



INSTITUTO FEDERAL
GOIANO
Câmpus Rio Verde

BACHARELADO EM AGRONOMIA

AMIDO COMO CRITÉRIO NA SELEÇÃO DE HÍBRIDOS DE MILHO
ASPECTOS GENÉTICOS, FISIOLÓGICOS E INDUSTRIAIS

THAYLANE LORENA BARBIERI PEREIRA

RIO VERDE, GO

2025

INSTITUTO FEDERAL DE EDUCAÇÃO, CIÊNCIA E TECNOLOGIA
GOIANO – CAMPUS RIO VERDE

BACHARELADO EM AGRONOMIA

AMIDO COMO CRITÉRIO NA SELEÇÃO DE HÍBRIDOS DE MILHO
ASPECTOS GENÉTICOS, FISIOLÓGICOS E INDUSTRIAIS

THAYLANE LORENA BARBIERI PEREIRA

Trabalho de Curso apresentado ao
Instituto Federal Goiano – Campus
Rio Verde, como requisito parcial
para a obtenção do Grau de Bacharel
em Agronomia.

RIO VERDE- GO
NOVEMBRO
2025

**Ficha de identificação da obra elaborada pelo autor, através do
Programa de Geração Automática do Sistema Integrado de Bibliotecas do IF Goiano - SIBi**

P436a Pereira, Thaylane Lorena Barbieri
 AMIDO COMO CRITÉRIO NA SELEÇÃO DE HÍBRIDOS DE
 MILHO ASPECTOS GENÉTICOS, FISIOLÓGICOS E
 INDUSTRIAIS / Thaylane Lorena Barbieri Pereira. Rio Verde
 2025.

 30f. il.

 Orientadora: Profª. Dra. Ana Paula Cardoso Gomide.
 Tcc (Bacharel) - Instituto Federal Goiano, curso de 0220024 -
 Bacharelado em Agronomia - Integral - Rio Verde (Campus Rio
 Verde).

 1. Bioenergia. 2. Endosperma. 3. Fenotipagem. 4. Gelatinização.

 I. Título.

TERMO DE CIÊNCIA E DE AUTORIZAÇÃO PARA DISPONIBILIZAR PRODUÇÕES TÉCNICO-CIENTÍFICAS NO REPOSITÓRIO INSTITUCIONAL DO IF GOIANO

Com base no disposto na Lei Federal nº 9.610, de 19 de fevereiro de 1998, AUTORIZO o Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia Goiano a disponibilizar gratuitamente o documento em formato digital no Repositório Institucional do IF Goiano (RIIF Goiano), sem ressarcimento de direitos autorais, conforme permissão assinada abaixo, para fins de leitura, download e impressão, a título de divulgação da produção técnico-científica no IF Goiano.

IDENTIFICAÇÃO DA PRODUÇÃO TÉCNICO-CIENTÍFICA

- | | |
|--|---|
| <input type="checkbox"/> Tese (doutorado) | <input type="checkbox"/> Artigo científico |
| <input type="checkbox"/> Dissertação (mestrado) | <input type="checkbox"/> Capítulo de livro |
| <input type="checkbox"/> Monografia (especialização) | <input type="checkbox"/> Livro |
| <input checked="" type="checkbox"/> TCC (graduação) | <input type="checkbox"/> Trabalho apresentado em evento |

☐ Produto técnico e educacional - Tipo: _____

Nome completo do autor:

Thaylane Lorena Barbieri Pereira

Matrícula:

201712200240154

Título do trabalho:

AMIDO COMO CRITÉRIO NA SELEÇÃO DE HÍBRIDOS DE
MILHO ASPECTOS GENÉTICOS, FISIOLÓGICOS E

RESTRIÇÕES DE ACESSO AO DOCUMENTO

Documento confidencial: ☒ Não ☐ Sim, justifique:

Informe a data que poderá ser disponibilizado no RIIF Goiano: / /

O documento está sujeito a registro de patente? ☐ Sim ☒ Não

O documento pode vir a ser publicado como livro? ☐ Sim ☒ Não

DECLARAÇÃO DE DISTRIBUIÇÃO NÃO-EXCLUSIVA

O(a) referido(a) autor(a) declara:

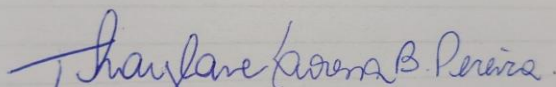
- Que o documento é seu trabalho original, detém os direitos autorais da produção técnico-científica e não infringe os direitos de qualquer outra pessoa ou entidade;
- Que obteve autorização de quaisquer materiais inclusos no documento do qual não detém os direitos de autoria, para conceder ao Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia Goiano os direitos requeridos e que este material cujos direitos autorais são de terceiros, estão claramente identificados e reconhecidos no texto ou conteúdo do documento entregue;
- Que cumpriu quaisquer obrigações exigidas por contrato ou acordo, caso o documento entregue seja baseado em trabalho financiado ou apoiado por outra instituição que não o Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia Goiano.

Rio Verde

04 / 02 / 2026

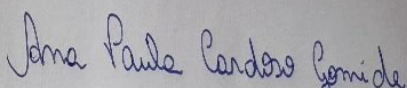
Local

Data



Assinatura do autor e/ou detentor dos direitos autorais

Ciente e de acordo:



Assinatura do(a) orientador(a)

Regulamento de Trabalho de Conclusão de Curso (TCC) – IF Goiano - Campus Rio Verde

ANEXO V - ATA DE DEFESA DE TRABALHO DE CURSO

Aos 07 dias do mês de novembro de dois mil e vinte e cinco às 18 horas, reuniu-se a Banca Examinadora composta por: Prof. Ana Paula Cardoso Gomide e os Mestrandos em Zootecnia do Instituto Federal Goiano, Campus Rio Verde, os Zootecnistas: Ana Carolina Alves Soares e Luiz Felipe Diniz Aniceto e Silva, para examinar o Trabalho de Conclusão de Curso (TCC) intitulado "AMIDO COMO CRITÉRIO NA SELEÇÃO DE HÍBRIDOS DE MILHO ASPECTOS GENÉTICOS, FISIOLÓGICOS E INDUSTRIAIS" de Thaylane Lorena Barbieri Pereira, estudante do curso de Agronomia do IF Goiano – Campus Rio Verde, sob Matrícula nº 2017102200240154. A palavra foi concedida ao(à) estudante para a apresentação oral do TC, em seguida houve arguição do candidato pelos membros da Banca Examinadora. Após tal etapa, a Banca Examinadora decidiu pela APROVAÇÃO do(a) estudante. Ao final da sessão pública de defesa foi lavrada a presente ata, que, após apresentação da versão corrigida do TC, foi assinada pelos membros da Banca Examinadora.

Rio Verde, 30 de janeiro de 2026.

(Assinado eletronicamente)

Ana Paula Cardoso Gomide

Orientador(a)

(Assinado eletronicamente)

Ana Carolina Alves Soares

Membro da Banca Examinadora

(Assinado eletronicamente)

Luiz Felipe Diniz Aniceto e Silva

Membro da Banca Examinadora

Documento assinado eletronicamente por:

- **Ana Paula Cardoso Gomide**, **PROFESSOR ENS BASICO TECN TECNOLOGICO**, em 30/01/2026 12:19:26.
- **Luiz Felipe Diniz Aniceto e Silva**, **2024202310240005 - Discente**, em 30/01/2026 13:17:49.
- **Ana Carolina Alves Soares**, **2023202310240001 - Discente**, em 03/02/2026 17:24:00.

Este documento foi emitido pelo SUAP em 30/01/2026. Para comprovar sua autenticidade, faça a leitura do QRCode ao lado ou acesse <https://suap.ifgoiano.edu.br/autenticar-documento/> e forneça os dados abaixo:

Código Verificador: 783543

Código de Autenticação: 0644436c55



RESUMO

PEREIRA, Thaylane Lorena Barbieri. **Amido como Critério na Seleção de Híbridos de Milho: Aspectos Genéticos, Fisiológicos e Industriais, 2025.** Trabalho de Curso de Bacharelado em Agronomia. Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia Goiano – Campus Rio Verde, Rio Verde, GO, 2025.

