



**UNIVERSIDADE ESTADUAL DO SUDOESTE DA BAHIA - UESB**

**DOUTORADO EM ENGENHARIA DE ALIMENTOS**

**CAMPUS JUVINO OLIVEIRA**

**BRUNA DE ANDRADE BRAGA MENDES**

**APLICAÇÃO DA FARINHA INTEGRAL DE BANANA VERDE NATIVA E  
MODIFICADA POR TRATAMENTO HIDROTÉRMICO EM FORMULAÇÕES DE  
BOLOS ISENTOS DE GLÚTEN**

**ITAPETINGA  
BAHIA – BRASIL  
2023**

**BRUNA DE ANDRADE BRAGA MENDES**

**APLICAÇÃO DA FARINHA INTEGRAL DE BANANA VERDE NATIVA E  
MODIFICADA POR TRATAMENTO HIDROTÉRMICO EM FORMULAÇÕES DE  
BOLOS ISENTOS DE GLÚTEN**

Tese apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia e Ciência de Alimentos da Universidade Estadual do Sudoeste da Bahia (UESB), como requisito parcial para obtenção do título de Doutor em Engenharia e Ciência de Alimentos, área de concentração em Ciência de Alimentos.

**ORIENTADORA:** Prof.<sup>a</sup> Dra. Cristiane Martins Veloso

**CO-ORIENTADORES:** Prof.<sup>a</sup> DSc. Renata Cristina Ferreira Bonomo

Prof. DSc. Leandro Soares Santos

Prof.<sup>a</sup> DSc. Cassiara Camelo de Souza

**ITAPETINGA  
BAHIA – BRASIL  
2023**

**FICHA CATALOGRÁFICA**664.768  
M49a

Mendes, Bruna de Andrade Braga.

Aplicação da farinha integral de banana verde nativa e modificada por tratamento hidrotérmico em formulações de bolos isentos de glúten. / Bruna de Andrade Braga Mendes. – Itapetinga-BA: UESB, 2023.

144f.

Tese apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia e Ciência de Alimentos da Universidade Estadual do Sudoeste da Bahia (UESB), como requisito parcial para obtenção do título de Doutor em Engenharia e Ciência de Alimentos, área de concentração em Ciência de Alimentos. Sob a orientação da Prof<sup>a</sup>. D. Sc. Cristiane Martins Veloso e coorientação da Prof<sup>a</sup>. D. Sc. Renata Cristina Ferreira Bonomo, Prof. D. Sc. Leandro Soares Santos e Prof<sup>a</sup>. D. Sc. Cassiara Camelo de Souza.

1. Farinha de banana - Bolos sem glúten. 2. Banana verde – Amido nativo modificado. 3. Banana – Tratamento hidrotérmico. I. Universidade Estadual do Sudoeste da Bahia - Programa de Pós-Graduação de Doutorado em Engenharia e Ciências de Alimentos, *Campus* de Itapetinga. II. Veloso, Cristiane Martins. III. Bonomo, Renata Cristina Ferreira. IV. Santos, Leandro Soares. V. Souza, Cassiara Camelo de. VI. Título.

**CDD(21): 664.768**

Catalogação na Fonte:

Adalice Gustavo da Silva – CRB 535-5ª Região  
Bibliotecária – UESB – Campus de Itapetinga-BA

Índice Sistemático para desdobramentos por Assunto:

1. Farinha de banana – Tratamento hidrotérmico
2. Alimentos funcionais
3. Farinha de banana – Produção e aplicação

## DECLARAÇÃO DE APROVAÇÃO



Universidade Estadual do Sudoeste da Bahia - UESB  
 Recredenciada pelo Decreto Estadual  
 N° 16.825, de 04.07.2016



Governo do  
 Estado da Bahia

## DECLARAÇÃO DE APROVAÇÃO

**Título:** “UTILIZAÇÃO DA FARINHA INTEGRAL DE BANANA-DA-TERRA VERDE (Musa Paradisiaca L.) NATIVA E MODIFICADA POR TRATAMENTO HIDROTÉRMICO EM FORMULAÇÃO DE BOLOS TIPO CUPCAKES ISENTOS DE GLÚTEN”.

**Autor (a):** BRUNA DE ANDRADE BRAGA MENDES

**Orientador (a):** Prof.<sup>a</sup> Dr.<sup>a</sup> Cristiane Martins Veloso

**Coorientador (a):** Prof. Dr. Leandro Soares Santos

Prof.<sup>a</sup> Dr.<sup>a</sup> Cassiara Camelo de Souza

Prof.<sup>a</sup> Dr.<sup>a</sup> Renata Cristina Ferreira Bonomo

Aprovada como parte das exigências para obtenção do Título de **DOUTORA EM ENGENHARIA E CIÊNCIA DE ALIMENTOS, ÁREA DE CONCENTRAÇÃO: CIÊNCIA DE ALIMENTOS**, pela Banca Examinadora.

Documento assinado digitalmente  
 GABRIELLE CARDOSO REIS FONTAN  
 Data: 17/07/2023 10:53:14-0300  
 Verifique em <https://validar.iti.gov.br>

Prof.<sup>a</sup> Dr.<sup>a</sup> Gabrielle Cardoso Reis Fontan  
 UESB

Documento assinado digitalmente  
 ANTONIO MANOEL MARADINI FILHO  
 Data: 14/07/2023 15:27:13-0300  
 Verifique em <https://validar.iti.gov.br>

Prof. Dr. Antonio Manoel Maridini Filho  
 (UFES)

Documento assinado digitalmente  
 RENATO SOUZA CRUZ  
 Data: 15/07/2023 15:44:26-0300  
 Verifique em <https://validar.iti.gov.br>

Prof. Dr. Renato Souza Cruz  
 (UEFS)

Documento assinado digitalmente  
 ELISETH DE SOUZA VIANA  
 Data: 14/07/2023 17:14:16-0300  
 Verifique em <https://validar.iti.gov.br>

Prof.<sup>a</sup> Dr.<sup>a</sup> Eliseth de Souza Viana  
 (EMBRAPA)

Documento assinado digitalmente  
 CRISTIANE MARTINS VELOSO  
 Data: 18/07/2023 11:19:28-0300  
 Verifique em <https://validar.iti.gov.br>

Prof.<sup>a</sup> Dr.<sup>a</sup> Cristiane Martins Veloso  
 Orientadora - UESB  
 Presidente da Banca

Itapetinga-BA, 13 de julho de 2023.

**“O correr da vida embrulha tudo,  
a vida é assim: esquentada e esfria,  
aperta e daí afrouxa,  
sossega e depois desinquieta.  
O que ela quer da gente é coragem.  
O que Deus quer é ver a gente  
aprendendo a ser capaz  
de ficar alegre a mais,  
no meio da alegria,  
e ainda mais alegre  
ainda no meio da tristeza!  
A vida inventa!  
A gente principia as coisas,  
no não saber por que,  
e desde aí perde o poder de continuação  
porque a vida é mutirão de todos,  
por todos remexida e temperada...”**

*João Guimarães Rosa*

*Dedico este trabalho a Pedro, meu amado filho,  
que é a minha fonte inesgotável de felicidade,  
esperança, força e resiliência.*

## AGRADECIMENTOS

A Deus, por ter cuidado de cada detalhe, por ter cuidado de mim. Nunca estive só, o Senhor sempre esteve ao meu lado e em alguns momentos eu tenho certeza de que me carregou no colo, sua graça e proteção foram fundamentais para que eu chegasse até aqui, obrigada senhor por esta conquista. “...*Não fui eu que ordenei a você? Seja forte e corajoso! Não se apavore nem desanime, pois o senhor, o seu Deus, estará com você por onde você andar.*” (Josué 1:9).

À minha mãe Vivalda e ao meu pai Helvécio, que apoiam e vibram por cada conquista minha, sei que sempre estou em suas preces e que vocês não descansam em oração, sou tão grata por tê-los em minha vida, amo vocês.

Ao meu filho Pedro, tão pequeno e já me ensinou tanto, era o seu sorriso e o seu abraço que eu procurava/procuro todos os dias para sentir o que realmente importa nessa vida, ser sua mãe é o melhor presente que Deus poderia ter me dado, agradeço por sua vida em minha vida. Te amo infinito, meu amor!

Ao meu marido Alisson, meu parceiro de vida, sem o seu apoio incondicional essa jornada não seria possível, obrigada por compreender a minha ausência em tantos momentos, por trazer paz nos momentos mais difíceis, você fez o seu melhor para que eu conseguisse realizar esse projeto com mais leveza e sem culpa, eu te amo!

Aos meus irmãos, cunhados e sobrinhos, cada um à sua maneira transmitiu força, estive presente e me deu suporte.

À minha amiga Cidia Luize, que sempre me incentivou e viveu cada etapa dessa jornada junto comigo e nunca me deixou desanimar, seu apoio foi muito importante.

Aos meus sogros, demais familiares e amigos por compreenderem a minha ausência, pelos momentos de descontração e apoio genuíno.

À Professora Cristiane Martins Veloso, minha querida orientadora, que tenho o mais profundo respeito. Obrigada pela orientação admirável, confiança, compreensão, conselhos, resiliência e amizade. Tenho muito orgulho e gratidão em ser sua orientanda, você é inspiração, levarei muito do seu orientar comigo.

Aos meus co-orientadores, professor Leandro Soares, Cassiara Camelo e Renata Bonomo, à professora Gabrielle Cardoso e a todos professores do Programa de Pós-Graduação em Engenharia e Ciência de Alimentos que direta ou indiretamente contribuíram para a viabilidade desta pesquisa.

Ao professor Alcebíades Rebouças e equipe da Biofábrica (UESB) pela disponibilidade em colaborar com o desenvolvimento dessa pesquisa.

Aos membros do Laboratório de Ciência e Tecnologia de Alimentos da Embrapa Mandioca e Fruticultura pelo suporte para realização da análise de RVA.

Aos professores João Tomaz da Silva Borges, Renato Souza Cruz, Leandro Soares Santos e Daniela Oliveira Dos Santos pela contribuição valiosa no exame de qualificação.

Aos amigos do Laboratório de Química III, Gabriela, Carlos, Gabriel, Maiara, Jaqueline, Bruno, Leonardo e Maria José, pela assistência, troca de conhecimentos, momentos de descontração e paciência com a minha mania de organização. Formamos um verdadeiro time!

Aos colegas do Laboratório de Engenharia de Processos (LEP), que direta ou indiretamente contribuíram na construção desse trabalho.

À minha amiga Dica pela presença, apoio e cumplicidade, essa jornada não teria sido a mesma sem você, obrigada por tanto, mesmo!

A Matheus Almeida, amigo que a UESB me deu, por todo auxílio, troca de conhecimentos e disponibilidade.

À Universidade Federal da Bahia por ter permitido minha dedicação exclusiva ao doutorado, dando suporte para o meu aperfeiçoamento profissional.

Aos amigos da UFBA por todo apoio e vibrações positivas.

Aos membros da banca examinadora, por terem aceitado prontamente o convite para cooperar com este trabalho.

À Universidade Estadual do Sudoeste da Bahia (UESB) pela oportunidade e estrutura para realização deste doutorado.

Ao colegiado do Programa de Pós-Graduação em Engenharia e Ciência de Alimentos (PPGECAL), pela oportunidade e assistência para realização deste doutorado.

À Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior (CAPES), pelo suporte para realização deste trabalho.

Deixo aqui o mais sincero e profundo agradecimento, **MUITO OBRIGADA!**

## SUMÁRIO

LISTA DE FIGURAS.....	XI
LISTA DE TABELAS.....	XII
LISTA DE ABREVIACÕES.....	XIII
RESUMO.....	XV
<b>CAPÍTULO 1.....</b>	<b>17</b>
1. INTRODUÇÃO.....	18
2. REVISÃO DE LITERATURA.....	19
2.1. Amido.....	19
2.1.1. Modificações do amido nativo.....	21
2.1.1.1. Modificação física.....	22
2.1.2. Amido resistente.....	23
2.2. Banana-da-terra ( <i>Musa paradisiaca</i> L.) verde .....	24
2.3. Glúten.....	24
2.3.1. Demanda do mercado por produtos sem glúten .....	25
2.3.3. Produtos sem glúten.....	27
2.3.3.1. Bolos .....	27
2.3.3.1.1. Bolo sem glúten .....	28
3. OBJETIVOS .....	31
3.1. Objetivo geral .....	31
3.1. Objetivos específicos .....	31
4. REFERÊNCIAS .....	32
<b>CAPÍTULO 2 .....</b>	<b>37</b>
RESUMO .....	39
1. INTRODUÇÃO .....	40
2. MATERIAIS E MÉTODOS .....	41
2.1 Obtenção da matéria-prima .....	41
2.2 Preparo da farinha integral de banana-da-terra ( <i>Musa paradisiaca</i> L.) verde ...	41
2.2.1 Determinação do rendimento .....	42
2.3 Modificação hidrotérmica .....	42
2.4 Caracterização da farinha nativa e modificada .....	43
2.4.1 Composição química .....	43
2.4.2 Teor de amido total da farinha nativa .....	44
2.4.3 Amido resistente da farinha nativa .....	44
2.4.4 Atividade de água da farinha nativa .....	45
2.4.5 Compostos fenólicos da farinha nativa .....	45
2.4.6 Teor de amilose aparente da farinha nativa e modificada .....	45
2.4.7 Propriedades de pasta da farinha nativa e modificada .....	45
2.4.2 Teor de amido total da farinha nativa .....	44

2.4.8 Poder de inchamento (PI) e índice de solubilidade (IS) da farinha nativa e modificada .....	46
2.5 Análise estatística .....	47
3. RESULTADOS E DISCUSSÃO .....	47
3.1 Rendimento da farinha integral de banana-da-terra verde nativa .....	47
3.2 Caracterização da farinha de banana-da-terra verde .....	47
3.3 Solubilidade, poder de inchamento e teor de amilose .....	51
3.4 Propriedades de pasta da farinha nativa e modificada .....	54
4. CONCLUSÃO .....	58
5. REFERÊNCIAS .....	59
<b>CAPÍTULO 3</b> .....	64
RESUMO .....	66
1. INTRODUÇÃO .....	66
2. MATERIAIS E MÉTODOS .....	70
2.1. Matéria-prima .....	70
2.2. Obtenção da farinha de banana-da-terra verde .....	70
2.3. Modificação por tratamento hidrotérmico .....	71
2.4. Desenvolvimento do cupcake sem glúten .....	72
2.5. Caracterização dos cupcakes sem glúten .....	75
2.5.1. Densidade da massa .....	75
2.5.2. Microestrutura da massa .....	76
2.5.3. Rendimento do processo e perda por cozimento .....	76
2.5.4. Altura dos cupcakes .....	76
2.5.5. Análise do volume específico .....	76
2.5.6. Teor de umidade .....	77
2.5.7. Análise do perfil de textura dos cupcakes .....	77
2.5.8 Análise do miolo .....	78
2.5.9 Cor do miolo e crosta .....	78
2.6. Análise sensorial .....	79
2.7. Análise estatística .....	80
3. RESULTADOS E DISCUSSÃO .....	80
3.1. Características dos cupcakes .....	81
3.2. Análise de cor da crosta e miolo dos cupcakes .....	86
3.3 Análise do perfil de textura .....	91
3.4 Aplicação do PCA nas propriedades texturais e características físicas dos cupcakes sem glúten .....	94
3.5 Análise sensorial .....	98
4. CONCLUSÃO.....	101
REFERÊNCIAS .....	102
<b>ANEXOS</b> .....	109

## LISTA DE FIGURAS

### CAPÍTULO 1

<b>Figura 1:</b> Representação gráfica do grânulo de amido (Fonte: DE BORBA <i>et al.</i> , 2021) .....	21
---	----

### CAPÍTULO 2

<b>Figura 1:</b> Banana-da-terra em estágio de maturação 1 (A); Banana-da-terra <i>in natura</i> fatiada (B); Farinha integral de banana-da-terra verde nativa (C).....	42
<b>Figura 2:</b> Superfícies de resposta do índice de solubilidade.....	53
<b>Figura 3:</b> Índice de solubilidade (A) e poder de inchamento (B) da farinha de banana-da-terra verde nativa e modificadas por HMT.....	54
<b>Figura 4.</b> Perfis de viscosidade da farinha de banana-da-terra verde nativa (NBF) e modificada por HMT (MBF) determinados por RVA.....	56

### CAPÍTULO 3

<b>Figura 1:</b> Banana-da-terra em estágio de maturação 1 (A); Banana-da-terra <i>in natura</i> fatiada (B); Banana-da-terra desidratada (C); Farinha integral de banana-da-terra verde nativa (D).....	71
<b>Figura 2:</b> Farinha integral de banana-da-terra verde nativa (A); Farinha integral de banana-da-terra verde modificada MBF1 (B); Farinha integral de banana-da-terra verde modificada MBF2(C); Farinha integral de banana-da-terra verde modificada MBF3 (D).....	74
<b>Figura 3:</b> Microestrutura da massa de cupcakes sem glúten elaborados com farinha de arroz (controle - A), farinha integral de banana-da-terra verde nativa (NAT - B) e modificadas (CUP1 - C, CUP2 - D e CUP3 - E) .....	84
<b>Figura 4:</b> Imagens reais e binárias do miolo dos cupcakes sem glúten elaborados com farinha de arroz (controle - A), farinha integral de banana-da-terra verde nativa (NAT - B) e modificadas (CUP1 - C, CUP2 - D e CUP3 - E) .....	85
<b>Figura 5:</b> Imagem da crosta (A) e miolo (B) dos cupcakes sem glúten controle e desenvolvidos com farinha integral de banana-da-terra verde nativa e modificadas por HMT.....	87
<b>Figura 6:</b> Análise de Componentes Principais (ACP): Gráfico de cargas fatoriais de variáveis de propriedades texturais e físicas dos cupcakes ao longo dos Componentes Principais 1, 2 e 3 (CP1 e CP2 – A; CP1 e CP3 – B) .....	95
<b>Figura 7:</b> Análise de componentes principais (ACP): distribuição das amostras em gráficos de dispersão para o tipo de farinha utilizada para a produção dos <i>cupcakes</i> e o tempo de armazenamento ao longo do Componente Principal 1 e 2 (A) e componente Principal 1 e 3 (B).....	96
<b>Figura 8:</b> Análise de componentes principais (ACP): Gráfico de cargas fatoriais dos <i>cupcakes</i> e dispersão dos consumidores para aceitação global dos cupcakes...	99

### ANEXOS

<b>Figura 9:</b> Resumo gráfico – Produção da farinha e cupcakes.....	109
---	-----

## LISTA DE TABELAS

### CAPÍTULO 2

<b>Tabela 1:</b> Condições experimentais do Delineamento Composto Central Rotacional (DCCR).....	43
<b>Tabela 2:</b> Descrição dos tratamentos.....	44
<b>Tabela 3:</b> Caracterização da farinha integral de banana-da-terra verde nativa (NBF).....	48
<b>Tabela 4:</b> Efeito do tratamento hidrotérmico na solubilidade, poder de inchamento e teor de amilose da farinha integral de banana-da-terra verde.....	52
<b>Tabela 5:</b> Propriedades de pasta da farinha de banana-da-terra verde nativa (NBF) e modificada por HMT (MBF) determinados por RVA.....	57

### CAPÍTULO 3

<b>Tabela 1:</b> Descrição dos tratamentos.....	72
<b>Tabela 2:</b> Formulação dos <i>cupcakes</i> à base de farinha de arroz (Controle), farinha integral de banana-da-terra verde nativa (NBF) e modificadas (MBF1, MBF2 e MBF3) .....	73
<b>Tabela 3:</b> Características dos <i>cupcakes</i> sem glúten controle e desenvolvidos com farinha integral de banana-da-terra verde nativa e modificadas por HMT....	82
<b>Tabela 4:</b> Análise de cor da crosta e miolo dos <i>cupcakes</i> sem glúten controle e desenvolvidos com farinha integral de banana-da-terra verde nativa e modificadas por HMT.....	86
<b>Tabela 5:</b> Análise do perfil de textura dos <i>cupcakes</i> sem glúten controle e desenvolvidos com farinha integral de banana-da-terra verde nativa e modificadas por HMT.....	92
<b>Tabela 6:</b> Coeficientes de correlação de Pearson para os parâmetros relacionados às propriedades texturais e características físicas dos <i>cupcakes</i> sem glúten.....	93
<b>Tabela 7:</b> Análise sensorial de <i>cupcakes</i> sem glúten elaborados com farinha de banana-da-terra verde nativa e modificada por HMT.....	98

### ANEXOS

<b>Table 1:</b> Effects of Wheat Flour Replacement on the Properties of Gluten-Free Doughs and Cakes.....	128
---	-----

**LISTA DE ABREVIACÕES**

- AAC - Conteúdo de Amilose Aparente
- ACP - Análise de Componentes Principais
- AGCC - Ácidos Graxos de Cadeia Curta
- ANN - Recozimento
- ANOVA - Análise de variância
- AR - Amido Resistente
- AT - Alergia ao Trigo
- $a_w$  - Atividade de Água
- C\* - Croma
- CFT - Compostos Fenólicos Totais
- CNNPA - Comissão Nacional de Normas e Padrões para Alimentos
- CP - Componente Principal
- CUP - Cupcake
- DC - Doença Celíaca
- DCCR - Delineamento Composto Central Rotacional
- DLG - Dieta livre de Glúten
- h - Hora
- HHP - Tratamento de Alta Pressão Hidrostática
- HMT - Tratamento hidrotérmico
- IS - Índice de Solubilidade
- $L^*$ ,  $a^*$  e  $b^*$  - Coordenadas CIEL\* $a^*b^*$
- $m_a$  - Massa da amostra
- $m_b$  - Massa de banana- da- terra verde *in natura*
- MBF - Farinha integral de banana- da- terra verde (*Musa paradisiaca* L.) modificada
- $m_f$  - Massa da farinha de banana- da- terra verde
- $m_{gel}$  - Massa do gel
- $m_s$  - Massa do sobrenadante seco
- NAT - Nativo
- NBF - Farinha integral de banana- da- terra verde (*Musa paradisiaca* L.) nativa
- PEF - Campo Elétrico Pulsado
- PI - Poder de inchamento
- PPO - Polifenol Oxidase

RVA - Analisador Rápido de Viscosidade

SNCG - Sensibilidade Não Celíaca ao Glúten

T - Temperatura

t - Tempo

TCLE - Termo de Consentimento Livre e Esclarecido

U - Umidade

WI - Índice de Brancura

YI - Índice de Amarelecimento

## RESUMO

MENDES, B. A. B. APLICAÇÃO DA FARINHA INTEGRAL DE BANANA VERDE NATIVA E MODIFICADA POR TRATAMENTO HIDROTÉRMICO EM FORMULAÇÕES DE BOLOS ISENTOS DE GLÚTEN. Itapetinga – BA: UESB, 2023. (Tese – Doutorado em Engenharia e Ciência de Alimentos – Área de concentração em Ciência de Alimentos) <sup>1</sup>

A crescente demanda pelo desenvolvimento de alimentos isentos de glúten estimula a busca por substitutos para a farinha de trigo no processo de produção de produtos de panificação, incluindo bolos. A banana verde tem sido estudada em função da sua composição, sobretudo pela presença de fibras alimentares, com destaque para o amido resistente. Esse trabalho teve como objetivo obter a farinha integral de banana-da-terra verde nativa (NBF), modificá-la por tratamento hidrotérmico - HMT (MBF), utilizando o delineamento composto central rotacional como ferramenta estatística para avaliar o efeito do tempo, temperatura e umidade no amido presente nas farinhas, e caracterizá-las quanto as suas propriedades de pasta, tecnológicas, físicas e químicas, aplicá-las no desenvolvimento de *cupcakes* isentos de glúten, cujas formulações foram avaliadas quanto às propriedades físicas, químicas e sensoriais. Constatou-se que o tratamento hidrotérmico alterou as propriedades tecnológicas da farinha nativa (redução do Poder de Inchamento - PI, aumento do Índice de Solubilidade - IS), as propriedades de pasta (aumento da temperatura de pasta, redução da viscosidade máxima, viscosidade mínima, viscosidade final, quebra e taxa de retrogradação), o conteúdo de amilose aparente (AAC) e compostos fenólicos. Não foi possível encontrar um modelo matemático significativo para o PI, AAC e propriedades de pasta. A substituição parcial (40%) da farinha de arroz pelas farinhas nativa e modificadas selecionadas (MBF9, MBF11 e MBF17) alterou a cor dos *cupcakes*, tornando-os mais escuros, mais avermelhados, menos amarelados e com menor intensidade de cor com relação ao controle. A análise do perfil de textura mostrou que em 24 h de armazenamento o *cupcake* com NBF apresentou menor mastigabilidade, dureza e coesividade. Entre os *cupcakes*, em 24 h, não houve diferença significativa para elasticidade e houve uma tendência geral para aumento da dureza durante o período de armazenamento. A análise sensorial indicou uma aceitação superior para os *cupcakes* com as farinhas nativa e modificadas, em relação ao controle, para aparência, sabor, textura, aroma e aceitação global. De modo geral, as farinhas de banana-da-terra verde nativa e modificada por HMT são opções atrativas para a substituição parcial da farinha de arroz no desenvolvimento de *cupcakes* sem glúten. Entre elas, a farinha nativa é a opção mais viável por apresentar maiores valores para PI (14,05 g.g<sup>-1</sup>), conteúdo de compostos fenólicos (135,5 EAG mg/100g), melhor perfil das propriedades de pasta, levar a obtenção de *cupcakes* com menores valores para dureza e mastigabilidade, sem alteração da elasticidade e volume específico significativa, com aceitação sensorial superior ao controle e semelhante aos *cupcakes* com as farinha modificadas por tratamento hidrotérmico, representando maior redução de custos operacionais e otimização de processo. Além disso, a sua incorporação poderá contribuir para a qualidade nutricional e funcional desses *cupcakes*, pelo seu reconhecido conteúdo de fibras alimentares, compostos bioativos e amido resistente, contribuindo com a diversidade de produtos funcionais no mercado.

**Palavras-Chave:** Tratamento hidrotérmico; Novos produtos; Alimentos funcionais; Análise sensorial.

<sup>1</sup> Orientador: Cristiane Martins veloso, D.Sc., UESB.

## ABSTRACT

MENDES, B. A. B. APPLICATION OF NATIVE AND HYDROTHERMALLY TREATED GREEN BANANA FLOUR IN GLUTEN-FREE CAKE FORMULATIONS. Itapetinga – BA: UESB, 2023. (Thesis – Doctorate in Engineering and Food Science - Area of Concentration in Food Science) <sup>1</sup>

The growing demand for gluten-free food development stimulates the search for substitutes for wheat flour in the production process of bakery products, including cakes. Green banana has been studied for its composition, particularly due to the presence of dietary fibers, with a focus on resistant starch. This study aimed to obtain native green plantain whole flour (NBF) and modify it through hydrothermal treatment (HMT), using the central composite rotational design as a statistical tool to evaluate the effect of time, temperature, and humidity on the starch present in the flours. The flours were characterized for their paste, technological, physical, and chemical properties. They were then applied in the development of gluten-free cupcakes, and the formulations were evaluated for their physical, chemical, and sensory properties. It was found that the hydrothermal treatment altered the technological properties of the native flour (reduction in Swelling Power - SP, increase in Solubility Index - SI), paste properties (increase in pasting temperature, reduction in peak viscosity, minimum viscosity, final viscosity, breakdown, and retrogradation rate), apparent amylose content (AAC), and phenolic compounds. It was not possible to find a significant mathematical model for SP, AAC, and paste properties. The partial substitution (40%) of rice flour with the selected native and modified flours (MBF9, MBF11, and MBF17) altered the color of the cupcakes, making them darker, more reddish, less yellowish, and with lower color intensity compared to the control. Texture profile analysis showed that after 24 hours of storage, the cupcake with NBF exhibited lower chewiness, hardness, and cohesiveness. Among the cupcakes, after 24 hours, there was no significant difference in elasticity, and there was a general tendency for an increase in hardness during the storage period. Sensory analysis indicated higher acceptance for the cupcakes made with native and modified flours compared to the control, regarding appearance, taste, texture, aroma, and overall acceptance. In general, both native and hydrothermally modified green plantain flours are attractive options for partial substitution of rice flour in gluten-free cupcake development. Among them, the native flour is the most viable option as it presents higher values for Swelling Power (14.05 g.g<sup>-1</sup>), phenolic compounds content (135.5 GAE mg/100g), better paste properties profile, leading to cupcakes with lower hardness and chewiness values, no significant alteration in elasticity and specific volume, with sensory acceptance superior to the control and similar to cupcakes made with hydrothermally treated modified flours. This represents a greater reduction in operational costs and process optimization. Furthermore, its incorporation can contribute to the nutritional and functional quality of these cupcakes due to its recognized content of dietary fibers, bioactive compounds, and resistant starch, thus adding to the diversity of functional products in the market.

**Keywords:** Hydrothermal treatment; New products; Functional foods; Sensory analysis.

<sup>1</sup> Advisor: Cristiane Martins Veloso, D.Sc., UESB

## CAPÍTULO 1

---

**Introdução Geral**

**Revisão de Literatura**

**Objetivos**

---

## 1. INTRODUÇÃO

A banana corresponde a quarta cultura alimentar de maior importância depois do arroz, trigo e milho, representando uma das frutas mais consumidas no mundo (SALAZAR et al., 2022). No estágio de maturação 1, ou seja, banana verde, é uma importante fonte de amido, que corresponde entre 70 a 80% do seu conteúdo em base seca, além disso, a presença de vitaminas, minerais, compostos bioativos, como os compostos fenólicos, e fibra dietética, com destaque para o amido resistente, tem ampliado o interesse em seu estudo (RIQUETTE et al., 2019; SALAZAR et al., 2022).

O amido em alimentos, seja isolado ou na matriz, a exemplo do presente na farinha de banana verde, possui uma forte contribuição na textura, e por isso, é aplicado como espessante, estabilizador coloidal, agente gelificante, agente de volume e de retenção de água, sendo essas propriedades responsáveis por ampliar as suas possibilidades de aplicação, entre as quais estão a substituição da farinha de trigo em preparações alimentares isentas de glúten (CABALLERO; FINGLAS; TOLDRÁ, 2016; ELIASSON, 2018; PANG et al., 2019). Além dessas propriedades, o amido resistente (AR), presente na farinha de banana-da-terra verde, é uma reconhecida fonte de fibra dietética, que inclui todos os produtos de degradação de amido e o amido que passa no intestino delgado humano de maneira intacta, ou seja, não são absorvidos no intestino delgado de indivíduos saudáveis. Sua função prebiótica tem sido amplamente pesquisada (KHOOZANI; BEKHIT; BIRCH, 2019; PRASAD; BONDY, 2019).

A aplicação do amido na sua forma nativa é limitada sob determinadas condições de processamento e armazenamento, pela baixa resistência ao cisalhamento, baixa resistência térmica, decomposição térmica durante o processamento, e elevada tendência à retrogradação. Portanto pesquisas visando promover modificações de natureza química, física, enzimática ou derivada de processos fermentativos em sua estrutura têm sido realizadas para melhorar as características estruturais, propriedades funcionais e nutricionais (ELIASSON, 2018; ZHAO et al., 2019; PANG et al., 2019).

As modificações físicas são mais simples de serem empregadas, sendo a classe de maior interesse de aplicação. Ocorrem pelo tratamento do amido nativo com irradiação, pressão osmótica, campo elétrico pulsado, pré-gelatinização ou calor e umidade. Dentre os métodos mais aplicados destaca-se o tratamento hidrotérmico – HMT (do inglês, *heat moisture treatment*) (SCHAFRANSKI; ITO; LACERDA, 2021; YANG et al., 2022), que promove transformações nas características químicas e físicas dos alimentos, como por exemplo, o aumento da estabilidade térmica, redução do poder de inchamento e de viscosidade, alterações atrativas para indústria de alimentos, principalmente em produtos isentos de glúten (YANG et al., 2022).

A demanda por produtos livres de glúten vem crescendo constantemente, atendendo a um

público que vai além daquele que precisa de uma dieta livre de glúten (DLG) como tratamento de saúde, a exemplo da doença celíaca, alergia ao trigo e sensibilidade não celíaca ao glúten (DA COSTA BORGES et al., 2021). A DLG é uma das mais populares no mundo e considerando o mercado global de alimentos destinados a atender as intolerâncias alimentares, os produtos sem glúten representam um terço do total desse mercado, confirmando sua potencialidade (JUHÁSZ; COLGRAVE; HOWITT, 2020).

O grande desafio para dietas com restrição de glúten é o desenvolvimento dos produtos de panificação. O glúten está presente nos grãos de trigo, centeio, cevada e aveia (por contaminação cruzada) e alimentos à base desses cereais são consumidos em todo o mundo, com destaque para os produtos de panificação como pães, biscoitos e bolos, além das massas, salgadinhos e cereais matinais (TASNIM et al., 2020; XU et al., 2020). Os bolos estão entre os alimentos mais produzidos em todo o mundo, geralmente compostos por uma mistura de farinha, açúcar, ovos, gordura/óleo e agentes de crescimento, caracterizados por apresentarem massas densas, com miolos alveolares flexíveis, elásticos, levemente úmidos (18 a 28% de umidade) e doces (XU et al., 2020). Pesquisas com objetivo de encontrar ingredientes que possam substituir a farinha de trigo no desenvolvimento de produtos de panificação sem glúten têm sido realizadas (ALEMAN et al., 2021; AMMAR et al., 2021; BHINDER et al., 2022; DA COSTA BORGES et al., 2021; STORCK et al., 2021). A busca por novas farinhas de fontes botânicas distintas vem acontecendo, sobretudo aquelas com potencial de agregar qualidade nutricional, e, ou de funcionalidade, uma vez que as substituições mais tradicionais, com derivados de arroz e milho, levam ao preparo de produtos com baixa qualidade nutricional, alto índice glicêmico e baixo conteúdo de fibras (AMMAR et al., 2021; XU et al., 2020).

É essencial a realização de estudos das propriedades de matérias-primas de uso convencional e não convencional, a fim de determinar sua composição, principais interferentes no valor nutritivo, melhores condições de processamento, aplicação de novas tecnologias e seus efeitos, obtenção de derivados e possíveis aplicações, dentre outros. Desta forma, o presente estudo tem por objetivo conhecer as propriedades físicas e químicas da farinha de banana-da-terra verde nativa e modificada por tratamento hidrotérmico, bem como, avaliar seu efeito na qualidade de bolo tipo cupcake isento de glúten.

## **2. REVISÃO DE LITERATURA**

### **2.1. Amido**

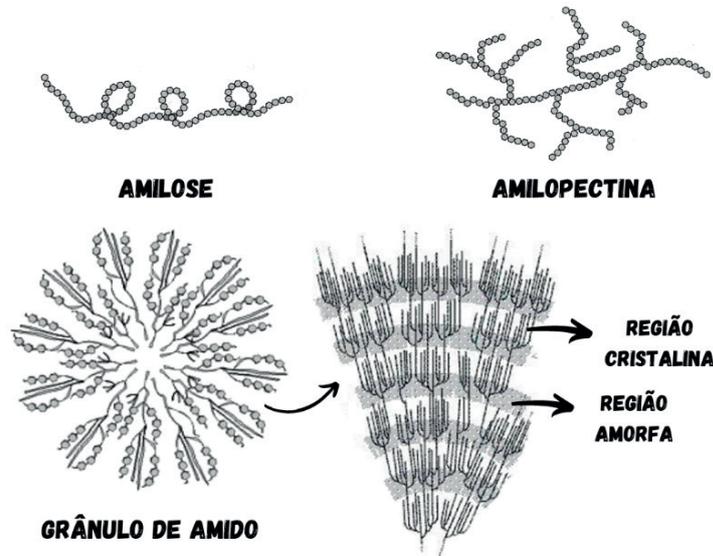
O amido é amplamente utilizado desde a antiguidade, perpassando pelo seu uso na papelaria até na moda, mas foi na década de 30, que os químicos especialistas em carboidratos iniciaram pesquisas que resultaram no desenvolvimento de diferentes produtos derivados do amido (ELIASSON, 2018). O amido é um nutriente básico que constitui a reserva nutricional e de energia de plantas superiores, sendo composto por polímeros de cadeias lineares (amilose) e polímeros de cadeia ramificada (amilopectina), se diferenciando dos carboidratos por sua estrutura, uma vez que o amido se organiza em partículas parcialmente cristalinas, denominadas de grânulos (DAMODARAN, PARKIN, 2019).

A amilose, essencialmente linear, tem uma forte tendência para formar hélices únicas em razão do arranjo axial das unidades de  $\alpha$ -D-glicose unidas por ligações (1 $\rightarrow$ 4). É possível encontrar um pequeno número de ramificações na cadeia da amilose, em torno de 0,3 a 0,5%, porém essas ramificações apresentam pontos muito distantes, além de serem muito longas ou muito curtas, não afetando o comportamento linear da molécula. Já a amilopectina é altamente ramificada, 4 a 7% das ligações, com unidades  $\alpha$ -D-glicopiranosil ligadas principalmente por ligações (1 $\rightarrow$ 4) com ramificações resultantes de ligações (1 $\rightarrow$ 6), apresentando peso molecular maior que a amilose e está entre as maiores das moléculas, e suas cadeias ramificadas tendem a formar duplas-hélices (DAMODARAN; PARKIN, 2019; WANG et al., 2019).

A organização do grânulo de amido é complexa, as moléculas de amilose e amilopectina estão dispostas em seu interior de modo radial, com origem na região chamada de hilo, e consiste em camadas alternadas de anéis de crescimento (Figura 1). Os anéis de crescimento são classificados em amorfo e semicristalino, organizados de maneira alternada no interior dos grânulos. Os anéis amorfos apresentam uma conformação desordenada e incluem as moléculas de amilose, amilopectina e suas interações. Os anéis semicristalinos são constituídos por estruturas lamelares de regiões amorfas e cristalinas, alternadamente. A região cristalina é formada pelas duplas hélices das cadeias laterais de amilopectina e a região amorfa inclui os pontos de ramificação da amilopectina e a amilose. A cristalinidade dos grânulos de amido se deve, basicamente, à amilopectina (DAMODARAN; PARKIN, 2019). As propriedades funcionais do amido podem variar de acordo com a sua fonte botânica, proporção entre as moléculas de amilose e amilopectina e método de processamento aplicado (BOJARCZUK et al., 2022).

O amido nas plantas, sendo a forma prioritária de reserva energética, é armazenado em órgãos específicos, como sementes, frutos, tubérculos e / ou raízes. As formas comerciais são comumente obtidas das sementes de cereais, entre elas, do milho comum, milho ceroso, milho com alto teor de amilose, trigo, diversas variedades de arroz, e de tubérculos e raízes, com destaque para a batata e a mandioca (ELIASSON, 2018; NAKAJIMA et al., 2019). Atualmente, novas fontes de amido têm sido estudadas, entre elas o amido resiste de bananas verdes de diferentes cultivares, como a *Musa*

*acuminata L.*, *Musa paradisiaca L.*, entre outras (DAS et al., 2022; VIANA et al., 2022; WANG et al., 2014).



**Figura 1:** Representação gráfica do grânulo de amido (Fonte: DE BORBA et al., 2021)

Em alimentos, o amido possui relevante contribuição na textura, atuando como espessante, estabilizador coloidal, gelificante, agente de volume e de retenção de água. Porém, sua aplicação quando na forma nativa é limitada em determinadas condições de processamento e armazenamento pela baixa resistência ao cisalhamento, baixa resistência térmica, decomposição térmica durante o processamento e elevada tendência à retrogradação, o que, por vezes, leva ao questionamento se a sua aplicação na indústria de alimentos será ou não viável (CABALLERO; FINGLAS; TOLDRÁ, 2016; ELIASSON, 2018).

### 2.1.1. Modificações do amido nativo

Com o objetivo de alterar as propriedades dos amidos nativos, modificações em sua estrutura têm sido pesquisadas e aplicadas, o que pode alterar e favorecer consideravelmente as suas propriedades físicas, químicas, funcionais e até nutricionais (PANG *et al.*, 2019). Diferentes tipos de modificações de amido podem ser aplicados para melhorar as características estruturais, propriedades funcionais e características nutricionais. Essas modificações podem ser de natureza química, física, enzimática ou derivada de processos fermentativos, a depender da natureza do amido nativo e das características que se deseja alterar, adaptando, assim, o amido nativo para aplicações alimentares específicas (CABALLERO; FINGLAS; TOLDRÁ, 2016; ELIASSON, 2018; ZHAO *et al.*, 2019).

