

UNIVERSIDADE FEDERAL DE PELOTAS
Faculdade de Agronomia Eliseu Maciel
Programa de Pós-Graduação em Ciência e Tecnologia de Alimentos



Tese

Bioacessibilidade de compostos fenólicos após a digestibilidade de amido de arroz de pericarpo preto e vermelho submetidos a diferentes métodos de pré-cocção, cocção e pós-cocção

Caroline Lambrecht Dittgen
Engenheira Agrônoma

Pelotas, 2023

Caroline Lambrecht Dittgen

Bioacessibilidade de compostos fenólicos após a digestibilidade de amido de arroz de pericarpo preto e vermelho submetidos a diferentes métodos de pré-cocção, cocção e pós-cocção

Tese apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Ciência e Tecnologia de Alimentos da Faculdade de Agronomia Eliseu Maciel da Universidade Federal de Pelotas, como requisito parcial à obtenção do título de Doutora em Ciência e Tecnologia de Alimentos.

Orientador: Prof. Dr. Nathan Levien Vanier

Coorientadora: Profa. Dra. Ya-Jane Wang

Pelotas, 2023

Universidade Federal de Pelotas / Sistema de Bibliotecas
Catalogação na Publicação

D617b Dittgen, Caroline Lambrecht

Bioacessibilidade de compostos fenólicos após a digestibilidade de amido de arroz de pericarpo preto e vermelho submetidos a diferentes métodos de pré-cocção, cocção e pós-cocção / Caroline Lambrecht Dittgen ; Nathan Levien Vanier, orientador ; Ya-Jane Wang, coorientador. — Pelotas, 2023.

89 f. : il.

Tese (Doutorado) — Ciência e Tecnologia de Alimentos, Faculdade de Agronomia Eliseu Maciel, Universidade Federal de Pelotas, 2023.

1. Arroz pigmentado. 2. Bioacessibilidade. 3. Cocção. 4. Compostos fenólicos. 5. Digestibilidade. I. Vanier, Nathan Levien, orient. II. Wang, Ya-Jane, coorient. III. Título.

CDD : 641.3318

Caroline Lambrecht Dittgen

Bioacessibilidade de compostos fenólicos após a digestibilidade de amido de arroz de pericarpo preto e vermelho submetidos a diferentes métodos de pré-cocção, cocção e pós-cocção

Tese apresentada, como requisito parcial para a obtenção do grau de Doutora em Ciência e Tecnologia de Alimentos, Programa de Pós-Graduação em Ciência e Tecnologia de Alimentos, Faculdade de Agronomia Eliseu Maciel, Universidade Federal de Pelotas.

Data da defesa: 27 de setembro de 2023.

Banca examinadora:

Prof. Dr. Nathan Levien Vanier (orientador). Doutor em Ciência e Tecnologia de Alimentos pela Universidade Federal de Pelotas.

Dr^a Dianini Hüttner Kringel. Doutora em Ciência e Tecnologia de Alimentos pela Universidade Federal de Pelotas.

Dr^a Elessandra da Rosa Zavarezze. Doutora em Engenharia e Ciência de Alimentos pela Universidade Federal do Rio Grande.

Dr^a Jaqueline Pozzada dos Santos. Doutora em Ciência e Tecnologia de Alimentos pela Universidade Federal de Pelotas.

Dr^a Rosana Colussi. Doutora em Ciência e Tecnologia de Alimentos pela Universidade Federal de Pelotas.

Agradecimentos

À minha família, em especial minhas irmãs e avós, pela compreensão e pelo incentivo, e ao meu namorado, Igor, pelo apoio e paciência.

Aos amigos e colegas de pós-graduação Miriã e Cristian, pelo auxílio durante os experimentos e por dividir comigo as alegrias e angústias durante esse período. À Catarina e Karev, pela companhia. Aos meus amigos, por estarem presentes.

Ao Prof. Dr. Nathan Vanier, pela oportunidade e disponibilidade de orientação.

À Dra. Ya-Jane Wang por me receber em seu laboratório durante missão de trabalho no exterior e oportunizar participar do *Rice Short Course* da Universidade do Arkansas.

Agradeço, também, aos demais colegas de pós-graduação, alunos de iniciação científica, e professores por tudo que aprendi através do convívio diário.

À Universidade Federal de Pelotas e ao Programa de Pós-Graduação em Ciência e Tecnologia de Alimentos pela oportunidade e à Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico (CNPq) pelo apoio financeiro.