A composição do amido em híbridos de milho influencia diretamente sua produtividade, qualidade nutricional e adequação industrial. Variações entre amilose e amilopectina alteram propriedades funcionais, sendo cruciais na escolha de cultivares para diferentes finalidades. O presente trabalho teve como objetivo revisar a literatura sobre a influência do amido na seleção de híbridos de milho. A revisão abordou aspectos estruturais e funcionais do amido, bem como a interação com fatores genéticos, ambientais e agronômicos. Tecnologias de melhoramento, como a seleção assistida por marcadores moleculares e o CRISPR-Cas9, foram destacadas por sua eficiência na obtenção de híbridos com perfis amiláceos específicos. Constatou-se que híbridos com diferentes proporções de amilose e amilopectina apresentam comportamentos distintos em digestibilidade, rendimento e aplicação industrial. Por fim, conclui-se que a qualidade do amido é um critério estratégico para o desenvolvimento de cultivares voltadas à indústria e à agricultura sustentável.

Palavras-chave: Bioenergia, Endosperma, Fenotipagem, Gelatinização, Propriedades reológicas, Zeína.

ABSTRACT

The starch composition in maize hybrids directly influences their productivity, nutritional quality, and industrial suitability. Variations between amylose and amylopectin alter functional properties and are essential in selecting cultivars for specific purposes. This study aimed to review the literature on the influence of starch in the selection of maize hybrids. The review addressed structural and functional aspects of starch, as well as its interaction with genetic, environmental, and agronomic factors. Breeding technologies such as marker-assisted selection and CRISPR-Cas9 were highlighted for their efficiency in developing hybrids with specific starch profiles. It was found that hybrids with different amylose and amylopectin proportions show distinct performance in digestibility, yield, and industrial use. In conclusion, starch quality is a strategic criterion for developing cultivars aimed at industry and sustainable agriculture.

Keywords: Bioenergy, Endosperm, Phenotyping, Gelatinization, Rheological properties, Zein.

SUMÁRIO

1. INTRODUÇÃO	6
2. OBJETIVOS	7
2.1. Objetivo Geral	7
2.2. Objetivos Específicos	7
3. REVISÃO DE LITERATURA	8
3.1. Fundamentos do amido de milho	8
3.2. Função biológica do amido	10
3.3. Variedade de amido em diferentes híbridos de milho	12
3.4. Fatores que influenciam a qualidade do amido de milho: genética, condições ambientais e práticas de cultivo	13
3.5. Importância do amido na qualidade dos grãos: características que impactam no processamento e valor nutritivo	14
3.6. Qualidade do grão e impacto na qualidade do amido	15
3.7. Impacto do teor e qualidade do amido na nutrição, digestibilidade e valor energético do milho	16
3.8. O papel do melhoramento genético na otimização da produção de híbridos de milho com maior qualidade de amido	16
3.8.1. Melhoramento genético para modulação da estrutura e funcionalidade do amido: impacto na indústria alimentícia e farmacêutica	18
3.8.2. Melhoramento de híbridos para ração animal: foco em digestibilidade e eficiência energética	19
3.8.3. Produção de híbridos de alto rendimento amiláceo para uso energético e biotecnológico: uma alternativa estratégica para o setor de biocombustíveis	19
3.8.4. Exemplos de híbridos de milho com diferentes perfis de amido e suas aplicações	20
3.9. Avanços e tendências tecnológicas no melhoramento genético do milho para otimização do amido	21
3.10. Influências fisiológicas e manejo agrônomo do teor e qualidade do amido no milho	22

3.11. Atendimento às demandas industriais e sustentabilidade agrícola através do melhoramento do milho	23
3.12. Tendências futuras e perspectivas no melhoramento genético do milho .	24
4. CONCLUSÃO.....	25
5. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	27

1. INTRODUÇÃO

O milho (*zea mays L.*) é uma das culturas agrícolas de maior importância no Brasil, tanto do ponto de vista econômico quanto social. Está presente em sistemas produtivos de diferentes escalas, desde propriedades familiares até grandes áreas empresariais, contribuindo para a geração de renda, empregos e para a segurança alimentar. Seu papel é fundamental na cadeia produtiva de alimentos e rações, além de fornecer matéria-prima para diversas indústrias (Duarte; Garcia, 2021; Coêlho, 2021). Dados recentes da Companhia Nacional de Abastecimento (CONAB, 2023) indicam que a produção nacional de milho mantém trajetória de crescimento, impulsionada pela alta demanda interna e externa, especialmente no segmento de proteína animal, já que o grão é o principal ingrediente de rações industriais. O Departamento de Agricultura dos Estados Unidos (USDA, 2023) reforça essa relevância, destacando o Brasil como um dos maiores exportadores mundiais do cereal, o que consolida o milho como pilar estratégico da balança comercial agrícola.

Sob o ponto de vista botânico, o milho pertence à família Poaceae e exibe elevada capacidade de adaptação e produtividade, resultado de décadas de melhoramento genético. A planta é eficiente no acúmulo de amido, principal forma de reserva energética, que constitui mais de 70% do grão seco (Bresolin; Pons, 1983; Fornasieri Filho, 2007). Esse carboidrato complexo, composto por amilose e amilopectina, possui importância central tanto para o metabolismo da planta quanto para suas aplicações comerciais (Lima; Borém, 2018). A composição e estrutura do amido influenciam diretamente o desempenho da cultura, sendo fatores críticos na seleção de cultivares para alimentação animal, alimentação humana e indústria. Em especial, sistemas produtivos sustentáveis têm valorizado híbridos com maior rendimento de amido, visando não apenas a produtividade, mas também a eficiência ecológica do cultivo (Paterniani; Campos, 1999; Paes, 2008).

A qualidade e a proporção entre amilose e amilopectina determinam o destino industrial do grão. Híbridos com maior teor de amilopectina apresentam melhor digestibilidade e são mais indicados para alimentação animal e silagem, enquanto cultivares com amido mais resistente ao calor e com melhor perfil viscoamilográfico são preferidos na indústria alimentícia e na produção de biocombustíveis (Mendes, 2015; Embrapa, 2018). A tecnologia de predição genômica tem sido uma ferramenta valiosa nesse processo, permitindo identificar genótipos com características específicas do

amido, além de maior tolerância a condições adversas, como o déficit hídrico, que interfere diretamente na fisiologia e produtividade do milho (Heinemann et al., 2009; Zancanaro, 2013).

Diante disso, este estudo tem como objetivo contribuir para a compreensão da seleção de híbridos de milho com base nas propriedades do amido, uma estratégia essencial para atender às demandas específicas das indústrias alimentícias e de ração animal. O melhoramento genético do milho voltado para as características do amido representa uma abordagem promissora para otimizar a produção, elevar a qualidade do produto final e promover maior sustentabilidade e eficiência nas cadeias produtivas relacionadas ao grão (Galvão et al., 2014; Lima; Borém, 2018).

2. OBJETIVOS

2.1. Objetivo Geral

Analisar, por meio de uma revisão bibliográfica, a influência do amido na seleção de híbridos de milho para plantio, destacando como a composição e qualidade do amido afetam a escolha de híbridos para diferentes finalidades agrícolas e industriais, com foco em produtividade, qualidade nutricional, e adequação a processos industriais e de silagem.

2.2. Objetivos Específicos

- Revisar as propriedades do amido no milho: Explorar a estrutura química do amido (amilose e amilopectina) e suas funções no grão de milho.
- Investigar a relação entre o amido e a qualidade do milho: Examinar como o teor e a qualidade do amido impactam a qualidade nutricional do milho, sua digestibilidade, e o valor energético do grão.
- Avaliar o impacto do amido na escolha de híbridos de milho: Analisar como as características do amido influenciam a seleção de híbridos para uso na alimentação humana, ração animal, biocombustíveis e outros processos industriais.
- Explorar as práticas de melhoramento genético no milho: Discutir como o melhoramento genético pode otimizar a produção de híbridos com maior qualidade de amido para diferentes finalidades.

➤ Identificar tendências e inovações futuras: Analisar as perspectivas futuras do melhoramento genético de milho visando otimizar o teor de amido e atender às demandas da indústria e agricultura.

3. REVISÃO DE LITERATURA

3.1. Fundamentos do amido no milho

O amido é um polissacarídeo amplamente utilizado em diversas aplicações industriais e alimentares devido à sua abundância, biodegradabilidade e segurança fisiológica. Trata-se da principal forma de armazenamento de energia nas plantas, sendo responsável por fornecer cerca de 70 a 80% da energia calórica ingerida pela população mundial. Ele é extraído principalmente de grãos como milho, arroz e trigo, bem como de raízes e tubérculos, como mandioca, batata-doce e batata. Tanto o amido em sua forma natural quanto suas versões modificadas são utilizados em alimentos por suas múltiplas funções tecnológicas, atuando como espessantes, gelificantes, adesivos, formadores de filmes, ligantes, retentores de umidade e ainda ajudando a retardar o processo de retrogradação de alguns produtos (Zobel; Stephen, 1995; Freitas et al., 2003).