### 2.1.1.1. Modificação física

As modificações de natureza física são modificações mais simples de serem executadas, acessíveis e ecologicamente corretas, por não envolver tratamento químico ou agentes biológicos, correspondendo, assim, à classe de modificação de maior interesse (PUNIA, 2020; SCHAFRANSKI; ITO; LACERDA, 2021). Elas podem ser classificadas em tratamentos térmicos, hidrotérmicos e não-térmicos. O tratamento térmico compreende a pré-gelatinização, os tratamentos hidrotérmicos incluem o tratamento de calor-umidade HMT (do inglês, *heat moisture treatment*) e o recozimento – ANN (do inglês, *annealing*), e os tratamentos não-térmicos abrangem processamento de alta pressão – HPP (do inglês, *high pressure processing*), micronização, ultra-som, campo elétrico pulsado – PEF (do inglês, *pulse electric field*) (PUNIA, 2020). Entre os métodos mais aplicados estão o por secagem em tambor, cozimento por extrusão, secagem por pulverização, radiação, recozimento, tratamento de calor-umidade – HMT e tratamento de alta pressão hidrostática (CABALLERO; FINGLAS; TOLDRÁ, 2016).

O tratamento de calor-umidade – HMT consiste em aquecer o amido acima do ponto de gelatinização (90 °C a 120 °C), em condições controladas de umidade (10% a 30%) e por um determinado período (1 a 24 h), buscando modificar não somente as propriedades físicas e químicas, mas também suas características funcionais e de digestão, sem romper a estrutura granular do amido. As combinações do binômio temperatura-tempo necessárias para atingir a funcionalidade desejada deve levar em consideração as diferentes fontes de amido (CABALLERO; FINGLAS; TOLDRÁ, 2016; DE BORBA *et al.*, 2021; KUNYANEE; LUANGSAKUL, 2022).

Com o HMT a região cristalina dos grânulos de amido sofre rearranjo, onde os cristalinos helicoidais do tipo B e C podem ser convertidos para cristalino tipo A, que corresponde a unidades altamente condensadas e cristalinas de amilopectina. A água e a energia térmica aplicada durante a modificação favorecem a movimentação das duplas hélices dentro da região cristalina, levando a formação de uma estrutura mais ordenada e compactada. Além disso, com a expansão das regiões amorfas, pequenas moléculas solúveis são disponibilizadas, levando a formação de uma fase contínua de gel. Esse processo leva a maior estabilidade térmica, maior resistência ao cisalhamento e alteração das propriedades de pasta do amido (DE BORBA *et al.*, 2021).

O HMT pode contribuir com a diminuição do poder de inchamento, diminuição da viscosidade de pasta e maior estabilidade térmica, que são características atraentes para a indústria de alimentos (CAHYANA *et al.*, 2019; YANG *et al.*, 2022). O efeito do HMT em amidos de diferentes fontes botânicas tem sido amplamente estudado (SCHAFRANSKI; ITO; LACERDA, 2021). Em farinhas a sua aplicação também tem sido estudada e resultados satisfatórios têm sido encontrados. Kunyane & Luangsakul (2022), em um estudo sobre o impacto do HMT nas propriedades físico-químicas e índice

glicêmico *in vitro* de farinha de arroz com diferentes teores de amilose, concluíram que as farinhas de arroz modificadas exibiram diminuições no poder de inchamento e índice de solubilidade, e apresentaram aumentos nas temperaturas de pasta, além do impacto positivo no índice glicêmico, com sua redução.

### 2.1.2. Amido resistente

Em alimentos, considerando o grau de digestibilidade e velocidade de digestão, o amido pode ser classificado em amido de digestão lenta, de digestão rápida ou resistente (BOJARCZUK et al., 2022). O amido resistente (AR) é uma reconhecida fonte de fibra dietética, que inclui todos os produtos de degradação de amido e o próprio amido que passam no intestino delgado humano de maneira intacta, ou seja, não são absorvidos no intestino delgado de indivíduos saudáveis, sendo sua função prebiótica amplamente estudada (KHOZANI; BEKHIT; BIRCH, 2019; PRASAD; BONDY, 2019). Essa ação prebiótica se dá pela fermentação do AR por bactérias probióticas no cólon, resultando na formação de ácidos graxos de cadeia curta (AGCC), como o acetato, propionato e butirato, sendo que o butirato se destaca, uma vez que sua produção a partir do AR é maior que a observada em outras fontes de fibra. Os AGCC estão positivamente relacionados à redução de doenças inflamatórias, câncer de cólon e outras neoplasias malignas, obesidade, diabetes tipo II e doenças cardiovasculares, além de contribuir na saúde intestinal de maneira geral (DAMODARAN; PARKIN, 2019; PRASAD; BONDY, 2019).

O AR é encontrado naturalmente nos alimentos ou por modificações de suas moléculas durante o processamento de alimentos. As fontes de amido resistente podem ser classificadas como convencionais e não convencionais. O arroz, milho, batata, trigo e mandioca correspondem as fontes convencionais. As fontes não convencionais incluem frutas, como a banana verde, sementes e leguminosas (VALL RIBEIRO; RAMER-TAIT; CAZARIN, 2022).

Cinco categorias são empregadas para classificar o amido resistente: AR1, AR2, AR3, AR4 e AR5, sendo essa última a mais recentemente identificada. O AR1 é fisicamente inacessível nas paredes celulares e suas fontes são grãos, leguminosas e sementes. O AR2 é o amido nativo granulado com estrutura altamente cristalina e suas fontes são alimentos ricos em amido (batata, milho rico em amilose e banana verde). O AR3 é o amido retrogradado e suas fontes são alimentos amiláceos retrogradados. O AR4 é o amido quimicamente modificado e suas fontes são amidos reticulados, esterificados ou fosforilados. Por fim, o AR5, corresponde ao complexo amilose-lipídico, cuja fontes são amidos complexados com lipídeos (DAMODARAN; PARKIN, 2019; KHOZANI; BIRCH; BEKHIT, 2019).

## 2.2. Banana-da-terra (*Musa paradisiaca L.*) verde

A banana-da-terra (*Musa paradisiaca L.*) está entre as frutas mais utilizadas como fonte de energia na alimentação das pessoas que vivem em localidades de sua maior produção, como as regiões tropicais, se diferem das demais por serem maiores, mais firmes e menos valorizadas quanto ao seu consumo fresco, uma vez que nessa fase, ainda que madura, possuem amido, comprometendo assim o seu sabor e a sua textura, por esse motivo são, preferencialmente, destinadas ao cozimento prévio ao seu consumo, mas também podem ser assadas ou fritas (PEREIRA; MARASCHIN, 2015; XIE et al., 2023)

A banana-da-terra verde, assim como as demais cultivares em mesmo estágio de maturação, tem sido amplamente estudada, em função da sua composição, sobretudo pela presença de compostos bioativos e fibra dietética, com destaque para o amido resistente (RIQUETTE et al., 2019). Em base seca, o conteúdo de amido na banana-da-terra verde pode corresponder até 60 %. Esses valores são próximos aos encontrados no milho, por exemplo, sendo, portanto, uma fonte potencial de amido (MARTA et al., 2019).

Quando verdes, as bananas-da-terra podem ser classificadas como um alimento funcional, o que influencia o seu consumo, considerando que é crescente o número de consumidores que tem buscado melhorar a sua saúde por meio da alimentação, incluindo indivíduos em dietas com restrição ao glúten. Os principais derivados obtidos a partir da banana-da-terra verde são a farinha, amido e a biomassa (KHOZANI; BEKHIT; BIRCH, 2019).

## 2.3. Glúten

O glúten consiste em proteínas de armazenamento de algumas espécies de plantas cerealíferas, como trigo, centeio e cevada. A aveia é considerada uma possível fonte de glúten, mas a verdade é que as suas proteínas de armazenamento são diferentes daquelas encontradas no trigo, centeio e cevada. O que ocorre é a contaminação cruzada dos grãos durante a colheita, transporte, armazenamento e processamento com alguns desses cereais que contêm glúten (SMULDERS et al., 2018; XU et al., 2020a).

Com composição única de aminoácidos, as proteínas encontradas no glúten incluem as glutelinas e prolaminas, sendo as prolaminas proteínas ricas em glutamina e prolina, dando origem ao seu nome (RIBES KONINCKX et al., 2015; SCHERF, 2019). As prolaminas correspondem a fração proteica de potencial alergênico para a doença celíaca (TEIXEIRA; LOPES; MACHADO, 2017). O tipo de prolamina presente vai variar de acordo com a natureza do grão, ou seja, no trigo encontram-se as gliadinas, no centeio as secalinas, na cevada as hordeínas, e na aveia as aveninas (PARSONS et al., 2021; XHAFERAJ et al., 2020).

A farinha de trigo é o principal ingrediente derivado do grão de trigo, e contém várias frações de proteínas solúveis e insolúveis em água. A albumina, as enzimas do tipo globulina e algumas glicoproteínas compreendem a fração das proteínas solúveis, correspondendo a aproximadamente 20% do total de proteínas da sua composição. Elas não têm participação na formação da massa viscoelástica, ficando somente para as proteínas do glúten essa propriedade (ABEDI; POURMOHAMMADI, 2021; RIBES KONINCKX et al., 2015). A farinha de trigo é o ingrediente mais utilizado no desenvolvimento dos produtos de panificação, especialmente os pães (DAMODARAN & PARKIN, 2020). Em contato com a água, as proteínas do glúten contribuem fortemente para a formação de uma massa viscoelástica, com característica única, sendo essa propriedade o resultado da composição e interação dos resíduos de aminoácidos de suas proteínas. O tipo e o número de interações influenciam nas características da rede tridimensional do glúten e viscoelasticidade da massa. Essas interações podem ser principalmente de natureza covalente (ligações dissulfeto) e não covalentes (ligações de hidrogênio, iônicas e hidrofóbicas) (DAMODARAN; PARKIN, 2020; XU *et al.*, 2020; SCHERF, 2019).

A massa viscoelástica, resultado da interação do glúten com a água e aplicação de força mecânica, tornam o glúten um ingrediente desejado nos produtos de panificação, sobretudo pela singular capacidade de aprisionar gás durante a fermentação que essa massa possui. Entre os produtos de panificação em que o glúten é requisitado estão, em primeiro lugar, os pães, onde a qualidade do glúten presente na farinha de trigo influencia diretamente na sua qualidade final. Outros produtos que requerem o glúten, por serem beneficiados com suas características específicas, são as massas alimentícias, biscoitos, bolos, bolachas e pretzels (ABEDI; POURMOHAMMADI, 2021; TASNIM et al., 2020). A qualidade dos pães e demais produtos dessa categoria dependem diretamente da funcionalidade das proteínas do glúten. A proporção das gliadinas e gluteninas influenciará diretamente nessa qualidade, onde as gliadinas são responsáveis pela viscosidade e capacidade de expansão da massa, já as gluteninas conferem coesão e elasticidade. Em pães, por exemplo, uma proporção de gliadina/glutenina de 2:1 forma uma massa ótima, com boa retenção de gás, resultando em um pão de miolo elástico, com distribuição e formação uniforme dos poros após processo de cocção (ABEDI; POURMOHAMMADI, 2021; BLANCHARD et al., 2012; SCHERF, 2019).

### **2.3.1. Demanda do mercado por produtos sem glúten**

A demanda por produtos livres de glúten vem crescendo constantemente, estima-se que o seu mercado global, considerando produtos de panificação, salgadinhos, pratos prontos para consumo, pizzas, massas, condimentos e temperos, atingirá em 2023 a marca de 6,47 bilhões de dólares (XU et al., 2020), podendo chegar até 32,39 bilhões de dólares em 2025 (FÖSTE et al., 2020). O impressionante é que esse mercado atende a um público que vai além daquele que precisa de uma

dieta livre de glúten (DLG) como tratamento de saúde, a exemplo da doença celíaca, alergia ao trigo e sensibilidade não celíaca ao glúten (DA COSTA BORGES et al., 2021).

A restrição do glúten da dieta consiste na remoção de todo e qualquer alimento que possa tê-lo em sua composição, incluindo traços. Elas são indicadas, a princípio, para indivíduos com alergia ao glúten (portadores da doença celíaca), alergia ao trigo ou para indivíduos com sensibilidade não celíaca ao glúten (ALEMAN et al., 2021; DIMIDI et al., 2021).

A doença celíaca (DC) é uma doença crônica de natureza autoimune, do grupo das enteropatias, que acomete o intestino delgado e tem como matriz a ingestão do glúten por indivíduos geneticamente predispostos (DIMIDI et al., 2021). Ocorrendo em todo o mundo, é uma enfermidade que apresenta taxa de soroprevalência global de 1,4%, com variação entre os continentes, sendo a menor taxa na África (1,1%) e a maior taxa na Ásia, (1,8%). Tem como tratamento a completa exclusão do glúten da dieta do paciente, a chamada dieta livre de glúten (DLG), que permanece ao longo de toda vida. Se não tratada a DC pode levar a doenças graves, como câncer intestinal (DIMIDI et al., 2021; FERNÁNDEZ MIAJA et al., 2021).

A alergia ao trigo (AT) consiste em uma resposta imunológica que tem como antígeno alimentar as quatro classes de proteínas do trigo (albumina, globulina, gliadina e glutenina). A soroprevalência global da alergia ao trigo é de 0,3%, com maior ocorrência na população pediátrica (WANG et al., 2021). O tratamento da alergia ao trigo consiste na exclusão do trigo e produtos à base de trigo da dieta (ALEMAN et al., 2021; SCHERF, 2019).

A sensibilidade não celíaca ao glúten (SNCG) foi definida em 2011, porém sua patogênese não é bem esclarecida. Caracteriza-se pela presença de sintomas gastrointestinais e/ou extra intestinais associados à ingestão de alimentos contendo glúten, onde a suspeita de doença celíaca e alergia ao trigo é descartada. Seu tratamento consiste na adoção da dieta livre de glúten (DLG), levando ao desaparecimento dos sintomas associados ao processo (ALEMAN et al., 2021).

A DLG é uma das mais populares no mundo e considerando o mercado global de alimentos destinados a atender as intolerâncias alimentares, os produtos sem glúten representam um terço do total desse mercado, confirmando sua potencialidade (JUHÁSZ; COLGRAVE; HOWITT, 2020).

O apelo sobre a alimentação sem glúten ser mais saudável atrai cada vez mais apreciadores, que são impulsionados pelo crescimento da oferta em produtos dessa categoria, e por propagandas em mídias sociais, revistas, televisão e por influenciadores digitais. Os adeptos dessa dieta acreditam que o glúten é um ingrediente ruim para saúde, mesmo não existindo um consenso de que uma dieta livre de glúten possa trazer algum benefício para quem não tem alergia ou sensibilidade. Esse contexto mostra como o mercado de produtos sem glúten é bastante promissor e atrativo, com ampla perspectiva de investimento e crescimento (CHAUDHRY et al., 2021; DA COSTA BORGES et al., 2021; FORNARI et al., 2021; FÖSTE et al., 2020; JUHÁSZ; COLGRAVE; HOWITT, 2020).

Essa mudança no perfil do consumidor, que deixou de ser somente aqueles que consomem os produtos livres de glúten como tratamento de saúde, somada a ampliação do mercado de produtos isentos de glúten, impactou também nos locais de comercialização desses produtos. Anteriormente eram comercializados restritamente nas farmácias e, atualmente, podem ser encontrados em supermercados, lojas online e até mesmo em restaurantes, com consequente aumento das vendas e da margem de lucro, já que os produtos dessa categoria são mais caros. Por fim, a imagem do estabelecimento que comercializa esses produtos considerados como saudáveis é favorecida, passando a imagem de uma empresa responsável que se preocupa em atender a necessidades de todos ao se atentar à saúde e bem-estar do seu cliente (CORNICELLI et al., 2018; FORNARI et al., 2021).

Muitas pesquisas têm sido desenvolvidas com o objetivo de encontrar alimentos e/ou ingredientes que possam substituir as tradicionais fontes de glúten, principalmente a farinha de trigo, para o desenvolvimento de alimentos isentos desse nutriente (ALEMAN et al., 2021; AMMAR et al., 2021; BHINDER; SINGH; KAUR, 2022; DA COSTA BORGES et al., 2021; STORCK et al., 2021). Os estudos têm focado também na modificação das propriedades tecnológicas, sensoriais e nutricionais desses alimentos e/ou ingredientes, buscando levar alimentos de qualidade sensorial e nutricional para essa população, uma vez que as substituições mais comuns são sensorialmente desfavoráveis e, muitas vezes, de baixa qualidade nutricional (CHAUDHRY et al., 2021; MAHROUG et al., 2019).

### **2.3.3. Produtos sem glúten**

Alimentos à base de trigo são comumente consumidos em todo o mundo, isso inclui principalmente os produtos de panificação, como pães, biscoitos e bolos, além das massas, salgadinhos e cereais matinais (TASNIM et al., 2020; XU et al., 2020). Do ponto de vista tecnológico e nutricional, os produtos sem glúten são diferentes de suas versões tradicionais, pois com a substituição da farinha de trigo a qualidade final do produto pode ser comprometida (AMMAR et al., 2021). Portanto, conhecer as características do produto em que a substituição pretende ser realizada é fundamental para que novos ingredientes e técnicas sejam estudados para a otimização das formulações (ALEMAN et al., 2021).

#### **2.3.3.1. Bolos**

Os bolos são produtos de panificação, que estão entre os alimentos mais produzidos em todo o mundo. São sistemas complexos, que incluem espumas (ar disperso em fase aquosa) e/ou emulsões (gotículas de óleo dispersas em fase aquosa contínua), sendo considerados sistemas termodinamicamente instáveis (BURBANO; CABEZAS; CORREA, 2021; XU et al., 2020). São geralmente compostos por uma mistura de farinha, açúcar, ovos, gordura/óleo e agentes de

crescimento, caracterizados por apresentarem massas densas, com miolos alveolares flexíveis, elásticos, levemente úmidos (18 a 28% de umidade) e doces (XU et al., 2020). Podem ser classificados em função da sua composição e técnica de preparo (TASNIM et al., 2020; XU et al., 2020).

Considerando a composição, os bolos podem ser classificados em bolos de alta ou baixa proporção. Essa classificação leva em consideração a proporção de açúcar e farinha utilizada na formulação. Quando a quantidade de açúcar for maior que quantidade de farinha, ou seja, proporção maior que 1,0, trata-se de um bolo de alta proporção. Quando a quantidade de açúcar for menor ou igual a quantidade de farinha, ou seja, proporção menor ou igual a 1,0, trata-se de um bolo de baixa proporção (WILDERJANS et al., 2013).

Associando a composição da formulação e a técnica de preparo, os bolos podem ser classificados em três tipos: bolos tipo massa, a exemplo do bolo libra, onde os principais ingredientes são farinha, açúcar, ovo, gordura e fermento em pó; bolo tipo espuma, como o pão de ló, tendo como principais ingredientes ovo, farinha e açúcar; e, por fim, o bolo tipo chiffon que corresponde a uma junção do bolo tipo massa e espuma (XU et al., 2020).

Os bolos mais comuns incluem o bolo tradicional e o pão de ló. O bolo tradicional é úmido, macio e aveludado, contém gordura e agentes de crescimento, como fermento químico em pó, feito de massa à base de emulsão, do tipo óleo em água, com uma fase aquosa contínua. O pão de ló é um bolo sem gordura e seu volume é derivado do ar aprisionado em ovos batidos e vapor gerado durante cozimento (PYCARELLE et al., 2019; SAHAGÚN et al., 2018; XU et al., 2020).

#### **2.3.3.1.1. Bolo sem glúten**

Para melhor entendimento sobre desenvolvimento de bolos sem glúten é necessário compreender a funcionalidade da farinha de trigo nesse tipo de produto. A farinha de trigo utilizada para produção de bolos é, preferencialmente, a de trigo mole (*Triticum aestivum* L.), com menor teor de proteína (8–11%) (WILDERJANS et al., 2013). A mistura para bolo é um sistema complexo e a compreensão completa sobre a contribuição de cada ingrediente não é clara (BLANCHARD et al., 2012).

A farinha de trigo é o principal ingrediente dos bolos, sua composição compreende principalmente o amido, que representa de 70-80%, e as proteínas, entre 8-14% (BLANCHARD et al., 2012; WILDERJANS et al., 2013). O glúten, sua principal proteína, nos bolos não vai se desenvolver completamente em uma estrutura viscoelástica como acontece nos pães. Fatores como a concentração alta de açúcar, pH neutro, menor força mecânica aplicada e a diluição do glúten entre os ingredientes líquidos contribuem para esse comportamento, que nesse tipo de produto é desejado,

pois vai resultar em uma massa mais macia e aveludada (PAESANI; BRAVO-NÚÑEZ; GÓMEZ, 2021; WILDERJANS et al., 2013).

Em bolos o glúten não precisa se desenvolver completamente, fazendo acreditar que a substituição da farinha de trigo nesse produto não seria uma limitação, já que o desenvolvimento do glúten não é tão desejado, diferente do que acontece nos pães. Porém, a contribuição da farinha de trigo na textura da massa do bolo é fundamental para sua elaboração, onde a capacidade de absorção da água pela farinha de trigo atua no aumento da viscosidade da massa, que por sua vez restringe a coalescência das partículas de gordura e dos alvéolos com gás, favorecendo a formação de uma emulsão estável (SAHAGÚN et al., 2018; WILDERJANS et al., 2013), sendo esse o grande desafio da substituição da farinha de trigo em bolos sem glúten, uma vez que a viscosidade da massa é fundamental para os bolos (XU et al., 2020).

Do ponto de vista tecnológico, inicialmente, a qualidade de um bolo sem glúten depende da massa, pois ela irá determinar a qualidade final do produto. A escolha da matéria-prima e processamento adequado são importantes, mas a reologia da massa é fundamental para garantir um bolo com características sensoriais aceitáveis (AMIN et al., 2021; MARCHETTI et al., 2020).

Bolo sem glúten e de qualidade precisa ser macio, com volume adequado, miolo estruturado e uniforme, além de conseguir manter essas características por um período razoável, ou seja, ter boa tolerância ao envelhecimento (AMIN et al., 2021). Essas características estão intimamente relacionadas com a viscosidade da massa, que por sua vez exerce influência na retenção de ar, pois se for muito baixa, o gás retido será perdido durante o cozimento, e se for muito alta, a densidade da massa impedirá sua expansão, resultando em um bolo baixo com qualidade indesejada (BURBANO; CABEZAS; CORREA, 2021; SAHAGÚN et al., 2018; TASNIM et al., 2020; WILDERJANS et al., 2013; XU et al., 2020). Os fatores que influenciam a viscosidade da massa incluem o método e grau de moagem, tipo de farinha e/ou amido e a presença ou não de aditivos alimentares na massa, sobretudo os hidrocolóides (XU et al., 2020).

A qualidade final de um bolo está relacionada às características do seu miolo, portanto, avaliar o volume específico e a textura do bolo é fundamental para compreender se determinada formulação conseguiu alcançar as características desejadas. Em bolos, o volume específico está relacionado ao gás incorporado e retido em sua massa, que por sua vez está relacionado a sua viscosidade e densidade. Como dito anteriormente, a viscosidade não deve ser baixa o suficiente para permitir que o bolo se eleve rapidamente durante o cozimento e o ar incorporado à massa seja perdido, como também não deve ser excessivamente alta, impedindo a expansão da massa durante o processamento e cozimento. O desenvolvimento de um bolo volumoso é desejado sensorialmente e tecnologicamente, já que um bolo com volume adequado, quase sempre, está relacionado a um bolo de qualidade, por impactar positivamente nas propriedades de textura (BURBANO; CABEZAS;

CORREA, 2021; OZYIGIT et al., 2020; PAESANI; BRAVO-NÚÑEZ; GÓMEZ, 2021; STORCK et al., 2021).

Dessa maneira, buscando atender a demanda do mercado por produtos sem glúten, sendo o bolo um dos produtos mais requisitados nesse mercado, diferentes ingredientes e tecnologias estão sendo pesquisados com o objetivo de substituir a farinha de trigo em bolos, como farinhas de outros cereais (sorgo, milho, arroz) (AMIN et al., 2021; PAESANI; BRAVO-NÚÑEZ; GÓMEZ, 2021; STORCK et al., 2021), pseudocereais (trigo sarraceno) (BHINDER; SINGH; KAUR, 2022), amidos (mandioca, batata) (ALEMAN et al., 2021), tubérculos (yacon) (LANCETTI et al., 2020) proteínas vegetais (arroz, ervilha) (SAHAGÚN et al., 2018), proteínas animais (clara de ovo e soro de leite) (SAHAGÚN et al., 2018), resíduos alimentares e industriais (coco, pó do bagaço da laranja, fibra da laranja e bagaço de noz-pecã) (MARCHETTI; ACUÑA; ANDRÉS, 2021; OZYIGIT et al., 2020) , oleaginosas (nozes e amêndoas) (BURBANO; CABEZAS; CORREA, 2021; HOPKIN; BROADBENT; AHLBORN, 2022) e aditivos alimentares (nanocelulose bacteriana) (MARCHETTI et al., 2020), na busca por substituir integralmente ou enriquecer as pré-misturas sem glúten, com o objetivo de melhorar a qualidade nutricional e/ou funcional das formulações.

### 3. OBJETIVOS

#### 3.1. Objetivo geral

Obter a farinha integral de banana-da-terra (*Musa paradisiaca* L.) verde nativa e modificada por tratamento hidrotérmico, caracterizá-las e aplicá-las no desenvolvimento de bolos tipo *cupcakes* sem glúten.

#### 3.1. Objetivos específicos

- (i) Obter a farinha integral de banana-da-terra verde nativa;
- (ii) Modificar a farinha integral de banana-da-terra verde nativa por tratamento hidrotérmico;
- (iii) Determinar as propriedades físicas, químicas tecnológicas e de pasta da farinha nativa e modificadas;
- (iv) Aplicar a farinha nativa e modificada no desenvolvimento de bolos tipo *cupcakes* sem glúten;
- (v) Caracterizar os cupcakes desenvolvidos com a farinha integral de banana-da-terra verde nativa e modificadas por tratamento hidrotérmico;
- (vi) Realizar análise sensorial dos bolos tipo *cupcakes* sem glúten desenvolvidos.

#### 4. REFERÊNCIAS

- ABEDI, E.; POURMOHAMMADI, K. Chemical modifications and their effects on gluten protein: An extensive review. **Food Chemistry**, v. 343, p. 128398, 1 maio 2021.
- ALEMAN, R. S. et al. High protein brown rice flour, tapioca starch & potato starch in the development of gluten-free cupcakes. **LWT**, v. 152, p. 112326, 1 dez. 2021.
- AMIN, T. et al. Functional cake from rice flour subjected to starch hydrolyzing enzymes: Physicochemical properties and in vitro digestibility. **Food Bioscience**, v. 42, p. 101072, 1 ago. 2021.
- AMMAR, I. et al. Optimization of gluten-free sponge cake fortified with whey protein concentrate using mixture design methodology. **Food Chemistry**, v. 343, p. 128457, 1 maio 2021.
- BHINDER, S.; SINGH, N.; KAUR, A. Impact of germination on nutraceutical, functional and gluten free muffin making properties of Tartary buckwheat (*Fagopyrum tataricum*). **Food Hydrocolloids**, Volume 124, Part A, 2022.
- BLANCHARD, C. et al. Study of the impact of wheat flour type, flour particle size and protein content in a cake-like dough: Proton mobility and rheological properties assessment. **Journal of Cereal Science**, v. 56, n. 3, p. 691–698, 1 nov. 2012.
- BOJARCZUK, A. et al. Health benefits of resistant starch: A review of the literature. **Journal of Functional Foods**, v. 93, p. 105094, 1 jun. 2022.
- BURBANO, J. J.; CABEZAS, D. M.; CORREA, M. J. Effect of walnut flour addition on rheological, thermal and microstructural properties of a gluten free batter. **LWT**, p. 112819, 17 nov. 2021.
- CABALLERO B.; FINGLAS P. M.; TOLDRÁ F. **Encyclopedia of Food and Health**. Cambridge: Academic Press, 2016.
- CAHYANA, Y. et al. The effect of different thermal modifications on slowly digestible starch and physicochemical properties of green banana flour (*Musa acuminata* colla). **Food Chemistry**, v. 274, p. 274–280, 15 fev. 2019.
- CHAUDHRY, N. A. et al. All Things Gluten: A Review. **Gastroenterology Clinics of North America**, v. 50, n. 1, p. 29–40, 1 mar. 2021.
- CORNICELLI, M. et al. Nutritional composition of gluten-free food versus regular food sold in the Italian market. **Digestive and Liver Disease**, v. 50, n. 12, p. 1305–1308, 1 dez. 2018.
- DA COSTA BORGES, V. et al. Production of gluten free bread with flour and chia seeds (*Salvia hispânica* L). **Food Bioscience**, v. 43, p. 101294, 1 out. 2021.

DAMODARAN S.; PARKIN K. L. **Química de Alimentos de Fennema**. 5. ed. Porto Alegre: Artmed, 2019.

DAS, M. et al. A novel approach for resistant starch production from green banana flour using amylopullulanase. **LWT**, v. 153, p. 112391, 1 jan. 2022.

DE BORBA, V. S.; SILVEIRA, C. O.; ALVES, J. B.; GROPELLI, V. M.; BADIALE-FURLONG. Modificações do amido e suas implicações tecnológicas. In: CORDEIRO, C. A. M.; DA SILVA, E. M.; DA SILVA, B. A. **Ciência e tecnologia de alimentos: Pesquisa e práticas contemporâneas**. Edição 1. São Paulo, SP: Editora científica digital, 2021.

DIMIDI, E. et al. Predictors of adherence to a gluten-free diet in celiac disease: Do knowledge, attitudes, experiences, symptoms, and quality of life play a role? **Nutrition**, v. 90, p. 111249, 1 out. 2021.

ELIASSON A. **Starch in Food: Structure, Function and Applications**. Sawston: Woodhead Publishing, 2018.

FERNÁNDEZ MIAJA, M. et al. Study of adherence to the gluten-free diet in coeliac patients. **Anales de Pediatría**, v. 94, n. 6, p. 377–384, 1 jun. 2021.

FORNARI, E. et al. Taking advantage of the gluten-free opportunity: Assortment as the key driver for modern grocery retailers. **Journal of Retailing and Consumer Services**, v. 63, p. 102747, 1 nov. 2021.

FÖSTE, M. et al. Fibres of milling and fruit processing by-products in gluten-free bread making: A review of hydration properties, dough formation and quality-improving strategies. **Food Chemistry**, v. 306, p. 125451, 15 fev. 2020.

HOPKIN, L.; BROADBENT, H.; AHLBORN, G. J. Influence of almond and coconut flours on Ketogenic, Gluten-Free cupcakes. **Food Chemistry: X**, v. 13, p. 100182, 30 mar. 2022.

JUHÁSZ, A.; COLGRAVE, M. L.; HOWITT, C. A. Developing gluten-free cereals and the role of proteomics in product safety. **Journal of Cereal Science**, v. 93, p. 102932, 1 maio 2020.

KHOOZANI, A. A.; BEKHIT, A. E. D. A.; BIRCH, J. Effects of different drying conditions on the starch content, thermal properties and some of the physicochemical parameters of whole green banana flour. **International journal of biological macromolecules**, v. 130, p. 938–946, 1 jun. 2019.

KUNYANEE, K.; LUANGSAKUL, N. The impact of heat moisture treatment on the physicochemical properties and in vitro glycemic index of rice flour with different amylose contents and associated effects on rice dumpling quality. **LWT**, v. 154, p. 112694, 15 jan. 2022.

- LANCETTI, R. et al. Yacon (*Smallanthus sonchifolius*) flour obtention: Effect of process conditions on quality attributes and its incorporation in gluten-free muffins. **LWT**, v. 125, p. 109217, 1 maio 2020.
- MAHROUG, H. et al. How microwave treatment of gluten affects its toxicity for celiac patients? A study on the effect of microwaves on the structure, conformation, functionality and immunogenicity of gluten. **Food Chemistry**, v. 297, p. 124986, 1 nov. 2019.
- MARCHETTI, L. et al. Effect of bacterial nanocellulose addition on the rheological properties of gluten-free muffin batters. **Food Hydrocolloids**, v. 98, p. 105315, 1 jan. 2020.
- MARCHETTI, L.; ACUÑA, M. S.; ANDRÉS, S. C. Effect of pecan nut expeller meal on quality characteristics of gluten-free muffins. **LWT**, v. 146, p. 111426, 1 jul. 2021.
- MARTA, H. et al. A comparative study on the physicochemical and pasting properties of starch and flour from different banana (*Musa spp.*) cultivars grown in Indonesia. **International Journal of Food Properties**, v. 22, n. 1, p. 1562–1575, 1 jan. 2019.
- NAKAJIMA, S. et al. Quantification of starch content in germinating mung bean seedlings by terahertz spectroscopy. **Food Chemistry**, v. 294, p. 203–208, 1 out. 2019.
- OZYIGIT, E. et al. Large Amplitude Oscillatory Shear (LAOS) analysis of gluten-free cake batters: The effect of dietary fiber enrichment. **Journal of Food Engineering**, v. 275, p. 109867, 1 jun. 2020.
- PAESANI, C.; BRAVO-NÚÑEZ, Á.; GÓMEZ, M. Effect of stabilized wholegrain maize flours on the quality characteristics of gluten-free layer cakes. **LWT**, v. 135, p. 109959, 1 jan. 2021.
- PANG, Z. et al. Physicochemical properties of modified starch under yogurt manufacturing conditions and its relation to the properties of yogurt. **Journal of Food Engineering**, v. 245, p. 11–17, 1 mar. 2019.
- PARSONS, K. et al. Gluten cross-contact from common food practices and preparations. **Clinical Nutrition**, v. 40, n. 5, p. 3279–3287, 1 maio 2021.
- PEREIRA, A.; MARASCHIN, M. Banana (*Musa spp*) from peel to pulp: Ethnopharmacology, source of bioactive compounds and its relevance for human health. **Journal of Ethnopharmacology**. Elsevier Ireland Ltd, 3 fev. 2015.
- PRASAD, K. N.; BONDY, S. C. Dietary fibers and their fermented short-chain fatty acids in prevention of human diseases. **Bioactive Carbohydrates and Dietary Fibre**. Elsevier Ltd, 1 jan. 2019.
- PUNIA, S. Barley starch modifications: Physical, chemical and enzymatic - A review. **International Journal of Biological Macromolecules**, v. 144, p. 578–585, 1 fev. 2020.

- PYCARELLE, S. C. et al. Wheat (*Triticum aestivum* L.) flour free lipid fractions negatively impact the quality of sponge cake. **Food Chemistry**, v. 271, p. 401–409, 15 jan. 2019.
- RIBES KONINCKX, C. et al. La introducción del gluten en la dieta del lactante. Recomendaciones de un grupo de expertos. **Anales de Pediatría**, v. 83, n. 5, p. 355.e1-355.e7, 1 nov. 2015.
- RIQUETTE, R. F. R. et al. Do production and storage affect the quality of green banana biomass? **LWT**, v. 111, p. 190–203, 1 ago. 2019.
- SAHAGÚN, M. et al. Influence of protein source on the characteristics of gluten-free layer cakes. **LWT**, v. 94, p. 50–56, 1 ago. 2018.
- SALAZAR, D. et al. Physico-chemical properties and filmogenic aptitude for edible packaging of Ecuadorian discard green banana flours (*Musa acuminata* AAA). **Food Hydrocolloids**, v. 122, p. 107048, 1 jan. 2022.
- SCHAFRANSKI, K.; ITO, V. C.; LACERDA, L. G. Impacts and potential applications: A review of the modification of starches by heat-moisture treatment (HMT). **Food Hydrocolloids**, v. 117, p. 106690, 1 ago. 2021.
- SCHERF, K. A. Immunoreactive cereal proteins in wheat allergy, non-celiac gluten/wheat sensitivity (NCGS) and celiac disease. **Current Opinion in Food Science**, v. 25, p. 35–41, 1 fev. 2019.
- SMULDERS, M. J. M. et al. Oats in healthy gluten-free and regular diets: A perspective. **Food Research International**, v. 110, p. 3–10, 1 ago. 2018.
- STORCK, C. R. et al. Different reaction times for phosphorylation of sorghum flour (*Sorghum bicolor*): Physicochemical evaluation and application in the formulation of gluten-free cakes. **Food Bioscience**, v. 44, p. 101441, 1 dez. 2021.
- TASNIM, T. et al. Nutritional, textural, and sensory quality of plain cake enriched with rice rinsed water treated banana blossom flour. **Journal of Agriculture and Food Research**, v. 2, p. 100071, 1 dez. 2020.
- TEIXEIRA, F. A. M.; LOPES, F. O. DE A.; MACHADO, A. P. DE S. L. Dieta isenta de glúten e risco de desfechos gestacionais desfavoráveis em mulheres com doença celíaca: revisão sistemática. **Reprodução & Climatério**, v. 32, n. 2, p. 120–126, 1 maio 2017.
- VALL RIBEIRO, N. C. B.; RAMER-TAIT, A. E.; CAZARIN, C. B. B. Resistant starch: A promising ingredient and health promoter. **PharmaNutrition**, v. 21, p. 100304, 1 set. 2022.
- VIANA, E. B. M. et al. Development of starch-based bioplastics of green plantain banana (*Musa paradisiaca* L.) modified with heat-moisture treatment (HMT). **Food Packaging and Shelf Life**, v. 31, p. 100776, 1 mar. 2022.

WANG, H. et al. Effect of water content of high-amylose corn starch and glutinous rice starch combined with lipids on formation of starch–lipid complexes during deep-fat frying. **Food Chemistry**, v. 278, p. 515–522, 25 abr. 2019.

WANG, J. et al. Changes in resistant starch from two banana cultivars during postharvest storage. **Food chemistry**, v. 156, p. 319–325, 1 ago. 2014.

WANG, Y. et al. Allergenicity assessment and allergen profile analysis of different Chinese wheat cultivars. **World Allergy Organization Journal**, v. 14, n. 7, p. 100559, 1 jul. 2021.

WILDERJANS, E. et al. Ingredient functionality in batter type cake making. **Trends in Food Science & Technology**, v. 30, n. 1, p. 6–15, 1 mar. 2013.

XHAFERAJ, M. et al. Recent progress in analytical method development to ensure the safety of gluten-free foods for celiac disease patients. **Journal of Cereal Science**, v. 96, p. 103114, 1 nov. 2020.

XIE, J. et al. Pectin from plantain peels: green recovery for transformation into reinforced packaging films. **Waste Management**, v. 161, p. 225–233, 15 abr. 2023.

XU, J. et al. Advanced properties of gluten-free cookies, cakes, and crackers: A review. **Trends in Food Science & Technology**, v. 103, p. 200–213, 1 set. 2020.

YANG, S. et al. Structural, gelatinization, and rheological properties of heat-moisture treated potato starch with added salt and its application in potato starch noodles. **Food Hydrocolloids**, v. 131, 1 out. 2022.

ZHAO, T. et al. Effect of natural fermentation on the structure and physicochemical properties of wheat starch. **Carbohydrate Polymers**, v. 218, p. 163–169, 15 ago. 2019.

## CAPÍTULO 2

---

### ARTIGO 1

#### **Physical, chemical and technological properties of whole green plantain flour native and modified by hydrothermal treatment**

Propriedades físicas, químicas e tecnológicas da farinha integral de banana-da-terra verde nativa e modificada por tratamento hidrotérmico

---

\*Manuscrito será submetido na revista Food Chemistry (INSS: 0308-8146) –  
Classificação Qualis-Capes: A1



35 **Resumo**

36

37 As bananas verdes têm sido estudadas em função da sua composição, sobretudo pela presença de  
38 fibras alimentares, com destaque para o amido resistente. Esse trabalho teve como objetivo  
39 obter a farinha integral de banana-da-terra verde nativa, caracterizá-la e modificá-la por  
40 tratamento hidrotérmico - HMT, utilizando o delineamento composto central rotacional como  
41 ferramenta estatística para avaliar o efeito do tempo, temperatura e umidade no amido presente  
42 nas farinhas, e caracterizá-las quanto as suas propriedades de pasta, tecnológicas, físicas e  
43 químicas. Em relação à farinha nativa, o tratamento hidrotérmico alterou as propriedades  
44 tecnológicas, com redução do poder de inchamento e aumento do índice de solubilidade e as  
45 propriedades de pasta (aumento da temperatura de pasta, redução da viscosidade máxima,  
46 viscosidade mínima, viscosidade final, quebra e taxa de retrogradação). A farinha nativa e  
47 modificadas por tratamento hidrotérmico se mostraram compatíveis para aplicação alimentares,  
48 com potencial contribuição para enriquecimento nutricional e funcional em formulações à base  
49 de farinhas refinadas.