À Fundação de Amparo à Pesquisa do Estado do Rio Grande do Sul (FAPERGS) pelo apoio financeiro à missão de trabalho no exterior, fruto do projeto de internacionalização da pós-graduação.

A todos aqueles que, de alguma forma, contribuíram para minha formação.

Resumo

DITTFEN, Caroline Lambrecht. **Bioacessibilidade de compostos fenólicos após a digestibilidade de amido de arroz de pericarpo preto e vermelho submetidos a diferentes métodos de pré-cozimento, cozimento e pós-cozimento.** 2023. 86f. Tese (Doutorado em Ciência e Tecnologia de Alimentos) – Programa de Pós-graduação em Ciência e Tecnologia de Alimentos, Faculdade de Agronomia Eliseu Maciel, Universidade Federal de Pelotas, Pelotas, 2023.

Quando consumido, o arroz passa pelo processo de cozimento, que causa alterações sensoriais e químicas no amido e demais componentes, como os compostos fenólicos. Os estudos sobre os impactos do cozimento e da digestão nos compostos fenólicos do arroz apresentam resultados discrepantes, destacando a necessidade de estudos abrangentes. Este estudo explorou esses impactos em grãos de arroz preto e vermelho, com variações no seu preparo quanto aos parâmetros de pré-cozimento (hidratação e lavagem), cozimento (método, tempo e quantidade de água) e pós-cozimento (resfriamento e congelamento) e posterior digestão. Os resultados mostram que o arroz vermelho apresentou as maiores reduções nos compostos fenólicos durante o cozimento (-39% totais, -64% livres e -22% ligados), enquanto o arroz preto apresentou uma redução média nos fenólicos livres (-17%), mas um aumento nos complexados (+20%) e totais (+4%). O método de micro-ondas apresentou maior preservação dos fenólicos livres. A quantidade de água utilizada no cozimento influenciou diretamente os teores de fenólicos livres, enquanto o tempo de cozimento teve efeito significativo. O arroz preto, independente do tempo de cozimento, exibiu um aumento na fração ligada de fenólicos, enquanto o arroz vermelho mostrou um aumento na fração complexada com tempos de cozimento mais longos. Ainda, a digestão in vitro resultou em reduções nos teores de fenólicos bioacessíveis em ambos os tipos de arroz, em torno de 57% no arroz preto e 61% no arroz vermelho em relação aos teores totais antes do cozimento. A quantidade de água durante o cozimento e o tempo de cozimento influenciaram a bioacessibilidade, enquanto o armazenamento não teve impacto significativo nos teores de fenólicos. Os grãos remanescentes após a digestão demonstraram um aumento expressivo principalmente na fração livre, com médias de 325% no arroz preto e 589% no arroz vermelho. Não foram encontradas correlações significativas entre a presença de compostos fenólicos e a hidrólise do amido durante a digestão in vitro, mas a presença de compostos fenólicos bioacessíveis mostrou uma forte relação com a fração livre de fenólicos após o cozimento. Esses resultados ressaltam a complexidade das interações entre cozimento, digestão e compostos fenólicos no arroz, enfatizando a importância de considerar a bioacessibilidade desses compostos na preparação de alimentos mais nutritivos. Também, foi avaliado como diferentes métodos de cozimento afetam a hidrólise do amido, e foi observado que o método de pressão resultou em menores taxas de hidrólise, destacando a integridade da matriz do grão como um fator crucial na digestibilidade do amido. Esses resultados fornecem dados relevantes para atender a diversas necessidades alimentares e para a compreensão dos efeitos dos processos de cozimento e digestão nos compostos fenólicos e no amido do arroz.

Palavras chaves: Arroz pigmentado. Bioacessibilidade. Cozimento. Compostos fenólicos. Digestibilidade.

Abstract

DITTFEN, Caroline Lambrecht. **Bioaccessibility of phenolic compounds after starch digestibility of black and red pericarp rice subjected to different pre-cooking, cooking, and post-cooking methods.** 2023. 86f. Thesis (Doctor Degree in em Ciência e Tecnologia de Alimentos) – Programa de Pós-graduação em Ciência e Tecnologia de Alimentos, Faculdade de Agronomia Eliseu Maciel, Universidade Federal de Pelotas, Pelotas, 2023.