Graças ao seu baixo custo e ampla disponibilidade, o amido tem sido utilizado tradicionalmente pela indústria alimentícia não apenas como fonte calórica, mas também como um componente funcional capaz de melhorar diversas propriedades tecnológicas dos produtos. Sua aplicação permite alterar ou controlar atributos como textura, aparência, umidade, consistência e estabilidade durante o armazenamento. Além disso, pode desempenhar funções variadas, como agir como agente de ligação ou desintegração, proporcionar expansão ou densificação, conferir transparência ou opacidade, reter ou controlar a umidade, e ainda formar coberturas suaves ou crocantes. Também é eficaz na estabilização de emulsões e na formação de filmes com resistência à penetração de óleos (Silva et al., 2008).

Contudo, os amidos em sua forma nativa apresentam limitações significativas quando expostos a determinadas condições de processamento, como variações extremas de temperatura, pH e pressão. Essas condições podem comprometer seu desempenho, uma vez que os amidos não modificados tendem a apresentar baixa resistência ao cisalhamento, além de serem mais propensos à retrogradação e à sinérese, o que restringe seu uso em diversos processos industriais (Sánchez-Rivera et al., 2005).

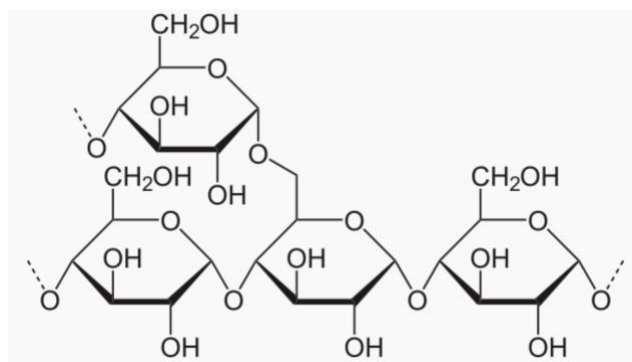


Figura 1. Estrutura molecular do amido

O amido é composto principalmente por duas macromoléculas: a amilose, que possui estrutura linear, e a amilopectina, caracterizada por sua complexa ramificação. A proporção entre esses dois componentes varia não apenas entre espécies botânicas distintas, mas também entre diferentes cultivares de uma mesma espécie, podendo ser influenciada pelo estágio de desenvolvimento da planta (Denardin e Silva, 2009).

A amilose é formada por cadeias de glicose conectadas predominantemente por ligações do tipo α -1,4, o que confere a essa molécula um caráter linear. Segundo Eduardo (2002), “a estrutura da amilose é essencialmente composta por unidades de glicose ligadas por ligações α -1,4”, sem presença significativa de ramificações. Durante o processo de gelatinização ou sob tratamento hidrotérmico, a amilose pode formar complexos com lipídios, os chamados complexos amilose-lipídeo, além de ocorrer também em sua forma livre. A capacidade dessa molécula de formar diferentes arranjos estruturais é um dos fatores que influenciam suas propriedades funcionais (Eliasson, 2004; Denardin e Silva, 2009).

A amilopectina, por sua vez, é uma molécula de grande peso molecular, altamente ramificada. Ela apresenta cadeias de α -D-glicopirranose unidas por ligações α -1,4, com cerca de 4 a 6% de ligações α -1,6 responsáveis pelas ramificações. De acordo com Vandeputte e Delcour (2004), “o peso molecular da amilopectina pode variar de 50 a 500 milhões de Daltons”, dependendo da fonte botânica e dos métodos de extração.

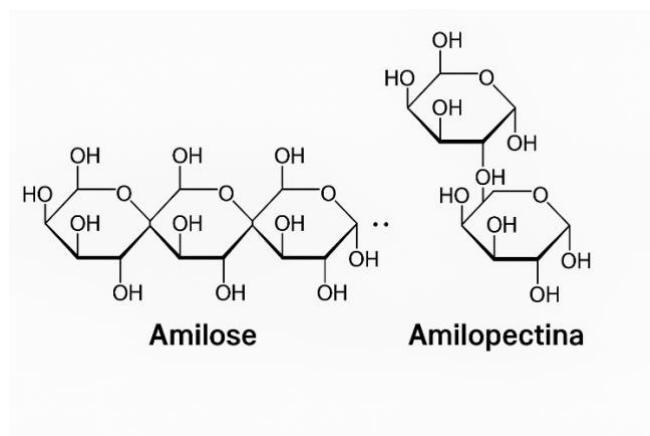


Figura 2. Estrutura molecular da amilose e da amilopectina

A estrutura da amilopectina pode ser descrita por três tipos de cadeias: A, B e C. As cadeias A ligam-se às cadeias B ou C, mas não originam ramificações. Já as cadeias B conectam-se a outras cadeias B ou C e originam cadeias do tipo A e B. Por fim, a cadeia C é única em cada molécula de amilopectina, possui um terminal redutor e está ligada tanto por ligações α -1,4 quanto α -1,6 (Vandeputte e Delcour, 2004).

3.2. Função biológica do amido

O amido é o principal carboidrato de reserva nas plantas, composto por duas macromoléculas: a amilose, que possui cadeia linear, e a amilopectina, que é ramificada (Jane, 2009; Zobel, 1988). O amido do milho é armazenado principalmente no endosperma, que representa a maior parte do grão. Nessa região, o amido se acumula em forma de grânulos, compostos por amilose e amilopectina. O grão de milho é formado por três partes: o endosperma (rico em amido), o gérmen (onde ficam óleos e enzimas) e o pericarpo, que é a casca protetora. A composição e integridade dessas partes influenciam diretamente a qualidade e funcionalidade do amido. No milho e em outras gramíneas, o amido é sintetizado e acumulado principalmente nos grãos, servindo como fonte vital de energia para a planta durante estágios de alta demanda metabólica, como a germinação e o desenvolvimento inicial das plântulas (Buckeridge, 2021; Li et al., 2019). Essa reserva energética é fundamental para garantir o crescimento e a sobrevivência da planta, especialmente em fases em que a fotossíntese não é suficiente para suprir suas necessidades.

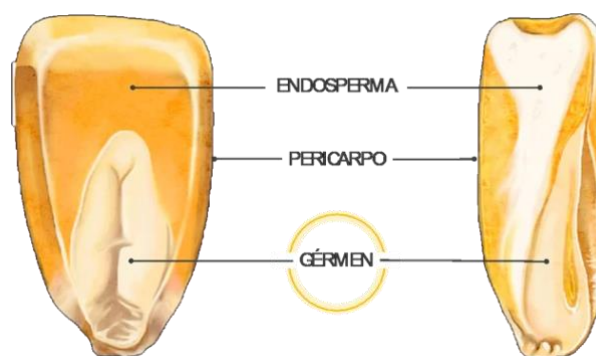


Figura 3. Estrutura do grão de milho

Durante a germinação, o amido acumulado é degradado por enzimas hidrolíticas, principalmente as amilases, que quebram as moléculas em açúcares simples, como glicose, utilizados para a respiração celular e geração de ATP (Li et al., 2019; Denardin & Silva, 2009). Este processo enzimático é regulado para garantir o fornecimento adequado de energia ao embrião em desenvolvimento, promovendo o crescimento rápido e o estabelecimento da plântula. A mobilização eficiente do amido é, portanto, um fator decisivo para a viabilidade e vigor das sementes, impactando diretamente na produtividade da cultura do milho (Paterniani & Campos, 1999).

Além de sua função energética, o amido também atua como um componente importante na adaptação da planta a condições ambientais adversas, como déficits hídricos e altas temperaturas (Kong et al., 2020; Heinemann et al., 2009). O armazenamento e a regulação do metabolismo do amido permitem que o milho e outras plantas mantenham sua homeostase energética quando a fotossíntese é limitada por fatores de estresse, contribuindo para a tolerância e resiliência das plantas. Esse papel adaptativo do amido reforça sua importância não apenas no ciclo metabólico, mas também na estabilidade produtiva das culturas.

Por fim, pesquisas recentes indicam que o amido exerce influência direta na interação entre a planta e o ambiente do solo, especialmente na absorção de água e nutrientes essenciais para o desenvolvimento do milho (Gao et al., 2022). Essa relação destaca a multifuncionalidade do amido, que vai além do simples armazenamento energético para atuar no equilíbrio fisiológico e nutricional da planta. Assim, o amido se apresenta como um elemento central para a otimização da produtividade agrícola e para a sustentabilidade das práticas de melhoramento genético, alinhando-se às demandas atuais por cultivares mais eficientes e adaptadas (Lima & Borém, 2018; Schaffert et al., 2016).