50

51

52 **Palavras-Chave:** Banana verde; Modificação física; Propriedade de pasta; Alimento funcional.

53

54

55

56

57

58

59

60

61

62

## 1. Introdução

As bananas ocupam o quarto lugar em commodities agrícolas e representam uma das frutas mais consumidas no mundo (Salazar et al., 2022; Feitosa et al., 2023). A banana-da-terra está entre as frutas mais utilizadas como fonte de energia na alimentação das pessoas que vivem em regiões de sua maior produção (Stragliotto et al., 2022; Xie et al., 2023). Trata-se de uma fonte importante de amido, quando verdes, que corresponde entre 70 a 80% do seu conteúdo em base seca. Além disso, a presença de vitaminas, minerais, compostos bioativos e fibra dietética, com destaque para o amido resistente, tem ampliado o interesse em seu estudo (Riquette et al., 2019; Salazar et al., 2022). Entre os produtos derivados da banana verde estão o amido, a farinha e a biomassa (Salazar et al., 2022; Viana et al., 2022).

O amido em alimentos, seja isolado ou presente na matriz, a exemplo do amido presente na farinha de banana-da-terra verde, possui uma forte contribuição na textura, pois atua como espessante, estabilizador coloidal, agente gelificante, agente de volume e agente de retenção de água. Essas propriedades são responsáveis por ampliar as suas possibilidades de aplicação, entre elas a substituição total ou parcial de farinhas refinadas em preparações alimentares (Caballero et al., 2016; Eliasson, 2018; Pang et al., 2019). Além disso, o amido resistente (AR) presente na farinha de banana-da-terra verde, é uma reconhecida fonte de fibra dietética, que inclui todos os produtos de degradação de amido e o próprio amido, que passam pelo intestino delgado humano de maneira intacta, ou seja, não são absorvidos no intestino delgado de indivíduos saudáveis. Atualmente, sua função prebiótica tem sido amplamente pesquisada (Khoodzani et al., 2019; Prasad & Bondy, 2019; Reddappa et al., 2023).

A utilização do amido na sua forma nativa é limitada em determinadas condições de processamento e armazenamento, devido a baixa resistência ao cisalhamento, baixa resistência térmica, decomposição térmica durante o processamento, e tendência para a retrogradação. Desta forma, modificações em sua estrutura que possam alterar e favorecer consideravelmente as suas propriedades físicas, químicas, funcionais e nutricionais têm sido pesquisadas e aplicadas (Pang et al., 2019; Schafranski et al., 2021). Diferentes tipos de modificações podem ser empregadas para melhorar as características estruturais, propriedades funcionais e características nutricionais, podendo ser de natureza química, física, enzimática ou derivada de processos fermentativos (Zhao et al., 2019).

A aplicação de tratamentos químicos ou agentes biológicos podem ser nocivos para saúde humana, assim, as modificações de natureza física são mais seguras, ecologicamente corretas e simples de serem executadas, logo, é a classe de modificação de maior interesse da indústria

97 atualmente. Os principais métodos de modificação física são: tratamento do amido nativo com  
98 irradiação, pressão osmótica, campo elétrico pulsado, pré-gelatinização ou calor e umidade. O  
99 tratamento hidrotérmico – HMT (do inglês, *heat moisture treatment*) é bastante empregado  
100 por apresentar benefícios que vão além da sua viabilidade e aplicação segura, abrangendo o  
101 potencial de transformação de características químicas, físicas, nutricionais e de digestibilidade  
102 do amido nativo isolado e em farinhas (Schafranski et al., 2021; Yang et al., 2022). Entre as  
103 transformações observadas, destaca-se o aumento da estabilidade térmica, redução do poder de  
104 inchamento, redução da viscosidade, aumento do conteúdo de amido resistente e redução da  
105 digestibilidade do amido, que são alterações atrativas para indústria de alimentos,  
106 potencializando a qualidade nutricional e/ou funcional dos seus produtos (Chen et al., 2020;  
107 Schafranski et al., 2021; Yang et al., 2022).

108 Considerando que existem poucos dados sobre as propriedades físicas, químicas, e  
109 tecnológicas da farinha integral de banana-da-terra verde (*Musa paradisiaca* L.) modificada, o  
110 presente trabalho teve como objetivo caracterizar a farinha integral de banana-da-terra verde  
111 nativa e modificada por HMT, buscando ampliar as suas possibilidades de aplicação.

112

## 113 **2. Materiais e métodos**

114

### 115 **2.1 Obtenção da matéria-prima**

116

117 A banana-da-terra (*Musa paradisiaca* L.) orgânica foi adquirida diretamente de um  
118 produtor da região Sudoeste da Bahia – Brasil, em fevereiro de 2022, no estágio de maturação  
119 1, ou seja, com maturidade fisiológica e 100% da casca verde. O sistema de cultivo dos frutos  
120 foi o agroflorestal, consorciado com frutíferas diversas, após a colheita os frutos não foram  
121 submetidos a tratamentos para acelerar a maturação.

122

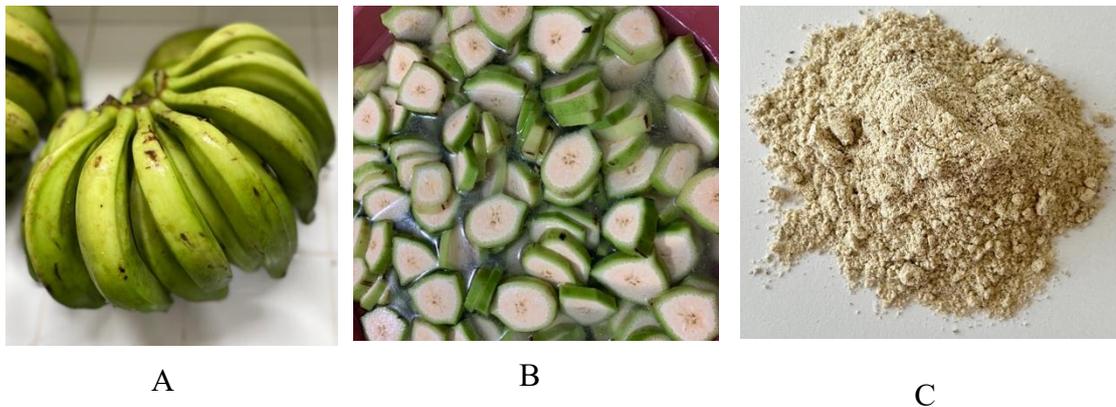
### 123 **2.2 Preparo da farinha integral de banana-da-terra (*Musa paradisiaca* L.) verde**

124

125 A farinha integral de banana-da-terra verde nativa (NBF) foi produzida conforme  
126 metodologia descrita por (Khoozani et al., 2019) com adaptações. As bananas foram lavadas,  
127 sanitizadas em solução clorada (200 ppm) por 15 min e enxaguadas em água corrente. Em  
128 seguida, foram imersas em solução de ácido cítrico 0,5% (p/v) por 15 min, para evitar o  
129 escurecimento, fatiadas em rodela de aproximadamente 7 mm de espessura e novamente

130 mergulhadas em solução de ácido cítrico a 0,5% (p/v) por 15 min. As fatias (casca e polpa)  
 131 foram dispostas em bandejas e submetidas à secagem em estufa (Tecnal, modelo TE-394/4 MP,  
 132 Piracicaba – SP) com circulação forçada de ar a 55 °C por 15 h ou até peso constante. As fatias  
 133 desidratadas foram trituradas em liquidificador industrial, peneiradas em peneiras de 28 mesh,  
 134 dispostas em embalagens de polipropileno, identificadas e armazenadas em temperatura  
 135 ambiente ao abrigo da luz (Figura 1).

136



137 **Figura 1:** Banana-da-terra em estágio de maturação 1 (A); Banana-da-terra *in natura* fatiada  
 138 (B); Farinha integral de banana-da-terra verde nativa (C).

139

### 140 2.2.1 Determinação do rendimento

141

142 Para o cálculo de rendimento em farinha de banana-da-terra verde integral (casca +  
 143 polpa) utilizou-se a massa da fruta submetida à secagem e a massa de farinha obtida após a  
 144 moagem da matéria-prima desidratada. O rendimento foi determinado através da Equação 1 e  
 145 expresso em porcentagem. A análise foi realizada em triplicada e os resultados expressos em  
 146 média ± desvio padrão.

147

$$148 \quad \% \text{ Rendimento} = \left( \frac{m_F}{m_B} \right) \times 100$$

149

(1)

150 Onde:  $m_B$  é a massa da banana-da-terra verde *in natura* e  $m_F$  massa farinha.

151

### 152 2.3 Modificação hidrotérmica

153

154 Foi utilizado o Delineamento Composto Central Rotacional (DCCR) como ferramenta  
 155 estatística para analisar o efeito do tempo, temperatura e umidade no grânulo do amido presente  
 156 na farinha integral de banana-da-terra verde. Foram realizados 17 ensaios, sendo 14 tratamentos  
 157 com três repetições no ponto central. Os níveis utilizados estão apresentados na Tabela 1.

158  
 159 **Tabela 1:** Condições experimentais do Delineamento Composto Central Rotacional (DCCR).

Variáveis	Níveis				
	-1,682	-1	0	+1	+1,682
<b>Tempo (h)</b>	2,07	6,50	13,00	19,50	23,93
<b>Temperatura (°C)</b>	79,97	88,09	99,99	111,89	120,01
<b>Umidade (%)</b>	19,93	23,00	27,50	32,00	35,07

160  
 161

162 A modificação física por tratamento hidrotérmico (HMT) seguiu metodologia descrita  
 163 por (Chung et al., 2009), onde 60 g da farinha de banana-da-terra verde nativa foram dispostas  
 164 em um reator de teflon e a umidade desejada foi ajustada com adição de água destilada. A massa  
 165 de água utilizada foi calculada levando-se em consideração o teor de umidade inicial da farinha.  
 166 As farinhas foram cuidadosamente homogeneizadas e mantidas em refrigeração a 4 °C por 24  
 167 h. As amostras hermeticamente seladas foram aquecidas em estufa nas temperaturas  
 168 estabelecidas, durante os intervalos de tempo determinados de acordo ao planejamento  
 169 experimental (Tabela 2). Após este período, as farinhas foram retiradas dos reatores,  
 170 distribuídas em placas de Petri para secagem em estufa com circulação forçada de ar a 40°C até  
 171 atingirem umidade próxima a 12%. Em seguida foram pulverizadas, peneiradas (28 mesh),  
 172 embaladas em embalagens de polipropileno, identificadas e armazenadas sob temperatura  
 173 ambiente, ao abrigo de luz e umidade.

174

## 175 **2.4 Caracterização da farinha nativa e modificada**

176

### 177 **2.4.1 Composição química**

178

179 O teor de umidade, cinzas e proteínas foram determinados segundo as técnicas n° 92510,  
 180 n° 92303 e n° 92303, respectivamente, da AOAC (1997). Na determinação do pH seguiu a  
 181 metodologia n° 981.12 (AOAC, 2016). O teor de lipídeos totais foi determinado segundo  
 182 método descrito por Folch et al. (1957) e carboidratos totais foram obtidos seguindo a  
 183 metodologia descrita por Gutiérrez (2018). A acidez total titulável foi definida pela titulação

184 com solução de hidróxido de sódio (NaOH) 0,1 mol/L até atingir uma faixa de pH entre 8,2 -  
 185 8,4, seguindo a metodologia do Instituto Adolfo Lutz (2008).

186

187 **Tabela 2:** Descrição dos tratamentos.

Tratamento	Tempo (h)	Temperatura (°C)	Umidade (%)
MBF1	6,50	88,1	23,00
MBF2	6,50	88,1	32,00
MBF3	6,50	111,9	23,00
MBF4	6,50	111,9	32,00
MBF5	19,50	88,1	23,00
MBF6	19,50	88,1	32,00
MBF7	19,50	111,9	23,00
MBF8	19,50	111,9	32,00
MBF9	2,07	100,0	27,50
MBF10	23,93	100,0	27,50
MBF11	13,00	79,97	27,50
MBF12	13,00	120,0	27,50
MBF13	13,00	100,0	19,93
MBF14	13,00	100,0	35,07
MBF15	13,00	100,0	27,50
MBF16	13,00	100,0	27,50
MBF17	13,00	100,0	27,50

188 MBF, farinha integral de banana-da-terra verde modificada.

189

#### 190 **2.4.2 Teor de amido total da farinha nativa**

191

192 A determinação do teor de amido total seguiu a metodologia descrita por Soares et al.  
 193 (2022), com adaptações. Este método se baseia no princípio na determinação do composto  
 194 colorido formado pela reação entre a antrona e a glicose derivada da hidrólise do amido.  
 195 Inicialmente, a farinha nativa (NBF) foi desengordurada em solução de hexano P.A., sendo que  
 196 125 mg foi adicionada em 5 mL de solução 0,5 mol. L<sup>-1</sup> de ácido sulfúrico (H<sub>2</sub>SO<sub>4</sub>) a 100 °C  
 197 por 1 h, com agitação eventual. A leitura de cor foi realizada em espectrofotômetro UV-VIS  
 198 (Celm, modelo E-225 D visível, Barueri - SP) usando cubeta de vidro de 1 cm e em  
 199 comprimento de onda de 620 nm. O branco foi preparado com água destilada, solução de ácido  
 200 sulfúrico e antrona.

201

#### 202 **2.4.3 Amido resistente da farinha nativa**

203

204 O conteúdo de amido resistente foi determinado seguindo metodologia descrita por Goñi et

205 al. (1996) com adaptações, o princípio do método consiste na remoção da proteína e do amido  
206 digestível, seguido de solubilização e hidrólise enzimática do amido resistente e quantificação  
207 do amido resistente como glicose liberada.

208

#### 209 **2.4.4 Atividade água da farinha nativa**

210

211 A atividade de água ( $a_w$ ) foi medida com a utilização de um analisador de atividade de  
212 água, marca Aqualab, Modelo CX-2 (Washington/USA). As amostras foram dispostas em  
213 recipiente de apropriado e acomodada no equipamento. A leitura da atividade de água foi  
214 realizada a 25 °C.

215

#### 216 **2.4.5 Compostos fenólicos totais da farinha nativa**

217

218 A determinação de compostos fenólicos totais (CFT) seguiu a metodologia ISO 14502-  
219 1:2005 (ISO, 2005), utilizando solução de Folin-Ciocalteu a 10% e carbonato de sódio a 7,5%.  
220 O conteúdo de CFT foi obtido a partir da curva analítica construída com ácido gálico. A leitura  
221 foi realizada em espectrofotômetro UV-VIS (Analyser, modelo SF 200 DM, São Paulo – SP) a  
222 765 nm em comprimento de onda. Os resultados obtidos foram expressos em mg equivalente de  
223 ácido gálico (EAG)/100 g.

224

#### 225 **2.4.6 Teor de amilose aparente da farinha nativa e modificada**

226

227 Para a determinação do teor de amilose aparente foi utilizada a metodologia descrita por  
228 Martinez e Cuevas (1989), com modificações. Esse método colorimétrico baseia-se na  
229 transmissão da luz através do complexo colorido que a amilose forma ao reagir com o iodo. As  
230 leituras de absorbância foram realizadas em espectrofotômetro UV-VIS (Celm, modelo E-225  
231 D visível, Barueri - SP) usando cubetas de vidro de 1 cm e em comprimento de onda igual a  
232 590 nm. O teor de amilose foi obtido a partir da curva analítica preparada usando como padrão  
233 soluções de amilose de batata.

234

#### 235 **2.4.7 Propriedades de pasta da farinha nativa e modificada**

236

237 As propriedades de pasta da farinha nativa (NBF) e modificada (MBF) foram  
238 determinadas utilizando o Analisador Rápido de Viscosidade – RVA (RVA 4500, Perten

239 Instruments, Newport Scientific, Austrália), no Laboratório de Ciência e Tecnologia de  
240 Alimentos da Embrapa Mandioca e Fruticultura, seguindo o padrão de análise *Standard 1*.

241 Para a análise foram utilizadas 3 g de cada amostra com umidade corrigida para 14 %.  
242 Adicionou-se água destilada até a obtenção do peso final de 28 g. A viscosidade foi determinada  
243 em função do perfil de temperatura, onde a temperatura foi mantida inicialmente a 50 °C por 1  
244 min, seguido pelo aquecimento de 50 °C a 95 °C com taxa de aquecimento de 12,2 °C.min<sup>-1</sup>,  
245 mantida em 95°C durante 2,5 min, por fim, resfriado até 50 °C com taxa de 11,8 °C.min<sup>-1</sup>. Ao  
246 atingir 50 °C o gel foi mantido nessa temperatura por 2 min. A amostra foi agitada durante toda  
247 a análise por uma pá giratória. Nos primeiros 10 s a velocidade de agitação foi de 960 rpm, com  
248 o objetivo de homogeneizar a solução. Posteriormente, ao longo de toda análise, a velocidade  
249 foi de 160 rpm. Cada análise teve uma duração de aproximadamente 13 min, com tempo entre  
250 cada leitura de aproximadamente 4 s. Os parâmetros medidos foram: viscosidade máxima (cP),  
251 viscosidade mínima (cP), viscosidade final (cP), quebra de viscosidade (breakdown) (cP) e  
252 tendência à retrogradação (setback) (cP), além da temperatura de pasta (°C).

253

#### 254 **2.4.8 Poder de Inchamento (PI) e Índice de Solubilidade (IS) da farinha nativa e** 255 **modificada**

256

257 O PI (g.g<sup>-1</sup>) e IS (g.g<sup>-1</sup>) da NBF e MBF foram determinados de acordo com a  
258 metodologia de Marta et al. (2019), com modificações. 1,0 g da amostra foi pesada diretamente  
259 no tubo da centrífuga (50 mL), aproximadamente 20 mL de água destilada foram adicionados,  
260 sendo a suspensão homogeneizada por 1 min em agitador vórtex (Phoenix lufenco, modelo AP-  
261 56) e dispostas em banho termostatizado (Tecnal, modelo TE-054, Piracicaba - SP) por 30 min  
262 a 95 °C, com agitação eventual. Após a gelatinização, as suspensões foram resfriadas e  
263 centrifugadas por 15 min a 3000 g (Solab, modelo SL-706, Piracicaba – SP). Para a  
264 determinação do IS (g.g<sup>-1</sup>) das amostras, o sobrenadante foi cuidadosamente transferido para  
265 placas de Petri, previamente pesadas, e o volume seco foi obtido em estufa de secagem e  
266 circulação de ar à 105 °C (Ethik technology, modelo 420\_TD, Vargem Grande Paulista - SP)  
267 até massa constante. O poder de inchamento (PI) e índice de solubilidade (IS) foram  
268 determinados através das Equações 2 e 3.

269

$$270 \quad PI (g \cdot g^{-1}) = \frac{m_{gel}}{m_a - m_s} \quad (2)$$

271

$$IS (g \cdot g^{-1}) = \frac{m_s}{m_a} \quad (3)$$

273

274 Onde:  $m_{gel}$  = massa do gel (g),  $m_a$  = massa da amostra (g) e  $m_s$  = massa do sobrenadante seco  
275 (g).

276

## 277 **2.5 Análise estatística**

278

279 Os resultados da caracterização da farinha de banana-da-terra verde nativa foram  
280 expressos em média  $\pm$  desvio padrão. Para analisar o efeito do tratamento por HMT no teor de  
281 amilose aparente, poder de inchamento, índice de solubilidade e propriedades de pasta da  
282 farinha, foi utilizado um delineamento central composto rotacional (DCCR) com 17 ensaios,  
283 sendo 14 tratamentos com três repetições no ponto central. Os resultados foram submetidos à  
284 análise de regressão para avaliar o efeito das diferentes condições de tempo, temperatura e  
285 umidade aplicados nas propriedades estudadas. Todas as análises foram realizadas no software  
286 estatístico Statistical Analysis System- SAS®, versão OnDemand for Academics Pannel.

287

## 288 **3. Resultados e discussão**

289

### 290 **3.1 Rendimento da farinha integral de banana-da-terra verde nativa**

291

292 O rendimento da farinha integral de banana-da-terra verde nativa (NBF) foi de 24,73 %.  
293 Conhecer o rendimento de um produto permite que a produção tenha um planejamento seguro,  
294 impedindo projeções inadequadas quanto à armazenagem, logística e distribuição, evitando  
295 prejuízos, além de contribuir na definição dos custos envolvidos no processo. Em um estudo  
296 com farinha de banana verde, com cinco variedades diferentes (Grand Naine, Monthan, Saba,  
297 Nendran e Popoulu), Kumar et al. (2019) encontram rendimento da farinha de banana verde  
298 uma variação de 20,61% a 23,57 % para cv. Saba e Monthan respectivamente, valores  
299 inferiores, porém próximos ao encontrado nesse trabalho. É importante destacar que o  
300 aproveitamento da banana verde para a produção de farinha é mais rentável em comparação à  
301 produção de amido, em função da baixa produção de resíduos e custos operacionais (Gutiérrez,  
302 2018).

303

### 304 **3.2 Caracterização da farinha de banana-da-terra verde**

305

306 Os resultados para caracterização da NBF são apresentados na Tabela 3. O valor do pH da  
 307 NBF foi próximo aos apresentados por Kumar et al. (2019) que obtiveram valores de pH para  
 308 as farinhas da polpa de banana verde de 5,00 cv. Nendran, 5,02 cv. Saba, 5,15 cv. Monthan,  
 309 5,36 cv. Grand Naine e 5,78 cv. Popoulu, e inferior aos encontrados por Padhi & Dwivedi  
 310 (2022) de 6,45 e 6,12, em um estudo com a farinha da polpa de banana verde (*Musa sp.*),  
 311 aplicando secagem por janela de refração e secagem em estufa, respectivamente. A acidez  
 312 titulável apresentou valor superior ao encontrado por Khoozani et al. (2019) (0,32) para farinha  
 313 integral de banana verde (cultivar *Cavendish of musa (AAA) nanica*). Os ácidos orgânicos  
 314 ocorrem em sistemas naturais e podem desempenhar algumas funções específicas, como a  
 315 participação em sistemas de tamponamento, por exemplo, podendo influenciar no pH dos  
 316 alimentos. A qualidade microbiológica e, conseqüentemente, o estado de conservação de um  
 317 produto é influenciada por sua acidez, por atuar como inibidor do crescimento microbiano.  
 318 Considerando os resultados encontrados a NBF pode ser classificada como ácida, contribuindo  
 319 assim para a sua maior segurança e estabilidade microbiológica (Damodaran & Parkin, 2019).  
 320

321 **Tabela 3:** Caracterização da farinha integral de banana-da-terra verde nativa (NBF).

<b>Propriedade</b>	<b>NBF</b>
<b>pH</b>	5,79 ± 0,02
<b>Acidez titulável (g/100g)</b>	0,42 ± 0,05
<b>Amido total (%)</b>	70,57 ± 4,78
<b>Amido resistente (%)</b>	50,6 ± 0,12
<b>Umidade (%)</b>	9,64 ± 0,08
<b>Cinzas (%)</b>	2,63 ± 0,03
<b>Proteína bruta (%)</b>	4,74 ± 0,48
<b>Lipídeos totais (%)</b>	0,02 ± 0,00
<b>Carboidratos totais (%)</b>	82,97 ± 0,41
<b>Compostos fenólicos (EAG mg/100g)</b>	133,5 ± 11,8
<b>Atividade de água (a<sub>w</sub>)</b>	0,53 ± 0,01

322 Valores expressos em média ± desvio-padrão. Base seca.

323

324 O amido é o principal constituinte da banana verde, logo, conhecer o seu conteúdo, e  
 325 conseqüentemente, o da amilose e da amilopectina em sua farinha é importante, pois a sua  
 326 funcionalidade será determinada por sua composição (Zhang et al., 2005). O valor encontrado  
 327 na NBF para amido total está dentro do esperado para banana verde integral (casca e polpa) que  
 328 é entre 70-80% do peso seco (Khoozani et al., 2019; Pelissari et al., 2013). Patiño-Rodríguez et  
 329 al. (2018) encontraram 72,44% de amido total na farinha integral de banana verde (*Musa*

330 paradisiaca L.), valor próximo ao obtido nesse estudo. Kumar et al. (2019) obtiveram os valores  
331 diversos de amido total para as farinhas de polpa de banana verde, com 68,97% cv. Grand  
332 Naine, 69,88% cv. Popoulu, 73,41% cv. Nendran, 80,87% cv. Saba e 81,66% cv. Monthan. O  
333 valor de amido total encontrado para NBF é próximo ao da farinha de trigo com 75,79% (Kumar  
334 et al., 2019).

335 O teor de amido resistente da farinha integral de banana-da-terra nativa (50,6%), indica  
336 o potencial funcional da mesma. O amido resistente (AR) é uma reconhecida fonte de fibra  
337 dietética com função prebiótica (Khoozani et al., 2019) relacionada positivamente com redução  
338 de doenças inflamatórias, câncer de cólon e outras neoplasias malignas, obesidade, diabetes  
339 tipo II e doenças cardiovasculares, além de contribuir na saúde intestinal de maneira geral  
340 (Damodaran & Parkin, 2019; Prasad & Bondy, 2019).

341 O valor de umidade encontrado está abaixo de 15,5%, que corresponde ao limite  
342 máximo de qualidade para farinha de trigo definido pelo Codex Alimentarius (1985),  
343 assegurando a vida útil da farinha durante o armazenamento em condições adequadas, uma vez  
344 que a umidade elevada em alimentos favorece o crescimento microbiano, a perda de  
345 propriedades texturais, químicas e bioquímicas (P. S. Kumar et al., 2019).

346 O teor de cinzas da NBF foi inferior ao valor apresentado por Patiño-Rodríguez et al.  
347 (2018) que encontram 3,25% para farinha integral de banana verde (*M. paradisiaca* L.). Vega-  
348 Rojas et al. (2021) encontraram valores inferiores, com 1,23% para farinha banana verde (*Musa*  
349 *paradisiaca* L.) feita somente com a polpa. A farinha integral de banana verde possui um  
350 conteúdo de minerais superior ao da farinha de banana verde produzida somente com a polpa  
351 (Khoozani et al., 2019; Patiño-Rodríguez et al., 2019), devido à concentração de minerais  
352 presentes nas cascas, que é desejável para melhor qualidade nutricional da farinha e,  
353 consequentemente, dos produtos em que ela será aplicada.

354 Comparando os valores encontrados para proteínas e lipídeos com outros estudos,  
355 observa-se que Patiño-Rodríguez et al. (2018) encontraram valores inferiores para proteína  
356 (4,00%) e superiores para lipídeos (1,04%) para farinha integral de banana verde (*M.*  
357 *paradisiaca* L.). Em um estudo com farinha nativa de banana verde (*Musa* ssp., grupo AAB,  
358 subgrupo clone Harton), somente polpa, Gutiérrez (2018) obteve valor inferior para proteína  
359 com 2,62% e superior para lipídeos com 0,37%. Kumar et al. (2019) obtiveram valores diversos  
360 de proteínas e lipídeos para as farinhas de banana verde, produzidas somente com a polpa,  
361 variando de 3,35% a 4,89% para proteína nas cultivares *Popoulu* e *Monthan*, respectivamente,  
362 e de 0,17% a 0,61% para lipídeos nas cultivares *Saba/Monthan* e *Nendran*, respectivamente.  
363 Estas diferenças podem ser justificadas, mais uma vez, pelo fato de a farinha ser integral (casca

364 e polpa) ou não (polpa), pela diferença entre as cultivares e pelo processo de obtenção. Conhecer  
365 o conteúdo de proteínas e lipídeos na farinha é importante para avaliação das suas propriedades  
366 tecnológicas, incluindo índice de absorção de água, poder de inchamento e índice de  
367 solubilidade. No amido isolado essas propriedades estão relacionadas prioritariamente com as  
368 características do amido, incluindo a proporção do conteúdo de amilose e amilopectina e  
369 cristalinidade, diferente das farinhas, que apresentam uma matriz complexa, onde esses  
370 componentes fazem parte da fração não amilácea, que competem pela absorção de água  
371 (proteínas) e a formação de complexos (lipídeos), que favorecem a formação de amido  
372 resistente (AR) tipo 5, caracterizado pela resistência à hidrólise, influenciando a sua  
373 digestibilidade (Khoozani et al., 2019; Marta et al., 2019).

374 A banana verde é fonte de compostos fenólicos, classificados como metabólitos secundários  
375 em espécies botânicas, que promovem benefícios para saúde humana pela sua capacidade em  
376 modular o estresse oxidativo e inflamatório, sendo associado à prevenção de doenças  
377 cardiovasculares, diabetes, obesidade e atividade antitumoral (Pico et al., 2019; Vu et al., 2018).  
378 O teor de compostos fenólicos da NBF foi inferior ao encontrado por Sarawong *et al.* (2014),  
379 que foi de 158,83 EAG mg/ 100g para o teor de fenólicos livres na farinha de banana verde  
380 nativa. Na banana verde, o conteúdo de compostos fenólicos pode variar em função da cultivar,  
381 condições de cultivo e processamento. A produção da farinha de banana verde é descrita como  
382 um processamento seguro, que preserva os compostos fenólicos, quando processada em  
383 condições ideais, com ajustes no tempo e temperatura de secagem (Pico et al., 2019). A casca  
384 de banana verde é uma considerável fonte de compostos fenólicos, sobretudo quando  
385 comparada a outras cascas de frutas (Vu et al., 2018), demonstrando a vantagem do  
386 processamento integral da farinha de banana verde, como aplicado nesse estudo.

387 Estudos recentes mostram que os compostos fenólicos dietéticos estão associados à  
388 promoção de uma microbiota intestinal saudável, favorecendo o crescimento seletivo das  
389 bactérias saudáveis e inibindo o crescimento de bactérias patogênicas no lúmen intestinal (Luo  
390 et al., 2023; Santos et al., 2022). Quando associados às fibras dietéticas com propriedades  
391 prebióticas, podem ter um papel importante na promoção de saúde para indivíduos  
392 imunossuprimidos em que o uso de probióticos podem levar a efeitos colaterais indesejáveis  
393 como estimulação imunológica excessiva, infecções sistêmicas, entre outros (Legesse Bedada  
394 et al., 2020). Essas características mostram o potencial da farinha integral de banana-da-terra  
395 verde como alimentos/ingrediente funcional em função da presença de compostos fenólicos e  
396 conteúdo de amido resistente (Liao & Hung, 2015).

397           Valores de  $a_w$  inferiores a 0,6 indicam estabilidade microbiológica dos alimentos, uma  
398 vez que o conteúdo de água disponível para processos biológicos está diretamente relacionado  
399 com a sua conservação, de maneira que quanto maior for o conteúdo de água livre de um  
400 produto, mais perecível será. A remoção de água por secagem é um dos métodos mais eficazes  
401 de conservação dos alimentos (Damodaran & Parkin, 2019), com isso é possível afirmar que a  
402 NBF representa uma potente alternativa de processamento da banana-da-terra verde,  
403 proporcionando sua maior conservação e melhor distribuição, ao contrário do processamento  
404 da biomassa.

405

### 406           **3.3 Solubilidade, poder de inchamento e teor de amilose**

407

408           O poder de inchamento (PI), índice de solubilidade (IS) e conteúdo de amilose aparente  
409 (AAC) da farinha integral de banana-da-terra verde nativa (NBF) e modificada por tratamento  
410 hidrotérmico (MBF) tem seus valores apresentados na Tabela 4. O HMT é uma modificação  
411 física realizada em condições controladas de tempo, temperatura e umidade que promove  
412 alteração na estrutura molecular, cristalina e granular do amido, controlando o intumescimento,  
413 a lixiviação e, conseqüentemente, a viscosidade da pasta. A fonte do amido e as condições  
414 aplicadas às variáveis do processo são os fatores fundamentais na determinação das  
415 propriedades dos amidos modificados por esse método (Kaur & Singh, 2019).

416           Considerando os dados experimentais, modelos matemáticos foram testados com a  
417 finalidade de prever o comportamento do PI, IS e AAC em função do tempo (t) Temperatura  
418 (T) e umidade (U). Não foi possível obter um modelo significativo para o PI e AAC ( $p > 0,05$ ).  
419 O modelo que melhor descreve o IS está descrito na Equação 4. As variáveis e interações que  
420 não foram significativas ( $p > 0,05$ ) foram retiradas do modelo. Para compreender melhor a  
421 influência das variáveis do processo um gráfico de superfície de resposta foi gerado a partir do  
422 modelo (Figura 2).

423           A amilose e amilopectina interferem nas propriedades do amido, que podem variar de  
424 acordo com as condições de processamento impostas (Magallanes-Cruz et al., 2023). Essa  
425 alteração pode estar relacionada com a formação de complexos entre amilose-proteína e  
426 amilose-lipídio durante o tratamento hidrotérmico (Zhang et al., 2023), impactando nas  
427 propriedades tecnológicas, térmicas e de pasta (Solaesa et al., 2022).

428

429

430

431 **Tabela 4:** Efeito do tratamento hidrotérmico na solubilidade, poder de inchamento e teor de  
 432 amilose da farinha integral de banana-da-terra verde.  
 433

<b>Tratamentos</b>	<b>Poder inchamento (g.g<sup>-1</sup>)</b>	<b>Índice de solubilidade (g.g<sup>-1</sup>)</b>	<b>Amilose Aparente (%)</b>
NBF	14,05	0,086	37,79
MBF1	9,94	0,165	36,36
MBF2	7,94	0,106	39,88
MBF3	8,14	0,144	35,45
MBF4	7,35	0,106	35,71
MBF5	9,75	0,371	35,45
MBF6	7,41	0,218	35,97
MBF7	8,41	0,197	37,79
MBF8	7,79	0,125	39,88
MBF9	12,18	0,092	38,31
MBF10	8,58	0,258	35,71
MBF11	9,11	0,167	38,31
MBF12	7,52	0,157	38,31
MBF13	10,35	0,254	38,57
MBF14	7,49	0,132	38,31
MBF15	8,25	0,204	36,36
MBF16	8,21	0,179	40,40
MBF17	7,61	0,176	38,44

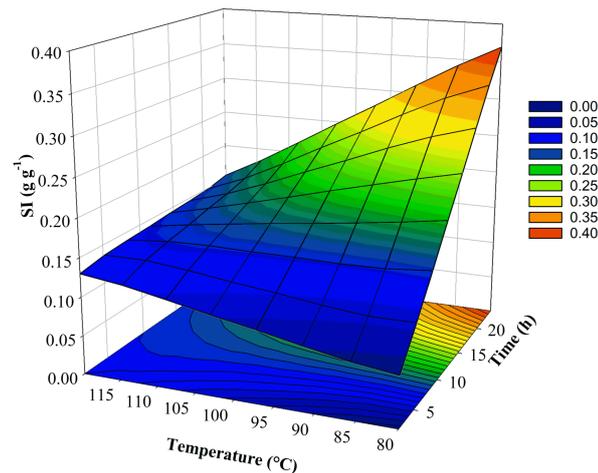
434

435 O HMT tem efeito sobre o IS (Equação 4), que segundo o modelo descrito, ocorre em  
 436 função do tempo e temperatura, com efeito linear positivo, apontando o aumento do IS com o  
 437 aumento do tempo e temperatura de modificação. Observando o gráfico de superfície de  
 438 resposta (Figura 2) identificamos que não foi possível definir um ponto ótimo para o IS, porém  
 439 é percebe-se uma região de valores máximos. No amido a redução no IS está relacionada com  
 440 o aumento e fortalecimento das interações entre as moléculas de amilose e amilopectina,  
 441 dificultando a lixiviação dos grânulos de amido (Kaur & Singh, 2019; Magallanes-Cruz et al.,  
 442 2023), porém nas farinhas essa diferença sugere a influência de componentes não amiláceos  
 443 (proteínas, gorduras, cinzas, fibras, pectina, celulose, ácidos fenólicos, entre outros), que  
 444 também competem por água e/ou favorece a formação de complexos, afetando as propriedades  
 445 tecnológicas da farinha (Marta et al., 2019; Salazar et al., 2022).

446

447 
$$IS (g.g^{-1}) = -0,24831 + 0,04731t + 0,00330T - 0,00039765T*t \quad R^2 = 0,62 (4)$$

448



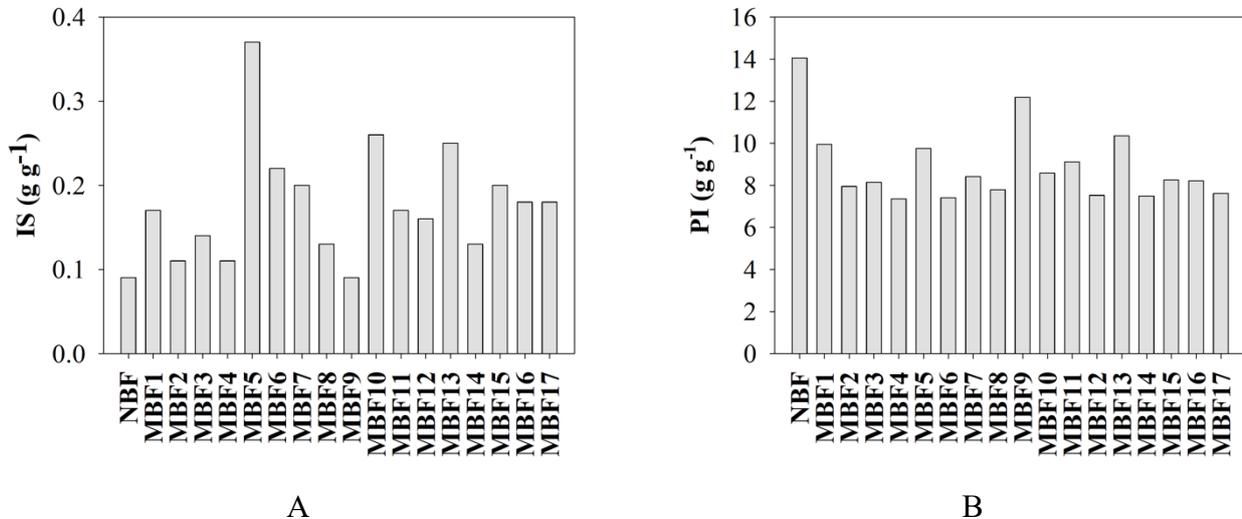
449  
 450 **Figura 2:** Superfícies de resposta do índice de solubilidade.  
 451

452 Observando a Figura 3B, nota-se que as condições de processamento (tempo,  
 453 temperatura e umidade) afetaram o PI das MBF, quando comparado ao valor obtido para FBN,  
 454 comportamento semelhante foi relatado por Yu et al. (2021) em um estudo com farinha de  
 455 inhame tratada hidrotérmicamente. O poder de inchamento expressa a capacidade do grânulo  
 456 de amido intumescer em condições específicas, levando a compreensão da extensão das  
 457 interações entre as cadeias de amido dentro dos domínios amorfo e cristalino, estando  
 458 relacionado com a viscosidade da pasta (De Borba et al., 2021; Yu et al., 2021).

459 A farinha nativa apresenta maior valor para PI. A redução do PI nas farinhas modificadas  
 460 pode ser relacionada ao rearranjo das cadeias de amilose-amilose, amilose-amilopectina ou  
 461 complexos de amilose-lípido e/ou amilose-fenólico, resultado da interação entre os grupos  
 462 funcionais do amido provocado pelo HMT, ocasionando limitação na hidratação dos grânulos.  
 463 Essas modificações podem aumentar a estabilidade térmica e resistência ao cisalhamento da  
 464 farinha, podendo impactar na gelatinização, propriedades de pasta, cristalinidade,  
 465 características morfológicas, nutricionais e de digestibilidade (Kumar et al., 2023; Sudlapa &  
 466 Suwannaporn, 2023; Yu et al., 2021).

467 Um comportamento oposto foi observado para o IS (Figura 3A), onde mesmo após a  
 468 modificação, a solubilidade das MBF foi maior que a NBF, mostrando que o IS é afetado pelo  
 469 tratamento hidrotérmico. A variação do índice de solubilidade em função do tempo e  
 470 temperatura, com efeito linear, indica que os valores de IS tem relação diretamente  
 471 proporcional, no qual o aumento do tempo e temperatura de modificação provocam um aumento

472 nos valores de IS, apresentando uma faixa de resposta máxima entre 80 °C a 85 °C, acima de  
 473 15h de modificação.



