carburante. **Tecnologia & Ciência Agropecuária**, v. 7, n. 1, 2013.

SANTOS, J.R.A.; SOUTO-MAIOR, A.M.; GOUVEIA, E.R. Comparação entre processos SHF e em SSF de bagaço de cana-de-açúcar para a produção de etanol por *Saccharomyces cerevisiae*. **Quimíca Nova**, n. 4, v. 33, 2010.

SERGIPE (Estado). Secretaria de Estado da Agricultura, Desenvolvimento Agrário

REMUNOM
ISSN 2178-6925

Received: 29/04/2026 - **Accepted:** 08/06/2026
Vol: 13.12
DOI: 10.66104/2jsg1d58
Pages: 1-48

e da Pesca. Empresa de Desenvolvimento Agropecuário do Sergipe. **Mandioca: análise conjuntural**. Aracaju: Governo do Estado, 2025. Disponível em: https://emdagro.se.gov.br/wp-content/uploads/2025/07/MANDIOCA-ANALISE-CONJUNTURAL.pdf . Acesso em: 11 jan. 2026.

SEUNG, D. Amylose in starch: towards an understanding of biosynthesis, structure and function. **New Phytologist**, v. 228, n. 5, p. 1490-1504, 2020. DOI: https://doi.org/10.1111/nph.16858

SEWSYNKER-SUKAI. Y.; KANA, E.B.G. Simultaneous saccharification and bioethanol production from corn cobs: process optimization and kinetic studies. **Bioresource Technology**, v. 262, p. 32-41, 2018. DOI: https://doi.org/10.1016/j.biortech.2018.04.056

SHAHEEN, A.; YANG, Y.; SHAH, G.; BHATTI, H.A.; LI, Z. LI, H. From stress to success: biostimulants and nanotechnology-drive strategies to enhance wheat resilience under abiotic stress. **Plants Stress**, v. 20, 2026. DOI: https://doi.org/10.1016/j.stress.2026.101267

SILVA, R.F.; MASCARENHAS, M.S.; BATISTOTE, M. Biomass: bioethanol transformation and production process**. Revista de Agricultura Neotropical**, v. 9, n. 4, 2022. DOI: https://doi.org/10.32404/rean.v9i4.7089

SILVA, R.F.; MASCARENHAS, M.S.; BATISTOTE, M. Technological advances in ethanol production: the role of sugarcane, corn and yeast lineages. **Revista Cereus**, v. 15, n. 4, 2023. DOI: https://doi.org/10.18605/2175-7275/cereus.v15n4p216-225

SILVEIRA, M.A. (org.); SOUZA, F.R.; ALVIM, T.C.; DIAS, L.E.; SANTANA, W.R.; VITAL, M.K.G.S.; GOUVÊA, G.R.S.R.; COSTA, D.M. **A cultura da batata-doce como fonte de matéria-prima para produção de etanol**. Palmas: Lasper/UFT, 2008. (Boletim Técnico). Disponível em: http://antigo.sudam.gov.br/conteudo/destaques/arquivos/Etanol/BOLETIM-TECNICO-UFT.pdf . Acesso em: 28 dez. 2025.

SINGH, A.; SINGHANIA, R.R.; SOAM, S.; CHEN, C-W.; HALDAR, D.; VARJANI, S.; CHANG, J-S.; DONG, C-D.; PATEL, A.K. Production of bioethanol from food waste: status and perspectives**. Bioresource Technology**, v. 360, 2022. Disponível em: https://doi.org/10.1016/j.biortech.2022.127651

SLAVIC, M.S.; MARGETIC, A.; DOJNOV, B.; VUJCIC, M.; MISIC, M.; BOZIC, N.; VUJCIC, Z. Modified simultaneous saccharification and fermentation for the production of bioethanol from highly concentrated raw corn starch. **Fuel**, v. 338, 2023. DOI: https://doi.org/10.1016/j.fuel.2022.127363

REMUNOM
ISSN 2178-6925

Received: 29/04/2026 - **Accepted:** 08/06/2026
Vol: 13.12
DOI: 10.66104/2jsg1d58
Pages: 1-48

SOUZA, P.M.; MAGALHÃES, P.O. Application of microbial α-amylase in industry – a review. **Brazilian Journal of Microbiology**, v. 41, n. 4, p. 850-861, 2010. DOI: https://doi.org/10.1590/s1517-83822010000400004 .

SOUZA, R.C.R.; SARDINHA, M.D.; CARVALHO, S.M.S.; BACELLAR, A.A.; SOUZA, F.C.R.; SOUZA, C.D.R.; LISBOA, F.C.; CHAAR, J.S.; MENDONÇA, M.A.F.; ASTOLFI FILHO, S.; SEYE, O.; TRINDADE, A.B.; MORAIS, B.E.P.; PRADO, F.N.L.; ASSUNÇÃO, D.B.; CORDEIRO JÚNIOR, B. Produção de etanol de mandioca (*Manihot sculenta* Crantz) na Região Norte: desafios e oportunidades. In CONGRESSO SOBRE GERAÇÃO DISTRIBUÍDA DE ENERGIA NO MEIO RURAL**,** 9., 2013, Itajubá**. Anais**. Itajubá: UNIFEI, 2013.