3.3. Variedade de amido em diferentes híbridos de milho

O amido, como principal produto de reserva nas plantas, possui grande importância não apenas no fornecimento de energia, mas também no crescimento e desenvolvimento das culturas. A sua variedade entre diferentes híbridos de milho é uma característica essencial, pois influencia diretamente tanto o uso do amido na alimentação quanto sua aplicação em biotecnologia e outras indústrias.

A composição do amido, que é predominantemente constituído por amilopectina e amilose, varia entre os híbridos. Entre os híbridos de milho com alta concentração de amilopectina, destaca-se o AG1051, amplamente utilizado na alimentação animal. Este híbrido possui amido ceroso, o que confere excelente digestibilidade e alta viscosidade, características desejáveis para formulação de rações. Por outro lado, híbridos como o BRS 3046, com maior proporção de amilose, são valorizados na produção de alimentos com baixo índice glicêmico e aplicações tecnológicas que exigem retrogradação mais lenta, como a fabricação de filmes comestíveis e embalagens biodegradáveis. O amido ceroso, praticamente isento de amilose, oferece maior estabilidade térmica e resistência ao envelhecimento do gel, sendo útil em processos industriais que exigem tais propriedades (Liu et al., 2021). Segundo Patel et al. (2020), híbridos de milho com alto teor de amilose, por outro lado, apresentam características que são desejáveis em produtos como filmes comestíveis e bioplásticos devido à maior resistência a temperaturas elevadas e a sua capacidade de formar estruturas mais densas.

Sun et al. (2020) destaca que a variação do teor de amilopectina e amilose também influencia a textura, viscosidade e estabilidade dos produtos alimentícios derivados do milho, como amido modificado e xarope de milho. Híbridos de milho que possuem maior teor de amilopectina são utilizados para obter produtos com maior consistência e viscosidade, enquanto aqueles com maior teor de amilose oferecem uma maior resistência à fusão e retrocesso durante o armazenamento.

Tabela 1. Comparação entre híbridos de milho com diferentes teores de amilose e amilopectina

Híbrido	Teor Amilose (%)	Teor Amilopectina (%)	Tipo Amido	Principais aplicações
AG 1051	5-10	90-95	Ceroso	Ração animal, silagem.
BRS3046	60-70	30-40	Alto teor de amilose	Embalagens biodegradáveis, alimentos de baixo índice glicêmico.
DKB390PRO3	25-28	72-75	Convencional	Produção de etanol, alimentos processados.
BRS4103	20-25	75-80	Levemente ceroso	Produção de xarope de milho e molhos espessos.
Híbrido Experimental CER-MZ	<5	>95	Ceroso Modificado	Ingredientes para indústria farmacêutica e alimentícia premium.

Fonte. Adaptado de EMBRAPA (2018), PAES (2008) e SCHAFERT et al. (2016)

Além disso para Tang et al. (2021), o impacto de fatores ambientais como temperatura, irrigação e qualidade do solo também desempenham um papel na modulação da composição do amido em diferentes híbridos. O estresse hídrico, por exemplo, pode reduzir a produção de amido em algumas variedades, enquanto outras variedades mais resistentes podem manter níveis adequados de amido, o que é fundamental para garantir a produção e a qualidade do grão em condições adversas.

Em resumo, a variação no conteúdo de amido entre diferentes híbridos de milho não só afeta suas propriedades funcionais e industriais, mas também tem implicações na eficiência da planta em utilizar os nutrientes armazenados. O controle dessa variabilidade pode ser crucial para otimizar tanto a produção agrícola quanto as aplicações industriais do milho.

3.4. Fatores que influenciam a qualidade do amido de milho: genética, condições ambientais e práticas de cultivo

A busca por materiais de maior produtividade, que exijam menos investimentos nos tratos culturais, além de apresentarem resistência a doenças e alta qualidade física e nutricional do produto, representa um dos maiores desafios para os melhoristas de plantas. No caso do milho, a qualidade do amido — fundamental para suas aplicações industriais e alimentícias — é diretamente influenciada por três grandes fatores: a genética, as condições ambientais e as práticas de cultivo adotadas.

No aspecto genético, a utilização da superioridade dos genótipos heterozigotos e do vigor híbrido tem sido a principal metodologia para obter híbridos que apresentam composição ideal do amido, especialmente no equilíbrio entre amilopectina e amilose. Até o início dos anos vinte, a produção de milho estava restrita a variedades, cujas características genéticas limitavam o controle sobre a qualidade do amido. Com o surgimento dos primeiros híbridos duplos na década de 1920, e posteriormente dos híbridos simples em 1950, o melhoramento genético permitiu avanços significativos na qualidade do amido, por meio da seleção de linhagens homozigotas com características desejáveis para as propriedades funcionais do amido (Sprague & Dudley, 1988; Hallauer, 1990; Fancelli, 1994).

Além da genética, as condições ambientais durante o ciclo de cultivo exercem papel decisivo na formação e composição do amido. Fatores como temperatura, disponibilidade hídrica, qualidade do solo e estresses climáticos podem alterar a biossíntese do amido e sua estrutura, influenciando diretamente a viscosidade, estabilidade térmica e resistência ao retrocesso do produto final.

As práticas de cultivo também são fundamentais para garantir amido de alta qualidade. O manejo adequado da irrigação, o uso balanceado de fertilizantes, o controle de doenças e pragas, assim como o momento correto da colheita, impactam diretamente a quantidade e a composição do amido no grão de milho. O emprego de tecnologias modernas, como seleção recorrente, retrocruzamento, autofecundações sucessivas e tecnologia de duplo-haplóides, tem potencializado a obtenção de linhagens com melhor resposta genética a essas condições ambientais e práticas agronômicas, promovendo assim a produção de milho com amido mais estável e adequado para as diversas aplicações industriais (Sarkar K. R, et al. 2021)

Dessa forma, o aprimoramento genético aliado ao manejo eficiente das condições ambientais e práticas agrícolas sustentáveis constitui a base para a produção de milho com qualidade superior do amido, atendendo às exigências do mercado e contribuindo para a competitividade da cultura.

3.5. Importância do amido na qualidade do grão: características que impactam no processamento e valor nutritivo.

O amido é o principal componente dos grãos de milho, representando cerca de 60 a 70% do peso seco do grão, e sua qualidade influencia diretamente as propriedades físicas, químicas e nutricionais do produto final (Zhou et al., 2019). A composição do

amido, especialmente a relação entre amilose e amilopectina, determina a funcionalidade do amido em processos industriais e sua digestibilidade, afetando o valor nutritivo dos alimentos derivados do milho (Jane, 2009).

A proporção de amilose no amido está associada à resistência ao retrocesso, melhorando a estabilidade dos produtos durante o armazenamento e processamento térmico (Zobel, 1988). Amidos com maior conteúdo de amilopectina, por outro lado, conferem maior viscosidade e capacidade de formação de gel, características desejadas para algumas aplicações alimentícias e industriais (Liu et al., 2019).

Do ponto de vista nutricional, a digestibilidade do amido influencia o índice glicêmico e a disponibilidade de energia, sendo que frações de amido resistente atuam como fibras dietéticas, promovendo benefícios à saúde intestinal (Englyst et al., 1992). Além disso, a estrutura física dos grânulos de amido, como tamanho e forma, impacta a cinética de digestão e a textura dos alimentos processados (Wang et al., 2015).

Por fim, fatores genéticos do milho, condições ambientais durante o cultivo e práticas agrícolas influenciam a composição e qualidade do amido, refletindo na performance durante o processamento e no valor nutricional dos produtos finais (Tester et al., 2004).

3.6. Qualidade do grão e impacto na qualidade do amido

A qualidade do amido extraído do milho está diretamente relacionada à qualidade dos grãos, a qual é influenciada por fatores genéticos, ambientais e agronômicos. O milho é a principal fonte de amido para diversas aplicações industriais, e a composição química do grão, principalmente a proporção entre amilose e amilopectina, é determinante para as propriedades funcionais do amido, como viscosidade, estabilidade térmica e resistência ao retrocesso (Li et al., 2019; Tester et al., 2004).

Grãos de milho com alta pureza, integridade física e maturação adequada tendem a apresentar amido de melhor qualidade, pois esses fatores evitam a presença de impurezas e alterações na estrutura do amido que podem comprometer seu desempenho (Wang et al., 2019). A maturação do grão é especialmente crítica, pois amidos de grãos imaturos ou sobremaduros possuem propriedades químicas e físicas diferentes, o que afeta a funcionalidade do amido (Shi & Seib, 1992).

Além disso, o manejo agrícola, incluindo a nutrição da planta, irrigação e controle de pragas, impacta a saúde da planta e, consequentemente, a qualidade do grão e do amido. Estresses ambientais, como seca e temperaturas elevadas, podem reduzir a

biossíntese de amido e modificar a proporção entre amilose e amilopectina (Tang et al., 2021; Kong et al., 2020).