474  
 475 **Figura 3:** Índice de solubilidade (A) e poder de inchamento (B) e da farinha de banana-da-terra  
 476 verde nativa e modificadas por HMT.  
 477

478 Em um estudo comparativo das propriedades físico-químicas e de pasta de amido e  
 479 farinha de diferentes cultivares de banana verde, Marta et al. (2019) observaram a morfologia  
 480 dos grânulos do amido e da farinha por Microscopia Eletrônica de varredura (MEV). Os autores  
 481 relataram que os grânulos das quatro cultivares de banana apresentaram superfícies densas com  
 482 uma pequena camada fina, que consistia em componentes não amiláceos nos grânulos de  
 483 farinha, ao contrário das superfícies mais lisas dos grânulos de amido isolados. Yu et al. (2021)  
 484 ao avaliar o IS do amido e farinha de inhame chinês, modificados por HMT, constaram que o  
 485 IS das amostras de farinha de inhame era maior do que o do amido, associando esse achado aos  
 486 componentes não amiláceos da farinha de inhame.

487 A maior compactação dos grânulos de amido e as ligações de hidrogênio formadas entre  
 488 os grupos hidroxila dentro das moléculas de amido, provocada pela modificação hidrotérmica,  
 489 dificultam a liberação da amilose dos grânulos, no entanto a presença de componentes não  
 490 amiláceos presentes na farinha tendem a ter a sua suspensão potencializada em função do  
 491 fortalecimento entre as cadeias da amilose e amilopectina. Isso pode justificar os menores  
 492 valores de PI e maiores valores de IS nas farinhas modificadas em relação à farinha nativa  
 493 (Marta et al., 2019).

494

### 495 3.4 Propriedades de pasta da farinha nativa e modificada

496

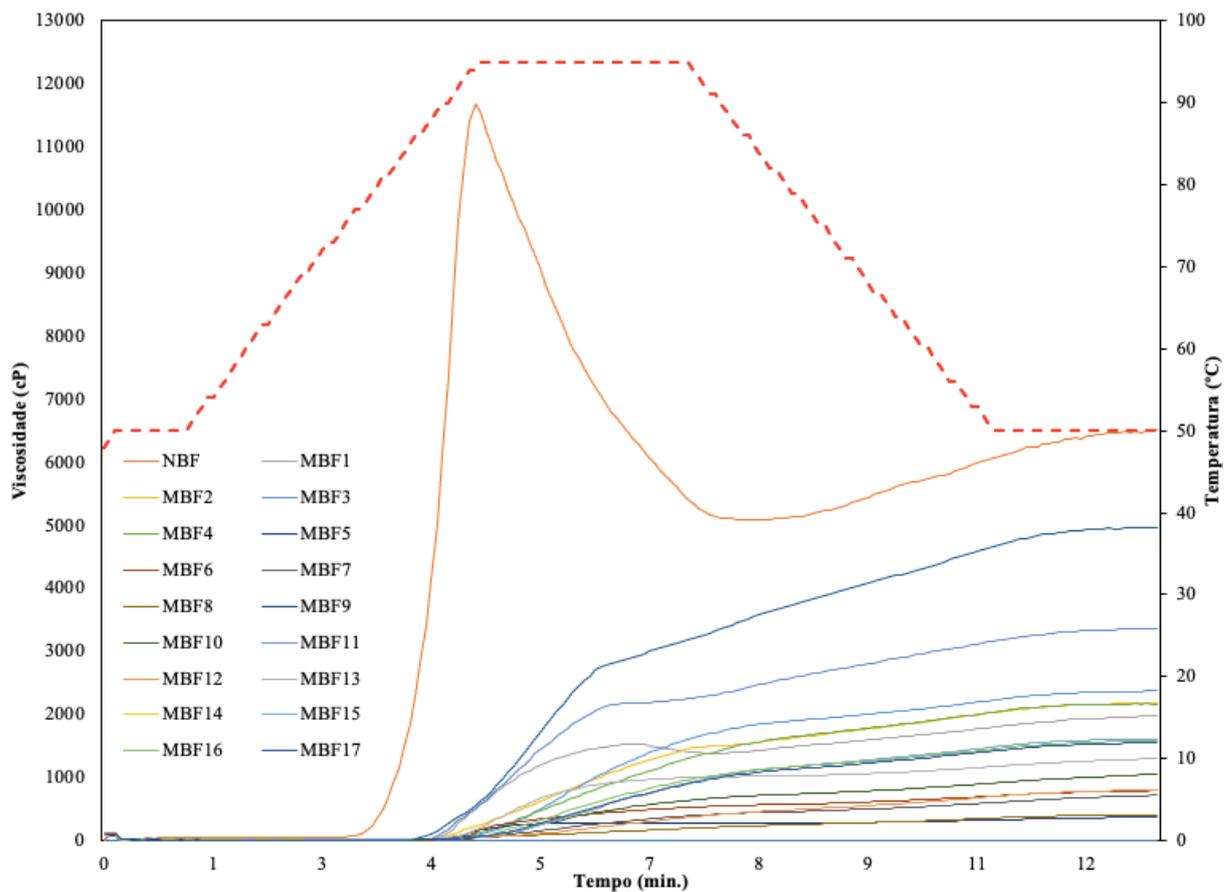
497 As propriedades de pasta da farinha integral de banana-da-terra nativa e suas modificações  
498 por HMT, avaliadas por RVA, foram viscosidade máxima, viscosidade mínima, queda na  
499 viscosidade (quebra), viscosidade final, tendência à retrogradação, tempo de pico e temperatura  
500 de pasta, todas apresentadas na Tabela 5 e Figura 4.

501 A viscosidade máxima determinada pelo RVA corresponde à maior viscosidade registrada  
502 durante o aquecimento, que equivale ao intumescimento dos grânulos de amido na presença de  
503 água e aplicação de calor. A viscosidade mínima é a menor viscosidade alcançada durante o  
504 período de retenção, resultado da desintegração dos grânulos de amido após a lixiviação. A  
505 quebra é o resultado da diferença entre o pico de viscosidade e a viscosidade mínima. A  
506 viscosidade final é a viscosidade alcançada ao final da etapa de resfriamento. Durante o  
507 resfriamento é registrada a retrogradação, que corresponde a diferença entre a viscosidade final  
508 e viscosidade mínima, representando a tendência de realinhamento das moléculas de amilose  
509 inicialmente, e de amilopectina com o envelhecimento do gel formado. O tempo de pico é o  
510 tempo necessário para alcançar a viscosidade máxima. Por fim, temperatura de pasta é a  
511 temperatura em que a viscosidade começa a elevar (Balet et al., 2019; Schafranski et al., 2021).

512 As alterações das propriedades de pasta, provocadas pela modificação física por HMT,  
513 podem ser impactadas por ajustes no processo aplicado, como aumento do tempo de  
514 modificação, aumento da temperatura do procedimento e/ou aplicação de ciclos (Wang et al.,  
515 2021). Para avaliar estes efeitos modelos matemáticos foram testados com a finalidade de  
516 prever o comportamento das propriedades de pasta em função das variáveis experimentais de  
517 tempo (t), Temperatura (T) e umidade (U). Não foi obtido modelo significativo para nenhuma  
518 das propriedades de pasta estudadas ( $p > 0,05$ ), indicando que entre as farinhas modificadas pelo  
519 tratamento hidrotérmico não houve variação na estrutura cristalina dos grânulos de amido.

520 Diante dos perfis de viscosidade apresentados na Figura 4 é possível verificar que a  
521 modificação física por HMT alterou as propriedades de pasta em relação a farinha nativa, como  
522 relatado por Schafranski et al. (2021) em uma revisão sobre o impacto do tratamento por HMT  
523 em amidos. A NBF apresentou uma temperatura de pasta de 77 °C, aumentando para 89 a 95  
524 °C nas farinhas submetidas ao tratamento por HMT. Resultado semelhante foi encontrado para  
525 farinha de banana verde (*Musa acuminata colla*, grupo AAA, subgrupo Cavendish) nativa e  
526 modificada por HMT, com 79 °C e 90 °C, respectivamente (Cahyana et al., 2019).

527



528

529 **Figura 4.** Perfis de viscosidade da farinha de banana-da-terra verde nativa (NBF) e modificada  
 530 por HMT (MBF) determinados por RVA.

531

532

533

534 A redução da viscosidade máxima, viscosidade mínima, viscosidade final, quebra e  
 535 tendência à retrogradação podem refletir o crescimento da região cristalina, pelo aumento das  
 536 interações entre as cadeias de amido, que ocorrem durante a modificação por HMT, com a  
 537 ruptura da regularidade e da compactação do sistema semicristalino, pelas interações amilose-  
 538 amilose e amilose-amilopectina, que está relacionada ao fortalecimento das ligações de  
 539 hidrogênio. Esse comportamento também foi registrado em outros estudos (Cahyana et al.,  
 540 2019; Yu et al., 2021; Zhang et al., 2023). Isso ocorre, pois a água atua como agente plastificante  
 541 enfraquecendo as ligações de hidrogênio, levando ao rearranjo da estrutura com alteração da  
 542 cristalinidade e com o aumento da espessura das lamelas cristalinas e amorfas, conforme  
 543 ilustrado na Figura 5 (Khoozani et al., 2019; Riquette et al., 2019). Esse resultado pode ser  
 544 associado ao poder de inchamento, que foi reduzido em relação à farinha nativa e, mais uma  
 vez, sem diferença estatística significativa entre as farinhas modificadas.

545

546 **Tabela 5:** Propriedades de pasta da farinha de banana-da-terra verde nativa (NBF) e modificada por HMT (MBF) determinados por RVA.

	<b>Viscosidade máxima (cP)</b>	<b>Viscosidade mínima (cP)</b>	<b>Quebra (cP)</b>	<b>Viscosidade final (cP)</b>	<b>Retrogradação (cP)</b>	<b>Tempo de pico (min.)</b>	<b>Temperatura de pasta (°C)</b>
<b>NBF</b>	11673,50	5075,00	6598,50	6507,50	1432,50	4,67	76,65
<b>MBF1</b>	1540,00	1382,00	158,00	1980,00	598,00	6,60	88,80
<b>MBF2</b>	1358,00	945,00	413,00	2181,50	1236,50	7,00	88,85
<b>MBF3</b>	1492,00	959,00	533,00	2374,50	1415,50	7,00	94,80
<b>MBF4</b>	1194,50	778,50	416,00	2169,00	1390,50	7,00	92,83
<b>MBF5</b>	286,50	274,00	12,50	374,00	100,00	6,30	91,35
<b>MBF6</b>	510,00	421,00	89,00	794,00	373,00	7,00	92,10
<b>MBF7</b>	368,50	252,00	116,50	719,50	467,50	7,00	**
<b>MBF8</b>	181,00	126,50	54,50	406,50	280,00	7,00	**
<b>MBF9</b>	3086,00	2621,00	465,00	4957,00	2336,00	7,00	86,30
<b>MBF10</b>	605,00	427,00	178,00	1048,50	621,50	7,00	94,60
<b>MBF11</b>	2214,00	2012,50	201,50	3362,50	1350,00	7,00	88,08
<b>MBF12</b>	334,00	196,00	138,00	803,50	607,50	7,00	**
<b>MBF13</b>	987,50	868,50	119,00	1301,50	433,00	7,00	92,05
<b>MBF14</b>	1103,00	886,50	216,50	1689,00	802,50	7,00	93,65
<b>MBF15</b>	832,50	489,00	343,50	1615,50	1126,50	7,00	94,63
<b>MBF16</b>	888,00	575,50	312,50	1584,00	1008,50	7,00	94,83
<b>MBF17</b>	826,00	505,50	320,50	1552,50	1047,00	7,00	94,58

547 \*\* As modificações MBF7, MBF8 e MBF12 não tiveram as suas temperaturas de pasta registradas, apresentando erro, essas modificações sofreram  
548 condições de tratamento mais rigorosas que inviabilizaram a gelatinização dessas farinhas e, conseqüentemente, os parâmetros necessários para  
549 conclusão da análise não tiveram condições de serem registrados, justificando o erro da análise.

550 O elevado conteúdo de amido da farinha de banana-da-terra verde faz com que ela seja  
551 um potencial ingrediente como substituto parcial ou total da farinha de trigo em massas, pães,  
552 bolos e biscoitos (Khoozani et al., 2019; Riquette et al., 2019). A ausência de variação na  
553 estrutura cristalina dos grânulos de amido entre as farinhas modificadas pelo tratamento  
554 hidrotérmico, indica que dentro das condições de tempo, umidade e temperatura estudadas não  
555 houve alteração das propriedades de pasta, dessa maneira a seleção dos parâmetros de  
556 modificação, dentro dos limites estudados, deve considerar aqueles em que a qualidade  
557 nutricional é melhor apresentada, seguido pelas condições de modificação mais brandas,  
558 contribuindo para otimização de processos e controle de custos.

559 A aplicação da farinha de banana-da-terra verde nativa ou modificada tem o potencial  
560 de enriquecer nutricionalmente esses produtos, entre outros fatores, pela presença de amido  
561 resistente (AR) (Sarawong et al., 2014). Portanto estudos complementares com a determinação  
562 do conteúdo de AR, devem ser realizados para fortalecer o processo de escolha, visto que o  
563 tratamento por HMT tende a aumentar o AR, em função do rearranjo estrutural com  
564 fortalecimento das cadeias de amido dificultando a ação enzimática (Yu et al., 2021). Um  
565 aumento do conteúdo de AR é desejável por se tratar de uma reconhecida fonte de fibra  
566 dietética, com ação prebiótica, que está associada positivamente na promoção da saúde  
567 (Khoozani et al., 2019; Prasad & Bondy, 2019).

568

#### 569 **4. Conclusão**

570

571 A produção de farinha integral de banana-da-terra verde é viável por ser um  
572 processamento acessível, de baixo custo, baixa produção de resíduos e contribui com a  
573 disponibilidade de um produto com qualidade nutricional. A modificação física da farinha de  
574 banana-da-terra verde por HMT reduziu o PI, aumentou IS e alterou as propriedades de pasta  
575 em relação à NBF. Entre as farinhas modificadas o PI e as propriedades de pasta não foram  
576 significativamente alterados, o IS e o teor de amilose aparente foram afetados pelo tempo e  
577 temperatura de modificação. A NBF apresenta alto teor de amido resistente e é fonte de  
578 compostos fenólicos. A NBF e modificada por HMT revelaram o seu potencial como  
579 ingrediente funcional para formulação de alimentos, sendo uma válida alternativa para  
580 substituição total ou parcial das tradicionais farinhas brancas em massas, produtos de  
581 panificação e afins, contribuindo, sobretudo, com o enriquecimento nutricional desses produtos,  
582 por ser uma reconhecida fonte de compostos fenólicos, AR e fibras alimentares.

583

584 **5. Referências**

585

586 AOAC. Official Methods of Analysis of AOAC International. In Association of Official  
587 Analysis Chemists International, 1997.

588 AOAC. Official Methods of Analysis of AOAC International. In Association of Official  
589 Analysis Chemists International, 2016.

590 Balet, S., Guelpa, A., Fox, G., & Manley, M. (2019). Rapid Visco Analyser (RVA) as a Tool  
591 for Measuring Starch-Related Physicochemical Properties in Cereals: a Review. *Food*  
592 *Analytical Methods* 2019 12:10, 12(10), 2344–2360. [https://doi.org/10.1007/S12161-](https://doi.org/10.1007/S12161-019-01581-W)  
593 019-01581-W

594 Caballero, B., Finglas, P. M., & Toldrá, F. (2016). *Encyclopedia of Food and Health*.  
595 Academic Press.

596 Cahyana, Y., Wijaya, E., Halimah, T. S., Marta, H., Suryadi, E., & Kurniati, D. (2019). The  
597 effect of different thermal modifications on slowly digestible starch and physicochemical  
598 properties of green banana flour (*Musa acuminata* colla). *Food Chemistry*, 274, 274–280.  
599 <https://doi.org/10.1016/J.FOODCHEM.2018.09.004>

600 Chen, S. H., Li, X. F., Shih, P. T., & Pai, S. M. (2020). Preparation of thermally stable and  
601 digestive enzyme resistant flour directly from Japonica broken rice by combination of  
602 steam infusion, enzymatic debranching and heat moisture treatment. *Food*  
603 *Hydrocolloids*, 108, 106022. <https://doi.org/10.1016/J.FOODHYD.2020.106022>

604 Chung, H. J., Liu, Q., & Hoover, R. (2009). Impact of annealing and heat-moisture treatment  
605 on rapidly digestible, slowly digestible and resistant starch levels in native and  
606 gelatinized corn, pea and lentil starches. *Carbohydrate Polymers*, 75(3), 436–447.  
607 <https://doi.org/10.1016/J.CARBPOL.2008.08.006>

608 Codex Alimentarius Commission. (1985). *Standard for wheat flour (CODEX STAN 152-*  
609 *1985)*.

610 Damodaran S., Kirk L. Parkin. (2019). *Química de alimentos de Fennema* (5th ed.). Artmed.

611 De Borba, V. S.; Silveira, C. O.; Alves, J. B.; Gropelli, V. M.; Badiale-Furlong. (2021)  
612 *Modificações do amido e suas implicações tecnológicas*. In: CORDEIRO, C. A. M.; DA  
613 SILVA, E. M.; DA SILVA, B. A. *Ciência e tecnologia de alimentos: Pesquisa e práticas*  
614 *contemporâneas*. Edição 1. São Paulo, SP: Editora científica digital.

615 Eliasson A. (2018). *Starch in Food: Structure, Function and Applications*. Woodhead  
616 Publishing.

617 Feitosa, B. F., Alcântara, C. M. de, Lucena, Y. J. A. de, Oliveira, E. N. A. de, Cavalcanti, M.  
618 T., Mariutti, L. R. B., & Lopes, M. F. (2023). Green banana biomass (*Musa* spp.) as a  
619 natural food additive in artisanal tomato sauce. *Food Research International*, 170,  
620 113021. <https://doi.org/10.1016/J.FOODRES.2023.113021>

- 621 Folch, J.; Less, M.; Stanley, S. A simple method for the isolation and purification of total  
622 lipids from animal tissues. **Journal of Biological Chemistry**, volume 226, pp. 497-509,  
623 1957.
- 624 Gutiérrez, T. J. (2018). Plantain flours as potential raw materials for the development of  
625 gluten-free functional foods. *Carbohydrate Polymers*, 202, 265–279.  
626 <https://doi.org/10.1016/J.CARBPOL.2018.08.121>
- 627 Goñi, I., García-Diz, L., Mañas, E., & Saura-Calixto, F. (1996). Analysis of resistant starch: a  
628 method for foods and food products. *Food Chemistry*, 56(4), 445–449.  
629 [https://doi.org/10.1016/0308-8146\(95\)00222-7](https://doi.org/10.1016/0308-8146(95)00222-7)
- 630 Instituto Adolfo Lutz. Normas analíticas do Instituto Adolfo Lutz: métodos químicos e físicos  
631 para análises de alimentos. 1. ed. Digital. São Paulo: IAL, 2008.
- 632 ISO 14502-1:2005. Determination of substances characteristic of green and black tea:  
633 content of polyphenols in tea. Calorimetric method using folin-calciateu reagent. Hong  
634 Kong: ISO, 2005.
- 635 Kaur, M., & Singh, S. (2019). Influence of heat-moisture treatment (HMT) on  
636 physicochemical and functional properties of starches from different Indian oat (*Avena*  
637 *sativa* L.) cultivars. *International Journal of Biological Macromolecules*, 122, 312–319.  
638 <https://doi.org/10.1016/J.IJBIOMAC.2018.10.197>
- 639 Khoozani, A. A., Bekhit, A. E. D. A., & Birch, J. (2019). Effects of different drying  
640 conditions on the starch content, thermal properties and some of the physicochemical  
641 parameters of whole green banana flour. *International Journal of Biological*  
642 *Macromolecules*, 130, 938–946. <https://doi.org/10.1016/j.ijbiomac.2019.03.010>
- 643 Kumar, P. S., Saravanan, A., Sheeba, N., & Uma, S. (2019). Structural, functional  
644 characterization and physicochemical properties of green banana flour from dessert and  
645 plantain bananas (*Musa* spp.). *LWT*, 116, 108524.  
646 <https://doi.org/10.1016/J.LWT.2019.108524>
- 647 Kumar, S. R., Tangsrianugul, N., Sriprabhom, J., Wongsagonsup, R., Wansuksri, R., &  
648 Suphantharika, M. (2023). Effect of heat-moisture treatment on the physicochemical  
649 properties and digestibility of proso millet flour and starch. *Carbohydrate Polymers*, 307.  
650 <https://doi.org/10.1016/J.CARBPOL.2023.120630>
- 651 Legesse Bedada, T., Feto, T. K., Awoke, K. S., Garedew, A. D., Yifat, F. T., & Birri, D. J.  
652 (2020). Probiotics for cancer alternative prevention and treatment. *Biomedicine &*  
653 *Pharmacotherapy*, 129, 110409. <https://doi.org/10.1016/J.BIOPHA.2020.110409>
- 654 Liao, H. J., & Hung, C. C. (2015). Chemical composition and in vitro starch digestibility of  
655 green banana (cv. Giant Cavendish) flour and its derived autoclaved/debranched powder.  
656 *LWT - Food Science and Technology*, 64(2), 639–644.  
657 <https://doi.org/10.1016/J.LWT.2015.06.058>
- 658 Luo, B., Wen, Y., Ye, F., Wu, Y., Li, N., Farid, M. S., Chen, Z., El-Seedi, H. R., & Zhao, C.  
659 (2023). Bioactive phytochemicals and their potential roles in modulating gut microbiota.  
660 *Journal of Agriculture and Food Research*, 12, 100583.  
661 <https://doi.org/10.1016/J.JAFR.2023.100583>

- 662 Magallanes-Cruz, P. A., Duque-Buitrago, L. F., & del Rocío Martínez-Ruiz, N. (2023).  
 663 Native and modified starches from underutilized seeds: Characteristics, functional  
 664 properties and potential applications. *Food Research International*, 169.  
 665 <https://doi.org/10.1016/j.foodres.2023.112875>
- 666 Marta, H., Cahyana, Y., Djali, M., Arcot, J., & Tensiska, T. (2019). A comparative study on  
 667 the physicochemical and pasting properties of starch and flour from different banana  
 668 (*Musa spp.*) cultivars grown in Indonesia. 22(1), 1562–1575.  
 669 <https://doi.org/10.1080/10942912.2019.1657447>
- 670 Martínez, C.; Cuevas, F. Evaluación de la calidad culinaria y molinera del arroz. Guía de  
 671 estudio, CIAT, 1989.
- 672 Padhi, S., & Dwivedi, M. (2022). Physico-chemical, structural, functional and powder flow  
 673 properties of unripe green banana flour after the application of Refractance window  
 674 drying. *Future Foods*, 5, 100101. <https://doi.org/10.1016/J.FUFO.2021.100101>
- 675 Pang, Z., Xu, R., Luo, T., Che, X., Bansal, N., & Liu, X. (2019). Physicochemical properties of  
 676 modified starch under yogurt manufacturing conditions and its relation to the properties  
 677 of yogurt. *Journal of Food Engineering*, 245, 11–17.  
 678 <https://doi.org/10.1016/J.JFOODENG.2018.10.003>
- 679 Patiño-Rodríguez, O., Agama-Acevedo, E., Pacheco-Vargas, G., Alvarez-Ramirez, J., &  
 680 Bello-Pérez, L. A. (2019). Physicochemical, microstructural and digestibility analysis of  
 681 gluten-free spaghetti of whole unripe plantain flour. *Food Chemistry*, 298, 125085.  
 682 <https://doi.org/10.1016/J.FOODCHEM.2019.125085>
- 683 Patiño-Rodríguez, O., Bello-Pérez, L. A., Flores-Silva, P. C., Sánchez-Rivera, M. M., &  
 684 Romero-Bastida, C. A. (2018). Physicochemical properties and metabolomic profile of  
 685 gluten-free spaghetti prepared with unripe plantain flours. *LWT*, 90, 297–302.  
 686 <https://doi.org/10.1016/J.LWT.2017.12.025>
- 687 Pelissari, F. M., Andrade-Mahecha, M. M., Sobral, P. J. do A., & Menegalli, F. C. (2013).  
 688 Comparative study on the properties of flour and starch films of plantain bananas (*Musa*  
 689 *paradisiaca*). *Food Hydrocolloids*, 30(2), 681–690.  
 690 <https://doi.org/10.1016/j.foodhyd.2012.08.007>
- 691 Pico, J., Xu, K., Guo, M., Mohamedshah, Z., Ferruzzi, M. G., & Martínez, M. M. (2019).  
 692 Manufacturing the ultimate green banana flour: Impact of drying and extrusion on  
 693 phenolic profile and starch bioaccessibility. *Food Chemistry*, 297, 124990.  
 694 <https://doi.org/10.1016/j.foodchem.2019.124990>
- 695 Prasad, K. N., & Bondy, S. C. (2019). Dietary fibers and their fermented short-chain fatty  
 696 acids in prevention of human diseases. In *Bioactive Carbohydrates and Dietary Fibre*  
 697 (Vol. 17). Elsevier Ltd. <https://doi.org/10.1016/j.bcdf.2018.09.001>
- 698 Reddappa, S. B., Muthusamy, V., Zunjare, R. U., Chhabra, R., Talukder, Z. A., Maman, S.,  
 699 Chand, G., Pal, D., Kumar, R., Mehta, B. K., Guleria, S. K., Singh, A. K., & Hossain, F.  
 700 (2023). Composition of kernel-amylose and -resistant starch among subtropically  
 701 adapted maize. *Journal of Food Composition and Analysis*, 119, 105236.  
 702 <https://doi.org/10.1016/J.JFCA.2023.105236>

- 703 Riquette, R. F. R., Ginani, V. C., Leandro, E. dos S., de Alencar, E. R., Maldonade, I. R., de  
704 Aguiar, L. A., de Souza Acácio, G. M., Mariano, D. R. H., & Zandonadi, R. P. (2019).  
705 Do production and storage affect the quality of green banana biomass? *LWT*, *111*, 190–  
706 203. <https://doi.org/10.1016/j.lwt.2019.04.094>
- 707 Salazar, D., Arancibia, M., Lalaleo, D., Rodríguez-Maecker, R., López-Caballero, M. E., &  
708 Montero, M. P. (2022). Physico-chemical properties and filmogenic aptitude for edible  
709 packaging of Ecuadorian discard green banana flours (*Musa acuminata* AAA). *Food*  
710 *Hydrocolloids*, *122*, 107048. <https://doi.org/10.1016/J.FOODHYD.2021.107048>
- 711 Santos, D., Frota, E. G., Vargas, B. K., Tonieto Gris, C. C., Santos, L. F. dos, & Bertolin, T.  
712 E. (2022). What is the role of phenolic compounds of yerba mate (*Ilex paraguariensis*) in  
713 gut microbiota? *Phytochemistry*, *203*, 113341.  
714 <https://doi.org/10.1016/J.PHYTOCHEM.2022.113341>
- 715 Sarawong, C., Schoenlechner, R., Sekiguchi, K., Berghofer, E., & Ng, P. K. W. (2014). Effect  
716 of extrusion cooking on the physicochemical properties, resistant starch, phenolic  
717 content and antioxidant capacities of green banana flour. *Food Chemistry*, *143*, 33–39.  
718 <https://doi.org/10.1016/J.FOODCHEM.2013.07.081>
- 719 Schafranski, K., Ito, V. C., & Lacerda, L. G. (2021). Impacts and potential applications: A  
720 review of the modification of starches by heat-moisture treatment (HMT). *Food*  
721 *Hydrocolloids*, *117*, 106690. <https://doi.org/10.1016/J.FOODHYD.2021.106690>
- 722 Soares, P. P. de S., Cairo, P. A. R., da Silva, L. D., Matsumoto, S. N., do Bonfim, R. A. A.,  
723 Barbosa, M. P., Sá, M. C., Almeida, M. F., & Mesquita, N. L. S. (2022). Mitigating  
724 water stress by increasing NO<sub>3</sub><sup>-</sup>: NH<sub>4</sub><sup>+</sup> ratio in young *Eucalyptus urophylla* plants.  
725 *Trees - Structure and Function*, *36*(1), 81–91. [https://doi.org/10.1007/S00468-021-](https://doi.org/10.1007/S00468-021-02183-Y/FIGURES/4)  
726 [02183-Y/FIGURES/4](https://doi.org/10.1007/S00468-021-02183-Y/FIGURES/4)
- 727 Solaesa, Á. G., Villanueva, M., Vela, A. J., & Ronda, F. (2022). Impact of microwave  
728 radiation on in vitro starch digestibility, structural and thermal properties of rice flour.  
729 From dry to wet treatments. *International Journal of Biological Macromolecules*, *222*,  
730 1768–1777. <https://doi.org/10.1016/J.IJBIOMAC.2022.09.262>
- 731 Sudlapa, P., & Suwannaporn, P. (2023). Dual complexation using heat moisture treatment and  
732 pre-gelatinization to enhance Starch–Phenolic complex and control digestibility. *Food*  
733 *Hydrocolloids*, *136*, 108280. <https://doi.org/10.1016/J.FOODHYD.2022.108280>
- 734 Stragliotto, L. K., Ferrari, G. T., Campagnol, P. C. B., Strasburg, V. J., Zandonadi, R. P., &  
735 Oliveira, V. R. de. (2022). Green banana by-products on the chemical, technological and  
736 sensory quality of meat products. *International Journal of Gastronomy and Food*  
737 *Science*, *30*, 100614. <https://doi.org/10.1016/J.IJGFS.2022.100614>
- 738 Vega-Rojas, L. J., Londoño-Restrepo, S. M., & Rodríguez-García, M. E. (2021). Study of  
739 morphological, structural, thermal, and pasting properties of flour and isolated starch  
740 from unripe plantain (*Musa paradisiaca*). *International Journal of Biological*  
741 *Macromolecules*, *183*, 1723–1731. <https://doi.org/10.1016/J.IJBIOMAC.2021.05.144>
- 742 Viana, E. B. M., Leite, N. O., Ribeiro, J. S., Almeida, M. F., Souza, C. C. E., Resende, J. V.,  
743 Santos, L. S., & Veloso, C. M. (2022). Development of starch-based bioplastics of green

- 744 plantain banana (*Musa paradisiaca* L.) modified with heat-moisture treatment (HMT).  
745 *Food Packaging and Shelf Life*, 31, 100776. <https://doi.org/10.1016/J.FPSL.2021.100776>
- 746 Vu, H. T., Scarlett, C. J., & Vuong, Q. V. (2018). Phenolic compounds within banana peel  
747 and their potential uses: A review. *Journal of Functional Foods*, 40, 238–248.  
748 <https://doi.org/10.1016/J.JFF.2017.11.006>
- 749 Wang, Y., Weng, J., Zhu, C., Ai, R., Zhou, J., Wang, C., Chen, Q., & Fu, L. (2021).  
750 Allergenicity assessment and allergen profile analysis of different Chinese wheat  
751 cultivars. *World Allergy Organization Journal*, 14(7), 100559.  
752 <https://doi.org/10.1016/J.WAOJOU.2021.100559>
- 753 Xie, J., Zhang, Y., Klomklao, S., & Simpson, B. K. (2023). Pectin from plantain peels: Green  
754 recovery for transformation into reinforced packaging films. *Waste Management*, 161,  
755 225–233. <https://doi.org/10.1016/J.WASMAN.2023.02.035>
- 756 Yang, S., Dhital, S., Zhang, M. N., Wang, J., & Chen, Z. G. (2022). Structural, gelatinization,  
757 and rheological properties of heat-moisture treated potato starch with added salt and its  
758 application in potato starch noodles. *Food Hydrocolloids*, 131.  
759 <https://doi.org/10.1016/j.foodhyd.2022.107802>
- 760 Yu, B., Li, J., Tao, H., Zhao, H., Liu, P., & Cui, B. (2021). Physicochemical properties and in  
761 vitro digestibility of hydrothermal treated Chinese yam (*Dioscorea opposita* Thunb.)  
762 starch and flour. *International Journal of Biological Macromolecules*, 176, 177–185.  
763 <https://doi.org/10.1016/J.IJBIOMAC.2021.02.064>
- 764 Zhang, G., Xuan, Y., Lyu, F., & Ding, Y. (2023). Microstructural, physicochemical properties  
765 and starch digestibility of brown rice flour treated with extrusion and heat moisture.  
766 *International Journal of Biological Macromolecules*, 242, 124594.  
767 <https://doi.org/10.1016/J.IJBIOMAC.2023.124594>
- 768 Zhang, P., Whistler, R. L., Bemiller, J. N., & Hamaker, B. R. (2005). Banana starch:  
769 Production, physicochemical properties, and digestibility - A review. *Carbohydrate*  
770 *Polymers*, 59(4), 443–458. <https://doi.org/10.1016/j.carbpol.2004.10.014>
- 771 Zhao, T., Li, X., Zhu, R., Ma, Z., Liu, L., Wang, X., & Hu, X. (2019). Effect of natural  
772 fermentation on the structure and physicochemical properties of wheat starch.  
773 *Carbohydrate Polymers*, 218, 163–169.  
774 <https://doi.org/10.1016/J.CARBPOL.2019.04.061>
- 775
- 776

## CAPÍTULO 3

---

### ARTIGO 2

#### **Physical, textural and sensory characteristics of gluten-free cupcakes developed with native green plantain flour and modified by hydrothermal treatment**

Características físicas, texturais e sensoriais de cupcakes isentos de glúten desenvolvidos com farinha de banana-da-terra verde nativa e modificada por tratamento hidrotérmico

---

**Características físicas, texturais e sensoriais de cupcakes isentos de glúten desenvolvidos com farinha de banana-da-terra nativa e modificada por tratamento hidrotérmico**

## Resumo

Dietas sem glúten caracterizam-se pela qualidade nutricional inferior. A utilização de farinha de banana-da-terra-verde em formulações sem glúten surge como alternativa para superar essa carência, tendo em vista que a banana verde possui relevante conteúdo de compostos bioativos, fibras alimentares, incluindo amido resistente. O objetivo deste trabalho foi avaliar o efeito da adição de farinha integral de banana-da-terra verde nativa e modificada por tratamento hidrotérmico na qualidade de cupcakes isentos de glúten. Foram avaliados a viscosidade, densidade, rendimento e microestrutura da massa, volume específico, altura, análise do miolo, cor, textura e aceitabilidade sensorial dos cupcakes. A substituição parcial (40%) da farinha de arroz pelas farinhas nativa e modificadas produziu cupcakes mais escuros, mais avermelhados, menos amarelados e com menor intensidade de cor. A análise sensorial revelou aceitação superior para os cupcakes com as farinhas nativa e modificadas, em relação ao controle, para aparência, sabor, textura, aroma e aceitação global. A farinha nativa foi a opção mais viável, pois o cupcake produzido com a mesma apresentou os melhores valores para dureza e mastigabilidade, sem alteração da elasticidade e volume específico, além da aceitação sensorial superior ao controle e semelhante aos cupcakes com as demais farinhas modificadas.

Palavras-chave: Bolo sem glúten; Farinha integral; Aceitação sensorial; Propriedades mecânicas.

## 1. Introdução

A demanda por produtos isentos de glúten vem crescendo constantemente, atendendo a um público que vai além daquele que precisa de uma dieta livre de glúten (DLG) como tratamento de saúde, a exemplo da doença celíaca, alergia ao trigo e sensibilidade não celíaca ao glúten (da Costa Borges et al. 2021). A DLG é uma das mais populares no mundo, e, considerando o mercado global de alimentos destinados a atender as intolerâncias alimentares, os produtos sem glúten representam um terço do total desse mercado, confirmando sua potencialidade (Juhász et al. 2020).

O grande desafio para atender as exigências de dietas com restrição de glúten é o desenvolvimento dos produtos de panificação. O glúten está presente nos grãos de trigo, centeio, cevada e aveia (por contaminação cruzada) e alimentos à base desses cereais são

consumidos em todo o mundo, com destaque para os produtos de panificação como pães, biscoitos e bolos, além das massas, salgadinhos e cereais matinais (Xu et al. 2020; Tasnim et al. 2020). Os bolos estão entre os alimentos mais produzidos em todo o mundo, geralmente compostos por uma mistura de farinha, açúcar, ovos, gordura/óleo e agentes de crescimento, caracterizados por apresentarem massas densas, com miolos alveolares flexíveis, elásticos, levemente úmidos (18 a 28% de umidade) e doces (Xu et al. 2020). A substituição da farinha de trigo no desenvolvimento de produtos de panificação sem glúten tem sido amplamente estudada (Ammar et al. 2021; da Costa Borges et al. 2021; Aleman et al. 2021; Storck et al. 2021; Bhinder et al. 2022). Pesquisas por novas farinhas de fontes botânicas distintas tem sido estimuladas, sobretudo aquelas com potencial de agregar qualidade nutricional, e, ou de funcionalidade, uma vez que as substituições mais tradicionais, com derivados de arroz e milho, levam ao preparo de produtos com baixa qualidade nutricional, alto índice glicêmico e baixo conteúdo de fibras (Xu et al. 2020; Ammar et al. 2021).

A banana verde, de diferentes cultivares, tem ganhado interesse para produção de farinhas, em função da sua composição, sobretudo pela presença de compostos bioativos e fibra dietética, com destaque para o amido resistente (Riquette et al. 2019). Em base seca, o conteúdo de amido na banana-da-terra verde pode corresponder até 60%, valor próximo ao encontrado no milho, por exemplo, sendo, portanto, uma fonte potencial de amido (Marta et al. 2019). A sua composição lhe permite ser classificada como um alimento funcional, o que influencia o seu consumo, considerando que é crescente o número de consumidores que tem buscado melhorar a sua saúde por meio da alimentação, incluindo indivíduos em dietas com restrição ao glúten. Alimentos alternativos como a banana-da-terra, batata doce, mandioca e seus derivados, inhame, biomassa de banana verde são alternativas em substituição aos tradicionais produtos de panificação como

bolos, pães, biscoitos entre outros tradicionalmente produzidos com farinha de trigo (Khoozani et al. 2019; Riquette et al. 2019).

A banana-da-terra está entre as frutas mais utilizadas como fonte de energia na alimentação das pessoas que vivem em localidades de sua maior produção, como as regiões tropicais. Elas se diferem das demais por serem maiores, mais firmes e menos valorizadas quanto ao seu consumo fresco, pois ainda que madura possuem amido, comprometendo assim o seu sabor e a sua textura. Por esse motivo são, preferencialmente, destinadas ao cozimento prévio ao seu consumo, mas também podem ser assadas ou fritas (Pereira and Maraschin 2015; Xie et al. 2023). Os principais derivados obtidos a partir da banana-da-terra verde são a farinha, amido e a biomassa (Khoozani et al. 2019).

O amido isolado ou materiais ricos em amido obtidos da banana-da-terra verde, tem potencial para a contribuição na textura dos produtos, atuando como espessante, estabilizador coloidal, gelificante, agente de volume e retenção de água. Porém, sua aplicação quando na forma nativa é limitada em determinadas condições de processamento e armazenamento pela baixa resistência ao cisalhamento, baixa resistência térmica, decomposição térmica durante o processamento e elevada tendência à retrogradação, limitando sua aplicação na indústria de alimentos (Pang et al. 2019; Schafranski et al. 2021).

Buscando alterar as propriedades dos amidos nativos, modificações em sua estrutura têm sido pesquisadas e aplicadas, o que pode alterar e favorecer consideravelmente as suas propriedades físicas, químicas, funcionais e até nutricionais (Pang et al. 2019). Essas modificações podem ser de natureza química, física, enzimática ou derivada de processos fermentativos, a depender da natureza do amido nativo e das características que se deseja alterar, adaptando, assim, o amido nativo para aplicações alimentares específicas (Zhao et al. 2019; Punia 2020).

As modificações de natureza física são modificações mais simples de serem executadas, acessíveis e ecologicamente corretas, por não envolver tratamento químico ou agentes biológicos, correspondendo, portanto, a classe de modificação de maior interesse (Punia 2020; Schafranski et al. 2021). Elas podem ser classificadas em tratamentos térmicos, hidrotérmicos e não-térmicos. O tratamento hidrotérmico (HMT), que está entre os métodos mais aplicados de modificação física, consiste em aquecer o amido acima do ponto de gelatinização (90 °C a 120 °C), em condições controladas de umidade (10% a 30%) por um determinado período (1 a 24 h), buscando modificar não somente as propriedades físicas e químicas, mas também suas características funcionais e de digestão, sem romper a estrutura granular do amido. As combinações do binômio temperatura-tempo necessárias para atingir a funcionalidade desejada deve levar em consideração as diferentes fontes de amido (Bharti et al. 2019; Kunyane and Luangsakul 2022).