When consumed, rice undergoes the cooking process, which induces sensory and chemical changes in the starch and other components, such as phenolic compounds. Studies on the effects of cooking and digestion on rice phenolic compounds yield inconsistent results, emphasizing the necessity for comprehensive research. This study examined these effects on black and red rice grains, with variations in their preparation concerning pre-cooking (hydration and washing), cooking (method, time, and water quantity), and post-cooking (cooling and freezing) parameters, as well as subsequent digestion. The findings demonstrate that red rice exhibited the most substantial reductions in phenolic compounds during cooking (-39% total, -64% free, and -22% bound), while black rice showed a moderate decrease in free phenolics (-17%), alongside an increase in complexed (+20%) and total (+4%). The microwave method displayed superior preservation of free phenolics. The water quantity used in cooking directly influenced the free phenolic content, while the cooking duration had a notable impact. Irrespective of the cooking time, black rice manifested an increase in the bound fraction of phenolics, whereas red rice exhibited an upsurge in the complexed fraction with extended cooking periods. Moreover, *in vitro* digestion led to reductions in the levels of bioaccessible phenolics in both types of rice, approximately 57% in black rice and 61% in red rice in comparison to the total levels before cooking. The water quantity during cooking and cooking time influenced bioaccessibility, while storage had no significant effect on phenolic content. The grains remaining after digestion demonstrated a significant increase primarily in the free fraction, averaging 325% in black rice and 589% in red rice. No significant correlations were found between the presence of phenolic compounds and starch hydrolysis during *in vitro* digestion, but the existence of bioaccessible phenolic compounds exhibited a robust association with the free phenolic fraction after cooking. These results underscore the complexity of the interplay among cooking, digestion, and phenolic compounds in rice, underscoring the significance of considering the bioaccessibility of these compounds when preparing more nourishing foods. Additionally, the study evaluated how different cooking methods affect starch hydrolysis, revealing that the pressure method led to lower hydrolysis rates, highlighting the integrity of the grain matrix as a critical factor in starch digestibility. These findings provide pertinent data to address diverse dietary requirements and to comprehend the effects of cooking and digestion processes on phenolic compounds and starch in rice.

Keywords: Bioaccessibility. Cooking. Digestibility. Phenolic compounds. Pigmented rice.

Lista de figuras

| | |
|--|----|
| Figura 1 - Estrutura da amilose e amilopectina. | 18 |
| Figura 2 - Cadeias ramificadas da amilopectina..... | 19 |
| Figura 3 - Classes de compostos fenólicos..... | 20 |
| Figura 4 - Estrutura de proantocianidinas (a) e antocianinas (b)..... | 21 |
| Figura 5 - Tecnologias envolvidas no pré-cocção, cocção e pós-cocção do arroz...22 | |
| Figura 6 - Efeitos de compostos fenólicos na digestão de amido e controle glicêmico. | 26 |
| Figura 7 - Taxa de hidratação de arroz preto e do arroz vermelho cru. | 36 |
| Figura 8 - Compostos fenólicos bioacessíveis de arrozes de pericarpo preto e vermelho submetido a diferentes métodos de cocção (A e B), quantidade de água (C e D) e tempo de cocção (E e F). | 54 |
| Figura 9 - Compostos fenólicos bioacessíveis de arrozes de pericarpo preto e vermelho submetidos a tratamentos de resfriamento (A e B) e congelamento (C e D) após a cocção. | 57 |
| Figura 10 - Compostos fenólicos livres, complexados e totais de arrozes de pericarpo pigmentado de preto (A, B e C) e vermelho (D, E e F) submetidos a diferentes métodos de cocção e ao processo de digestão <i>in vitro</i> | 59 |
| Figura 11 - Digestibilidade (%) do amido de arrozes de pericarpo pigmentado preto e vermelho submetidos a diferentes métodos de cocção (A e B), quantidade de água (C e D) e tempo de cocção (E e F)..... | 62 |
| Figura 12 - Digestibilidade (%) do amido de arrozes de pericarpo marrom (A e B), preto (C e D) e vermelho (E e F) submetidos a tratamentos de resfriamento e congelamento após a cocção..... | 66 |