A densidade e a uniformidade dos grãos também influenciam a qualidade do amido, pois grãos mais densos geralmente contêm maior quantidade de amido e menor teor de contaminantes, o que favorece a qualidade do produto final (Kulp & Ponte, 2000).

Portanto, para garantir amido de alta qualidade, é fundamental que a produção de milho ocorra sob condições que promovam grãos íntegros, bem desenvolvidos e colhidos no momento adequado, além de utilizar híbridos com perfil genético favorável para as características desejadas do amido.

3.7. Impacto do teor e qualidade do amido na nutrição, digestibilidade e valor energético do milho

O amido representa a principal fração do milho e desempenha papel fundamental na qualidade nutricional do grão, especialmente influenciando a digestibilidade e o valor energético do alimento. A composição do amido, em especial a proporção entre amilose e amilopectina, afeta diretamente sua estrutura e taxa de digestão. Amidos com maior teor de amilose tendem a ser menos digeríveis devido à formação de estruturas cristalinas mais estáveis, contribuindo para o chamado amido resistente, que possui benefícios para a saúde intestinal e modulação glicêmica (Englyst et al., 1992; Sajilata et al., 2006). Por outro lado, amidos ricos em amilopectina são rapidamente digeridos, promovendo uma rápida liberação de glicose e maior valor energético disponível (Tester et al., 2004).

Além disso, o tamanho e a morfologia dos grânulos de amido influenciam sua digestibilidade, uma vez que grânulos menores e menos compactos apresentam maior superfície para a ação das enzimas digestivas (Wang et al., 2015). A interação do amido com outros componentes do grão, como proteínas e lipídios, também pode alterar a taxa de digestão e absorção, afetando o valor nutricional do milho (Li et al., 2018).

Dessa forma, a qualidade do amido impacta diretamente a eficiência nutricional do milho, sendo fundamental a seleção genética e o manejo agrícola para otimizar essas características, atendendo tanto a demandas alimentares quanto industriais.

3.8. O papel do melhoramento genético na otimização da produção de híbridos de milho com maior qualidade de amido

O melhoramento genético tem se consolidado como uma das ferramentas mais eficazes para atender às crescentes demandas do setor agrícola e industrial quanto à

qualidade do milho, especialmente no que se refere à composição e funcionalidade do amido. Com o avanço das biotecnologias e a intensificação das pesquisas em genética vegetal, torna-se possível desenvolver híbridos com características específicas de rendimento, adaptação ao ambiente e qualidade físico-química dos grãos.

Uma das principais contribuições do melhoramento genético é a seleção de cultivares com maior teor de amido no endosperma, bem como o ajuste da proporção entre amilose e amilopectina. O milho convencional apresenta de 25 a 28% de amilose e o restante de amilopectina; porém, através de programas de melhoramento é possível obter cultivares de alto teor de amilose (até 80%), utilizados em alimentos com menor índice glicêmico e também na produção de filmes biodegradáveis e cápsulas farmacêuticas (Abimilho, 2015; Singh et al., 2003; Paes, 2008).

Além da composição química, o melhoramento genético atua na seleção de grânulos de amido com maior estabilidade térmica e resistência à retrogradação, características desejadas em produtos alimentícios processados, como biscoitos, macarrão instantâneo, pudins e balas de goma. Essas propriedades podem ser manipuladas por meio da escolha de linhagens parentais que apresentem grânulos de forma, tamanho e estrutura molecular diferenciadas, como verificado por Sahai e Jackson (1996) e Li et al. (2001).

A integração entre a genética e o manejo agrônômico também tem sido fundamental para aumentar a eficiência produtiva e a qualidade dos híbridos. Estudos como os de Alvarez et al. (2006) e Argenta et al. (2001) mostram que a seleção de híbridos com arquitetura foliar mais ereta e maior tolerância ao adensamento permite semeaduras com menor espaçamento entre linhas, otimizando a interceptação da luz e o aproveitamento de nutrientes. Isso resulta em maior enchimento de grãos, com incremento na fração de endosperma, que é responsável por até 98% do amido presente no grão (Glover & Mertz, 1987).

Além disso, a engenharia genética permite a inserção de genes que conferem maior tolerância a estresses bióticos e abióticos, como seca, pragas e doenças. Isso amplia a estabilidade da produção em diferentes condições climáticas e reduz perdas na qualidade do grão, especialmente durante o armazenamento, o que é fundamental para a integridade do amido (Carneiro Et Al., 2000; Barcelo & Lazzeri, 1995).

O desenvolvimento de híbridos com perfis específicos de amido também permite a diversificação dos usos industriais. Enquanto cultivares com alto teor de amilopectina são preferidas para a produção de adesivos, etanol e produtos têxteis, aquelas com maior teor de amilose são direcionadas para a alimentação funcional e para a indústria

farmacêutica (Nguyen Et Al., 1998; Sandhu et al., 2007). A possibilidade de manipular essas proporções de forma precisa via melhoramento genético representa um avanço significativo para cadeias produtivas que necessitam de matérias-primas com qualidade constante.

Tabela 2: Relação entre setores industriais e características ideais do amido de milho

Setor Industrial	Proporção Ideal Amilose/Amilopectina	Características Funcionais Desejadas	Aplicações Típicas	Principais Aplicações
Alimentícia	Moderado a alto teor de amilopectina	Alta viscosidade, boa estabilidade térmica	Molhos, sopas, sobremesas	Produção de xarope, biscoitos e molhos
Farmacêutica	Alto teor de amilose	Resistência térmica, digestão lenta (amido resistente)	Cápsulas, filmes biodegradáveis	Ingredientes para a indústria farmacêutica
Energética (Biocombustíveis)	Alto teor de amilopectina	Rápida gelatinização, baixa cristalinidade	Etanol, biogás e polímeros	Etano, ração balanceada e alimentos processados
Embalagens e Bioplásticos	Muito alto teor de amilose	Formação de filmes resistentes, estrutura rígida	Sacolas, embalagens, plásticos ecológicos	Embalagens e alimentos funcionais de baixo índice glicêmico
Nutrição Animal	Alto teor de amilopectina (Ceroso)	Alta digestibilidade, fácil fermentação ruminal	Rações para aves, suínos e bovinos	Alimentos que exigem alta viscosidade e rápida digestão

Fonte. Elaborado pelo autor com base em Paes (2008), EMBRAPA (2018) e Singh et al. (2003)

Por fim, as instituições de pesquisa como a Embrapa Milho e Sorgo têm desempenhado papel crucial nesse cenário, atuando tanto na conservação de germoplasma, como no desenvolvimento de novas linhagens tropicais com qualidade nutricional melhorada e maior rendimento de amido (Netto & Andrade, 2000; Cruz et al., 2008). A partir da combinação de ferramentas tradicionais de melhoramento e técnicas modernas de biotecnologia, é possível gerar híbridos mais produtivos, eficientes e adaptáveis, promovendo ganhos econômicos e tecnológicos para os setores agrícola, alimentar e industrial.

3.8.1. Melhoramento genético para modulação da estrutura e funcionalidade do amido: impacto na indústria alimentícia e farmacêutica

O melhoramento genético do milho tem se concentrado na modificação da composição do amido, principalmente na relação entre amilose e amilopectina, com vistas a aplicações industriais específicas. Híbridos cerosos, praticamente isentos de amilose, têm sido selecionados para atender à indústria alimentícia, onde são valorizados por sua elevada viscosidade, estabilidade em pasteurização e retrogradação mínima, o que

melhora a textura e a conservação de produtos como sobremesas, sopas, molhos e alimentos prontos para consumo (Nguyen et al., 1998; Sandhu et al., 2007).

Por outro lado, híbridos ricos em amilose são preferidos na fabricação de cápsulas farmacêuticas, filmes biodegradáveis e alimentos funcionais com menor índice glicêmico, devido à sua maior resistência à digestão enzimática e formação de amido resistente (Singh et al., 2003). Essa variabilidade é alcançada por meio da seleção assistida por marcadores moleculares e da expressão direcionada de genes relacionados às enzimas da biossíntese do amido, como a amido sintase e a ramificante de amido. Tais avanços permitem desenvolver híbridos com perfis estruturais específicos, adaptados às demandas tecnológicas das cadeias produtivas (Carneiro et al., 2000; Barcelo & Lazzeri, 1995).