O HMT pode contribuir com a diminuição do poder de inchamento, diminuição das viscosidades de pasta e maior estabilidade térmica, que são características desejáveis para a indústria de alimentos (Cahyana et al. 2019; Yang et al. 2022). O efeito do HMT em amidos de diferentes fontes botânicas tem sido amplamente estudado (Schafranski et al. 2021). Em farinhas a sua aplicação também tem sido estudada e resultados satisfatórios tem sido encontrados (Kunyane and Luangsakul 2022).

É essencial a realização de estudos que busquem ampliar as possibilidades de utilização de alimentos convencionais e não convencionais, com o uso de diferentes técnicas de processamento, buscando avaliar os seus efeitos na obtenção de produtos derivados com potencial aplicação industrial. Dessa maneira, buscando atender a demanda do mercado por produtos sem glúten, sendo o bolo um dos produtos mais requisitados nesse mercado, esta pesquisa tem por objetivo estudar o efeito da farinha

integral de banana-da-terra verde nativa e modificada por HMT na qualidade de bolo tipo cupcake isento de glúten. Foram avaliadas as características da massa, características físicas e a aceitação sensorial dos cupcakes sem glúten. Cinco farinhas sem glúten foram testadas, farinha de arroz (Controle), farinha de banana-da-terra verde nativa (NBF) e três farinhas de banana-da-terra verde modificadas por tratamento hidrotérmico.

## **2. Materiais e métodos**

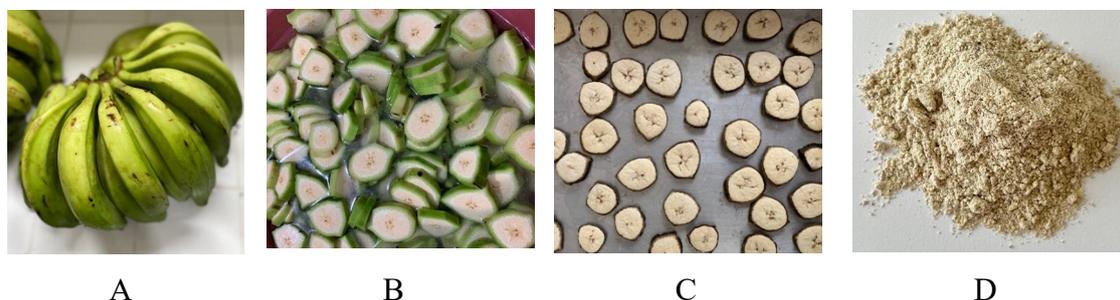
### ***2.1. Matéria-prima***

A banana-da-terra (*Musa paradisiaca* L.) orgânica foi adquirida diretamente de um produtor de sistema agroflorestal consorciado com frutíferas diversas, entre elas as bananeiras, da região Sudoeste da Bahia. Os frutos foram selecionados de acordo com o seu grau de maturação, sendo padronizados no Estádio 1, correspondendo ao fruto com casca integralmente verde e que não foram submetidos a qualquer tratamento para acelerar a maturação.

### ***2.2. Obtenção da farinha de banana-da-terra verde***

A farinha de banana-da-terra verde nativa (NBF) foi produzida conforme metodologia de Khoozani et al. (2019) com adaptações. As bananas foram lavadas, sanitizadas em solução clorada (200 ppm) por 15 min e enxaguadas em água corrente, sendo em seguida, imersas em solução de ácido cítrico 0,5% (p/v) por 15 min. para evitar o escurecimento durante processamento, fatiadas em rodela de aproximadamente 7 mm de espessura e novamente mergulhadas em solução de ácido cítrico a 0,5% (p/v) por 15 min. As fatias (casca e polpa) foram dispostas em bandejas e submetidas à secagem com circulação de ar forçada a 55 °C (Tecnal, modelo TE-394/4 MP, Piracicaba – SP) por 15 h ou até peso constante. Na produção da farinha, as fatias desidratadas foram trituradas

em liquidificador industrial, peneiradas em peneiras de 28 mesh, dispostas em embalagens de polipropileno, identificadas e armazenadas em temperatura ambiente ao abrigo da luz (Figura 1).



**Fonte:** Próprio autor (2023).

**Figura 1.** Banana-da-terra em estágio de maturação 1 (A); Banana-da-terra *in natura* fatiada (B); Banana-da-terra desidratada (C); Farinha integral de banana-da-terra verde nativa (D).

### ***2.3. Modificação por tratamento hidrotérmico***

A modificação física por tratamento hidrotérmico (HMT) seguiu metodologia descrita por Chung et al. (2009), onde a NBF foi disposta em um reator de teflon e a umidade desejada foi ajustada com a adição de água destilada, e a massa utilizada foi calculada levando-se em consideração o teor de umidade inicial da farinha. As farinhas foram armazenadas nos reatores e mantidas em refrigeração a 4 °C por 24 h. As amostras hermeticamente seladas foram aquecidas em estufa (Deleo, modelo DL-SE, Bento Golçalves - SP), nas temperaturas estabelecidas, durante os intervalos de tempo determinados (Tabela 1).

Após este período, as farinhas foram secas em estufa com circulação forçada de ar a 40°C (Ethik, modelo 420-TD, Vargem Grande Paulista – SP) até atingirem umidade próxima a 12%. Em seguida foram pulverizadas e peneiradas (28 mesh). As condições de

tempo, temperatura e umidade aplicadas aos tratamentos foram determinados em estudo prévio (Tabela 1). As propriedades de pasta foram determinadas utilizando o analisador Rápido de Viscosidade – RVA (RVA 4500, Perten Instruments, Newport Scientific, Austrália).

**Tabela 1.** Descrição dos tratamentos.

<b>Tratamento</b>	<b>Tempo (h)</b>	<b>Temperatura (°C)</b>	<b>Umidade (%)</b>
<b>MBF1</b>	2,07	100,00	27,5
<b>MBF2</b>	13,00	79,97	27,5
<b>MBF3</b>	13,00	100,00	27,5

#### **2.4. Desenvolvimento do cupcake sem glúten**

A formulação, tendo a farinha de arroz como substituto total da farinha de trigo, para o preparo dos cupcakes sem glúten, foi definida como cupcake controle (Tabela 3). A partir desta formulação, realizou-se a substituição de 40% da farinha de arroz pela farinha de banana-da-terra verde nativa (Figura 3) e suas modificações, com base em estudos preliminares, correspondendo às farinhas MBF1, MBF2 e MBF3 (Figura 2), selecionadas em função das suas propriedades de pasta previamente avaliadas (Tabela 2), dando origem aos cupcakes NAT (NBF), CUP1 (MBF1), CUP2 (MBF2) e CUP3 (MBF3).

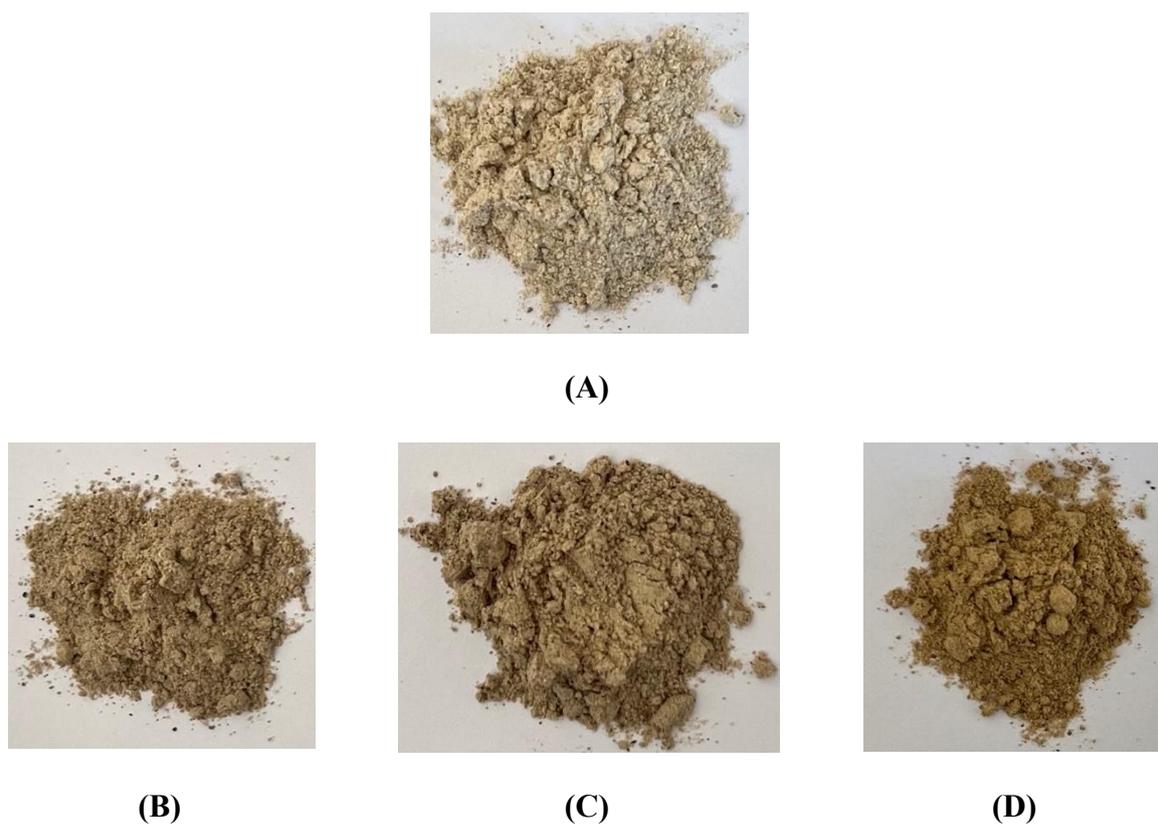
Para o preparo dos cupcakes, inicialmente foi feita a reconstituição do leite em pó em água, seguida pela adição do vinagre, e essa mistura permaneceu em repouso por aproximadamente 10 min. Enquanto isso, o óleo, o açúcar e o ovo inteiro foram misturados por 2 min com auxílio de um mixer (marca Philco, modelo PMX500I, 500W, Manaus - AM). O leite, previamente preparado, foi adicionado e misturado por 1 min. Em seguida a farinha de arroz ou mistura de farinhas (arroz e farinha de banana-da-terra verde nativa ou arroz e farinha de banana-da-terra verde modificada) e o sal foram

misturados por 1 min, com auxílio do mixer. Por fim, foi adicionado o fermento em pó e misturado por 1 min. As porções da massa (aproximadamente 35 g) foram pesadas, em balança de precisão (marca Tramontina, Modelo 61101/050, Farroupilha - RS), dispostas diretamente em formas de cupcake de silicone e levadas para assar por 35 min em forno elétrico (marca Brastemp, modelo B0B61A, Manaus - AM) preaquecido a 170 °C. Depois de retirados do forno os cupcakes foram resfriados à temperatura ambiente, acondicionados individualmente em embalagens de polipropileno e armazenados em temperatura ambiente ao abrigo da luz, pelos intervalos de 24 h, 72 h e 120 h, quando então tiveram as suas propriedades de bolo avaliadas.

**Tabela 2.** Formulação dos cupcakes à base de farinha de arroz (Controle), farinha integral de banana-da-terra verde nativa (NBF) e modificadas (MBF1, MBF2 e MBF3).

Ingrediente (g)	Cupcakes				
	Controle	NAT	CUP1	CUP2	CUP3
Ovo de galinha inteiro	50	50	50	50	50
Açúcar refinado	65	65	65	65	65
Leite em pó integral	13	13	13	13	13
Vinagre de maçã	5	5	5	5	5
Óleo vegetal - girassol	37	37	37	37	37
Farinha de arroz	70	42	42	42	42
NBF	0	28	0	0	0
MBF1	0	0	28	0	0
MBF2	0	0	0	28	0
MBF3	0	0	0	0	28
Fermento químico em pó	5	5	5	5	5
Água	65	65	65	65	65
Sal marinho	1	1	1	1	1

NAT – cupcake obtido com farinha nativa; CUP – cupcake obtido com farinha modificada por tratamento hidrotérmico (HMT).



Fonte: Próprio autor (2023).

**Figura 2.** Farinha integral de banana-da-terra verde nativa (A); Farinha integral de banana-da-terra verde modificada MBF1 (B); Farinha integral de banana-da-terra verde modificada MBF2(C); Farinha integral de banana-da-terra verde modificada MBF3 (D).

## 2.5. Caracterização dos cupcakes sem glúten

### 2.5.1. Densidade da massa

A densidade da massa (a temperatura ambiente) foi determinada utilizando uma proveta com um volume conhecido (25 mL). O valor da densidade foi calculado pela relação entre o peso (g) da massa colocada na proveta e o volume ocupado.

### 2.5.2. Microestrutura da massa

A determinação da microestrutura da massa seguiu metodologia descrita por Sahagún et al. (2018), com adaptações. Para a análise, uma gota da massa crua foi disposta em uma lâmina de microscópio, coberta com uma lamínula e comprimida sob um peso constante de 1kg, levando a formação de uma camada de massa uniforme. As amostras foram examinadas através de um microscópio de luz (Olympus Bx51 – Japan) e as imagens captadas por uma câmera de vídeo conectada a um software analisador de imagens (Kontron Electronic KS-300, Eching, Germany).

#### *2.5.3. Rendimento do processo e perda por cozimento*

A determinação do rendimento do processo seguiu metodologia descrita por Marchetti et al. (2021), e os resultados foram expressos em g/100 g do peso inicial da amostra. A determinação da perda por cozimento seguiu metodologia descrita por Storck et al. (2021), e os resultados foram expressos em percentual (%). As análises foram realizadas em 6 réplicas e os resultados expressos como média  $\pm$  desvio padrão.

#### *2.5.4. Altura dos cupcakes*

Após resfriamento, os cupcakes foram desenformados, sendo sua altura em cm, medida da base até o topo mais alto usando um paquímetro digital eletrônico (Digimess, modelo 100.179D). A análise foi realizada em triplicata e os resultados expressos como média  $\pm$  desvio padrão.

#### *2.5.5. Análise de volume específico*

A análise de volume específico (VE) seguiu metodologia descrita por Ding et al. (2019) com adaptações, após os tempos de armazenamento de 24 h, 72, h e 120 h. Os cupcakes foram pesados e o volume dos mesmos foi determinado pelo método de

deslocamento de sementes de linhaça marrom. A análise foi realizada em triplicata e os resultados expressos como média  $\pm$  desvio padrão.

#### *2.5.6. Teor de umidade*

O teor de umidade foi determinado por técnica gravimétrica em estufa, nº 92510 sugerida pela AOAC (1997), que consiste na secagem de 3 g de amostra em estufa a 105 °C, até peso constante, sendo posteriormente pesado em balança analítica e obtida a porcentagem de água. A análise foi realizada em triplicata e os resultados expressos como média  $\pm$  desvio padrão.

#### *2.5.7. Análise do perfil de textura dos cupcakes*

A análise do perfil de textura seguiu metodologia descrita por Storck et al. (2021) com adaptações. Para análise foi utilizado o Analisador de Textura (TA-XT, Stable Micro System Ltd., Surrey, Reino Unido), equipado com célula de carga de 10 kg e probe cilíndrica de 35 mm de diâmetro (Nº. 15422). Os cupcakes foram comprimidos a 50% de sua espessura original a uma velocidade de teste de 5,0 mm/s e ciclo duplo de compressão. Os parâmetros utilizados nos ensaios, definidos em estudos preliminares, foram velocidade pré-teste de 1,0 mm/s, velocidade pós-teste de 5,0 mm/s e força de disparo de 5 g e 30 s entre as compressões. Para obtenção das amostras medindo 25 mm de diâmetro e 25 mm de altura, os topos dos cupcakes foram removidos e um molde cilíndrico de inox foi utilizado na região central dos cupcakes. As seguintes propriedades texturais foram determinadas: dureza, coesividade, elasticidade e mastigabilidade. O software Exponent Connect Lite (versão 7.0.2.0. Stable Micro systems) foi utilizado para determinar as propriedades texturais dos cupcakes desenvolvidos. A análise foi realizada com 6 réplicas

por tratamento (controle, NAT, CUP1, CUP2 e CUP3) e período de armazenamento (24 h, 72 h e 120 h) e os resultados expressos em média  $\pm$  desvio padrão.

#### 2.5.8. *Análise do miolo*

A análise do miolo seguiu metodologia descrita por Marchetti, Acuña & Andrés (2021), com adaptações, sendo definido tamanho mínimo de 0,1mm a 6mm para inclusão das células. Foram avaliados a densidade das células (células/cm<sup>2</sup>), a fração de área dos poros e a circularidade dos poros. Três cupcakes de cada tratamento foram cortados horizontalmente na região central e analisados usando o programa ImageJ (National Institute of Health, Bethesda, MD, EUA). As amostras foram digitalizadas com um scanner de mesa (Marca Epson, modelo C462S), cortadas para um campo de visão de 420 x 420 pixels, convertidas em imagens de 8 bits. As escalas de medição foram calibradas e a densidade do fragmento celular medida por meio da análise de Threshold. As análises foram realizadas em triplicata nas amostras armazenadas por 24 h.

#### 2.5.9 *Cor do miolo e da crosta*

As determinações de cor instrumental foram realizadas usando um Colorímetro Chroma Meter CR-400 (Minolta Co., Ramsey, New Jersey, EUA) com utilização do sistema CIELAB. As análises foram feitas diretamente na crosta, para cor da crosta, e na superfície do miolo dos cupcakes cortados horizontalmente na região central, para cor do miolo. O tamanho da abertura foi de 8 mm e foi utilizado um iluminante C. Antes de cada série de medidas o instrumento foi calibrado com uma placa cerâmica branca ( $Y = 85,7$ ;  $X = 0,3175$ ;  $y = 0,3253$ ; Placa de calibração Konica Minolta). As análises foram realizadas em três pontos da superfície da crosta e do miolo de 3 amostras de cupcakes após 24 h de armazenamento. A partir das coordenadas CIELAB ( $L^*$ ,  $a^*$  e  $b^*$ ), o croma

(C\*), índice de amarelecimento (YI) e índice de brancura (WI) foram calculados de acordo com as Equações 1-3 (Pathare et al., 2013):

$$C^* = \sqrt{a^{*2} + b^{*2}} \quad (1)$$

$$YI = \frac{142,86 \times b^*}{L^*} \quad (2)$$

$$WI = 100 - [(100 - L^*)^2 + a^{*2} + b^{*2}]^{0,5} \quad (3)$$

## 2.6. Análise sensorial

O teste de aceitação sensorial foi realizado na Universidade estadual do sudoeste da Bahia – UESB, campus de Vitória da Conquista, seguindo metodologia descrita por Guedes et al. (2021) com adaptações. Participaram 95 voluntários não treinados, na qualidade de consumidores, com idades entre 18 e 60 anos, recrutados na comunidade acadêmica da UESB. A amostragem foi constituída de servidores públicos (técnicos administrativos e professores) e estudantes dos cursos de graduação e pós-graduação do Campus. A análise foi realizada em cabines sensoriais sob iluminação artificial, controle de temperatura (22–24 °C) e circulação de ar.

Não puderam fazer parte da análise os indivíduos que apresentasse alergia, intolerância ou aversão a qualquer um dos ingredientes presentes nas formulações dos cupcakes, os que não tivessem condições de responder ao questionário (dificuldade de compreensão das questões, deficiência visual ou auditiva) e aqueles que se recusaram em participar espontaneamente.

A análise foi realizada após aprovação pelo Comitê de Ética e Pesquisa (CAAE Nº. 64489222.4.0000.0055). Os indivíduos elegíveis a participarem do estudo assinaram previamente o Termo de Consentimento Livre e Esclarecido - TCLE, seguindo a

Resolução do Conselho Nacional de Saúde - CNS n° 466/2012, após explicação de todos os objetivos e procedimentos a serem realizados.

Os cupcakes (Controle, NBF, MBF1, MBF2 e MBF3) foram cortados em quatro partes iguais, com aproximadamente 9 g cada, e apresentados em formas brancas descartáveis de papel, identificadas com 3 dígitos atribuídos aleatoriamente, dispostos em ordem aleatória. Cada avaliador provou 5 partes, uma de cada cupcake, e foram solicitados a avaliar e expressar a sua aceitação em relação à impressão global, aparência, textura, aroma e sabor em uma escala hedônica de nove pontos, variando de 1 (desgostei muitíssimo) a 9 (gostei muitíssimo), assim como a intenção de compra com aplicação da escala de atitude de compra com 5 pontos, variando de 1 (decididamente eu não compraria) a 5 (decididamente eu compraria).

### ***2.7. Análise estatística***

Os resultados obtidos foram expressos em média  $\pm$  desvio padrão e submetidos à análise de variância (ANOVA), e as médias comparadas pelo teste de Tukey ao nível de 5% de significância. Foi utilizada a análise multivariada de dados com a aplicação da análise de componentes principais (ACP) para classificar as propriedades texturais (dureza, coesividade, elasticidade e mastigabilidade) e características físicas (volume específico, altura e umidade) dos cupcakes e para obtenção do mapa de preferência interno para aceitação global. Todas as análises foram realizadas no software estatístico Statistical Analysis System- SAS®, versão OnDemand for Academics Paineel.

## **3. Resultados e discussão**

### **3.1. Características dos cupcakes**

As propriedades dos cupcakes estão apresentadas na Tabela 4. Com a substituição parcial da farinha de arroz pelas farinhas integrais de banana-da-terra verde nativa e modificadas por HMT, verificou-se diferença significativa para a perda por cozimento, indicando que o cupcake controle apresentou maior rendimento, representando maior lucro em comercialização. O rendimento dos cupcakes apresentou valores superiores a 88%, considerado elevado, o que é interessante para este tipo de produto (Marchetti et al. 2021). Esses resultados são relevantes para dimensionar custo, rendimento e otimização de produção.

A densidade da massa crua dos bolos tipo cupcakes CUP3 e CUP2, apresentou diferença com relação ao controle. As formulações NAT e CUP1 não apresentaram diferença significativa com relação ao controle preparado com farinha de arroz, que é a principal referência comercial de farinha sem glúten (Aleman et al. 2021). O volume e textura dos bolos estão relacionados com a densidade da massa, esperando-se que massas menos densas resultem em bolos mais volumosos, uma vez que a densidade está relacionada com a incorporação de ar à massa. Quanto maior for a incorporação de ar, menor será a densidade da massa, entretanto ela não estabelece o tamanho e a distribuição das bolhas (Amin et al. 2021).

Apesar de ter ocorrido diferença significativa na densidade ( $p < 0,05$ ), em valores a altura e o volume específico dos cupcakes não foram impactados. Apenas o cupcake controle, com período de armazenamento de 120 h, apresentou diferença significativa. Para altura, esse comportamento foi semelhante, pois os cupcakes controle e CUP2 apresentaram menores valores com 120 h de armazenamento. Considerando os tempos de avaliação, não houve interferência nem na altura, nem no volume específico, com

exceção do cupcake CUP3 no período de 120 h, que apresentou diferença ( $p < 0,05$ ), porém com valores absolutos são próximos.

O volume específico está relacionado à densidade da massa, uma vez que massas com alta densidade dificultam a expansão, favorecendo a produção de bolos compactos, com menor volume específico, ao passo que massas com baixa densidade conseguem expandir rapidamente, com maior facilidade, porém perdendo o ar incorporado à massa, favorecendo ao colapso. Essas afirmações apontam a existência de um ponto de equilíbrio para densidade, na busca por bolos com volume específico desejável (Burbano et al. 2021), por ser uma propriedade importante que impacta diretamente na apresentação do produto e, conseqüentemente, na sua aceitação pelo consumidor (Amin et al. 2021).

O desenvolvimento satisfatório do volume específico dos cupcakes torna a sua produção viável economicamente e o produto apresenta melhores características sensoriais (Amin et al. 2021; Storck et al. 2021). Esperava-se uma redução do volume específico em função da presença de amido resistente na farinha de banana verde, que está relacionada a produção de bolos com massa mais densa e com menor volume específico. Esse comportamento foi comprovado por Amin *et al.* (2021) em um estudo com bolos, onde a farinha de arroz foi substituída totalmente por farinha de arroz submetida à hidrólise enzimática com maior conteúdo de amido resistente. Por ser resistente a gelatinização, o amido resistente favorece a formação de bolhas maiores na massa, que podem propiciar o colapso nos bolos (Wilderjans et al. 2010; Amin et al. 2021). Esse comportamento pode não ter ocorrido nos tratamentos desse estudo em função da substituição parcial da farinha de arroz e pela matriz complexa da farinha integral de banana-da-terra verde.

**Tabela 3.** Características dos cupcakes sem glúten controle e desenvolvidos com farinha integral de banana-da-terra verde nativa e modificadas por HMT.

Características	Controle	NAT	CUP1	CUP2	CUP3
<b>Rendimento (g/100g)</b>	90,36 <sup>A</sup> ± 1,38	90,21 <sup>AB</sup> ± 0,62	90,12 <sup>AB</sup> ± 0,26	88,67 <sup>C</sup> ± 1,06	88,84 <sup>BC</sup> ± 0,44
<b>Perda por cozimento (%)</b>	9,64 <sup>C</sup> ± 1,38	9,79 <sup>BC</sup> ± 0,62	9,88 <sup>BC</sup> ± 0,26	11,33 <sup>A</sup> ± 1,06	11,16 <sup>AB</sup> ± 0,44
<b>Densidade massa (g/cm<sup>3</sup>)</b>	0,92 <sup>B</sup> ± 0,00	0,99 <sup>AB</sup> ± 0,04	0,93 <sup>B</sup> ± 0,01	1,02 <sup>A</sup> ± 0,04	1,05 <sup>A</sup> ± 0,02
<b>Altura (cm)</b>					
24 H	2,8 <sup>aA</sup> ± 0,10	2,9 <sup>aA</sup> ± 0,12	3,0 <sup>aA</sup> ± 0,04	2,8 <sup>aA</sup> ± 0,12	2,8 <sup>aA</sup> ± 0,04
72 H	2,8 <sup>aA</sup> ± 0,10	2,9 <sup>aA</sup> ± 0,08	2,9 <sup>aA</sup> ± 0,04	2,8 <sup>aA</sup> ± 0,07	2,8 <sup>aA</sup> ± 0,03
120 H	2,7 <sup>aB</sup> ± 0,07	3,0 <sup>aA</sup> ± 0,02	2,9 <sup>aA</sup> ± 0,02	2,8 <sup>aAB</sup> ± 0,06	2,9 <sup>bA</sup> ± 0,02
<b>Volume específico (cm<sup>3</sup>/g)</b>					
24 H	2,45 <sup>aA</sup> ± 0,15	2,38 <sup>aA</sup> ± 0,36	2,46 <sup>aA</sup> ± 0,08	2,47 <sup>aA</sup> ± 0,09	2,36 <sup>aA</sup> ± 0,05
72 H	2,41 <sup>aA</sup> ± 0,11	2,21 <sup>aA</sup> ± 0,23	2,23 <sup>aA</sup> ± 0,15	2,27 <sup>aA</sup> ± 0,22	2,37 <sup>aA</sup> ± 0,05
120 H	1,98 <sup>aC</sup> ± 0,27	2,49 <sup>aA</sup> ± 0,26	2,43 <sup>aAB</sup> ± 0,07	2,16 <sup>aAB</sup> ± 0,08	2,28 <sup>aAB</sup> ± 0,08
<b>Umidade (%)</b>					
24 H	35,5 <sup>aA</sup> ± 1,1	34,4 <sup>aAB</sup> ± 0,1	35,1 <sup>aA</sup> ± 0,2	31,8 <sup>aB</sup> ± 1,3	32,2 <sup>aB</sup> ± 1,3
72 H	33,9 <sup>aA</sup> ± 1,9	33,5 <sup>aA</sup> ± 0,7	34,7 <sup>abA</sup> ± 0,2	32,5 <sup>aA</sup> ± 0,4	32,4 <sup>aA</sup> ± 0,8
120 H	33,3 <sup>aAB</sup> ± 0,9	33,6 <sup>aA</sup> ± 0,2	34,3 <sup>bA</sup> ± 0,4	30,7 <sup>aC</sup> ± 0,4	32,3 <sup>aB</sup> ± 0,1
<b>Densidade celular (cel./cm<sup>2</sup>)</b>	16,35 ± 0,51 <sup>C</sup>	18,33 ± 1,64 <sup>BC</sup>	23,48 ± 0,51 <sup>A</sup>	22,59 ± 1,57 <sup>A</sup>	21,90 ± 2,23 <sup>AB</sup>
<b>Área celular (%)</b>	9,33 ± 0,80 <sup>B</sup>	11,66 ± 1,12 <sup>B</sup>	17,67 ± 1,81 <sup>A</sup>	18,58 ± 2,52 <sup>A</sup>	15,89 ± 0,56 <sup>A</sup>
<b>Circularidade</b>	0,460 ± 0,07 <sup>A</sup>	0,463 ± 0,02 <sup>A</sup>	0,421 ± 0,05 <sup>A</sup>	0,377 ± 0,00 <sup>A</sup>	0,404 ± 0,01 <sup>A</sup>

NAT – cupcake obtido com farinha nativa; CUP – cupcake obtido com farinha modificada por tratamento hidrotérmico (HMT).

Média ± desvio padrão. Letras minúsculas diferentes na mesma coluna e letras maiúsculas na mesma linha diferem estatisticamente ( $p < 0,05$ ) pelo teste de Tukey.

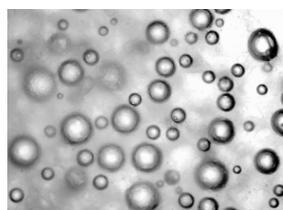
Bolo sem glúten de qualidade precisa ser macio, com volume adequado, miolo estruturado e uniforme, além de precisar manter essas características por um período razoável, ou seja, ter boa tolerância ao envelhecimento (Marchetti et al. 2021; Amin et al. 2021). Os cupcakes elaborados com as farinhas NBF e MBF além de apresentarem valores próximos ao controle, mantiveram suas características de altura e volume específico ao longo do período de armazenamento, característica desejável em bolos.

A umidade dos cupcakes variou entre 30,7% a 35,5%, podendo classificá-los como levemente úmidos, se relacionando à positiva sensação e frescor, como esperado para esse tipo de produto (Xu et al. 2020). Considerando o período de armazenamento, os cupcakes com as farinhas integrais de banana-da-terra verde nativa e modificadas, no geral, não apresentaram diferença com relação ao controle ( $p > 0,05$ ), exceto o CUP1 que apresentou uma discreta tendência a queda. O CUP2 apresentou os menores valores de umidade, se diferindo significativamente apenas no período de armazenamento de 120 h, representando perda da sensação de frescor ao longo do período de armazenamento.

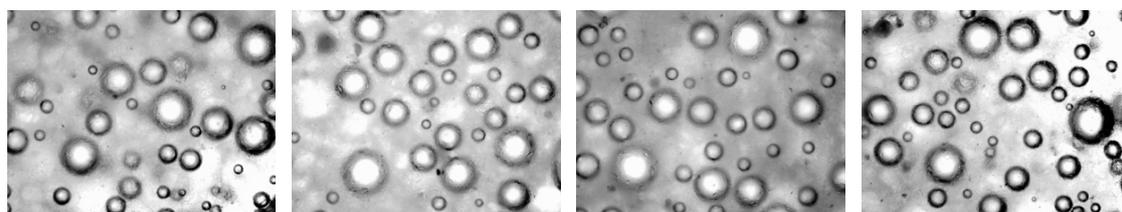
A substituição parcial da farinha de arroz pela NBF e MBF não alterou a microestrutura da massa dos cupcakes, como pode ser observado na Figura 3, onde o número e tamanho das bolhas foram preservados, podendo ser associada à densidade da massa, justificando a pequena diferença, observada em valores absolutos e, conseqüentemente, a manutenção do volume e altura dos bolos (Tabela 4). A ausência de fenômeno de coalescência demonstra a formação de bolhas estáveis, se correlacionando positivamente com a incorporação de ar à massa, refletindo em um miolo com consistência desejável, pela contribuição na formação de uma estrutura alveolar e macia (Sahagún et al. 2018).

A densidade e área celular dos miolos foram alteradas ( $p < 0,05$ ) com a substituição parcial da farinha de arroz pela NBF e MBF (Figura 4). Os cupcakes CUP1, CUP2 e

CUP3 apresentaram os maiores valores para ambos, sem diferença significativa entre eles, demonstrando que a modificação por HMT foi favorável à maior incorporação de ar à massa, contribuindo com a formação de um miolo poroso e volumoso. Em bolos, o volume pode ser associado positivamente à densidade celular (Marchetti et al. 2021; Hopkin et al. 2022), no entanto as diferenças encontradas não foram suficientes para refletir em seu valor. A circularidade das células pode variar de zero a um, onde o fator de forma 1,0 corresponde a um círculo perfeito, enquanto uma linha tem um fator de forma próximo de zero (Rosales-Juárez et al. 2008). A circularidade das células não foi alterada ( $p>0,05$ ), variando entre 0,377 a 0,463, correspondendo a células não circulares.



A



B

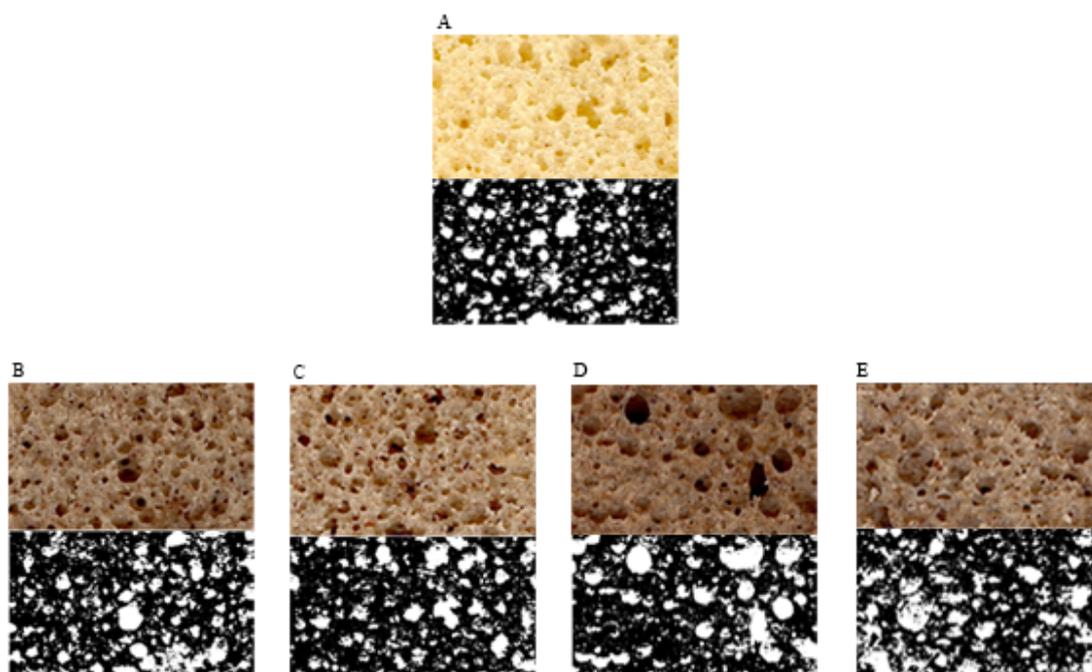
C

D

E

**Fonte:** Próprio autor (2023).

**Figura 3.** Microestrutura da massa de cupcakes sem glúten elaborados com farinha de arroz (controle - A), farinha integral de banana-da-terra verde nativa (NAT - B) e modificadas (CUP1 - C, CUP2 - D e CUP3 - E).



**Fonte:** Próprio autor (2023).

**Figura 4.** Imagens reais e binárias do miolo dos cupcakes sem glúten elaborados com farinha de arroz (controle - A), farinha integral de banana-da-terra verde nativa (NAT - B) e modificadas (CUP1 - C, CUP2 - D e CUP3 - E).

### ***3.2 Análise de cor da crosta e miolo dos cupcakes***

Os valores para os parâmetros de cor e imagens das crostas e miolos estão apresentados na Tabela 5 e Figura 5, respectivamente. Em bolos, a cor do miolo é impactada pelos ingredientes aplicados nas formulações, enquanto as reações de Maillard e a caramelização influenciam na cor característica da crosta (Majzoobi et al. 2014; Paesani et al. 2021; Marchetti et al. 2021). Os cupcakes preparados com as farinhas integrais de banana-da-terra verde nativa e modificada por HMT apresentaram alterações significativas ( $p < 0,05$ ) para cor dos cupcakes quando comparados ao controle. As farinhas nativa e modificadas produziram bolos mais escuros em relação ao controle, com

valores de L\* menores tanto para crosta como para o miolo. Esse resultado é esperado, já que a incorporação de farinhas integrais leva a esse resultado, por serem farinhas mais escuras, e estão de acordo aos resultados apresentados por Paesani et al. (2021) em um estudo sobre o efeito da aplicação de farinhas de milho integrais estabilizadas na qualidade de bolos sem glúten.

**Tabela 4.** Análise de cor da crosta e miolo dos cupcakes sem glúten controle e desenvolvidos com farinha integral de banana-da-terra verde nativa e modificadas por HMT.

	Controle	NAT	CUP1	CUP2	CUP3
<b>L* Crosta</b>	66,45 <sup>a</sup> ± 3,22	50,24 <sup>b</sup> ± 1,18	47,35 <sup>c</sup> ± 0,80	44,14 <sup>d</sup> ± 1,49	42,51 <sup>d</sup> ± 0,87
<b>a* Crosta</b>	-0,67 <sup>c</sup> ± 1,71	3,70 <sup>b</sup> ± 0,39	4,12 <sup>ab</sup> ± 0,36	4,94 <sup>a</sup> ± 0,54	4,71 <sup>ab</sup> ± 0,33
<b>b* Crosta</b>	29,40 <sup>a</sup> ± 2,69	18,80 <sup>b</sup> ± 1,13	16,78 <sup>bc</sup> ± 1,25	17,33 <sup>bc</sup> ± 0,99	16,43 <sup>c</sup> ± 0,87
<b>C* Crosta</b>	29,45 <sup>a</sup> ± 2,64	19,16 <sup>b</sup> ± 1,18	17,28 <sup>b</sup> ± 1,30	18,02 <sup>b</sup> ± 1,04	17,09 <sup>b</sup> ± 0,91
<b>YI Crosta</b>	63,53 <sup>a</sup> ± 8,42	53,24 <sup>b</sup> ± 3,15	50,66 <sup>b</sup> ± 3,95	56,11 <sup>b</sup> ± 3,34	55,21 <sup>b</sup> ± 2,20
<b>WI Crosta</b>	55,35 <sup>a</sup> ± 4,02	46,66 <sup>b</sup> ± 1,09	44,57 <sup>b</sup> ± 0,90	41,30 <sup>c</sup> ± 1,41	40,01 <sup>c</sup> ± 0,70
<b>L* Miolo</b>	70,99 <sup>a</sup> ± 1,22	49,04 <sup>b</sup> ± 1,88	49,45 <sup>b</sup> ± 1,66	44,57 <sup>c</sup> ± 1,75	43,42 <sup>c</sup> ± 0,88
<b>a* Miolo</b>	-3,58 <sup>c</sup> ± 0,08	2,39 <sup>d</sup> ± 0,16	2,64 <sup>c</sup> ± 0,19	3,14 <sup>b</sup> ± 0,22	3,66 <sup>a</sup> ± 0,13
<b>b* Miolo</b>	19,55 <sup>a</sup> ± 0,41	14,32 <sup>cd</sup> ± 0,52	14,11 <sup>d</sup> ± 0,44	14,73 <sup>c</sup> ± 0,33	16,06 <sup>b</sup> ± 0,39
<b>C* Miolo</b>	19,87 <sup>a</sup> ± 0,41	14,52 <sup>cd</sup> ± 0,51	14,35 <sup>d</sup> ± 0,44	15,06 <sup>c</sup> ± 0,33	16,47 <sup>b</sup> ± 0,40
<b>YI Miolo</b>	39,35 <sup>d</sup> ± 1,14	41,73 <sup>c</sup> ± 0,92	40,77 <sup>c</sup> ± 1,04	47,24 <sup>b</sup> ± 1,06	52,82 <sup>a</sup> ± 0,63
<b>WI Miolo</b>	64,83 <sup>a</sup> ± 1,07	47,01 <sup>b</sup> ± 1,70	47,45 <sup>b</sup> ± 1,52	42,56 <sup>c</sup> ± 1,61	41,07 <sup>c</sup> ± 0,74

NAT – cupcake obtido com farinha nativa; CUP – cupcake obtido com farinha modificada por tratamento hidrotérmico (HMT).