SUH. S.O.; BLACKWEEL, M.; KURTZMAN, C.P.; LACHANCE, M.A. Phylogenetics of *Saccharomyce* tales, the ascomycete yeasts. **Mycologia**, v. 98, n. 6, p. 1006-1017, 2006. DOI: https://doi.org/10.1080/15572536.2006.11832629

SURMELY, R.; ALVAREZ, H.; CEREDA, M.P.; VILPOUX, O.F. Hidrólise do amido In: CEREDA, M.P. (ed.). **Cultura de tuberosas amiláceas latino-americanas. tecnologia, usos e potencialidades de tuberosas latino-americanas**. São Paulo: Fundação Cargill, 2003, v. 3.

STOLF, R.; OLIVEIRA, A.P.R. The sucess of the Brazilian alcohol program (proálcool) – a decade – by – decade brief history of ethanol in Brazil. **Engenharia Agrícola**, v. 40, n. 2, 2020. DOI: https://doi.org/10.1590/1809-4430-Eng.Agric.v40n2p243-248/2020

TANIMURA, A.; KIKUKAWA, M.; YAMAGUCHI, S.; KISHINO, S.; OGAWA, J.; SHIMA, J. Direct ethanol production from starch using a natural isolate, *Scheffersomyces shehatae*: toward consolidated bioprocessing. **Scientific Reports Nature**, v. 5, 2015. DOI: https://doi.org/10.1038/srep09593

TESTER, R.F; KARKALAS, J.; QI, X. Starch – composition, fine structure and architecture. **Journal of Cereal Science**, v. 39, n. 2, p. 151-165, 2004. DOI: https://doi.org/10.1016/j.jcs.2003.12.001 .

THAKUR, R.; PRISTIJONO, P.; SCARLETT, C.J.; BOWYER, M.; SINGH, S.P.; VUONG, Q.V. Starch-based films: major factors affecting their properties. 2019. **International Journal of Biological Macromolecules**, v. 132, p. 1079-1089. DOI: https://doi.org/10.1016/j.ijbiomac.2019.03.190

TIWARI, S.P.; SRIVASTAVA, R.; SINGH, C.S.; SHUKLA, K.; SINGH, R.K.; SINGH, P.; SINGH, R.; SINGH, N.L.; SHARMA, R. Amylases: an overview with

REMUNOM
ISSN 2178-6925

Received: 29/04/2026 - **Accepted:** 08/06/2026
Vol: 13.12
DOI: 10.66104/2jsg1d58
Pages: 1-48

special reference to alpha-amylase. **Journal of Global Biosciences**, v. 4, n. 1, 2015.

TURNER, T.L.; KIM, H.; KONG, I.I.; LIU, J-J.; ZHANG, G-C.; JIN, Y-S. Engineering and evolution of *Saccharomyces cerevisiae* to produce biofuels and chemicals. **Adv Biochem Eng Biotechnol**., v. 162, p.175-215, 2018. DOI: https://doi.org/10.1007/10_2016_22

UDA, C.F.; PUTAROV, N.B.; BAVELLONI, P.L.; MARCOLINO, V.A. Extração e caracterização do grão de amido de batata, batata-doce e mandioca. **Revista Uningá**, v. 17, 2008. DOI: https://doi.org/10.46311/2318-0579.17.eUJ692

UNIÃO NACIONAL DE ETANOL DE MILHO (UNEM). **Etanol de milho: cenário atual e perspectivas para a cadeia no Brasil**. 1. ed. Ribeirão Preto: , 2021.

UNIÃO DA INDÚSTRIA DE CANA-DE-AÇÚCAR (ÚNICA). **Observatório da cana e bioenergia – produção**. 2026. Disponível em: https://unicadata.com.br/ . Acesso em: 16 abr. 2026.

VAIDYA, S.; SRIVASTAVA, P.K.; RATHORE, P.; PANDEY, A.K. Amylases: a prospective enzyme in the field of biotechnology. **Journal Applied Bioscience**, v. 41, n. 1, p. 1-18, 2015.