Lista de tabelas

| | |
|--|----|
| Tabela 1 - Tratamentos de pré-cocção utilizados..... | 29 |
| Tabela 2 - Métodos de cocção utilizados. | 29 |
| Tabela 3 - Condições para cada método de cocção utilizado. | 29 |
| Tabela 4 - Tempo e proporção de água de cocção ideal dos arrozos utilizados..... | 36 |
| Tabela 5 - Teor de amilose (%) dos diferentes tipos de arroz utilizados. | 37 |
| Tabela 6 - Distribuição (%) do comprimento de cadeias laterais de amilopectina dos amidos isolados dos diferentes tipos de arroz utilizados..... | 38 |
| Tabela 7 - Propriedades térmicas da farinha dos diferentes tipos de arroz utilizados. | 39 |
| Tabela 8 - Teor de umidade dos grãos cozidos por diferentes tempos. | 40 |
| Tabela 9 - Conteúdo (mg/g) de compostos fenólicos totais, livres e complexados do arroz preto e vermelho cru e cozido e percentagem (%) de aumento e redução após a cocção em relação ao grão cru. | 43 |
| Tabela 10 - Conteúdo (mg/g) de compostos fenólicos totais, livres e complexados do arroz preto e vermelho cru e cozido e submetido a tratamento de lavagem e hidratação antes da cocção e percentagem (%) de aumento e redução após a cocção em relação ao grão cru. | 50 |
| Tabela 11 - Conteúdo (mg/g) de compostos fenólicos totais, livres e complexados do arroz preto e vermelho cru e cozido e submetido a tratamento de resfriamento e congelamento após cocção e percentagem (%) de aumento e redução após a cocção em relação ao grão cru. | 52 |
| Tabela 12 - Percentagem (%) de aumento e redução de compostos fenólicos totais, livres e complexados na fração sólida após a digestão em relação ao grão cozido. | 60 |
| Tabela 13 - Correlação de Pearson entre o teor de compostos fenólicos com a bioacessibilidade. | 61 |
| Tabela 14 - Correlação de Pearson entre o teor de compostos fenólicos e a bioacessibilidade com o teor de hidrólise do amido. | 69 |

Sumário

| | |
|---|-----------|
| 1 Introdução | 12 |
| 2 Hipóteses | 14 |
| 3 Objetivo | 14 |
| 3.1 Objetivos específicos | 15 |
| 4 Revisão Bibliográfica | 15 |
| 4.1 Tendências de consumo no mercado de alimentos e grãos integrais..... | 15 |
| 4.2 Arroz: consumo atual e mercado brasileiro | 16 |
| 4.3 Composição do arroz de pericarpo pigmentado | 17 |
| 4.4 Formas de preparo do arroz para o consumo: impacto na digestibilidade do amido e do conteúdo fenólico | 22 |
| 4.5 Bioacessibilidade de compostos fenólicos e interações com o amido | 25 |
| 5 Material e métodos | 27 |
| 5.1 Material | 27 |
| 5.2 Métodos | 28 |
| 5.2.1 Determinação do tempo de cocção e quantidade de água de cocção ideais | 28 |
| 5.2.2 Preparo das amostras..... | 28 |
| 5.2.2.1 Tratamentos pré-cocção: lavagem e hidratação..... | 28 |
| 5.2.2.2 Métodos de cocção | 29 |
| 5.2.2.3 Proporção de grãos:água na cocção | 30 |
| 5.2.2.4 Variação do tempo de cocção | 30 |
| 5.2.2.5 Tratamentos pós-cocção: resfriamento e congelamento | 30 |
| 5.2.3 Digestibilidade <i>in vitro</i> do amido | 31 |
| 5.2.3.1. Preparo de amostra..... | 31 |
| 5.2.3.2. Procedimento para digestibilidade gastrointestinal <i>in vitro</i> | 31 |
| 5.2.3.3. Quantificação do amido hidrolisado..... | 31 |
| 5.2.3.3. Cinética de hidrólise, índice de hidrólise e índice glicêmico | 32 |
| 5.2.3.3. Determinação das frações do amido quanto à sua hidrólise | 32 |
| 5.2.4. Obtenção da farinha para análises | 33 |
| 5.2.5 Compostos fenólicos..... | 33 |
| 5.2.5.1 Extração de compostos fenólicos livres..... | 33 |
| 5.2.5.2 Extração de compostos fenólicos complexados | 33 |
| 5.2.5.3 Quantificação de compostos fenólicos | 33 |
| 5.2.6. Bioacessibilidade de compostos fenólicos após a digestibilidade <i>in vitro</i> . | 34 |