Média ± desvio padrão. Letras diferentes na mesma linha diferem estatisticamente ( $p < 0,05$ ) pelo teste de Tukey. C\* - Cromia; YI - índice amarelecimento; WI – índice de brançura.

Marchetti et al. (2021) encontraram resultado semelhante com a substituição de 20% e 30% de uma mistura sem glúten (fêcula de mandioca, amido de milho e farinha de arroz branca) por bagaço de noz pecan em muffins sem glúten, resultando em crosta e miolo mais escuros em relação ao controle. A diferença de luminosidade entre os cupcakes com as farinhas integrais de banana verde é resultado do processamento

aplicado pela modificação por HMT, que levou a obtenção de farinhas mais escuras e, conseqüentemente, com menor luminosidade. Os cupcakes com MBF3, cuja farinha foi submetida às condições mais rigorosas de processamento, apresentaram os menores valores para  $L^*$  e os produzidos com NBF apresentaram os maiores valores para  $L^*$ .



Fonte: Próprio autor (2023).

**Figura 5.** Imagem da crosta (A) e miolo (B) dos cupcakes sem glúten controle e desenvolvidos com farinha integral de banana-da-terra verde nativa e modificadas por HMT.

Considerando os parâmetros  $a^*$  e  $b^*$ , os cupcakes elaborados com a NBF e MBF também se diferenciaram significativamente em relação ao controle. A substituição por essas farinhas resultou em cupcakes mais avermelhados, com valores de  $a^*$  maiores que zero, esse comportamento foi observado na crosta e miolo. Essas substituições também resultaram em bolos menos amarelados em relação ao controle, apresentando menores valores de  $b^*$  para crosta e miolo. Entre os cupcakes elaborados com a NBF e MBF, considerando apenas os dados do miolo, os maiores valores de  $a^*$  e  $b^*$  foram para CUP3.

No geral, a alteração das coordenadas  $L^*$ ,  $a^*$  e  $b^*$  nos cupcakes pode ser relacionada à alteração da coloração das farinhas aplicadas, sobretudo as farinhas modificadas em função do tratamento HMT. Em alimentos processados a alteração da

coloração é associada às reações enzimáticas e não enzimáticas (Thuengtung et al. 2023). No entanto a polifenol oxidase (PPO), principal enzima relacionada ao escurecimento enzimático, é facilmente inativada com processamento térmico (Sui et al. 2023), sendo o tratamento por HMT suficiente para sua eficaz inativação. Logo, a alteração de cor das farinhas processadas pode estar relacionada às reações não enzimáticas, sobretudo a reação de Maillard, resultado da interação entre açúcares redutores e proteínas sob aquecimento. Dessa forma, o HMT contribui para redução da luminosidade, e aumento das coordenadas  $a^*$  e  $b^*$ , levando a produção de alimentos mais escuros, avermelhados e amarelados (Thuengtung et al. 2023).

O índice de amarelecimento (YI) pode ser relacionado com vários fatores, entre eles à queimadura e processamento aplicado aos alimentos e ou ingredientes, sendo indicado para avaliar o impacto desses fatores nos produtos elaborados (Pathare et al. 2012). Como a modificação física aplicada na NBF envolve alterações térmicas e o processamento do bolo também, a determinação do índice de amarelecimento poderia ajudar a compreender a extensão do impacto desses fatores nos cupcakes. O YI da crosta apresentou diferença ( $p < 0,05$ ), com maior valor para o cupcake controle. Entre os cupcakes feitos com as farinhas integrais de banana-da-terra verde não houve diferença significativa. Para o miolo também houve diferença ( $p < 0,05$ ), porém o efeito foi inverso, o cupcake controle apresentou menor valor para YI e entre aqueles com as farinhas integrais de banana-da-terra verde o maior valor foi para o MBF3. Esses resultados podem refletir o impacto que as reações de Maillard e a caramelização exercem na cor da crosta, bem como do processamento térmico na cor da farinha modificada e, conseqüentemente, na cor do miolo do cupcake (Paesani et al. 2021). Entre as farinhas modificadas aplicadas nos cupcakes, a MBF3 é a que apresenta condições mais extremas de processamento (13 h a 100 °C), sendo possível observar que o YI diminuiu proporcionalmente às condições

de tempo e temperatura de processamento das farinhas modificadas aplicadas.

Os cupcakes elaborados com as farinhas integrais de banana-da-terra verde nativa e modificadas por HMT apresentaram menores valores para índice de brancura (WI) com relação ao controle. O WI é um importante indicador para bolos, uma vez que a farinha de trigo é o principal ingrediente da versão tradicional, contribuindo para o desenvolvimento de bolos com cor mais clara (Blanchard et al. 2012; Wilderjans et al. 2013). Quando os consumidores precisam de versões alternativas para esse produto eles tendem a buscar por substitutos que se aproximem da versão tradicional, sobretudo no aspecto sensorial. As fórmulas complexas dos produtos de panificação isentos de glúten apresentam uma tendência para o desenvolvimento de produtos mais escuros (Xu et al., 2020). O nível geral de brancura dos alimentos é determinado pelo índice de brancura, que pode ser relacionado à predileção dos consumidores por produtos brancos (Pathare et al. 2012). Dessa maneira é razoável avaliar que os cupcakes desenvolvidos com as farinhas integrais de banana-da-terra verde nativa e modificadas por serem mais escuros apresentam maiores chances de rejeição pelos consumidores. Majzoobi et al. (2014) verificaram que valores superiores a 15% de substituição da farinha de trigo por isolado de proteína de soja produziram bolos com crosta e miolo mais escuros, sendo essa a possível justificativa para as notas mais baixas atribuídas na avaliação sensorial.

Para os valores de croma, os cupcakes NBF e MBF diferiram ( $p < 0,05$ ) com relação ao controle, apresentando valores inferiores tanto para crosta, quanto para o miolo. Para a crosta, entre os cupcakes NBF e MBF não houve diferença significativa, já para o miolo os valores apresentaram diferenças, com maior valor registrado para o cupcake MBF3. Em um contexto de luminosidade similar, o grau de diferença de uma tonalidade com relação ao cinza é determinado pelo croma. Valores elevados de croma são associados a maior intensidade da cor percebida por humanos (Pathare et al. 2012),

sendo assim é possível dizer que os cupcakes elaborados com as farinhas integrais de banana-da-terra verde nativa e modificada por HMT apresentaram menor intensidade de cor com relação ao controle. Em alimentos, conhecer a cor dos produtos se faz necessário, pois ela é uma qualidade importante, responsável tanto por determinar suas características, bem como tem o potencial em induzir a escolha e aceitação de um produto pelo consumidor (Pathare et al. 2012; Majzoobi et al. 2014).

### ***3.3 Análise do perfil de textura***

Na Tabela 6 são apresentados os resultados do efeito da substituição parcial da farinha de arroz por farinha integral de banana-da-terra verde nativa e modificada nas propriedades de textura de cupcakes isentos de glúten. De maneira geral, as substituições alteraram as propriedades de textura dos cupcake em relação ao controle.

Os cupcakes CUP2 e CUP3 apresentaram maior dureza com 24 h de armazenamento. Nesse mesmo período o cupcake NAT apresentou menor dureza sem diferença significativa ( $p > 0,05$ ) dos cupcakes controle e CUP1. Durante o período de armazenamento houve uma tendência para o aumento da dureza, com exceção do cupcake CUP1 que não apresentou diferença ( $p > 0,05$ ). Ao final do período de armazenamento estudado (120 h) os cupcakes CUP2 e CUP3 registraram maior dureza e os NAT, CUP1 e o controle menor dureza, respectivamente. A mastigabilidade não variou ( $p > 0,05$ ) ao longo do período de armazenamento. Entre os cupcakes, para o tempo de 24 h, o controle, CUP2 e CUP3 apresentaram maior mastigabilidade e o NAT menor mastigabilidade. Segundo Lancetti et al. (2020), a dureza e mastigabilidade de um alimento tem impacto na aceitação pelo consumidor, sendo atributos associados com a qualidade global, frescor e envelhecimento. Considerando dureza e mastigabilidade, o cupcake NBF apresentou melhores resultados, com a produção de cupcakes mais macios e mais fáceis de mastigar,

com redução significativa de ambos os atributos em relação aos cupcakes controle e com farinha modificada, incluindo análise ao longo do período de armazenamento.

Todos os cupcakes tiveram a coesividade reduzida ( $p < 0,05$ ) ao longo do período de armazenamento. No período de 24 h, o cupcake controle apresentou maior coesividade e o cupcake NAT a menor coesividade, e entre os cupcakes com farinha modificada não houve diferença. Ao final do período de armazenamento de 120 h, o cupcake controle permaneceu apresentando maior coesividade e os cupcakes NAT, CUP3 e CUP2 os menores valores para coesividade, respectivamente. Ozyigit et al. (2020) verificaram que a adição de fibra alimentar acima de 8% reduziu a coesividade e elasticidade em formulações de bolo sem glúten. Alimentos com elevada coesividade são mais resistentes a condições de produção, mantendo-se mais íntegros possível após os processos de fabricação, embalagem, armazenamento e transporte, garantindo que o produto chegue até o consumidor com as características previstas para aquele alimento. A coesividade está relacionada a quão resistente um alimento é a situações externas que possam gerar retração, representando a capacidade que o alimento tem de se ligar a si mesmo (Singh et al. 2016; Tasnim et al. 2020).

A elasticidade é um dos atributos texturais comprometido quando a farinha de trigo é removida dos produtos de panificação, incluindo os bolos (Storck et al. 2021). Logo, a manutenção desse atributo é desejada nos produtos isentos de glúten, por ter uma importante contribuição na aceitabilidade e qualidade sensorial (Marchetti et al. 2021). Não houve diferença significativa entre os tratamentos para a elasticidade em 24 h e 72 h de armazenamento, porém, com 120 h apenas o NAT apresentou diferença significativa, com menor valor de elasticidade observado entre todos os demais. Os cupcakes, de maneira geral, apresentaram uma tendência na redução da elasticidade ao longo do período de armazenamento.

**Tabela 5.** Análise do perfil de textura dos cupcakes sem glúten controle e desenvolvidos com farinha integral de banana-da-terra verde nativa e modificadas por HMT.

<b>Parâmetro</b>	<b>Controle</b>	<b>NAT</b>	<b>CUP1</b>	<b>CUP2</b>	<b>CUP3</b>
<b>Dureza (g)</b>					
24 H	829,69 <sup>bAB</sup> ± 93,69	716,3 <sup>bB</sup> ± 72,95	806,00 <sup>aAB</sup> ± 71,31	911,18 <sup>cA</sup> ± 79,93	908,59 <sup>bA</sup> ± 128,35
72 H	996,83 <sup>abAB</sup> ± 44,89	845,32 <sup>bB</sup> ± 47,32	978,34 <sup>aAB</sup> ± 185,70	1154,21 <sup>bA</sup> ± 133,05	1070,09 <sup>bA</sup> ± 157,19
120 H	1056,01 <sup>aB</sup> ± 173,55	929,85 <sup>aB</sup> ± 78,76	992,69 <sup>aB</sup> ± 90,00	13551,32 <sup>aA</sup> ± 94,40	1277,04 <sup>aA</sup> ± 121,89
<b>Coesividade</b>					
24 H	0,72 <sup>aA</sup> ± 0,03	0,58 <sup>aC</sup> ± 0,02	0,64 <sup>aB</sup> ± 0,02	0,65 <sup>aB</sup> ± 0,02	0,63 <sup>aB</sup> ± 0,01
72 H	0,65 <sup>bA</sup> ± 0,01	0,52 <sup>bC</sup> ± 0,01	0,55 <sup>bB</sup> ± 0,02	0,56 <sup>bB</sup> ± 0,02	0,55 <sup>bB</sup> ± 0,02
120 H	0,59 <sup>cA</sup> ± 0,03	0,48 <sup>cC</sup> ± 0,02	0,53 <sup>bB</sup> ± 0,02	0,50 <sup>cC</sup> ± 0,01	0,49 <sup>cC</sup> ± 0,02
<b>Elasticidade</b>					
24 H	95,33 <sup>aA</sup> ± 1,51	92,42 <sup>aB</sup> ± 1,67	93,76 <sup>aAB</sup> ± 1,02	94,73 <sup>aA</sup> ± 0,94	93,95 <sup>aAB</sup> ± 0,46
72 H	93,10 <sup>abA</sup> ± 1,33	90,47 <sup>aA</sup> ± 1,37	91,65 <sup>abA</sup> ± 2,17	91,76 <sup>bA</sup> ± 1,75	91,57 <sup>bA</sup> ± 1,16
120 H	91,58 <sup>bA</sup> ± 1,63	87,32 <sup>bB</sup> ± 1,45	90,32 <sup>bA</sup> ± 0,92	92,21 <sup>bA</sup> ± 0,67	90,48 <sup>bA</sup> ± 1,14
<b>Mastigabilidade</b>					
24 H	572,92 <sup>aA</sup> ± 80,23	412,17 <sup>aB</sup> ± 81,23	483,18 <sup>aAB</sup> ± 41,33	559,41 <sup>aA</sup> ± 57,32	537,20 <sup>aA</sup> ± 77,79
72 H	604,68 <sup>aA</sup> ± 30,43	397,02 <sup>aC</sup> ± 19,04	487,64 <sup>aBC</sup> ± 79,42	588,28 <sup>aA</sup> ± 54,12	537,50 <sup>aAB</sup> ± 77,52
120 H	561,48 <sup>aAB</sup> ± 108,75	387,47 <sup>aC</sup> ± 39,96	472,51 <sup>aBC</sup> ± 50,26	619,73 <sup>aA</sup> ± 54,23	566,67 <sup>aAB</sup> ± 65,27

NAT – cupcake obtido com farinha nativa; CUP – cupcake obtido com farinha modificada por tratamento hidrotérmico (HMT).

Média ± desvio padrão. Letras minúsculas diferentes na mesma coluna e letras maiúsculas na mesma linha diferem estatisticamente ( $p < 0,05$ ) pelo teste de Tukey.

### 3.4 Aplicação do PCA nas propriedades texturais e características físicas dos cupcakes sem glúten

Foi utilizada a análise dos componentes principais para avaliar a correlação entre as propriedades texturais (dureza, coesividade, elasticidade e mastigabilidade), volume específico, altura e umidade dos cupcakes sem glúten controle e desenvolvidos com farinha integral de banana-da-terra verde nativa e modificadas por HMT. Considerando os critérios de Kaiser os componentes podem ser selecionados em função do seu autovalor, que deve ser superior a um (Jolliffe and Cadima 2016). Dessa maneira, a partir das observações do *ScreePlot* foi possível determinar que são necessários três componentes principais (CPs) para explicar a variabilidade do conjunto de dados, conforme apresentado na Tabela 7. Considerando os coeficientes de correlação de Pearson (Tabela 7) as variáveis dominantes (coeficiente de correlação acima de 0,6) para CP1 foram mastigabilidade, altura e umidade, para CP2 foram coesividade, elasticidade, dureza e umidade, e para CP3 o volume específico. Juntos, os três primeiros CPs explicam 89% da variação dos dados, sendo esse percentual seguro para análise com propósito qualitativo (Doğan et al. 2019).

**Tabela 6.** Coeficientes de correlação de Pearson para os parâmetros relacionados às propriedades texturais e características físicas dos cupcakes sem glúten.

Variáveis	CP 1	CP 2	CP 3
Dureza	0,57105*	-0,74834*	0,01896 <sup>ns</sup>
Coesividade	0,32401 <sup>ns</sup>	0,93721*	-0,01616 <sup>ns</sup>
Elasticidade	0,53701*	0,77819*	0,04751 <sup>ns</sup>
Mastigabilidade	0,93958*	0,02876 <sup>ns</sup>	0,02822 <sup>ns</sup>
Volume específico	-0,04781 <sup>ns</sup>	0,17648 <sup>ns</sup>	0,97290*
Umidade	-0,61209*	0,60944*	-0,27166 <sup>ns</sup>
Altura	-0,85561*	-0,07039 <sup>ns</sup>	0,20732 <sup>ns</sup>

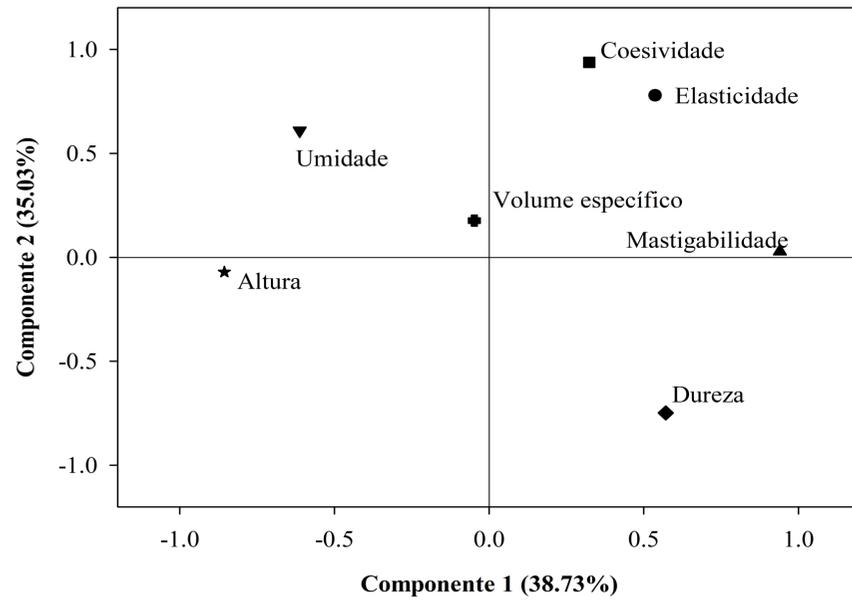
\* Significativo ( $p < 0,05$ ); <sup>ns</sup> não significativo ( $p > 0,05$ ).

De acordo com a matriz de correlação de Pearson (Tabela 7) e de acordo com o

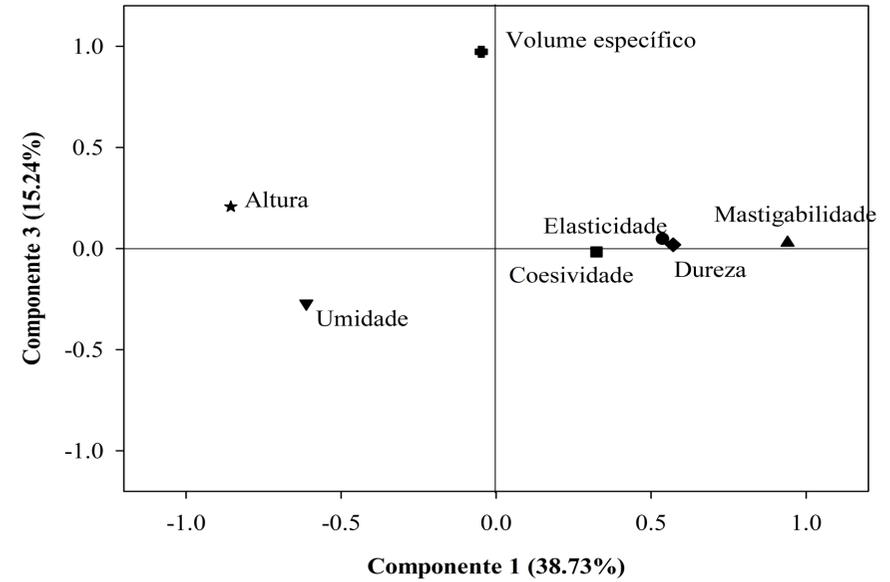
gráfico de carga fatorial, CP1 correlacionou-se positivamente com mastigabilidade e negativamente com altura e umidade (Figura 6A e 6B). O CP2 foi correlacionado positivamente com a coesividade, elasticidade e umidade, e negativamente com a dureza (Figura 6A). O CP 3 correlacionou-se positivamente com o volume específico (Figura 6B).

Observando CP1, nos quadrantes à direita do gráfico (Figura 7A), sendo esta localização correlacionada com a mastigabilidade, no período de 24 h os cupcakes controle, CUP2 e CUP3 foram os que apresentaram maior mastigabilidade, já os quadrantes à esquerda indicam que no período de 24 h de armazenamento os cupcakes NAT e CUP1 apresentaram maior altura e umidade e menor mastigabilidade. Esses comportamentos foram mantidos ao longo do período de armazenamento, exceto no período de 120h de armazenamento, onde o CUP2 e NAT apresentaram a maior e menor mastigabilidade, respectivamente. Esse resultado corrobora com aquele apresentado anteriormente ao se avaliar a relação entre as propriedades texturais e características físicas.

Na Figura 7A, em CP2, pode ser observado, com 24 h de armazenamento, que os cupcakes controle, NAT, CUP1, CUP2 e CUP3 situam-se nos quadrantes superiores relacionando-os com a coesividade, elasticidade e umidade, sendo o controle fortemente relacionado, indicando maiores valores para estes atributos, sem distinção entre os demais. Observa-se que com maiores períodos de armazenamento os cupcakes são direcionados aos quadrantes inferiores do gráfico, indicando redução da coesão, elasticidade e umidade, e aumento da dureza, uma vez que esse atributo está correlacionado negativamente e posicionado no quadrante inferior do gráfico, indicando perda de frescor das amostras avaliadas.



A

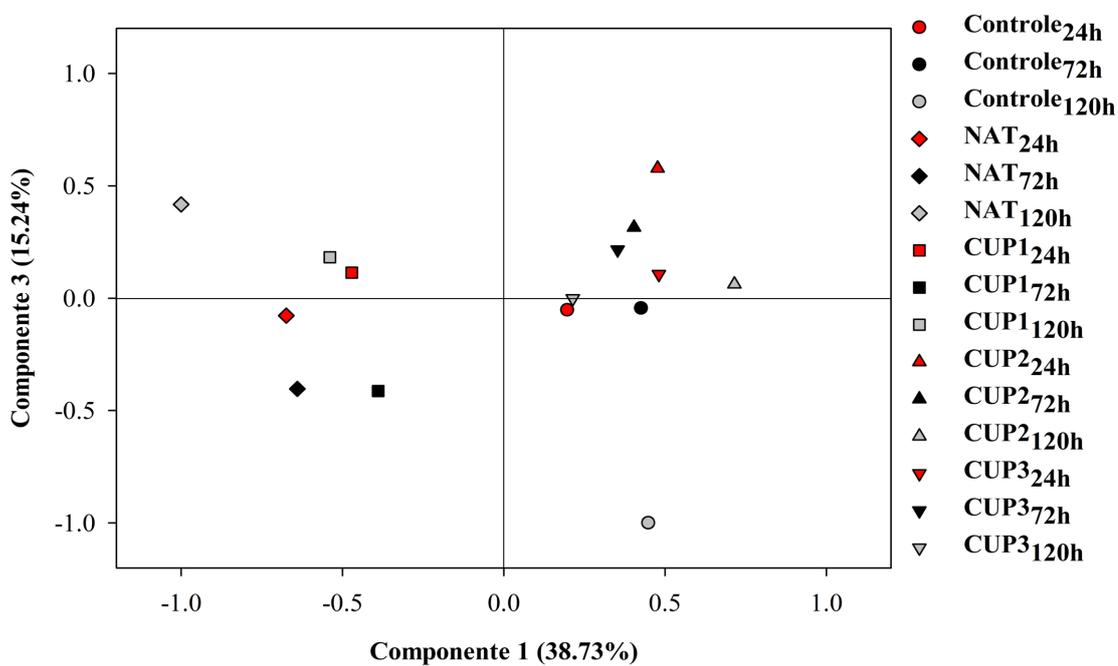
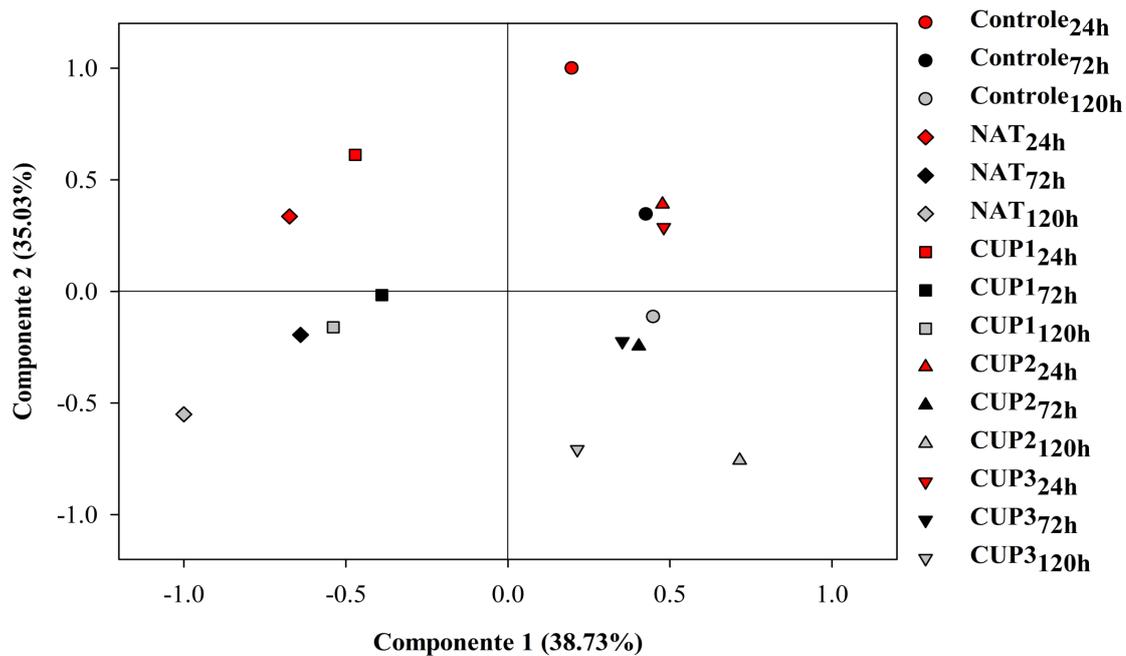


B

Fonte: Próprio autor (2023).

**Figura 6.** Análise de Componentes Principais (ACP): Gráfico de cargas fatoriais de variáveis de propriedades texturais e físicas dos cupcakes ao longo dos Componentes Principais 1, 2 e 3 (CP1 e CP2 – A; CP1 e CP3 – B).

A



B

Fonte: Próprio autor (2023).

**Figura 7.** Análise de componentes principais (ACP): distribuição das amostras em gráficos de dispersão para o tipo de farinha utilizada para a produção dos cupcakes e o tempo de armazenamento ao longo do Componente Principal 1 e 2 (A) e componente Principal 1 e 3 (B).

Observa-se na Figura 7B, que nenhum dos cupcakes posicionados nos quadrantes superiores do gráfico correlacionam-se fortemente com o volume específico, ou seja, não há diferença entre eles. No período de armazenamento de 120 h, o cupcake controle foi o que apresentou menor volume específico (quadrante inferior direito) se destacando dos demais.

### **3.5 Análise sensorial**

Na Tabela 8 são apresentados os resultados da análise sensorial para os cupcakes sem glúten elaborados com farinha de banana-da-terra verde nativa e modificada por tratamento hidrotérmico. No geral, para todos os atributos avaliados, os cupcakes receberam pontuações superiores a 5, indicando aceitação pelos consumidores (Paesani et al. 2021). O teste de aceitação mostrou que para os atributos de aparência, sabor, textura e aceitação global os cupcakes desenvolvidos com a NBF e MBF não apresentaram diferença entre eles e foram significativamente superiores ( $p < 0,05$ ) em relação ao cupcake controle.

A contribuição da NBF e MBF no desenvolvimento de cupcakes mais escuros em relação ao controle não interferiu na aceitação, contrariando a expectativa de que bolos mais escuros levam a redução da aceitação sensorial (Pathare et al. 2012; Majzoobi et al. 2014; Xu et al. 2020).

O cupcake controle teve aceitação sensorial inferior para o aroma em relação aos demais cupcakes. A modificação por tratamento hidrotérmico alterou o aroma das farinhas de banana-da-terra verde, refletindo no aroma do cupcake produzidos com as mesmas, que foi percebido positivamente pelos provadores. Quando questionados sobre a intenção de compra dos cupcakes, os provadores atribuíram notas altas para os cupcakes com as farinhas de banana-da-terra nativa e modificadas, sem distinção entre eles e superior ao controle.

Apesar das farinhas modificadas terem contribuído com o desenvolvimento de cupcakes com aceitação maior em relação ao controle, eles não se diferem do cupcake elaborado com a farinha nativa. Esse comportamento, quando associado aos resultados encontrados na análise do perfil de textura, onde o NAT apresentou menores valores para dureza e mastigabilidade, sem alteração da elasticidade e com o volume específico sem alteração significativa ( $p < 0,05$ ), permite concluir que dentro das condições estudadas a modificação da farinha nativa por tratamento hidrotérmico para aplicação em cupcakes sem glúten não seria recomendada.

**Tabela 7.** Análise sensorial de cupcakes sem glúten elaborados com farinha de banana-da-terra verde nativa e modificada por HMT.

<b>Amostra</b>	<b>Aceitação global</b>	<b>Aparência</b>	<b>Aroma</b>	<b>Sabor</b>	<b>Textura</b>	<b>Intenção de compra</b>
<b>Controle</b>	6,41 <sup>b</sup> ± 2,1	7,73 <sup>a</sup> ± 1,6	6,21 <sup>c</sup> ± 2,0	6,33 <sup>b</sup> ± 2,3	6,75 <sup>b</sup> ± 2,0	3,19 <sup>b</sup> ± 1,2
<b>NAT</b>	7,28 <sup>a</sup> ± 1,4	7,37 <sup>a</sup> ± 1,6	6,84 <sup>b</sup> ± 1,8	7,12 <sup>a</sup> ± 1,7	7,64 <sup>a</sup> ± 1,2	3,65 <sup>a</sup> ± 1,0
<b>CUP1</b>	7,32 <sup>a</sup> ± 1,4	7,46 <sup>a</sup> ± 1,3	7,0 <sup>ab</sup> ± 1,7	7,38 <sup>a</sup> ± 1,7	7,43 <sup>a</sup> ± 1,5	3,82 <sup>a</sup> ± 1,0
<b>CUP2</b>	7,39 <sup>a</sup> ± 1,5	7,44 <sup>a</sup> ± 1,3	7,04 <sup>b</sup> ± 1,6	7,60 <sup>a</sup> ± 1,4	7,35 <sup>a</sup> ± 1,7	3,89 <sup>a</sup> ± 1,0
<b>CUP3</b>	7,56 <sup>a</sup> ± 1,4	7,49 <sup>a</sup> ± 1,5	7,57 <sup>a</sup> ± 1,3	7,65 <sup>a</sup> ± 1,4	7,42 <sup>a</sup> ± 1,7	3,99 <sup>a</sup> ± 1,0

NAT – cupcake obtido com farinha nativa; CUP – cupcake obtido com farinha modificada por tratamento hidrotérmico (HMT).

Média ± desvio padrão. Letras minúsculas diferentes na mesma coluna diferem estatisticamente ( $p < 0,05$ ) pelo teste de Tukey. Cupcakes sem glúten elaborados com farinha de arroz (controle), farinha integral de banana-da-terra verde nativa (NAT) e modificadas (CUP1, CUP2 e CUP3).

O mapa de preferência interno para aceitação global foi aplicado, para melhor compreensão acerca da aceitação dos cupcakes. Essa ferramenta permite visualizar o comportamento individual dos consumidores mostrando suas preferências em referência às amostras avaliadas (Endrizzi et al., 2014). Para aceitação global os CPs 1 e 2 representaram 62,6% da variância total dos dados, desses 40,9% por CP1 e 21,7% por



#### 4. Conclusão

A produção de farinha integral de banana-da-terra verde é viável por ser um processamento acessível e com baixa produção de resíduos. A substituição parcial da farinha de arroz pelas farinhas de banana-da-terra verde nativa e modificada por HMT, resultou na obtenção de cupcakes mais escuros, mais avermelhados, menos amarelados e com menor intensidade de cor em relação ao controle. De modo geral, as farinhas de banana-da-terra verde nativa e modificada por HMT são opções atrativas para a substituição da farinha de arroz no desenvolvimento de cupcakes sem glúten, com nível de substituição de até 40%. Apesar das diferenças encontradas na análise instrumental de textura e cor, essas alterações não prejudicaram a aceitação das formulações pelos consumidores. A análise sensorial revelou que é possível obter cupcakes com a farinha integral de banana-da-terra verde nativa e modificada por tratamento hidrotérmico com aceitação superior ao controle para aparência, sabor, textura, aroma, aceitação global e intenção de compra. A farinha nativa é a opção mais viável na substituição parcial (40%) da farinha de arroz em cupcakes sem glúten, por apresentar menores valores para dureza e mastigabilidade, sem promover alteração da elasticidade e do volume específico, além de apresentar aceitação sensorial superior ao controle e semelhante aos cupcakes com as farinhas modificadas por tratamento hidrotérmico, representando uma redução de custos operacionais e otimização de processo. Além disso, a sua incorporação poderá contribuir para a qualidade nutricional e funcional desses cupcakes, pelo seu reconhecido conteúdo de fibras alimentares, compostos bioativos e amido resistente, colaborando com a diversificação de produtos funcionais no mercado.

Os autores informam que não há conflito de interesse a declarar.

## Referências

- Aleman RS, Paz G, Morris A, Prinyawiwatkul W, Moncada M, King JM. 2021. High protein brown rice flour, tapioca starch & potato starch in the development of gluten-free cupcakes. *LWT*. 152:112326. <https://doi.org/10.1016/J.LWT.2021.112326>
- Amin T, Naik HR, Hussain SZ, Rather SA, Makroo HA, Dar BN, Wani SM, Bashir O. 2021. Functional cake from rice flour subjected to starch hydrolyzing enzymes: Physicochemical properties and in vitro digestibility. *Food Biosci*. 42:101072. <https://doi.org/10.1016/J.FBIO.2021.101072>
- Ammar I, Gharsallah H, Ben Brahim A, Attia H, Ayadi MA, Hadrich B, Felfoul I. 2021. Optimization of gluten-free sponge cake fortified with whey protein concentrate using mixture design methodology. *Food Chem*. 343:128457. <https://doi.org/10.1016/J.FOODCHEM.2020.128457>
- Bharti I, Singh S, Saxena DC. 2019. Exploring the influence of heat moisture treatment on physicochemical, pasting, structural and morphological properties of mango kernel starches from Indian cultivars. *LWT*. 110:197–206. <https://doi.org/10.1016/J.LWT.2019.04.082>
- Bhinder S, Singh N, Kaur A. 2022. Impact of germination on nutraceutical, functional and gluten free muffin making properties of Tartary buckwheat (*Fagopyrum tataricum*). *Food Hydrocoll*. 124:107268. <https://doi.org/10.1016/J.FOODHYD.2021.107268>
- Blanchard C, Labouré H, Verel A, Champion D. 2012. Study of the impact of wheat flour type, flour particle size and protein content in a cake-like dough: Proton mobility and rheological properties assessment. *J Cereal Sci*. 56(3):691–698. <https://doi.org/10.1016/J.JCS.2012.08.005>
- Burbano JJ, Cabezas DM, Correa MJ. 2021. Effect of walnut flour addition on rheological, thermal and microstructural properties of a gluten free batter. *LWT*

[Internet]. [accessed 2021 Nov 28]:112819.

<https://doi.org/10.1016/J.LWT.2021.112819>

Cahyana Y, Wijaya E, Halimah TS, Marta H, Suryadi E, Kurniati D. 2019. The effect of different thermal modifications on slowly digestible starch and physicochemical properties of green banana flour (*Musa acuminata* colla). *Food Chem.* 274:274–280.

<https://doi.org/10.1016/J.FOODCHEM.2018.09.004>

Chung HJ, Liu Q, Hoover R. 2009. Impact of annealing and heat-moisture treatment on rapidly digestible, slowly digestible and resistant starch levels in native and gelatinized corn, pea and lentil starches. *Carbohydr Polym.* 75(3):436–447.

<https://doi.org/10.1016/J.CARBPOL.2008.08.006>

da Costa Borges V, Fernandes SS, da Rosa Zavareze E, Haros CM, Hernandez CP, Guerra Dias AR, de las Mercedes Salas-Mellado M. 2021. Production of gluten free bread with flour and chia seeds (*Salvia hispânica* L). *Food Biosci.* 43:101294.

<https://doi.org/10.1016/J.FBIO.2021.101294>

Ding S, Peng B, Li Y, Yang J. 2019. Evaluation of specific volume, texture, thermal features, water mobility, and inhibitory effect of staling in wheat bread affected by maltitol. *Food Chem.* 283:123–130.

<https://doi.org/10.1016/J.FOODCHEM.2019.01.045>

Doğan M, Aslan D, Gürmeriç V, Özgür A, Göksel Saraç M. 2019. Powder caking and cohesion behaviours of coffee powders as affected by roasting and particle sizes:

Principal component analyses (PCA) for flow and bioactive properties. *Powder*

*Technol.* 344:222–232. <https://doi.org/10.1016/J.POWTEC.2018.12.030>

Endrizzi, I., Gasperi, F., Rødbotten, M., & Næs, T. (2014). Interpretation, validation and segmentation of preference mapping models. *Food Quality and Preference*,

32(PA), 198–209. <https://doi.org/10.1016/J.FOODQUAL.2013.10.002>

Guedes, ISA, Viana, E, Reis, RC, Santos, FD, Mesquita, RR. 2021. "Development of a Cake Rich in Resistant Starch with Good Sensory Acceptance." *Semina: Ciências Agrárias* 42 (6). Universidade Estadual de Londrina: 3741–3756. doi:10.5433/1679-0359.2021V42N6SUPL2P3741.

Hopkin L, Broadbent H, Ahlborn GJ. 2022. Influence of almond and coconut flours on Ketogenic, Gluten-Free cupcakes. *Food Chem X*. 13:100182.

<https://doi.org/10.1016/J.FOCHX.2021.100182>

Jolliffe IT, Cadima J. 2016. Principal component analysis: a review and recent developments. *Philosophical Transactions of the Royal Society A: Mathematical, Physical and Engineering Sciences* [Internet]. [accessed 2023 May 28] 374(2065).

<https://doi.org/10.1098/RSTA.2015.0202>

Juhász A, Colgrave ML, Howitt CA. 2020. Developing gluten-free cereals and the role of proteomics in product safety. *J Cereal Sci*. 93:102932.

<https://doi.org/10.1016/J.JCS.2020.102932>

Khoozani AA, Bekhit AEDA, Birch J. 2019. Effects of different drying conditions on the starch content, thermal properties and some of the physicochemical parameters of whole green banana flour. *Int J Biol Macromol* [Internet]. [accessed 2023 May 28]

130:938–946. <https://doi.org/10.1016/J.IJBIOMAC.2019.03.010>

Kunyanee K, Luangsakul N. 2022. The impact of heat moisture treatment on the physicochemical properties and in vitro glycemic index of rice flour with different amylose contents and associated effects on rice dumpling quality. *LWT*. 154:112694.

<https://doi.org/10.1016/J.LWT.2021.112694>

Lancetti R, Palavecino PM, Bustos MC, León AE. 2020. Yacon (*Smallanthus sonchifolius*) flour obtention: Effect of process conditions on quality attributes and its

incorporation in gluten-free muffins. *LWT*. 125:109217.

<https://doi.org/10.1016/J.LWT.2020.109217>

Majzoobi M, Ghiasi F, Habibi M, Hedayati S, Farahnaky A. 2014. Influence of Soy Protein Isolate on the Quality of Batter and Sponge Cake. *J Food Process Preserv* [Internet]. [accessed 2023 May 28] 38(3):1164–1170.

<https://doi.org/10.1111/JFPP.12076>

Marchetti L, Acuña MS, Andrés SC. 2021. Effect of pecan nut expeller meal on quality characteristics of gluten-free muffins. *LWT*. 146:111426.

<https://doi.org/10.1016/J.LWT.2021.111426>

Marta H, Cahyana Y, Djali M, Arcot J, Tensiska T. 2019. A comparative study on the physicochemical and pasting properties of starch and flour from different banana (*Musa* spp.) cultivars grown in Indonesia. <https://doi.org/10.1080/1094291220191657447> [Internet]. [accessed 2023 May 23] 22(1):1562–1575.