VANDEPUTTE, G.E.; VERMEYLEN, R.; GEEROMS, J.; DELCOUR, J.A. Rice starches. III. Structural aspects provide insight in amylopectin retrogradation properties and gel texture. **Journal of Cereal Science**, v. 38, p. 61-68, 2003. DOI: https://doi.org/10.1016/S0733-5210(02)00142-X

VANIER, N.L.; EL HALAL, S.L.M.; DIAS, A.R.G. ZAVAREZE, E.R. Molecular structure, functionality and applications of oxidized starches: a review. **Food Chemistry**, v. 221, p. 1546 - 1559, 2017. DOI: https://doi.org/10.1016/j.foodchem.2016.10.138

VIDAL, M.F. Etanol de milho. **Caderno Setorial ETENE**, v. 9, n. 349, 2024. Disponível em: https://www.bnb.gov.br/revista/cse/article/view/3066 .

VIEIRA, L.C.; VIEIRA, D.J.C.; GRAZZIOTIN, R.C.B.; POLETTI, G.; VIEGAS, J.; PEROTTONI, J.; BERMUDES, R.F. Utilização de DDG e WDG na nutrição de ruminantes. In: **Zootecnia de Precisão: desafios e aplicações,** v. 1, 2021. DOI: https://dx.doi.org/10.37885/211106630

VÍTOR, L.A.D.; SIQUEIRA, G.B.; COLLICCHIO, E.; DOS SANTOS, D.B.R.

REMUNOM
ISSN 2178-6925

Received: 29/04/2026 - **Accepted:** 08/06/2026
Vol: 13.12
DOI: 10.66104/2jsg1d58
Pages: 1-48

Produção sustentável de etanol: avaliação da eficiência da hidrólise enzimática no amido de mandioca. **Desafios, Revista Interdisciplinar da Universidade Federal do Tocantins**. Palmas, v. 11, n. 7, 2024. DOI: https://doi.org/10.20873/Agroenergia_2024_v11_n7_17

WANG, S.; LI, C.; COPELAND, L.; NIU, Q.; WANG, S. Starch retrogradation: a comprehensive review. **Comprehensive Reviews in Food Science and Food Safety**, v. 14, p. 568-585, 2015. DOI: https://doi.org/10.1111/1541-4337.12143

WANG, Z.; MHASKE, P.; FARAHNAKY, A.; KASAPIS, S.; MAJZOOBI, M. Cassava starch: Chemical modification and its impact on functional properties and digestibility, review. **Food Hydrocolloids**, v. 129, 2022. DOI: https://doi.org/10.1016/j.foodhyd.2022.107542

WANG, X.; GUO, N.; HU, J.; GOU, C.; XIE, X.; ZHENG, H.; LIAO, A.; HUANG, J.; HUI, M.; LIU, N. Construction of an amylolytic *Saccharomyces cerevisiae* strain with high copies of α-amylase and glucoamylase genes integration for bioethanol production from sweet potato residue. **Front Microbiol**., v. 15, 2024. DOI: https://doi.org/10.3389/fmicb.2024.1419293

WAYLLACE, N.M.; HEDÍN, N.; BUSI, M.V.; GOMEZ-CASATI, D.F. Characterization of SdGA, a cold-adapted glucoamylase from *Saccharophagus degradans*. **Biotechnology Reports**, v. 30, 2021. DOI: https://doi.org/10.1016/j.btre.2021.e00625

WONG, D.W.S.; ROBERTSON, G.H.; LEE, C.C.; WAGSCHAL, K. Synergistic action of recombinant α-amylase and glucoamylase on the hydrolysis of starch granules. **The Protein Journal**, v. 26, n. 3, p. 159-164, 2007. DOI: https://doi.org/10.1007/s10930-006-9057-9

WU, A.C.; MORELL, M.K.; GILBERT, R.G. A parameterized model of amylopectin synthesis provides key insights into the synthesis of granular starch. **Plos One**, v. 8, n. 6, 2013. DOI: https://doi.org/10.1371/journal.pone.0065768

ZHIGUANG, C.; HAIXIA, Z.; MIN, C.; FAYONG, G.; JING, L. The fine structure of starch: a review. **NPJ Science of food**, n. 9, v. 50, 2025. DOI: https://doi.org/10.1038/s41538-025-00414-x

ZHU, J.; YU, W.; ZHANG, C.; ZHU, Y.; XU, J.; LI, E.; GILBERT, R.G.; LIU, Q. New insights into amylose and amylopectin biosynthesis in the rice endosperm. **Carbohydrate Polymers**, n. 230, 2020. DOI: https://doi.org/10.1016/j.carbpol.2019.115656

REMUNOM
ISSN 2178-6925

Received: 29/04/2026 - **Accepted:** 08/06/2026
Vol: 13.12
DOI: 10.66104/2jsg1d58
Pages: 1-48

ZOU, J.; LI, Y.; WANG, F.; SU, X.; LI, Q. Relationship between structural and functional properties of starch from different cassava (*Manihot esculenta* Crantz) and yam (*Dioscorea opposita* Thunb) cultivars used for food and industrial processing. **LWT – Food Science and Technology**, n. 173, 2023. DOI: https://doi.org/10.1016/j.lwt.2022.114261