| | |
|--|-----------|
| 5.2.7 Teor de amilose | 34 |
| 5.2.8 Teor de umidade..... | 34 |
| 5.2.9 Propriedades térmicas | 35 |
| 5.2.10 Distribuição das estruturas moleculares da amilopectina | 35 |
| 5.2.11 Análise estatística | 35 |
| 6 Resultados e discussão..... | 36 |
| 6.1 Características dos materiais utilizados | 36 |
| 6.1.1 Tempo de cocção e quantidade de água..... | 36 |
| 6.1.2 Tempo de hidratação na pré-cocção | 36 |
| 6.1.3 Teor de amilose da farinha | 37 |
| 6.1.4 Distribuição das estruturas moleculares da amilopectina do amido | 37 |
| 6.1.5 Propriedades térmicas da farinha | 39 |
| 6.1.6 Umidade dos grãos cozidos..... | 40 |
| 6.2 Compostos fenólicos após a cocção..... | 41 |
| 6.2.1 Efeitos da cocção e do método de cocção | 41 |
| 6.2.2 Efeitos da quantidade de água e tempo de cocção | 46 |
| 6.2.3 Efeitos dos tratamentos de pré e pós-cocção..... | 49 |
| 6.3 Bioacessibilidade de compostos fenólicos após o processo de digestão simulada..... | 53 |
| 6.3.1 Efeitos da digestão e métodos de cocção | 53 |
| 6.3.2 Efeitos da digestão e tratamentos de pós cocção | 56 |
| 6.3.3 Compostos fenólicos nos grãos residuais da digestão simulada..... | 57 |
| 6.3.4 Correlação entre compostos fenólicos após a cocção e compostos fenólicos bioacessíveis | 60 |
| 6.4. Digestibilidade de amido: taxa de hidrólise | 61 |
| 6.4.1 Efeitos das condições de cocção na digestibilidade do amido | 61 |
| 6.4.2 Efeito dos tratamentos de resfriamento e congelamento após a cocção...65 | |
| 6.4.3 Correlação entre compostos fenólicos e percentual de hidrólise do amido | 68 |
| 6.5. Digestibilidade de amido: cinética de digestão do amido e frações do amido quanto à sua hidrólise | 69 |
| 7 Considerações finais | 70 |
| Referências | 72 |
| Apêndice | 84 |

1 Introdução

No Brasil, os alimentos *in natura* ou minimamente processados, como arroz, feijão, carnes e frutas, constituíram a maior parte das calorias consumidas em 2017-2018 (IBGE, 2020). No entanto, a pandemia de Covid-19 afetou os hábitos alimentares, resultando em menor consumo destes alimentos e maior consumo de opções menos saudáveis (FIOCRUZ, 2020). Após a pandemia, notou-se um aumento da busca por alimentos mais saudáveis, especialmente grãos integrais, associados à promoção da saúde e à sustentabilidade ambiental (IFIC, 2021; IFIC, 2022).

O arroz e seus produtos têm uma posição de destaque global entre as categorias alimentares e a diversidade de variedades de arroz é notável, abrangendo mais de 120.000 tipos reconhecidos, incluindo variedades especiais e pigmentadas, que variam em características físicas e composição (CHAUDHARY, 2003; WANG et al., 2014; FAO, 2020). As variedades pigmentadas apresentam grãos com coloração que varia do roxo intenso ao marrom-avermelhado devido à presença de pigmentos naturais nas camadas externas (CHAUDHARY, 2003).

O arroz integral é composto por três frações distintas: endosperma, gérmen e farelo. O endosperma é rico em amido, composto por amilose e amilopectina, com estruturas variáveis (TESTER, KARKALAS e QI, 2004; LIMTRAKUL (DEJKRIENGKRAIKUL), SEMMARATH e MAPOUNG, 2020). O farelo, constituído pelo pericarpo, gérmen e aleurona, apresenta variação de cores devido à presença de polifenóis, como ácidos fenólicos, proantocianidinas e antocianinas (FINOCCHIARO, FERRARI e GIANINETTI, 2010; KONG; LEE, 2010; XIA et al., 2021). Além de diferenças na composição química, esses compostos podem estar presentes na sua forma livre ou ligada, apresentando propriedades antioxidantes e benefícios à saúde humana, incluindo a prevenção de doenças (MANACH et al., 2004; ROSA et al., 2018; GE, LI e LISAK, 2020).