<https://doi.org/10.1080/10942912.2019.1657447>

Ozyigit E, Eren İ, Kumcuoglu S, Tavman S. 2020. Large Amplitude Oscillatory Shear (LAOS) analysis of gluten-free cake batters: The effect of dietary fiber enrichment. *J Food Eng*. 275:109867. <https://doi.org/10.1016/J.JFOODENG.2019.109867>

Paesani C, Bravo-Núñez Á, Gómez M. 2021. Effect of stabilized wholegrain maize flours on the quality characteristics of gluten-free layer cakes. *LWT*. 135:109959.

<https://doi.org/10.1016/J.LWT.2020.109959>

Pang Z, Xu R, Luo T, Che X, Bansal N, Liu X. 2019. Physicochemical properties of modified starch under yogurt manufacturing conditions and its relation to the properties of yogurt. *J Food Eng*. 245:11–17. <https://doi.org/10.1016/J.JFOODENG.2018.10.003>

Pathare PB, Opara UL, Al-Said FAJ. 2013. Colour Measurement and Analysis in Fresh and Processed Foods: A Review. *Food and Bioprocess Technology* 2013 6:1 [Internet].

[accessed 2023 May 28] 6(1):36–60. <https://doi.org/10.1007/S11947-012-0867-9>

Pereira A, Maraschin M. 2015. Banana (*Musa spp*) from peel to pulp:

Ethnopharmacology, source of bioactive compounds and its relevance for human health.

*J Ethnopharmacol.* 160:149–163. <https://doi.org/10.1016/j.jep.2014.11.008>

Punia S. 2020. Barley starch modifications: Physical, chemical and enzymatic - A review. *Int J Biol Macromol.* 144:578–585.

<https://doi.org/10.1016/J.IJBIOMAC.2019.12.088>

Riquette RFR, Ginani VC, Leandro E dos S, de Alencar ER, Maldonade IR, de Aguiar LA, de Souza Acácio GM, Mariano DRH, Zandonadi RP. 2019. Do production and storage affect the quality of green banana biomass? *LWT.* 111:190–203.

<https://doi.org/10.1016/j.lwt.2019.04.094>

Rosales-Juárez M, González-Mendoza B, López-Guel EC, Lozano-Bautista F,

Chanona-Pérez J, Gutiérrez-López G, Farrera-Rebollo R, Calderón-Domínguez G.

2008. Changes on dough rheological characteristics and bread quality as a result of the addition of germinated and non-germinated soybean flour. *Food Bioproc Tech* [Internet].

[accessed 2023 May 28] 1(2):152–160. [https://doi.org/10.1007/S11947-007-0004-](https://doi.org/10.1007/S11947-007-0004-3/FIGURES/4)

[3/FIGURES/4](https://doi.org/10.1007/S11947-007-0004-3/FIGURES/4)

Sahagún M, Bravo-Núñez Á, Báscones G, Gómez M. 2018. Influence of protein source on the characteristics of gluten-free layer cakes. *LWT.* 94:50–56.

<https://doi.org/10.1016/J.LWT.2018.04.014>

Schafrański K, Ito VC, Lacerda LG. 2021. Impacts and potential applications: A review of the modification of starches by heat-moisture treatment (HMT). *Food Hydrocoll.*

117:106690. <https://doi.org/10.1016/J.FOODHYD.2021.106690>

Singh JP, Kaur A, Singh N. 2016. Development of eggless gluten-free rice muffins utilizing black carrot dietary fibre concentrate and xanthan gum. *J Food Sci Technol* [Internet]. [accessed 2023 May 28] 53(2):1269–1278. <https://doi.org/10.1007/S13197-015-2103-X>

Storck CR, Fortes CR, Halal SLM El, Ribeiro JD, Montagner GE, Fonseca LM, Zavareze E da R, Dias ARG. 2021. Different reaction times for phosphorylation of sorghum flour (*Sorghum bicolor*): Physicochemical evaluation and application in the formulation of gluten-free cakes. *Food Biosci* [Internet]. [accessed 2021 Nov 21] 44:101441. <https://doi.org/10.1016/J.FBIO.2021.101441>

Sui X, Meng Z, Dong T, Fan X, Wang Q. 2023. Enzymatic browning and polyphenol oxidase control strategies. *Curr Opin Biotechnol*. 81:102921. <https://doi.org/10.1016/J.COPBIO.2023.102921>

Tasnim T, Das PC, Begum AA, Nupur AH, Mazumder MAR. 2020. Nutritional, textural and sensory quality of plain cake enriched with rice rinsed water treated banana blossom flour. *J Agric Food Res*. 2:100071. <https://doi.org/10.1016/J.JAFR.2020.100071>

Thuengtung S, Ketnawa S, Ding Y, Cai Y, Ogawa Y. 2023. Effect of mild heat-moisture treatment for harvested raw paddy rice on physicochemical properties and in vitro starch digestibility of cooked rice. *Food Hydrocolloids for Health*. 3:100133. <https://doi.org/10.1016/J.FHFH.2023.100133>

Wilderjans E, Luyts A, Brijs K, Delcour JA. 2013. Ingredient functionality in batter type cake making. *Trends Food Sci Technol*. 30(1):6–15. <https://doi.org/10.1016/J.TIFS.2013.01.001>

Wilderjans E, Luyts A, Goesaert H, Brijs K, Delcour JA. 2010. A model approach to starch and protein functionality in a pound cake system. *Food Chem.* 120(1):44–51.

<https://doi.org/10.1016/J.FOODCHEM.2009.09.067>

Xie J, Zhang Y, Klomklao S, Simpson BK. 2023. Pectin from plantain peels: Green recovery for transformation into reinforced packaging films. *Waste Management.*

161:225–233. <https://doi.org/10.1016/J.WASMAN.2023.02.035>

Xu J, Zhang Y, Wang W, Li Y. 2020. Advanced properties of gluten-free cookies, cakes, and crackers: A review. *Trends Food Sci Technol.* 103:200–213.

<https://doi.org/10.1016/J.TIFS.2020.07.017>

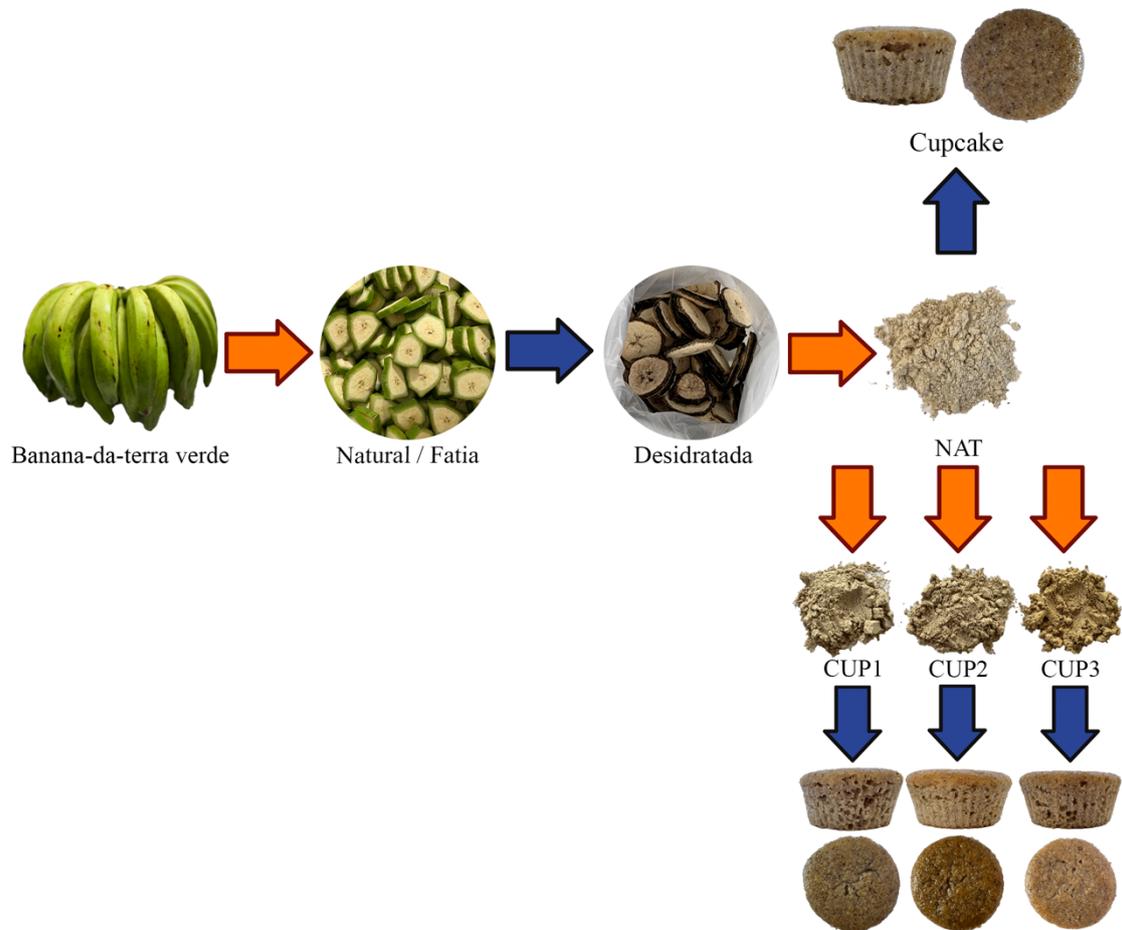
Yang S, Dhital S, Zhang MN, Wang J, Chen ZG. 2022. Structural, gelatinization, and rheological properties of heat-moisture treated potato starch with added salt and its application in potato starch noodles. *Food Hydrocoll.* 131.

<https://doi.org/10.1016/j.foodhyd.2022.107802>

Zhao T, Li X, Zhu R, Ma Z, Liu L, Wang X, Hu X. 2019. Effect of natural fermentation on the structure and physicochemical properties of wheat starch. *Carbohydr Polym.*

218:163–169. <https://doi.org/10.1016/J.CARBPOL.2019.04.061>

**ANEXO**

**Anexo 1** - Resumo gráfico – Produção da farinha e *cupcakes*.

**Anexo 2** – Artigo de revisão.

---

ARTIGO 3

**Trends on the development of gluten-free cakes: A review**

Tendências no desenvolvimento de bolos sem glúten: Uma revisão

---

### **Trends on the development of gluten-free cakes: A review**

Bruna de Andrade Braga Mendes<sup>a</sup>, Matheus Ferreira Almeida<sup>b</sup>, Eduardo Bruno Macêdo Viana<sup>c</sup>, Dioneire Amparo dos Anjos<sup>a</sup>, Cristiane Martins Veloso<sup>d\*</sup>.

a. Multidisciplinary Institute in Health (IMS), Federal University of Bahia (UFBA), Vitória da Conquista, BA, 45029-094, Brazil.

b. Chemistry Laboratory, State University of Southwest Bahia, 45031-300, Vitória da Conquista, BA, Brazil.

c. Process Engineering Laboratory, State University of Southwestern Bahia, 45700-000, Itapetinga, BA, Brazil.

d. Department of Natural Sciences (DCN), State University of the Southwest of Bahia (UESB), Vitória da Conquista, BA, 45000-000, Brazil. \*E-mail for correspondence: [crismveloso@yahoo.com.br](mailto:crismveloso@yahoo.com.br)

Declarations of interest: none.

## Abstract

*Background:* Celiac disease, wheat allergy, and non-celiac gluten sensitivity are health conditions that are treated by adopting a gluten-free diet, which excludes proteins found in some cereal plants. In this context, new approaches in the development of processed foods, such as cakes, for individuals with these health conditions have the potential to replace conventional products, contributing to greater adherence to a gluten-free diet and control of these diseases.

*Scope and approach:* The demand for gluten-free bakery products has been growing, from a technological and nutritional perspective, the development of gluten-free products is a challenge. Cakes are among the most consumed bakery products. Different ingredients and technologies are being researched with the aim of replacing of wheat flour in cakes, aiming to improve the nutritional and/or functional quality of the formulations.

*Key findings and conclusions:* Flours from different cereals, pseudocereals, starches, tubers, animal and vegetable proteins, and food and industrial waste have high potential. Along with the use of technologies such as the combined cooking treatment with vacuum, they can help in the complete substitution or enrichment of gluten-free pre-mixes, altering the viscoelastic properties and improving the nutritional and functional quality, which is limited when using the traditional substitution of wheat flour with rice flour.

**Keywords:** Bakery products; Nutritional quality; Technological properties; Cake.

## 1. Introduction

Gluten consists of storage proteins found in some cereal plant species, with these storage proteins being glutelins and prolamins. Prolamins are proteins rich in glutamine and proline, from which their name derives (Ribes Koninckx et al., 2015; Scherf, 2019). With a unique amino acid composition, gluten is present in grains such as wheat, rye, and barley. The type of prolamins present will vary depending on the plant species: wheat contains gliadins and glutenins, rye contains secalins, barley contains hordeins, and oats contain avenins (Parsons et al., 2021; Xhaferaj et al., 2020). While oats are considered a potential source of gluten, their storage proteins are different from those found in wheat, rye, and barley. The presence of gluten in their composition is the result of contamination during harvesting, transportation, storage, and processing in the presence of these cereals that naturally contain gluten (Smulders et al., 2018; Xu et al., 2020).

In contact with water and the application of mechanical force, gluten proteins strongly contribute to the formation of a viscoelastic mass with unique characteristics, making gluten a desirable ingredient in baked goods, particularly due to its ability to trap gas during dough fermentation. The main source of gluten is wheat grain, with wheat flour being one of its main derivative ingredients. Widely used in the food industry, particularly in the development of baked goods such as bread (Abedi & Pourmohammadi, 2021; Damodaran & Parkin, 2019; Ma et al., 2021; Scherf, 2019; Xu et al., 2020), other products such as cookies, cakes, crackers, and pretzels traditionally require the presence of wheat flour because they benefit from its properties beyond gluten (Abedi & Pourmohammadi, 2021; Damodaran & Parkin, 2019; Ribes Koninckx et al., 2015; Tasnim et al., 2020)

There are some health conditions in which a gluten-free diet is indicated, such as celiac disease, wheat allergy, and non-celiac gluten sensitivity (Moleski et al., 2021).

Celiac disease (CD), a chronic autoimmune enteropathy that affects the small intestine, is caused by the ingestion of dietary gluten by genetically predisposed individuals (Dimidi et al., 2021; Guennouni et al., 2022; Möller et al., 2021; Scherf, 2019). Gliadin, an undigested fraction of gluten, is considered an immunomodulatory component that triggers CD (Chaudhry et al., 2021; Gandini et al., 2021; Scherf, 2019). CD occurs worldwide, with a global seroprevalence rate of 1.4%, varying by continent, with the lowest rate in Africa at 1.1% and the highest rate in Asia at 1.8% (Chaudhry et al., 2021; Lebwohl & Rubio-Tapia, 2021).

Wheat allergy (WA) consists of an immune response with the wheat's four protein classes (albumin, globulin, gliadin, and glutenin) as a food antigen, which may or may not be

35 mediated by immunoglobulin E (IgE). Non-IgE prevalence is higher in children under three  
36 years old and less identified in adults (Henggeler et al., 2017; Scherf, 2019; Wang et al., 2021).  
37 The global seroprevalence of wheat allergy is 0.3%, with higher occurrence in the pediatric  
38 population (Wang et al., 2021).

39 Non-celiac gluten sensitivity (NCGS) was defined in 2011, but its pathogenesis is not  
40 well understood. It is characterized by the presence of gastrointestinal and/or extraintestinal  
41 symptoms associated with the ingestion of gluten-containing foods, where suspicion of celiac  
42 disease and wheat allergy is ruled out (Chaudhry et al., 2021; Khan et al., 2020; Moleski et al.,  
43 2021). The global prevalence of NCGS is estimated to be between 3-6% (Arslain et al., 2021).  
44 Unlike celiac disease and wheat allergy, non-celiac gluten sensitivity does not have specific  
45 biomarkers, which makes its diagnosis essentially clinical or exclusionary (Bathrellou et al.,  
46 2018; Chaudhry et al., 2021; Moleski et al., 2021).

47 All these health conditions presented have as treatment the adoption of a gluten-free diet  
48 (GFD), leading to the disappearance of symptoms associated with the process and control of  
49 the disease (Aleman et al., 2021; Bathrellou et al., 2018; Chaudhry et al., 2021; Khan et al.,  
50 2020; Moleski et al., 2021; Scherf, 2019).

51 The great challenge for gluten-restricted diets is the development of bakery products.  
52 Gluten is present in grains such as wheat, rye, barley, and oats (through cross-contamination),  
53 and foods made from these cereals are consumed worldwide, especially bakery products such  
54 as bread, cookies, and cakes, as well as pasta, snacks, and breakfast cereals (Xu et al., 2020;  
55 Tasnim et al., 2020). Cakes are among the most produced foods worldwide. The substitution of  
56 wheat flour in the development of gluten-free bakery products has been widely studied.  
57 Research for new flours from different botanical sources has been encouraged, especially those  
58 with potential to add nutritional quality and/or functionality, since traditional substitutions with  
59 rice and corn derivatives lead to the preparation of products with low nutritional quality, high  
60 glycemic index, and low fiber content (Ammar et al., 2021; Xu et al., 2020). The technological  
61 properties of gluten-free cake mixtures, as well as the nutritional and functional properties of  
62 different foods and/or ingredients for preparing gluten-free cakes, are not reported in a single  
63 approach in the literature. Therefore, the objective of this review was to investigate and gather  
64 different ingredients in gluten-free cake formulations, highlighting their main technological,  
65 nutritional, and functional properties, as well as alternative technologies and future trends.

66

67

## 2. Market demand for gluten-free products

The demand for gluten-free products has been steadily increasing. It is estimated that the global market for gluten-free products, including bakery products, snacks, ready-to-eat meals, pizzas, pastas, condiments, and spices, will reach 6.47 billion dollars in 2023 (Xu et al., 2020) and may reach up to 32.39 billion dollars in 2025 (Föste et al., 2020). What is impressive is that this market serves a public beyond those who need a gluten-free diet (GFD) as a health treatment, such as celiac disease, wheat allergy, and non-celiac gluten sensitivity (Chaudhry et al., 2021; da Costa Borges et al., 2021; Föste et al., 2020; Juhász et al., 2020; Sahagún et al., 2018). GFD is one of the most popular diets in the world, and considering the global market for foods aimed at meeting food intolerances, gluten-free products represent a third of the total market, confirming their potential (Juhász et al., 2020).

The appeal of gluten-free eating being healthier is gradually attracting more and more enthusiasts, who are driven by the increasing availability of products in this category, advertising on social media, magazines, television, and digital influencers. Followers of this diet believe that gluten is a bad ingredient for health, even though there is no consensus that a gluten-free diet can bring any benefit to those who do not have an allergy or sensitivity. This context shows how the gluten-free products market is very promising and attractive, with a wide investment and growth perspective (Chaudhry et al., 2021; da Costa Borges et al., 2021; Fornari et al., 2021; Föste et al., 2020; Juhász et al., 2020).

The change in the consumer profile, which is no longer just those who consume gluten-free products as a health treatment, combined with the expansion of the gluten-free products market, has also impacted the places where these products are sold. Previously, they were only sold in pharmacies and currently can be easily found in supermarkets, online stores, and even in restaurants, which benefit from attracting new customers who were previously limited to pharmacies. Thus, there is an increase in sales, an increase in profit margin, as products in this category are more expensive, and finally, a good image for the establishment, as the sale of products considered healthy favors the image of a responsible company that cares about meeting the needs of everyone by focusing on the health and well-being of its customers (Cornicelli et al., 2018; Fornari et al., 2021).

### 2.1.Challenges in developing gluten-free products

101 An industrially processed food to be considered gluten-free, according to the document  
102 published by the Food and Drug Administration (no. 2013-18813) and the Regulation of the  
103 European Union Commission (CE no. 41/2009), must present a gluten content below 20 mg kg<sup>-1</sup>  
104 and not contain any gluten-containing raw material or ingredient derived from a gluten source,  
105 such as wheat flour. The use of ingredients that have been processed to remove gluten is  
106 permitted, provided that the content of gluten is less than 20 mg kg<sup>-1</sup> (EU, 2009; FDA, 2013).

107 Many studies have been developed with the aim of finding foods and/or ingredients that  
108 can replace traditional sources of gluten, especially wheat flour, in the development of gluten-  
109 free foods, which represents a real technological challenge. The focus of research is the  
110 modification of technological, sensory and nutritional properties of these foods and/or  
111 ingredients, seeking to bring sensory and nutritional quality foods to the population. Despite  
112 advances, the most common substitutions, such as refined flours, starches, and tubers, which  
113 despite being colorless and mild-flavored, are sensory unfavorable and often of low nutritional  
114 quality (Ammar et al., 2021; Burbano et al., 2022; Coronel et al., 2021; da Costa Borges et al.,  
115 2021; A. B. Das & Bhattacharya, 2019; Mahroug et al., 2019; Sahagún et al., 2018; Storck et  
116 al., 2021; Tasnim et al., 2020; Xu et al., 2020).

117 Considering the functionality of wheat flour, there is currently no other food that  
118 satisfactorily substitutes its viscoelastic property of dough (Abedi & Pourmohammadi, 2021;  
119 Damodaran & Parkin, 2019; Ribes Koninckx et al., 2015). The absence of gluten interferes with  
120 the rheological characteristics of the dough, which are strictly associated with the final quality  
121 of the products. Therefore, it is necessary to use food ingredients and/or additives that seek to  
122 compensate for this viscoelasticity characteristic of the gluten-formed dough, especially in  
123 breads. Among the most commonly used food ingredients/additives are starches and  
124 hydrocolloids. Regarding hydrocolloids, the most used for formulating gluten-free foods are  
125 xanthan gum, guar gum, hydroxypropyl methylcellulose, and carboxymethylcellulose (Coronel  
126 et al., 2021; Marchetti et al., 2020; Milde et al., 2020; Patiño-Rodríguez et al., 2018).

127 The nutritional quality of gluten-free products available on the market is almost always  
128 inferior when compared to the traditional gluten-containing version. They are usually more  
129 calorie-dense, with a high glycemic index and/or glycemic load, lower in vitamins, especially  
130 B vitamins, minerals, and proteins, and with a higher content of fats and sodium (Arslain et al.,  
131 2021; Cervini et al., 2021; Coronel et al., 2021; da Costa Borges et al., 2021; Föste et al., 2020;  
132 Sahagún et al., 2018).

133 The development of gluten-free products enriched with ingredients of good nutritional  
134 density and/or functional properties has been requested by the market. Several options have

135 been considered, including pseudo cereal, legume, nut, vegetable, and fruit flours (Drabińska  
136 et al., 2018; Föste et al., 2020; Gutiérrez, 2018; Martínez-Villaluenga et al., 2020; Patiño-  
137 Rodríguez et al., 2018; Tasnim et al., 2020; Xu et al., 2020). Studies are being conducted with  
138 the aim of meeting this market demand, considering the high cost that this category of products  
139 represents, and seeking to take advantage of the potential of foods, evaluating the possibility of  
140 using byproducts of industrial processing, especially from fruits and vegetables (Drabińska et  
141 al., 2018).

142

## 143 **2.2. Gluten-free products**

144

145 Gluten is present in grains of wheat, rye, and barley. Oats may also contain gluten due  
146 to cross-contamination with some of these cereals during harvesting, transportation, storage,  
147 and processing (Parsons et al., 2021; Smulders et al., 2018; Xhaferaj et al., 2020; Xu et al.,  
148 2020). Foods made from these grains are sources of gluten and are commonly consumed  
149 worldwide, including bread, cookies, and cakes, as well as pasta, snacks, and breakfast cereals  
150 (Tasnim et al., 2020; Xu et al., 2020).

151

## 152 **3. Cakes**

153

154 Cakes are bakery products and are among the most produced foods worldwide. They  
155 are complex systems that include foams (air dispersed in an aqueous phase) and/or emulsions  
156 (oil droplets dispersed in a continuous aqueous phase) and are considered thermodynamically  
157 unstable systems (Burbano et al., 2022; Xu et al., 2020). Typically, they are composed of a  
158 mixture of flour, sugar, eggs, fat/oil, and leavening agents, characterized by having dense  
159 masses, flexible and elastic airy crumb, slightly moist (18 to 28% moisture), and sweet (Ammar  
160 et al., 2021; Das & Bhattacharya, 2019; Pycarelle et al., 2019; Tasnim et al., 2020; Wilderjans  
161 et al., 2010; Wilderjans et al., 2013; Xu et al., 2020).

162

163 The classification of cakes can be performed based on their composition and preparation  
164 technique (Tasnim et al., 2020; Xu et al., 2020). Considering the composition, cakes can be  
165 classified into high or low ratio cakes. This classification takes into account the proportion of  
166 sugar and flour used in the formulation. When the amount of sugar is greater than the amount  
167 of flour, i.e., a ratio greater than 1.0, it is a high ratio cake. When the amount of sugar is less  
168 than or equal to the amount of flour, i.e., a ratio less than or equal to 1.0, it is a low ratio cake  
(Wilderjans et al., 2013).

169 By combining the formulation composition and preparation technique, cakes can be  
170 classified into three types: (i) batter cakes, such as pound cake, where the main ingredients are  
171 flour, sugar, egg, fat, and baking powder; (ii) foam cakes, like sponge cake, with the main  
172 ingredients being egg, flour, and sugar; (iii) chiffon cakes, which are a combination of batter  
173 and foam cakes (Pycarelle et al., 2019; Wilderjans et al., 2013; Xu et al., 2020).

174 The most common cakes include traditional cake and sponge cake. The traditional cake  
175 is moist, soft, and velvety. It contains fat and leavening agents such as baking powder, made  
176 from an emulsion-based batter, of the oil-in-water (OW) type, with a continuous aqueous phase.  
177 Sponge cake is a fat-free cake, and its volume is derived from air trapped in beaten eggs and  
178 steam generated during baking (Pycarelle et al., 2019; Sahagún et al., 2018; Xu et al., 2020).

179

### 180 **3.1. Gluten-free cakes**

181

182 To better understand the development of gluten-free cakes, it is necessary to understand  
183 the functionality of wheat flour in this type of product. The wheat flour used for cake production  
184 is preferably soft wheat flour (*Triticum aestivum* L.) with a lower protein content (8-11%)  
185 (Wilderjans et al., 2013). Cake mix is a complex system and a complete understanding of the  
186 contribution of each ingredient has not been established (Blanchard et al., 2012).

187 Wheat flour is the main ingredient of cakes, and its composition mainly comprises  
188 starch, which represents 70-80%, and proteins, between 8-14% (Blanchard et al., 2012;  
189 Wilderjans et al., 2013). Gluten, its main protein, in cakes, will not fully develop into a  
190 viscoelastic structure as it does in bread. Factors such as the high concentration of sugar, neutral  
191 pH, lower mechanical force applied, and gluten dilution among liquid ingredients contribute to  
192 this behavior, which is desired in this type of product, as it results in a softer and velvety crumb  
193 (Paesani et al., 2021; Wilderjans et al., 2013).

194 The fact that gluten does not need to fully develop, as in bread, leads to the belief that  
195 substituting wheat flour in cakes would not be a limitation, as the development of gluten in  
196 cakes is not as desirable. However, the contribution of wheat flour to the texture of the cake  
197 batter is essential for the elaboration of this product, where the water absorption capacity of  
198 wheat flour acts to increase the viscosity of the batter, which in turn restricts the coalescence of  
199 fat particles and gas cells, favoring the formation of a stable emulsion (Sahagún et al., 2018;  
200 Wilderjans et al., 2013). Therefore, this is the great challenge of substituting wheat flour in  
201 gluten-free cakes, since the viscosity of the batter is crucial for cakes (Burbano et al., 2022;  
202 Sahagún et al., 2018; Tasnim et al., 2020; Wilderjans et al., 2013; Xu et al., 2020).

203           In order for the substitution of wheat flour in gluten-free cakes to be effective, some  
204 factors must be considered, such as the type of flour, the particle size of the flour, and the  
205 presence or absence of food additives (Xu et al., 2020). Therefore, aiming to meet the demand  
206 of the market for gluten-free products, with cakes being one of the most sought-after products  
207 in this market, different ingredients and technologies are being researched with the goal of  
208 replacing wheat flour in them, attempting not to compromise the sensory quality of the final  
209 product and seeking to add nutritional quality, which is compromised in products commonly  
210 found in the market.

211

### 212           **3.1.1. Substitution of wheat flour and nutritional quality of gluten-free cakes**

213

214           Attributes such as mild flavor, easy digestion, and hypoallergenic properties make  
215 refined rice flour one of the main substitutes for wheat flour in gluten-free cakes (Aleman et al.,  
216 2021), followed by corn starch. However, from a nutritional standpoint, these substitutes are  
217 more calorie-dense, have a high glycemic index, lower content of vitamins, minerals, proteins,  
218 and are poor in fiber (Arslain et al., 2021; Xu et al., 2020), which contributes to a reduction in  
219 the nutritional quality of gluten-free cakes.

220

221           In the study on the enrichment of gluten-free cake batters with dietary fibers from orange  
222 peel and orange bagasse powder, Ozyigit et al. (2020) found that the high content of total,  
223 soluble and insoluble dietary fiber not only contributed to the nutritional enrichment of cakes,  
224 but also that the addition of orange bagasse powder significantly affected the viscoelastic  
225 properties of cake batters and improved the quality of gluten-free cakes. Meanwhile, Aleman  
226 et al. (2021) described the development of a protein-enriched gluten-free flour blend with rice  
227 flour for the production of cupcakes, aiming to achieve improvements in the nutritional quality  
228 of this product.

229

230           The application of pecan nut hull flour, in partial substitution of a gluten-free pre-mix  
231 based on cassava starch, corn starch, and white rice flour, was the focus of a research that aimed  
232 to evaluate the quality characteristics, including nutritional, in the development of gluten-free  
233 muffins. The findings were encouraging, with an increase in fiber content, polyunsaturated fatty  
234 acid levels, and antioxidant capacity, which was three to four times higher than the control  
235 (Marchetti et al., 2021). Discoveries of this nature are powerful because they not only present  
236 new possibilities for applying an industrial byproduct, such as pecan nut hulls, but also  
positively contribute to the environment, reducing the possibility of inadequate disposal and  
excessive production of industrial waste.

### 3.1.2. Effects of wheat flour substitution on the properties of gluten-free cake batters

From a technological point of view, initially, the quality of a gluten-free cake depends on the batter, as it will determine the final quality of the product. The choice of raw material and adequate processing are important, but the rheology of the batter is crucial to ensure a cake with acceptable sensory characteristics (Amin et al., 2021; Marchetti et al., 2020).

A gluten-free cake of quality needs to be soft, with adequate volume, structured and uniform crumb, and able to maintain these characteristics for a reasonable period of time, i.e., have good aging tolerance (Amin et al., 2021). These characteristics are closely related, among other factors, to the viscosity of the cake batter, which in turn influences air retention. If the viscosity is too low, the trapped gas will be lost during baking, and if it is too high, the density of the batter will prevent its expansion, resulting in a low-quality, dense cake (Burbano et al., 2022; Sahagún et al., 2018; Tasnim et al., 2020; Wilderjans et al., 2013; Xu et al., 2020). Table 1 summarizes the substitutes for wheat flour in the development of gluten-free cakes and their batter and cake properties.

The factors that influence the viscosity of the batter include the method and degree of grinding, type of flour and/or starch, and the presence or absence of food additives in the batter, especially hydrocolloids (Coronel et al., 2021; Marchetti et al., 2020; Milde et al., 2020; Patiño-Rodríguez et al., 2018; Xu et al., 2020).

Considering the viscosity of cake batters in gluten-free formulations, Paesani et al. (2021) replaced 100% of a gluten-free premix (control) based on refined corn flour with whole corn flour, extruded stabilized whole corn flour, and extruded stabilized whole corn flour with bran and germ. They found that the control batter, batter with whole corn flour, and batter with extruded stabilized whole corn flour did not show significant differences. However, the batter with extruded stabilized whole corn flour with bran and germ showed higher viscosity. This result may be related to the water absorption capacity, which was higher for this flour, which is related to the gelatinization of the starch present in it, due to the extrusion treatment to which it was subjected. It is important to consider that the total, soluble, and insoluble dietary fiber content did not show significant differences among the studied flours, and that these values are higher compared to the control, suggesting that the content of dietary fibers, independently, did not have a direct interference in the viscosity results. Ozyigit et al. (2020) found different results in their study on the effect of enriching gluten-free cakes with dietary fibers from orange peel powder and orange fiber at different substitution levels (4%, 8%, 12%, and 16%). The authors

270 concluded that the addition of dietary fiber significantly altered the viscoelastic behavior, in a  
271 nonlinear way, of gluten-free cake batters.

272 A similar result was found by Sahagún et al. (2018) with the incorporation of different  
273 proteins (rice protein, pea protein, egg white protein, and whey protein) at different substitution  
274 levels (15%, 30%, and 45%) in gluten-free cake formulations, with rice flour as the gluten-free  
275 premix (control). The viscosity of all samples increased with the addition of proteins, with  
276 higher values for pea protein. Overall, the increase in viscosity was directly proportional to the  
277 increase in substitution level of the flours. The water-binding capacity would justify the higher  
278 viscosity results for the doughs developed with vegetable proteins, since this parameter was  
279 superior among them. The higher foam-forming capacity explains the increase in viscosity in  
280 doughs made with animal proteins, since viscosity increases with the amount of air incorporated  
281 into the dough.

282 Bhinder et al. (2022), evaluating the rheological behavior of gluten-free muffin batters,  
283 with substitution of rice flour (control) by native and germinated tartary buckwheat flour for  
284 24, 48, 72, and 96 hours, at substitution levels of 20% and 40% relative to the control, observed  
285 that all gluten-free batters showed an increase in viscoelastic functions, with the storage  
286 modulus ( $G'$ ) higher than the loss modulus ( $G''$ ), determining a characteristic soft gel behavior,  
287 possibly due to the increase in protein content of the batters with the increase in incorporation  
288 of native and germinated tartary buckwheat flour. This increase in viscoelastic functions  
289 occurred both due to the increase in the level of flour substitution and the increase in the  
290 germination period.

291 Burbano et al. (2022) evaluated the paste properties of a gluten-free cake batter, with a  
292 pre-mixture (control) based on rice flour, cassava starch, and corn starch, by applying different  
293 levels of substitution of walnut flour (10%, 15%, and 20%). They found that the increase in  
294 walnut flour addition resulted in a significant reduction in peak viscosity, minimum viscosity,  
295 and retrogradation tendency. This behavior can be explained by the reduction in the  
296 concentration of total starch associated with moderate swelling of starch granules and the  
297 presence of lipids derived from walnut flour, which may have favored the formation of amylose-  
298 lipid complexes or be related to the melting and solidification of lipids during the heating and  
299 cooling process applied during the analysis.

300 Amin et al. (2021) conducted a study on the application of enzymatically hydrolyzed  
301 rice flour, with total substitution compared to the control (based on rice flour). The authors  
302 found that the experimental cake batter showed higher viscosity compared to the control batter,  
303 and this result was associated with the higher content of resistant starch in the enzymatically

304 hydrolyzed rice flour, since resistant starch has limited capacity to bind with water and  
305 solubilize, resulting in higher viscosity.

306 The volume and texture of cakes are related to the density of the batter. It is expected  
307 that less dense batters will result in more voluminous cakes, since density is related to the  
308 incorporation of air into the batter, where higher incorporation of air results in lower density of  
309 the batter, however, it does not establish the size and distribution of the bubbles (Amin et al.,  
310 2021).

311 In the study conducted by Paesani et al. (2021), the density of batters with whole grain  
312 corn flour (WG), extrusion-stabilized whole grain corn flour (WG-S), and extrusion-stabilized  
313 whole grain corn flour with bran and germ (WG-SBG), showed contradictory effects, as the  
314 WG batter had reduced density, the WG-S batter had increased density, and the WG-SBG batter  
315 showed no change, all in relation to the control. The water-binding capacity, fiber content, and  
316 particle size could not be related to this behavior, as both are the same for WG and WG-S.

317 Sahagún et al. (2018) observed different behaviors in the density of gluten-free cake  
318 batters enriched with different protein sources. Rice protein and egg white promoted a reduction  
319 in batter density as the substitution level increased (15%, 30%, and 45%). The justification for  
320 this behavior, considering the batters' microstructure, is related to the increase in bubble  
321 formation capacity. Rice protein favored the formation of larger bubbles (coalescence effect),  
322 and egg white favored the formation of a greater number of smaller bubbles, certainly due to  
323 its well-known foaming property. The addition of pea protein had no effect on density. Whey  
324 protein had a distinct behavior, with an increase in batter density for the lowest substitution  
325 level (15%), no change for the intermediate level (30%), and a considerable drop in density for  
326 the highest substitution level (45%), in this case, with the formation of bubbles in greater  
327 quantity and size. Still considering the batters' microstructure, among the vegetable proteins,  
328 the coalescence effect was observed, and among the animal proteins, the foaming property  
329 favored bubble formation and stability.

330 Ozyigit et al. (2020) found that the addition of orange bagasse powder fiber to the  
331 gluten-free cake batter favored the incorporation of air into the batter, consequently reducing  
332 its density. A similar result was found by Amin et al. (2021) when they applied enzymatically  
333 hydrolyzed rice flour to gluten-free cupcake batter, resulting in a batter with lower density.  
334 They attributed this behavior to the higher content of resistant starch present in the flour, which  
335 would be responsible for the increased incorporation of air into the batter.

336 The viscosity of gluten-free cake batters is compromised by the absence of the  
337 viscoelasticity provided by gluten, naturally present in wheat flour. The use of food additives

338 such as hydrocolloids is frequently studied and employed with the aim of compensating for this  
339 limitation, as the viscosity of cake batters is directly related to their final quality (Coronel et al.,  
340 2021; Marchetti et al., 2020; Milde et al., 2020; Patiño-Rodríguez et al., 2018). Marchetti et al.  
341 (2020) evaluated the effect of adding bacterial nanocellulose to the rheological properties of  
342 gluten-free muffin batters. The results showed that the higher the level of addition of bacterial  
343 nanocellulose, the higher the hardness, consistency index, viscosity, and cohesiveness of the  
344 batters. The authors justified this behavior by the high gelation capacity and water absorption  
345 of the bacterial nanocellulose. Intermediate levels of bacterial nanocellulose addition (0.12 -  
346 0.18 g 100 g<sup>-1</sup>) showed better results for viscosity.

347

### 348 **3.1.3. Properties of gluten-free cakes**

349

350 The final quality of a cake is related to the characteristics of its crumb, and therefore, it  
351 is expected to be porous, elastic and slightly moist (Ammar et al., 2021; P. C. Das et al., 2019;  
352 Pycarelle et al., 2019; Tasnim et al., 2020; Wilderjans et al., 2010; Wilderjans et al., 2013; Xu  
353 et al., 2020), thus, evaluating the specific volume and texture of the cake is essential to  
354 understand if a certain formulation has achieved the desired characteristics.

355 In cakes, specific volume is related to the gas incorporated and retained in the batter,  
356 which in turn is related to its viscosity and density. As mentioned earlier, viscosity should not  
357 be low enough to allow the cake to rise quickly during baking and for the incorporated air to be  
358 lost, nor should it be excessively high, hindering the expansion of the batter during processing  
359 and baking. The development of a voluminous cake is desired both sensorially and  
360 technologically, as adequate volume is almost always related to a quality cake, positively  
361 impacting texture properties (Burbano et al., 2022; Ozyigit et al., 2020; Paesani et al., 2021;  
362 Storck et al., 2021).

363 Storck et al. (2021) incorporated native and phosphorylated sorghum flours into gluten-  
364 free cakes at different substitution levels. In relation to the control, there was no difference in  
365 specific volume in formulations with native flour, but an increase in specific volume was  
366 observed in cakes with 20%, 40%, and 50% substitution with phosphorylated flour. Comparing  
367 only the native and phosphorylated flours, the substitutions with 20% and 40% of  
368 phosphorylated flour showed higher specific volume. These results indicate that the  
369 phosphorylation process of sorghum flour contributed to the increase in specific volume of  
370 gluten-free cakes. This behavior may be related to the thermodynamic characteristics that were  
371 slightly increased in the phosphorylated flour, since the cake expansion is related to the starch

372 gelatinization temperature, where the higher the gelatinization temperature, the higher the level  
373 of expansion of the dough and the higher the expected specific volume (Gularte et al., 2012).