3.8.2. Melhoramento de híbridos para ração animal: foco em digestibilidade e eficiência energética

O amido representa a principal fonte de energia no milho utilizado na alimentação animal, especialmente em rações para aves e suínos, que consomem cerca de 70 a 80% da produção nacional (Fiesp, 2016; Embrapa, 2015). Nesse contexto, o melhoramento genético tem priorizado híbridos com elevada digestibilidade do amido, o que se traduz em melhor conversão alimentar e ganho de peso nos animais. A digestibilidade está relacionada a fatores como o tamanho dos grânulos, o grau de cristalinidade e a forma de interação entre o amido e as proteínas da matriz endospermica (Sahai & Jackson, 1996; Glover & Mertz, 1987).

Híbridos com grânulos de amido menores e com maior proporção de amilopectina demonstram maior vulnerabilidade à ação das enzimas digestivas, proporcionando melhor aproveitamento energético da ração. A engenharia genética e os programas de melhoramento também têm possibilitado a redução de fatores antinutricionais, como fitatos, e a otimização do perfil de aminoácidos associados ao amido, aumentando a biodisponibilidade dos nutrientes (Peter et al., 2014). Essa abordagem é essencial para sistemas intensivos de produção animal, nos quais a eficiência do uso da ração impacta diretamente na rentabilidade da atividade.

3.8.3. Produção de híbridos de alto rendimento amiláceo para uso energético e biotecnológico: uma alternativa estratégica para o setor de biocombustíveis

A crescente demanda por fontes alternativas de energia tem impulsionado o desenvolvimento de híbridos de milho com alto rendimento em amido, especialmente voltados para a produção de etanol e bioplásticos. O melhoramento genético permite selecionar plantas com elevado conteúdo de amido no endosperma, associado a estruturas moleculares que favorecem a hidrólise e a fermentação. Amidos com menor complexidade estrutural, baixa cristalinidade e predominância de amilopectina são preferidos nesses processos, pois exigem menor consumo de energia e enzimas durante a conversão do amido em açúcares fermentáveis (Barcelo & Lazzeri, 1995; Carneiro et al., 2000).

Além disso, o desenvolvimento de híbridos transgênicos com genes que codificam enzimas amilolíticas pode permitir a autocatálise parcial do amido, reduzindo etapas industriais e custos de produção. A EMBRAPA, através de seu núcleo de biotecnologia, tem atuado no desenvolvimento de linhagens adaptadas a diferentes regiões brasileiras, otimizando o rendimento por hectare e a qualidade do amido conforme o uso final (Netto & Andrade, 2000; Abimilho, 2015). A integração entre melhoramento convencional, técnicas de cultura de tecidos e ferramentas de edição gênica (como CRISPR-Cas9) representa um caminho promissor para a customização do milho como biofábrica de amido energético.

3.8.4. Exemplos de híbridos de milho com diferentes perfis de amido e suas aplicações

O conhecimento sobre a composição do amido presente em diferentes híbridos de milho tem se tornado uma ferramenta fundamental para o direcionamento de cultivares conforme a finalidade de uso seja alimentar, industrial ou energético. A proporção entre amilose e amilopectina, a estrutura dos grânulos de amido, bem como o teor total de amido no grão, influenciam diretamente na digestibilidade, viscosidade, retrogradação e valor energético dos produtos finais derivados do milho.

Conforme Paes (2008) e Mattoso et al. (2006), o milho convencional possui, em média, 25% de amilose e 75% de amilopectina, sendo essa relação modulada por melhoramento genético conforme as demandas industriais. Híbridos cerosos, por exemplo, são praticamente isentos de amilose, resultando em maior viscosidade e menor retrogradação, o que os torna ideais para a indústria alimentícia de sopas e molhos prontos. Por outro lado, híbridos com alto teor de amilose oferecem amido mais resistente

à digestão, sendo utilizados na formulação de alimentos funcionais e na produção de materiais biodegradáveis.

De acordo com Schaffert et al. (2016) e Cruz et al. (2008), o melhoramento genético tem permitido a seleção de híbridos específicos para aplicações diversas, como a alimentação animal que requer alta digestibilidade e liberação rápida de energia ou a produção de etanol, que exige amido com estrutura mais simples e maior taxa de conversão fermentativa. Esses avanços são potencializados pela adoção de ferramentas como a seleção assistida por marcadores moleculares e a engenharia genética, resultando em cultivares como o BRS 3046, AG1051 e BRS 4103, já utilizados com diferentes finalidades.

A seleção de híbridos voltados à composição do amido precisa considerar o ambiente de cultivo, os sistemas de produção e a destinação do grão. Alvarez et al. (2006) e Argenta et al. (2001) apontam que o espaçamento e densidade de plantio influenciam significativamente o enchimento de grãos e, por consequência, a produtividade do amido. Assim, híbridos como o DKB 390 PRO3 são recomendados para cultivos intensivos, enquanto BRS 2022 atende a pequenas propriedades com sistemas de baixo insumo.

Segundo Cruz et al. (2012) e Mattoso et al. (2006), o avanço na produtividade de híbridos também deve ser acompanhado da qualidade funcional do amido. Para fins de produção energética, como etanol e biogás, o ideal são híbridos com alta concentração de amilopectina e baixa cristalinidade, facilitando a hidrólise. Já na alimentação funcional e farmacêutica, o foco são híbridos com alta amilose e estrutura resistente, promovendo menor resposta glicêmica e melhor estabilidade térmica.

3.9. Avanços e tendências tecnológicas no melhoramento genético do milho para otimização do amido

O melhoramento genético do milho tem se beneficiado de avanços científicos e tecnológicos significativos, especialmente com o desenvolvimento de ferramentas moleculares e biotecnológicas que possibilitam um entendimento mais detalhado dos genes envolvidos na biossíntese do amido. A engenharia genética, juntamente com técnicas de seleção assistida por marcadores moleculares (MAS), tem permitido acelerar a identificação e incorporação de características que favorecem o aumento da qualidade e quantidade do amido, essencial para diferentes setores industriais (Cruz et al., 2008; Schaffert et al., 2016). Esses métodos viabilizam a criação de híbridos que não apenas apresentam alto rendimento, mas também especificidades como maior proporção de

amilose ou amilopectina, conforme a aplicação desejada, seja para a indústria alimentícia, farmacêutica ou de biocombustíveis.

Além disso, o advento das tecnologias ômicas como genômica, transcriptômica e proteômica tem possibilitado uma análise integrada do funcionamento da planta em nível molecular, elucidando mecanismos regulatórios e vias metabólicas que determinam a síntese e armazenamento do amido no grão (Magalhães & Durães, 2006). Esse conhecimento aprofundado abre espaço para estratégias mais precisas de melhoramento, indo além das características fenotípicas tradicionais e permitindo a manipulação de processos bioquímicos específicos. O uso de edição gênica, como CRISPR-Cas9, também desponta como uma ferramenta promissora para introduzir modificações pontuais, reduzindo o tempo e custos no desenvolvimento de cultivares superiores.

No entanto, apesar desses avanços, o desafio permanece em garantir que as características desejadas de amido sejam expressas de maneira estável em condições ambientais variadas, como diferentes climas, solos e regimes hídricos. A interação genótipo \times ambiente é um fator crítico que deve ser considerado no processo seletivo, demandando a realização de testes em múltiplos ambientes e o desenvolvimento de cultivares com plasticidade fenotípica adequada (Barbano et al., 2001). Dessa forma, o futuro do melhoramento genético do milho exige não só inovação tecnológica, mas também a integração de conhecimentos agronômicos para garantir a adaptação e produtividade consistente.

3.10. Influências fisiológicas e manejo agronômico no aumento do teor e qualidade do amido no milho

A fisiologia da planta de milho é fundamental para compreender e melhorar a capacidade de síntese e acúmulo do amido nos grãos. Durante o período de enchimento do grão, o amido é formado principalmente a partir dos fotoassimilados produzidos nas folhas, sendo essencial que o ciclo fenológico da planta seja otimizado para maximizar essa assimilação (Magalhães et al., 2009). Cultivares que possuem florescimento sincronizado e maior duração no enchimento de grãos tendem a acumular maiores quantidades de amido, o que pode ser explorado no melhoramento genético para aprimorar essas características. Portanto, estudos fisiológicos detalhados fornecem informações importantes para direcionar a seleção e o desenvolvimento de híbridos que maximizem o potencial produtivo.

Além disso, o manejo agrônomo exerce grande influência sobre a qualidade e quantidade de amido produzida. O espaçamento entre linhas e a densidade de semeadura, por exemplo, impactam diretamente a eficiência na captura de luz e a disponibilidade de nutrientes, refletindo na biomassa produzida e no rendimento do amido no grão (Alvarez et al., 2006; Silva et al., 2006). Uma configuração adequada dessas práticas permite a maximização do potencial genético das cultivares, promovendo uniformidade e qualidade na produção. Adubação nitrogenada e o manejo correto da irrigação também são essenciais para garantir que a planta tenha os recursos necessários para a síntese do amido durante as fases críticas do desenvolvimento.