374 In gluten-free cake formulations, Lancetti et al. (2020) found that the specific volume  
375 of muffins enriched with yacon flour was not altered. This is different from the results presented  
376 by Paesani et al. (2021), who had better results for specific volume increase with the control  
377 cake made with refined corn flour and the cake made with whole corn flour. The authors pointed  
378 out this result as contradictory since they expected the higher fiber content of whole corn flour  
379 to negatively impact the specific volume. Ozyigit et al. (2020) found that the enrichment with  
380 dietary fiber increased the specific volume of gluten-free cakes compared to the control sample,  
381 with a directly proportional relationship where the higher the level of fiber substitution (orange  
382 bagasse powder and orange fiber), the higher the specific volume, but the maximum substitution  
383 level was 16%. This effect was associated with the high-water retention capacity of the fibers  
384 used. The difference in these results indicates that when analyzing the specific volume, the fiber  
385 source is more relevant than just its presence (Gularte et al., 2012).

386 The specific volume in gluten-free muffins enriched with proteins was found to be  
387 influenced by the protein source. Sahagún et al. (2018) pointed out that the addition of animal  
388 proteins positively impacted the specific volume. It was observed that the higher the percentage  
389 of animal protein substitution, the higher the specific volume of the cakes. On the other hand,  
390 the incorporation of pea and rice plant proteins did not influence the specific volume. Aleman  
391 et al. (2021) found that the inclusion of high-protein brown rice flour resulted in cupcakes with  
392 a lower specific volume. In both cases, the effect may be related to the viscosity of the batter,  
393 which needs to be well adjusted to favor its expansion.

394

#### 395 **3.1.4. Texture profile in gluten-free cakes**

396

397 The evaluation of the texture of a cake considers data on hardness, elasticity, chewiness,  
398 and cohesiveness. Hardness refers to resistance to deformation, that is, it represents the  
399 maximum force required to compress the dough until it reaches a previously defined percentage  
400 value. Elasticity relates to the tendency of a material to withstand the deformation action during  
401 a compressive force and return to its initial shape/size, representing the elastic recovery of a  
402 material. Chewiness is a property that defines the sustained and elastic resistance of a material  
403 (hardness x cohesiveness x elasticity), corresponding to the energy required to chew a certain  
404 food, and if it is high, it represents an undesirable characteristic (Bhinder et al., 2022; Hopkin  
405 et al., 2022; Marchetti et al., 2021; Storck et al., 2021). Cohesiveness during chewing is

406 negatively associated with the food's disintegration rate. Strong cohesion in food can be related  
407 to better tolerance in the manufacturing process and adaptation to packaging, increasing the  
408 guarantee that the product will reach the consumer with its preserved characteristics (Hopkin et  
409 al., 2022; Lancetti et al., 2020; Storck et al., 2021).

410 Chemically modified flours are an alternative to improve the properties of native flour  
411 and expand and/or enhance its possibilities of application. In gluten-free cakes, it becomes  
412 especially attractive by increasing the swelling power and solubility index of starch granules,  
413 as well as contributing to the reduction of retrogradation, favoring the development of products  
414 with better final quality (Caballero et al., 2016; Eliasson, 2018; Pang et al., 2019; Storck et al.,  
415 2021). Storck et al. (2021) developed gluten-free cakes with native sorghum flour and  
416 chemically modified by phosphorylation at different levels of substitution compared to the  
417 control. When comparing the cakes developed with native and phosphorylated flour, the authors  
418 observed that the phosphorylation process reduced hardness. With the use of native flour,  
419 hardness increased as the level of substitution in the formulation increased. In addition,  
420 phosphorylated sorghum flour promoted a reduction in chewiness at higher levels of  
421 substitution (40% and 50%), an increase in cohesiveness at lower levels of substitution (10%  
422 and 20%), and no change in elasticity was registered. They concluded that substituting a gluten-  
423 free premix based on rice flour and corn starch with native and phosphorylated sorghum flour  
424 is feasible up to 50%.

425 Paesani et al. (2021) evaluated the application of whole corn flour, fully stabilized whole  
426 corn flour by extrusion, and whole corn flour with stabilized bran and germ by extrusion in the  
427 development of gluten-free cakes and observed changes in cake texture characteristics as a  
428 function of processing. Cakes obtained with extruded flours were harder than control cakes and  
429 cakes made with whole flour, showing an inverse relationship with specific volume. Elasticity  
430 was higher for all whole flours studied compared to the control. There was no significant  
431 difference between the whole flours studied and the control for cohesiveness. The cakes were  
432 subjected to sensory evaluation and all were rated as acceptable by consumers, with a score  
433 higher than 5 for all evaluated parameters.

434 Sahagún et al. (2018) found that the hardness of cakes developed with animal proteins  
435 (egg white and whey) was significantly higher, at all substitution levels (15%, 30%, and 45%),  
436 compared to cakes substituted with vegetable protein (rice and pea), with a highlight for cakes  
437 with egg white protein, which not only presented substantially higher values but also had their  
438 values increased proportionally as the substitution level in the formulations increased. For whey  
439 protein, these results were related to its high solubility, reducing the availability of water for

440 sugar solubilization in the dough, favoring its crystallization when exposed to heat and  
441 modifying the cake's texture. The same justification can be related to cakes with egg white,  
442 added to the coagulation characteristic of this protein when denatured by exposure to high  
443 temperatures, resulting in firmer cakes. Vegetable proteins had a lesser effect on hardness, and  
444 only cakes with 45% pea protein were significantly harder. The inclusion of vegetable proteins  
445 reduced elasticity and cohesion, while animal proteins increased the elasticity and cohesion of  
446 the cakes. In the sensory evaluation of cakes with 30% protein and those enriched with animal  
447 protein (whey and egg white), they were better evaluated. The authors concluded that enriching  
448 gluten-free cakes with proteins is feasible up to 45% substitution, where animal proteins gather  
449 the best characteristics, but a mixture of these, animal and vegetable proteins, can be a viable  
450 alternative.

451 In a study with different mixtures of brown high protein rice flour, tapioca starch and  
452 potato starch, at different substitution levels, Aleman et al. (2021) found that cupcakes made  
453 with brown high protein rice flour had greater hardness. This behavior can be justified by the  
454 low onset and peak viscosity temperature of the flour, resulting in lower expansion and specific  
455 volume, which in turn has an inversely proportional relationship with hardness (Gularte et al.,  
456 2012). The results for hardness were reflected in the results for chewiness, where higher  
457 hardness led to higher chewiness. Intermediate levels of brown high protein rice flour had a  
458 negative influence on elasticity, which is undesirable in gluten-free formulations, since  
459 viscoelasticity is the property lost and desired when removing gluten entirely from a  
460 formulation (Coronel et al., 2021). In this study, it was possible to observe that the addition of  
461 tapioca and potato starches to brown high protein rice flour positively contributed to the texture  
462 properties of the cupcakes, increasing the viability of using brown rice flour.

463 The enrichment of gluten-free cakes with orange peel and orange fiber was studied by  
464 Ozyigit et al. (2020). When evaluating the texture properties, the authors found that the  
465 incorporation of fibers significantly decreased the hardness of the cakes, with the exception of  
466 the cake with 16% orange peel powder. This behavior was also observed for elasticity and  
467 cohesiveness, which decreased with increasing levels of dietary fiber, except for cakes with 8%  
468 orange fiber. These results demonstrate the feasibility of enriching gluten-free cakes with these  
469 dietary fibers, both due to the improvement in texture characteristics and the nutritional benefits  
470 provided by the addition of dietary fibers.

471 Looking to apply pecan nut cake flour, an industrial residue, as a potential ingredient in  
472 increasing dietary fiber, polyunsaturated fats and antioxidant capacity, Marchetti et al. (2021)  
473 studied the enrichment of gluten-free muffins with this byproduct, aiming to improve not only

474 the nutritional quality, but also the technological performance. Under the studied conditions,  
475 the contribution of the flour to texture properties was significant, probably due to its high-water  
476 retention capacity, resulting in a reduction in hardness, a slight increase in elasticity, a reduction  
477 in chewiness, and only for muffins with 20% substitution, interference in cohesiveness, with a  
478 slight reduction.

479 Traditional gluten-free products are invariably high in carbohydrates. Currently, the  
480 practice of diets that restrict carbohydrate intake has increased, such as ketogenic diets and low-  
481 carbohydrate diets, as well as diets in which restriction is imposed due to health conditions,  
482 such as diabetes mellitus, for which carbohydrate control is part of the treatment (Dening &  
483 Islam, 2020; O'Neill & Raggi, 2020). In an attempt to meet the demand for a gluten-free product  
484 with low carbohydrate content, Hopkin et al. (2022) investigated the application of almond  
485 flour, coconut flour, and their mixture in the development of cupcakes over time (24 h, 72 h,  
486 and 120 h). Reduction in hardness was associated with higher amounts of almond flour, and its  
487 increase was associated with the addition of higher levels of coconut flour. The impact of time  
488 on hardness was not expected, since the formulations were free of starch, but overall, there was  
489 an increase in hardness over the storage time, which was associated with naturally predicted  
490 water loss. The high fat and protein content present in the flours may justify the fact that  
491 elasticity was not affected in any formulation and at any time interval.

492 Bhinder et al. (2022) applied native and germinated tartary buckwheat flour (for 24, 48,  
493 72, and 96 hours) in the development of gluten-free muffins, with substitution levels of 20%  
494 and 40% compared to the control. Cereal germination is a simple but highly relevant technology  
495 that favors the bioavailability of nutrients and phytochemicals, reduces anti-nutritional factors,  
496 improves digestibility, adds nutritional value, and expands consumption and application  
497 possibilities (Gabriele & Pucci, 2022). In general, the incorporation of tartary buckwheat flour  
498 resulted in a significant reduction in muffin hardness, but longer germination time favored the  
499 formation of harder muffins, with muffins containing 40% flour and germinated for 96 hours  
500 presenting the highest hardness values. Elasticity was increased with the incorporation of  
501 germinated tartary buckwheat flour. The best result was obtained for a medium fermentation  
502 time (48 hours) with 20% substitution, while longer germination times (72 and 96 hours)  
503 resulted in less elastic muffins. Cohesiveness was reduced with prolonged germination. The  
504 low water absorption capacity of flours with prolonged fermentation (96 hours) associated with  
505 a reduction in starch content, high sugar content, and low foam stability are the justifications  
506 associated with these results.

507 **Table 1:** Effects of Wheat Flour Replacement on the Properties of Gluten-Free Doughs and Cakes.  
508

Wheat flour substitute	Use of additives	Dough properties	Cake properties	Reference
Gluten-free premix (control) based on rice flour and corn starch.  <b>Study:</b> Native and chemically modified (FSN) sorghum flour by phosphorylation (FSF) (10, 20, 30, 40 and 50%)*.	Xanthan gum -0,3%.	N/D	<b>Specific volume:</b> FSN - no change; FSF - increase;  <b>Elasticity:</b> FSN and FSF - no change;  <b>Hardness:</b> FSN – increase; FSF - reduction;  <b>Chewability:</b> FSF - reduction;  <b>Cohesiveness:</b> FSF - increase;	Storck et al., 2021
Gluten-free premix (control) based on refined corn flour.  <b>Study:</b> Whole corn flour (WG), fully extrusion stabilized whole corn flour (WG-S) and extrusion stabilized whole corn flour with bran and germ separately and remixed respecting the original ratio (WG-SBG) (100%)*	N/D	<b>Density:</b> WG - reduced; WG-S - increased; WG-SBG - no change.  <b>Viscosity:</b> WG-SBG - higher.	<b>Specific volume:</b> WG-S and WG-SBG - smaller; WG - no change;  <b>Elasticity:</b> WG, WG-S and WG-SBG - greater;  <b>Hardness:</b> WG-S and WG-SBG - increase; WG - no change;  <b>Cohesiveness:</b> There was no change in any of the formulations.	Paesani et al., 2021

Gluten-free premix (control) based on rice flour.	N/D	<p><b>Density:</b> PA and PO - reduced;</p> <p><b>Viscosity:</b> PA, PE, PO and PSL - increased.</p>	<p><b>Specific volume:</b> PO and PSL - greater; PA and EP - unchanged (except 45%);</p> <p><b>Elasticity:</b> PA and PE - reduction; PO and PSL - increase;</p> <p><b>Cohesiveness:</b> PA and PE - reduction; PO and PSL - increase.</p>	Sahagún et al., 2018
Gluten-free premix (control) based on rice flour and buckwheat flour (8:2)	Xanthan Gum - 0.5g (approx. 0.1%)	<p><b>Density:</b> OPP - reduced;</p> <p><b>Viscosity:</b> OF - significantly affected properties.</p>	<p><b>Specific volume:</b> OPP and OF - increase;</p> <p><b>Elasticity:</b> OPP and OF - reduction*;</p> <p><b>Hardness:</b> OPP and OF - reduction;</p> <p><b>Cohesiveness:</b> OPP and OF - reduction*;</p> <p><b>Resilience:</b> OPP and OF - reduction*.</p>	Ozyigit et al., 2020
Gluten-free premix (control) based on rice flour, cassava starch and corn starch.	Hydroxypropylmethylcellulose (HPMC)	<p><b>Hardness:</b> FN - increase;</p>	N/D	Burbano et al., 2020

\* As the replacement percentage increases.

---

<b>Study:</b> Nut flour (FN) (10%, 15% and 20%)*.	- 22g (approx. 0.8%).	<p><b>Consistency index:</b> FN - increase;</p> <p><b>Viscosity index:</b> FN - increase;</p> <p><b>Cohesiveness index:</b> FN – increase;</p> <p><b>Linear viscoelastic range:</b> FN - reduction;</p> <p>FN: Formation of smaller oil droplets.</p>		
Gluten-free premix based on high protein brown rice flour (RF), tapioca starch (TF) and potato starch (PS).	N/D	N/D	<p><b>Specific volume:</b> PS - highest increase;</p> <p><b>Elasticity:</b> RF (intermediate levels) - negative influence;</p> <p><b>Hardness:</b> RF - highest increase;</p> <p><b>Resilience:</b> Increased RF and reduced TF - increased at most RF levels.</p>	Aleman et al., 2021

---

<p>Gluten-free premix (control) based on cassava starch, corn starch and white rice flour (2: 2: 6).</p> <p><b>Study:</b> Pecan nut bagasse flour (FBNP) (20% and 30%) *.</p>	<p>Xanthan Gum - 0.15%</p>	<p><b>Consistency:</b> FBNP - increase.</p>	<p><b>Elasticity:</b> FBNP - increase;</p> <p><b>Hardness:</b> FBNP - small reduction;</p> <p><b>Chewability:</b> FBNP - small reduction;</p> <p><b>Cohesiveness:</b> FBNP (20%) - reduction;</p> <p><b>Resilience:</b> no changes.</p>	<p>Marchetti et al., 2021</p>
<p><b>Study:</b> Almond Flour (FA), Coconut Flour (FC) and Mixed Almond Flour and Coconut Flour (FAFC).</p> <p><i>There was no control formulation.</i></p>	<p>Psyllium husk (2.0 g) and xanthan gum (0.2 g).</p>	<p>N/D</p>	<p><b>Elasticity:</b> there were no changes;</p> <p><b>Hardness:</b> Higher levels of FA - reduction; higher HR levels - increase</p> <p><b>Chewability:</b> FC (24h) chewier; FA (24h) less chewy.</p>	<p>Hopkin et al., 2022</p>
<p>Gluten-free premix (control): rice flour, tapioca starch and corn starch.</p> <p><b>Study:</b> Addition of Bacterial Nanocellulose (BNC) (0.06, 0.12, 0.18, 0.24 and 0.30 g 100 g-1) *.</p>	<p>Bacterial nanocellulose at different addition levels.</p>	<p><b>BNC (0,12 - 0,18 g 100 g<sup>-1</sup> - lower specific gravity values;</b></p> <p><b>higher BNC contents or without (control) - higher specific gravity.</b></p>	<p>N/D</p>	<p>Marchetti et al., 2020</p>

---

			<p><b>Higher BNC</b> - increase in hardness; consistency index;</p> <p>viscosity index and cohesiveness index.</p>	
			<p>All gluten-free doughs exhibited typical soft gel behavior.</p>	
<p>Gluten-free premix (control): rice flour.</p> <p><b>Study:</b> Tartary native (TBWN) and germinated (TBWG) buckwheat flours (for 24, 48, 72 and 96h) (20% and 40%) *.</p>	<p>Xanthan gum (1.5 g).</p>	<p><b>Hardness:</b> TBWN and TBWG - reduction (greater in TBWG 24 h);</p> <p><b>Elasticity:</b> TBWN and TBWG - increase (greater by 20% TBWG 48 h).</p>	<p>The longer incorporation of TBWG flours (96h) resulted in muffins with a lower specific volume, dense crumb, little aeration and fragile.</p>	<p>Bhinder et al., 2022</p>
<p>Gluten Free Premix (Control): Cornstarch.</p>	<p>N/D</p>	<p>N/D</p>	<p><b>Specific volume:</b> FV - There were no changes;</p> <p><b>Cohesiveness:</b> FV - increase;</p>	<p>Lancetti et al., 2020</p>

---

---

**Study:** Yacon flour (FV) (5% and 10%)\*.

**Hardness and chewiness:** FV - reduction;

Gluten-free premix (control): Rice flour.

**Study:** rice flour subjected to enzymatic hydrolysis (FAHE) (100%)\*.

Emulsifier (4g)

**Density:** FAHE - reduced;

**Viscosity:** FAHE - increased.

The hardness, cohesiveness, elasticity and chewiness of cakes with FAHE were significantly lower compared to the control cake.

Amin et al., 2021

---

509 \* Substitution levels of substituting ingredients relative to control.

510 \*\* Substitution levels of substituting ingredients in relation to buckwheat flour.

Yacon flour-enriched muffins (Lancetti et al., 2020) showed a significant reduction in hardness and chewiness parameters, and an increase in cohesion, regardless of the different levels of substitution, compared to the control. The main justification associated with these results is the weakening of the starch structure and egg network due to the breakdown of FOS particles between the components (Lancetti et al., 2020).

Amin et al. (2021), aiming to improve the technological quality of gluten-free pastries and cakes, subjected rice flour to enzymatic hydrolysis and used it in the development of a gluten-free cake formulation, evaluating the effect of storage (ambient and refrigerated) on texture properties. It is worth noting that enzymatic hydrolysis is a modification that does not involve the use of solvents or chemical reagents, which makes it suitable for application in food. Regarding texture properties, hardness was significantly lower in cakes with rice flour subjected to enzymatic hydrolysis, regardless of storage time and type, and this result was associated with the higher content of resistant starch in the cakes. Cohesiveness, elasticity, and chewiness were also significantly lower in cakes with rice flour subjected to enzymatic hydrolysis, regardless of storage time and type, and these behaviors were associated with higher density of the dough.

The progress in research on gluten-free product innovation goes beyond the discovery of new ingredients as substitutes for wheat flour and food additives; it also includes the application of new technologies. Tuta Şimşek (2020) studied the use of vacuum-combined cooking (VCB) on aging properties in gluten-free cake samples during a 5-day storage period. Texture changes were analyzed, and data on hardness and elasticity were observed. The hardness values of VCB cake samples were significantly lower than the control and slightly increased over the storage period, unlike the control, which had a significant increase. On the fifth day, the last day of the storage period studied, the hardness values of the control cake samples were approximately twice as high as the values of the VCB cake samples. This behavior was inversely proportional for elasticity values, which decreased while hardness values increased during the storage period. The elasticity of control samples was higher than VCB samples throughout the storage period. Despite the lower elasticity values for VCB cake compared to the control, the difference in hardness values is clearly lower over the entire storage period, making vacuum-combined cooking technology a valid technique for processing gluten-free cakes, contributing positively to texture and prolonging shelf life, which are limiting characteristics in products of this category.

When evaluating the contribution that new processing technologies, ingredients, and/or food additives have on the development of gluten-free cakes, it is reasonable to state that there are numerous possibilities for improving traditional formulations, and that limitations on nutritional and sensory quality can be overcome, including through the combination of these variables.

#### **4. Conclusion**

In recent years, there has been an increasing demand in the market for gluten-free products, justified by the need to cater to health conditions such as celiac disease, wheat allergy, and non-celiac gluten sensitivity, as well as by those who follow a gluten-free diet due to the belief that its exclusion represents a healthier diet. These products are especially represented by baked goods, which have wheat flour as their main ingredient, including cake, which is among the most produced and consumed baked goods worldwide.

Studies have been conducted with cereal flours (sorghum, corn, rice), pseudo cereals (buckwheat), starches (tapioca, potato), tubers (yacon), plant proteins (rice, pea), animal proteins (egg white and whey), food and industrial waste (coconut, orange peel powder, orange fiber, and pecan nut pulp), nuts (walnuts and almonds), and food additives (bacterial nanocellulose) in the search for fully substituting or enriching gluten-free premixes, with the aim of improving the nutritional and/or functional quality of the formulations. In addition, innovative technology has been applied (vacuum-combined cooking technology) to seek technological benefits in the development of gluten-free cakes, both aiming to overcome the limitations presented by traditional formulations based on refined rice flour and/or cornstarch.

It is possible to infer that the possibilities of substituting wheat flour and/or enriching gluten-free pre-mixes in the development of gluten-free cakes, given the data presented, have an interference on the dough properties. The combination of different flours and/or enrichment of gluten-free pre-mixes can contribute to technological performance, positively affecting viscosity, which in turn has an impact on the properties and final quality of the cake, as well as contributing to nutritional characteristics, overcoming the limitations that traditional formulations present and that represent a technological challenge. Combining these possibilities with the application of innovative processing technologies can represent a powerful alternative to intensify these results.

## 5. References

- Abedi, E., & Pourmohammadi, K. (2021). Chemical modifications and their effects on gluten protein: An extensive review. *Food Chemistry*, *343*, 128398. <https://doi.org/10.1016/J.FOODCHEM.2020.128398>
- Aleman, R. S., Paz, G., Morris, A., Prinyawiwatkul, W., Moncada, M., & King, J. M. (2021). High protein brown rice flour, tapioca starch & potato starch in the development of gluten-free cupcakes. *LWT*, *152*, 112326. <https://doi.org/10.1016/J.LWT.2021.112326>
- Amin, T., Naik, H. R., Hussain, S. Z., Rather, S. A., Makroo, H. A., Dar, B. N., Wani, S. M., & Bashir, O. (2021). Functional cake from rice flour subjected to starch hydrolyzing enzymes: Physicochemical properties and in vitro digestibility. *Food Bioscience*, *42*, 101072. <https://doi.org/10.1016/J.FBIO.2021.101072>
- Ammar, I., Gharsallah, H., Ben Brahim, A., Attia, H., Ayadi, M. A., Hadrich, B., & Felfoul, I. (2021). Optimization of gluten-free sponge cake fortified with whey protein concentrate using mixture design methodology. *Food Chemistry*, *343*, 128457. <https://doi.org/10.1016/J.FOODCHEM.2020.128457>
- Arslain, K., Gustafson, C. R., Baishya, P., & Rose, D. J. (2021). Determinants of gluten-free diet adoption among individuals without celiac disease or non-celiac gluten sensitivity. *Appetite*, *156*, 104958. <https://doi.org/10.1016/J.APPET.2020.104958>
- Bathrellou, E., Kontogianni, M. D., & Panagiotakos, D. B. (2018). Celiac disease and non-celiac gluten or wheat sensitivity and health in later life: A review. *Maturitas*, *112*, 29–33. <https://doi.org/10.1016/J.MATURITAS.2018.03.014>
- Bhinder, S., Singh, N., & Kaur, A. (2022). Impact of germination on nutraceutical, functional and gluten free muffin making properties of Tartary buckwheat (*Fagopyrum tataricum*). *Food Hydrocolloids*, *124*, 107268. <https://doi.org/10.1016/J.FOODHYD.2021.107268>
- Blanchard, C., Labouré, H., Verel, A., & Champion, D. (2012). Study of the impact of

- wheat flour type, flour particle size and protein content in a cake-like dough: Proton mobility and rheological properties assessment. *Journal of Cereal Science*, 56(3), 691–698. <https://doi.org/10.1016/J.JCS.2012.08.005>
- Burbano, J. J., Cabezas, D. M., & Correa, M. J. (2022). Effect of walnut flour addition on rheological, thermal and microstructural properties of a gluten free-batter. *LWT*, 154, 112819. <https://doi.org/10.1016/J.LWT.2021.112819>
- Caballero, B., Finglas, P. M., Toldrá, F. (2016). *Encyclopedia of Food and Health*. Cambridge: Academic Press. 4013p.
- Cervini, M., Frustace, A., Garrido, G. D., Rocchetti, G., & Giuberti, G. (2021). Nutritional, physical and sensory characteristics of gluten-free biscuits incorporated with a novel resistant starch ingredient. *Heliyon*, 7(3), e06562. <https://doi.org/10.1016/J.HELIYON.2021.E06562>
- Chaudhry, N. A., Jacobs, C., Green, P. H. R., & Rampertab, S. D. (2021). All Things Gluten: A Review. *Gastroenterology Clinics of North America*, 50(1), 29–40. <https://doi.org/10.1016/J.GTC.2020.10.007>
- Cornicelli, M., Saba, M., Machello, N., Silano, M., & Neuhold, S. (2018). Nutritional composition of gluten-free food versus regular food sold in the Italian market. *Digestive and Liver Disease*, 50(12), 1305–1308. <https://doi.org/10.1016/J.DLD.2018.04.028>
- Coronel, E. B., Guiotto, E. N., Aspiroz, M. C., Tomás, M. C., Nolasco, S. M., & Capitani, M. I. (2021). Development of gluten-free premixes with buckwheat and chia flours: Application in a bread product. *LWT*, 141, 110916. <https://doi.org/10.1016/J.LWT.2021.110916>
- da Costa Borges, V., Fernandes, S. S., da Rosa Zavareze, E., Haros, C. M., Hernandez, C. P., Guerra Dias, A. R., & de las Mercedes Salas-Mellado, M. (2021). Production of gluten free bread with flour and chia seeds (*Salvia hispánica* L). *Food Bioscience*, 43, 101294. <https://doi.org/10.1016/J.FBIO.2021.101294>
- Damodaran, S., & Parkin, K. L (2019). *Química de Alimentos de Fennema*. 5. ed. Porto Alegre: Artmed, 2019.

- Das, A. B., & Bhattacharya, S. (2019). Characterization of the batter and gluten-free cake from extruded red rice flour. *LWT*, *102*, 197–204.  
<https://doi.org/10.1016/J.LWT.2018.12.026>
- Das, P. C., Khan, M. J., Rahman, M. S., Majumder, S., & Islam, M. N. (2019). Comparison of the physico-chemical and functional properties of mango kernel flour with wheat flour and development of mango kernel flour based composite cakes. *NFS Journal*, *17*, 1–7. <https://doi.org/10.1016/J.NFS.2019.10.001>
- Dening, J., & Islam, S. M. S. (2020). Defining a low carbohydrate diet: Proposal for a standardized consensus of carbohydrate intake (Carb-Cal Model). *Diabetes Research and Clinical Practice*, *166*, 108284.  
<https://doi.org/10.1016/J.DIABRES.2020.108284>
- Dimidi, E., Kabir, B., Singh, J., Ageridou, A., Foster, C., Ciclitira, P., Dubois, P., & Whelan, K. (2021). Predictors of adherence to a gluten-free diet in celiac disease: Do knowledge, attitudes, experiences, symptoms, and quality of life play a role? *Nutrition*, *90*, 111249. <https://doi.org/10.1016/J.NUT.2021.111249>
- Drabińska, N., Ciska, E., Szymatowicz, B., & Krupa-Kozak, U. (2018). Broccoli by-products improve the nutraceutical potential of gluten-free mini sponge cakes. *Food Chemistry*, *267*, 170–177.  
<https://doi.org/10.1016/J.FOODCHEM.2017.08.119>
- Eliasson, A. (2018) *Starch in Food: Structure, Function and Applications*. Sawston: Woodhead Publishing. 624p.
- FDA. Food and Drug Administration (2013). *Food Labeling; Gluten-Free Labeling of Foods*. Document Citation: 78 FR 47154. Retrieved from <https://www.federalregister.gov/documents/2013/08/05/2013-18813/food-labeling-gluten-free-labeling-of-foods>. Accessed October 20, 2021.
- Fornari, E., Fornari, D., Grandi, S., Iuffmann Ghezzi, A., & Menegatti, M. (2021). Taking advantage of the gluten-free opportunity: Assortment as the key driver for modern grocery retailers. *Journal of Retailing and Consumer Services*, *63*, 102747.  
<https://doi.org/10.1016/J.JRETCONSER.2021.102747>
- Föste, M., Verheyen, C., Jekle, M., & Becker, T. (2020). Fibres of milling and fruit

- processing by-products in gluten-free bread making: A review of hydration properties, dough formation and quality-improving strategies. *Food Chemistry*, 306, 125451. <https://doi.org/10.1016/J.FOODCHEM.2019.125451>
- Gabriele, M., & Pucci, L. (2022). Fermentation and germination as a way to improve cereals antioxidant and antiinflammatory properties. *Current Advances for Development of Functional Foods Modulating Inflammation and Oxidative Stress*, 477–497. <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-823482-2.00014-5>
- Gandini, A., Gededzha, M. P., De Maayer, T., Barrow, P., & Mayne, E. (2021). Diagnosing coeliac disease: A literature review. *Human Immunology*, 82(12), 930–936. <https://doi.org/10.1016/J.HUMIMM.2021.07.015>
- Guennouni, M., Admou, B., Bourrhoute, A., Elkhoudri, N., Fguirouche, A., Nibaruta, J. C., & Hilali, A. (2022). Quality of life of Moroccan children with celiac disease: Arabic translation and validation of a specific celiac disease instrument. *Journal of Pediatric Nursing*, 62, e1–e7. <https://doi.org/10.1016/J.PEDN.2021.06.011>
- Gularte, M. A., de la Hera, E., Gómez, M., & Rosell, C. M. (2012). Effect of different fibers on batter and gluten-free layer cake properties. *LWT - Food Science and Technology*, 48(2), 209–214. <https://doi.org/10.1016/J.LWT.2012.03.015>
- Gutiérrez, T. J. (2018). Plantain flours as potential raw materials for the development of gluten-free functional foods. *Carbohydrate Polymers*, 202, 265–279. <https://doi.org/10.1016/J.CARBPOL.2018.08.121>
- Henggeler, J. C., Veríssimo, M., & Ramos, F. (2017). Non-coeliac gluten sensitivity: A review of the literature. *Trends in Food Science & Technology*, 66, 84–92. <https://doi.org/10.1016/J.TIFS.2017.05.018>
- Hopkin, L., Broadbent, H., & Ahlborn, G. J. (2022). Influence of almond and coconut flours on Ketogenic, Gluten-Free cupcakes. *Food Chemistry: X*, 13, 100182. <https://doi.org/10.1016/J.FOCHX.2021.100182>
- Juhász, A., Colgrave, M. L., & Howitt, C. A. (2020). Developing gluten-free cereals and the role of proteomics in product safety. *Journal of Cereal Science*, 93, 102932. <https://doi.org/10.1016/J.JCS.2020.102932>

- Khan, A., Suarez, M. G., & Murray, J. A. (2020). Nonceliac Gluten and Wheat Sensitivity. *Clinical Gastroenterology and Hepatology*, *18*(9), 1913-1922.e1. <https://doi.org/10.1016/J.CGH.2019.04.009>
- Lancetti, R., Palavecino, P. M., Bustos, M. C., & León, A. E. (2020). Yacon (*Smallanthus sonchifolius*) flour obtention: Effect of process conditions on quality attributes and its incorporation in gluten-free muffins. *LWT*, *125*, 109217. <https://doi.org/10.1016/J.LWT.2020.109217>
- Lebwohl, B., & Rubio-Tapia, A. (2021). Epidemiology, Presentation, and Diagnosis of Celiac Disease. *Gastroenterology*, *160*(1), 63–75. <https://doi.org/10.1053/J.GASTRO.2020.06.098>
- Ma, Y., Sang, S., Xu, D., Jin, Y., Chen, Y., & Xu, X. (2021). The contribution of superheated steam treatment of wheat flour to the cake quality. *LWT*, *141*, 110958. <https://doi.org/10.1016/J.LWT.2021.110958>
- Mahroug, H., Ribeiro, M., Rhazi, L., Bentallah, L., Zidoune, M. N., Nunes, F. M., & Igrejas, G. (2019). How microwave treatment of gluten affects its toxicity for celiac patients? A study on the effect of microwaves on the structure, conformation, functionality and immunogenicity of gluten. *Food Chemistry*, *297*, 124986. <https://doi.org/10.1016/J.FOODCHEM.2019.124986>
- Marchetti, L., Acuña, M. S., & Andrés, S. C. (2021). Effect of pecan nut expeller meal on quality characteristics of gluten-free muffins. *LWT*, *146*, 111426. <https://doi.org/10.1016/J.LWT.2021.111426>
- Marchetti, L., Andrés, S. C., Cerruti, P., & Califano, A. N. (2020). Effect of bacterial nanocellulose addition on the rheological properties of gluten-free muffin batters. *Food Hydrocolloids*, *98*, 105315. <https://doi.org/10.1016/J.FOODHYD.2019.105315>
- Martínez-Villaluenga, C., Peñas, E., & Hernández-Ledesma, B. (2020). Pseudocereal grains: Nutritional value, health benefits and current applications for the development of gluten-free foods. *Food and Chemical Toxicology*, *137*, 111178. <https://doi.org/10.1016/J.FCT.2020.111178>
- Milde, L. B., Chigal, P. S., Olivera, J. E., & González, K. G. (2020). Incorporation of

- xanthan gum to gluten-free pasta with cassava starch. Physical, textural and sensory attributes. *LWT*, *131*, 109674. <https://doi.org/10.1016/J.LWT.2020.109674>
- Moleski, S. M., Shah, A., Durney, P., Matthews, M., Kaushal, G., Smith, C., Koons, K. C., Rubin, E., Casey, P., Miller, R., Miller, C., Jawairia, M., Hasan, A., & DiMarino, A. J. (2021). Symptoms of gluten ingestion in patients with non-celiac gluten sensitivity: A randomized clinical trial. *Nutrition*, *81*, 110944. <https://doi.org/10.1016/J.NUT.2020.110944>
- Möller, S. P., Hayes, B., Wilding, H., Apputhurai, P., Tye-Din, J. A., & Knowles, S. R. (2021). Systematic review: Exploration of the impact of psychosocial factors on quality of life in adults living with coeliac disease. *Journal of Psychosomatic Research*, *147*, 110537. <https://doi.org/10.1016/J.JPSYCHORES.2021.110537>
- O'Neill, B., & Raggi, P. (2020). The ketogenic diet: Pros and cons. *Atherosclerosis*, *292*, 119–126. <https://doi.org/10.1016/J.ATHEROSCLEROSIS.2019.11.021>
- Ozyigit, E., Eren, İ., Kumcuoglu, S., & Tavman, S. (2020). Large Amplitude Oscillatory Shear (LAOS) analysis of gluten-free cake batters: The effect of dietary fiber enrichment. *Journal of Food Engineering*, *275*, 109867. <https://doi.org/10.1016/J.JFOODENG.2019.109867>
- Paesani, C., Bravo-Núñez, Á., & Gómez, M. (2021). Effect of stabilized wholegrain maize flours on the quality characteristics of gluten-free layer cakes. *LWT*, *135*, 109959. <https://doi.org/10.1016/J.LWT.2020.109959>
- Parsons, K., Brown, L., Clark, H., Allen, E., McCammon, E., Clark, G., Oblad, R., & Kenealey, J. (2021). Gluten cross-contact from common food practices and preparations. *Clinical Nutrition*, *40*(5), 3279–3287. <https://doi.org/10.1016/J.CLNU.2020.10.053>
- Patiño-Rodríguez, O., Bello-Pérez, L. A., Flores-Silva, P. C., Sánchez-Rivera, M. M., & Romero-Bastida, C. A. (2018). Physicochemical properties and metabolomic profile of gluten-free spaghetti prepared with unripe plantain flours. *LWT*, *90*, 297–302. <https://doi.org/10.1016/J.LWT.2017.12.025>
- Pycarelle, S. C., Winnen, K. L. J., Bosmans, G. M., Van Haesendonck, I., Pareyt, B., Brijs, K., & Delcour, J. A. (2019). Wheat (*Triticum aestivum* L.) flour free lipid

- fractions negatively impact the quality of sponge cake. *Food Chemistry*, 271, 401–409. <https://doi.org/10.1016/J.FOODCHEM.2018.07.181>
- Ribes Koninckx, C., Dalmau Serra, J., Moreno Villares, J. M., Diaz Martín, J. J., Castillejo De Villasante, G., & Polanco Allue, I. (2015). La introducción del gluten en la dieta del lactante. Recomendaciones de un grupo de expertos. *Anales de Pediatría*, 83(5), 355.e1-355.e7. <https://doi.org/10.1016/j.anpedi.2015.03.009>
- Sahagún, M., Bravo-Núñez, Á., Báscones, G., & Gómez, M. (2018). Influence of protein source on the characteristics of gluten-free layer cakes. *LWT*, 94, 50–56. <https://doi.org/10.1016/J.LWT.2018.04.014>
- Scherf, K. A. (2019). Immunoreactive cereal proteins in wheat allergy, non-celiac gluten/wheat sensitivity (NCGS) and celiac disease. *Current Opinion in Food Science*, 25, 35–41. <https://doi.org/10.1016/J.COFS.2019.02.003>
- Smulders, M. J. M., van de Wiel, C. C. M., van den Broeck, H. C., van der Meer, I. M., Israel-Hoevelaken, T. P. M., Timmer, R. D., van Dinter, B. J., Braun, S., & Gilissen, L. J. W. J. (2018). Oats in healthy gluten-free and regular diets: A perspective. *Food Research International*, 110, 3–10. <https://doi.org/10.1016/J.FOODRES.2017.11.031>
- Storck, C. R., Fortes, C. R., Halal, S. L. M. El, Ribeiro, J. D., Montagner, G. E., Fonseca, L. M., Zavareze, E. da R., & Dias, A. R. G. (2021). Different reaction times for phosphorylation of sorghum flour (*Sorghum bicolor*): Physicochemical evaluation and application in the formulation of gluten-free cakes. *Food Bioscience*, 44, 101441. <https://doi.org/10.1016/J.FBIO.2021.101441>
- Tasnim, T., Das, P. C., Begum, A. A., Nupur, A. H., & Mazumder, M. A. R. (2020). Nutritional, textural and sensory quality of plain cake enriched with rice rinsed water treated banana blossom flour. *Journal of Agriculture and Food Research*, 2, 100071. <https://doi.org/10.1016/J.JAFR.2020.100071>
- The Commission of The European Communities. *The composition and labelling of foodstuffs suitable for people intolerant to gluten*. Commission Regulation (EC) No 41/2009. Retrieved from <http://data.europa.eu/eli/reg/2009/41/oj>. Accessed January 20, 2009.

- Tuta Şimşek, S. (2020). Multivariate analysis of staling properties in vacuum-combined baking gluten-free cake during storage. *LWT*, *131*, 109824. <https://doi.org/10.1016/J.LWT.2020.109824>
- Wang, Y., Weng, J., Zhu, C., Ai, R., Zhou, J., Wang, C., Chen, Q., & Fu, L. (2021). Allergenicity assessment and allergen profile analysis of different Chinese wheat cultivars. *World Allergy Organization Journal*, *14*(7), 100559. <https://doi.org/10.1016/J.WAOJOU.2021.100559>
- Wilderjans, E., Luyts, A., Goesaert, H., Brijs, K., & Delcour, J. A. (2010). A model approach to starch and protein functionality in a pound cake system. *Food Chemistry*, *120*(1), 44–51. <https://doi.org/10.1016/J.FOODCHEM.2009.09.067>
- Wilderjans, Edith, Luyts, A., Brijs, K., & Delcour, J. A. (2013). Ingredient functionality in batter type cake making. *Trends in Food Science & Technology*, *30*(1), 6–15. <https://doi.org/10.1016/J.TIFS.2013.01.001>
- Xhaferaj, M., Alves, T. O., Ferreira, M. S. L., & Scherf, K. A. (2020). Recent progress in analytical method development to ensure the safety of gluten-free foods for celiac disease patients. *Journal of Cereal Science*, *96*, 103114. <https://doi.org/10.1016/J.JCS.2020.103114>
- Xu, J., Zhang, Y., Wang, W., & Li, Y. (2020). Advanced properties of gluten-free cookies, cakes, and crackers: A review. *Trends in Food Science & Technology*, *103*, 200–213. <https://doi.org/10.1016/J.TIFS.2020.07.017>