Outro aspecto importante é a resistência das plantas a fatores estressantes ambientais, como déficit hídrico e temperaturas elevadas, que podem reduzir significativamente a biossíntese de amido e comprometer a qualidade do grão (Barbano et al., 2001). O desenvolvimento de cultivares geneticamente mais tolerantes a esses estresses, aliado a práticas agrônomicas eficientes, é uma tendência que promete melhorar a estabilidade da produção e garantir o atendimento às demandas industriais mesmo em condições adversas.

3.11. Atendimento às demandas industriais e sustentabilidade agrícola através do melhoramento do milho

A indústria atual demanda matérias-primas com características específicas, que garantam qualidade e funcionalidade para os mais diversos usos, desde alimentos processados até produtos químicos e energéticos. O melhoramento genético do milho com foco na composição do amido principalmente a proporção entre amilose e amilopectina é essencial para atender a essas especificações, uma vez que diferentes aplicações requerem propriedades particulares do amido, como gelatinização, viscosidade e digestibilidade (Mattoso et al., 2006; Paes, 2008). Portanto, a capacidade de direcionar geneticamente essas características agrega valor ao produto e amplia as possibilidades de mercado para o milho.

Paralelamente às exigências industriais, a agricultura moderna deve caminhar para a sustentabilidade, exigindo cultivares que aliem alta produtividade à eficiência no uso dos recursos naturais. O melhoramento genético tem investido no desenvolvimento de híbridos que apresentam maior eficiência no uso da água e dos nutrientes, além de maior resistência a pragas, doenças e estresses abióticos (Alvarez et al., 2006; Mattoso et al., 2006). Esses avanços contribuem para reduzir o impacto ambiental da cultura e aumentam

a resiliência da produção frente às mudanças climáticas, garantindo uma cadeia produtiva sustentável.

Por fim, a convergência entre inovação genética, manejo agrônomo e práticas sustentáveis aponta para um futuro promissor na cultura do milho, no qual será possível otimizar o teor de amido e atender simultaneamente às demandas da indústria e da agricultura responsável. O desenvolvimento de cultivares altamente especializadas, associadas a sistemas de produção eficientes e sustentáveis, contribuirá para a segurança alimentar, para o desenvolvimento econômico e para a preservação ambiental, estabelecendo um novo paradigma no cultivo do milho (Silva et al., 2006; Schaffert et al., 2016).

3.12. Tendências futuras e perspectivas no melhoramento genético do milho

O melhoramento genético do milho tem passado por uma transformação profunda com o avanço das tecnologias moleculares, que permitem intervenções mais precisas e eficientes nas características genéticas da planta. Entre as inovações mais promissoras destaca-se a tecnologia CRISPR-Cas9, capaz de editar genes específicos de forma rápida e direcionada, superando limitações dos métodos tradicionais. Essa precisão tem sido utilizada para conferir resistência a pragas, tolerância ao déficit hídrico e melhor adaptação a diferentes ambientes, acelerando o desenvolvimento de cultivares superiores (De Oliveira et al., 2012; Lima & Borém, 2018). Estudos recentes demonstram que o uso do CRISPR pode reduzir o ciclo de melhoramento em até 50%, o que é fundamental para responder rapidamente às demandas de segurança alimentar e mudanças climáticas (EMBRAPA, 2018).

Paralelamente, surge o conceito de milho biofábrica, em que a planta é geneticamente programada para produzir compostos industriais, farmacêuticos ou nutricionais de alto valor agregado. Essa abordagem amplia o potencial econômico da cultura, permitindo a diversificação da produção além do grão para alimentação animal e humana (Paes, 2008; De Oliveira et al., 2012). A biofabricação representa um avanço tecnológico que integra biotecnologia e agronegócio, promovendo sustentabilidade econômica para os produtores ao criar cadeias de valor diretamente no campo, reduzindo custos com insumos externos e estimulando inovação tecnológica.

Um dos focos técnicos essenciais para a indústria e pesquisa é a edição do perfil amiláceo do milho, que regula a proporção entre amilose e amilopectina no amido. A manipulação desses componentes altera propriedades físico-químicas importantes, como

a digestibilidade, textura e capacidade de formar filmes biodegradáveis, que são muito demandadas pela indústria alimentícia e de bioplásticos (Paes, 2008; Chaves et al., 2020). O desenvolvimento de linhagens específicas com perfis amiláceos customizados pode atender nichos de mercado, contribuindo para a sustentabilidade e inovação, além de abrir novas oportunidades econômicas para os produtores.

Contudo, a adoção dessas tecnologias não está isenta de desafios. A produção sustentável do milho depende não apenas do avanço genético, mas também do manejo integrado que considera aspectos ambientais e socioeconômicos. É fundamental o desenvolvimento de híbridos que tolerem estresses abióticos, como déficit hídrico, e bióticos, como pragas, aliado ao controle biológico integrado para minimizar impactos ambientais (Heinemann et al., 2009; Fontes & Valadares-Inglis, 2020; Garavazi et al., 2020). Além disso, questões regulatórias e a aceitação social de culturas geneticamente modificadas ou editadas via CRISPR ainda exigem atenção, pois impactam diretamente na viabilidade comercial dessas tecnologias no Brasil (De Oliveira et al., 2012).

Assim, o futuro do melhoramento genético do milho aponta para uma forte convergência entre inovação tecnológica e sustentabilidade. A utilização integrada de técnicas como CRISPR, biofabricação e edição do amido, combinada a práticas agrícolas responsáveis, posiciona o Brasil como protagonista na produção de milho de alta produtividade, valor agregado e menor impacto ambiental. Essa trajetória é essencial para garantir a segurança alimentar global, promover o desenvolvimento rural e fortalecer a competitividade do agronegócio brasileiro no cenário internacional.

4. CONCLUSÃO

O presente trabalho realizou uma análise detalhada da influência do amido na seleção de híbridos de milho, com base em uma revisão bibliográfica ampla e atualizada. Partindo do entendimento da estrutura molecular do amido foi possível compreender como essas variações influenciam diretamente na digestibilidade, valor energético, aplicação industrial e desempenho agrônomo do milho.

Verificou-se que a composição do amido não é um fator isolado, mas resultado da complexa interação entre fatores genéticos, ambientais e práticas agrônomicas. Nesse sentido, o melhoramento genético emerge como uma ferramenta essencial, permitindo a seleção de híbridos com características amiláceas específicas, adaptadas a diferentes demandas, seja para a produção de alimentos com baixo índice glicêmico, ração animal

de alta eficiência energética, biocombustíveis ou insumos para a indústria farmacêutica e de embalagens biodegradáveis.

Ademais, observou-se que os avanços nas tecnologias de edição gênica, como o CRISPR-Cas9, bem como o uso de seleção assistida por marcadores moleculares, têm acelerado significativamente o desenvolvimento de cultivares altamente especializadas. Tais inovações, aliadas a práticas agronômicas sustentáveis, configuram um cenário promissor para a cadeia produtiva do milho, contribuindo tanto para a segurança alimentar quanto para o desenvolvimento de produtos de maior valor agregado e menor impacto ambiental.

Portanto, conclui-se que a escolha adequada de híbridos de milho, com base na qualidade do amido, representa uma estratégia eficaz para impulsionar a produtividade, a sustentabilidade e a competitividade da agricultura brasileira. O sucesso futuro dessa abordagem dependerá da integração entre pesquisa científica, inovação tecnológica, políticas públicas e transferência de conhecimento ao produtor rural.

5. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- ALVAREZ, C. G. D.; PINHO, R. G.; BORGES, I. D. Avaliação de características agronômicas e de produção de forragens e grãos de milho em diferentes densidades de semeadura e espaçamentos entre linhas. **Ciência e Agrotecnologia**, v. 30, p. 402–408, 2006.
- ARGENTA, G. et al. Resposta de híbridos simples de milho à redução do espaçamento entre linhas. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, v. 36, n. 1, p. 71–78, 2001.
- BARCELO, P.; LAZZERI, P. A. Transformação genética de cereais. In: JONES, H. **Plant gene transfer and expression protocols**. New York: Springer, 1995. p. 113–123.
- BARBANO, M. T. et al. Temperatura-base e acúmulo térmico no subperíodo semeadura–florescimento masculino em cultivares de milho no Estado de São Paulo. **Revista Brasileira de Agrometeorologia**, v. 9, n. 2, p. 261–268, 2001.
- BRESOLIN, M.; PONS, A. L. **Botânica do milho (Zea mays)**. Porto Alegre: IPAGRO, 1983.
- BUCKERIDGE, M. S. Starch metabolism and mobilization in plants: key processes for germination and growth. **Plant Physiology and Biochemistry**, v. 167, p. 1–10, 2021.
- CARNEIRO, A. A. et al. Milho transgênico. **Biotecnologia, Ciência & Desenvolvimento**, v. 3, n. 15, p. 42–46, 2000.
- CHIA, T. et al. Synthesis and storage of starch in plants: a review of molecular mechanisms and physiological functions. **Frontiers in Plant Science**, v. 10, p. 1234, 2019.
- COÊLHO, J. D. **Milho: produção e mercados**. Brasília: CONAB, 2021.
- CONAB. **Acompanhamento da safra brasileira: grãos 2022/2023**. 12. levantamento. Brasília, 2023. Disponível em: <https://www.conab.gov.br>. Acesso em: 15 out 2025.
- CRUZ, C. D.; REGAZZI, A. J.; CARNEIRO, P. C. S. **Modelos biométricos aplicados ao melhoramento genético**. 3. ed. Viçosa: UFV, 2008.
- CRUZ, J. C. et al. **Cultivo do milho**. Sete Lagoas: Embrapa Milho e Sorgo, 2008.
- DENARDIM, C. C.; SILVA, L. P. Estrutura dos grânulos de amido e sua relação com propriedades físico-químicas. **Ciência Rural**, v. 39, n. 3, p. 945–954, 2009.
- DUARTE, J. O.; GARCIA, J. C. (ed.). **Milho: importância socioeconômica**. Brasília: Embrapa, 2021.
- EDUARDO, M. P. **Hidrólise enzimática de mandioca e puba para obtenção de xarope de maltose**. 2002. Dissertação (Mestrado) – Universidade de São Paulo, Piracicaba, 2002.

ELIASSON, A. C. **Starch in food: structure, function and applications**. New York: CRC Press, 2004.

ENGLEYST, H. N.; KINGMAN, S. M.; CUMMINGS, J. H. Classification and measurement of nutritionally important starch fractions. **European Journal of Clinical Nutrition**, v. 46, supl. 2, p. S33–S50, 1992.

EMBRAPA. **Predição genômica ajuda a identificar milho mais tolerante ao déficit hídrico**. Brasília, 2018.

FANCELLI, A. L. **Tecnologia da produção do milho para alta produtividade**. Piracicaba: ESALQ/USP, 1994.

FONTES, E. M. G.; VALADARES-INGLIS, M. C. **Controle biológico de pragas da agricultura**. Brasília: Embrapa, 2020.

FORNASIERI FILHO, D. **Manual da cultura do milho**. Jaboticabal: Funep, 2007.

FREITAS, D. et al. A rheological description of mixtures of a galactoxiloglucan with high amylose and waxy corn starches. **Carbohydrate Polymers**, v. 51, p. 25–32, 2003.

GAO, X.; LI, J.; WANG, Y. Starch role in plant–soil interactions and nutrient uptake in maize. **Plant and Soil**, v. 474, n. 1–2, p. 15–28, 2022.

GARAVAZI, F.; PATRONI, B. H.; CARVALHO BALIEIRO, C. Comparativo do controle biológico e químico de *Spodoptera frugiperda* na cultura do milho. **Revista Ensaios Pioneiros**, v. 4, n. 1, p. 89–98, 2020.

GLOVER, D. V.; MERTZ, E. T. Corn. In: OLSON, R. A.; FREY, K. J. **Nutritional quality of cereal grains: genetic and agronomic improvement**. Madison: ASA, 1987. p. 183–336.

HALLAUER, A. R. Methods used in developing maize inbred lines. **Maydica**, v. 35, n. 1, p. 1–16, 1990.

HEINEMANN, A. B. et al. Padrões de deficiência hídrica para a cultura de milho no Estado de Goiás e suas consequências para o melhoramento genético. **Ciência e Agrotecnologia**, v. 33, p. 1026–1033, 2009.

JANE, J. The structure and function of starch granules. In: **Starch in food: structure, function and applications**. Boca Raton: CRC Press, 2009. p. 1–40.

KONG, X.; LI, Y.; ZHANG, S. Role of starch metabolism in plant resistance to drought and heat stress. **Journal of Experimental Botany**, v. 71, n. 3, p. 917–927, 2020.

KULP, K.; PONTE, J. G. **Handbook of starch hydrolysis products and their derivatives**. New York: Wiley, 2000.

LI, F.; WANG, L.; ZHOU, Z. Enzymatic hydrolysis of starch and its role in plant development. **International Journal of Molecular Sciences**, v. 20, n. 4, p. 965, 2019.

- LIU, Q. et al. Effects of starch structure on gelatinization and pasting properties of waxy maize starch. **Carbohydrate Polymers**, v. 207, p. 192–198, 2019.
- LIU, H. et al. An insight into the structural evolution of waxy maize starch chains. **Food Chemistry**, v. 340, p. 127987, 2021.
- LIMA, R. O.; BORÉM, A. **Melhoramento de milho**. Viçosa: Editora UFV, 2018.
- MATTOSO, L. H. C. et al. Aplicações de biopolímeros na agricultura. In: VIEIRA, R. S.; BEPPU, M. M. (org.). **Avanços em polímeros naturais e seus nanocompósitos**. São Carlos: EdUFSCar, 2006. p. 205–236.
- MENDES, M. P. **Predição genômica de híbridos simples de milho**. 2015. Tese (Doutorado em Genética) – Universidade de São Paulo, Ribeirão Preto, 2015.
- NETTO, D. A. M.; ANDRADE, R. V. **Recursos fitogenéticos de milho, sorgo e milheto**. Sete Lagoas: Embrapa Milho e Sorgo, 2000.
- NGUYEN, Q. D.; JENSEN, C. T. B.; KRISTENSEN, P. G. Experimental and modelling studies of the flow properties of maize and waxy maize starch pastes. **Chemical Engineering Journal**, v. 70, p. 165–171, 1998.
- PAES, M. C. D. **Manipulação da composição química do milho: impacto na indústria e na saúde humana**. Brasília: Embrapa, 2008.
- PATERNIANI, E.; CAMPOS, M. S. Melhoramento do milho. In: BORÉM, A. **Melhoramento de espécies cultivadas**. Viçosa: UFV, 1999.
- SANDHU, K. S.; SINGH, N.; LIM, S. T. A comparison of native and acid thinned normal and waxy corn starches. **LWT – Food Science and Technology**, v. 40, n. 9, p. 1527–1536, 2007.
- SCHAFFERT, R. E. et al. Melhoramento do milho com foco em produtividade e qualidade industrial. In: EMBRAPA MILHO E SORGO. **Avanços tecnológicos na cultura do milho**. Sete Lagoas: Embrapa, 2016. p. 49–72.
- SHI, Y. C.; SEIB, P. A. Structure–function relations of granular starches. In: SHAH, Y. P.; MOREIRA, R. A. (ed.). **Starch: chemistry and technology**. New York: Academic Press, 1992. p. 333–358.
- SINGH, N. et al. Morphological, thermal and rheological properties of starches from different botanical sources. **Food Chemistry**, v. 81, n. 2, p. 219–231, 2003.
- SPRAGUE, G. F.; DUDLEY, J. W. **Corn and corn improvement**. Madison: American Society of Agronomy, 1988.
- SUN, J. et al. Effect of process conditions and amylose/amylopectin ratio on the characteristics of starch-based edible films. **International Journal of Food Science & Technology**, v. 55, n. 5, p. 1891–1898, 2020.

TANG, L. et al. Effects of high air temperature, drought, and both combinations on maize starch synthesis and grain yield. **Field Crops Research**, v. 274, p. 108290, 2021.

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.

USDA. **Market and trade data: corn**. Washington, 2023. Disponível em: <https://apps.fas.usda.gov/psdonline/>. Acesso em: 26 out. 2025.

VANDEPUTTE, G. E.; DELCOUR, J. A. From sucrose to starch granule to starch physical behavior: a focus on rice starch. **Carbohydrate Polymers**, v. 58, p. 245–266, 2004.

WANG, S. et al. Starch granule size and shape affect thermal and digestion properties of starch. **Food Hydrocolloids**, v. 90, p. 200–207, 2019.

ZHOU, Z. et al. The molecular structure and functional properties of starches isolated from hullless barley cultivars grown in China. **Food Chemistry**, v. 117, n. 3, p. 439–447, 2009.

ZOBEL, H. F. Molecules to granules: a comprehensive starch review. **Starch/Stärke**, v. 40, n. 2, p. 44–50, 1988.