A cocção de grãos e produtos amiláceos, como o arroz, é um processo importante antes do seu consumo, e é influenciado por fatores culturais e preferências dos consumidores. Diversos métodos de preparo são utilizados, desde os tradicionais até os contemporâneos, variando em termos de imersão, temperaturas e adição de etapas pós-cocção (YU et al., 2017).

Esse processo altera as propriedades sensoriais como textura, aroma e sabor, além de afetar a disponibilidade de componentes como o amido e os compostos fenólicos. A gelatinização do amido, que ocorre durante a cocção, influencia sua digestibilidade e absorção, e a ação das enzimas digestivas é crucial na conversão do amido em glicose (CAPUANO e JANSSEN, 2021; DONMEZ et al., 2021).

A cocção, bem como os parâmetros envolvidos na antes e após a cocção, também desencadeia alterações nos compostos fenólicos presentes nos grãos, mas estudos divergem em seus efeitos. A quantidade de água, tempo, temperatura e métodos de cocção, imersão antes da cocção e resfriamento após a cocção são fatores-chave que influenciam as mudanças nos compostos fenólicos (FINOCCHIARO et al., 2007; HIEMORI et al., 2009; SAIKIA et al., 2012; ZAUPA et al., 2015). Resultados conflitantes na literatura sugerem que a cocção pode levar a diferentes efeitos nos compostos fenólicos devido a complexas interações entre a matriz alimentar e os compostos, bem como processos de liberação, degradação e conversão (DOUDU, 2011; N'DRI et al., 2013).

A digestão dos alimentos também desempenha um papel importante na bioacessibilidade desses compostos, ou seja, na quantidade que é liberada da matriz do alimento no sistema digestivo e que se torna disponível para absorção (CARBONELL-CAPELLA et al., 2014). Estudos demonstram que a capacidade antioxidante dos compostos fenólicos em alimentos, como arroz, pode aumentar após a digestão, sugerindo que a quantificação desses compostos pode ser subestimada se não for considerado o efeito da digestibilidade gastrointestinal (TANANUWONG; TANGSRIANUGUL, 2012; TI et al., 2015; KOEHNLEIN et al., 2016; DE SANTIAGO et al., 2018).

Ainda, a interação complexa entre os compostos fenólicos e a digestão do amido no corpo humano também pode ser notada, alterações da digestibilidade do amido têm sido associada à presença de compostos fenólicos, resultando em implicações significativas para a saúde, especialmente em condições como diabetes e obesidade (ZHU, 2015; SUN e MIAO, 2019; GIUBERTI et al., 2020).

As pesquisas existentes na literatura, além de comumente utilizarem poucos modos de preparo, oferecem resultados discrepantes sobre o efeito de diferentes métodos de cocção no teor de compostos fenólicos. A maioria dos estudos se concentra na análise de extratos, frações de grãos e grãos crus para quantificar e caracterizar os compostos fenólicos. No entanto, a avaliação dos grãos após a cocção, que é a forma comum de consumo, e a investigação de como esses compostos são absorvidos durante a digestão *in vitro* e *in vivo* são menos exploradas.

Explorar essas variáveis em um único estudo, com padronização de materiais e métodos, é crucial para compreender como os compostos fenólicos do arroz são afetados pelos diferentes parâmetros de cocção e pela digestão. Além disso, essa investigação nos ajuda a entender como a presença desses compostos influencia a liberação de glicose proveniente do amido durante a digestão, o que pode ter implicações significativas para a saúde humana.

2 Hipóteses

2.1 Avaliação de grãos crus de arroz de pericarpo preto e vermelho em comparação aos grãos cozidos subestimam o teor real de compostos fenólicos.

2.2 Grãos de arroz de pericarpo pigmentado cozidos em panela de pressão apresentam menor deformação dos grãos e, conseqüentemente, menor taxa de hidrólise de amido e bioacessibilidade de compostos fenólicos quando comparados aos demais métodos de cocção.

2.3 Hidratação pré-cocção, excesso de água e maior tempo de cocção resultam em maior taxa de hidrólise de amido e bioacessibilidade de compostos fenólicos.

2.4 Resfriamento de arroz cozido resulta em menor taxa de hidrólise de amido e bioacessibilidade de compostos fenólicos.

3 Objetivo

Avaliar os impactos de diferentes métodos de pré-cocção, cocção e pós-cocção sobre a bioacessibilidade de compostos fenólicos e digestibilidade do amido de grãos de arroz de pericarpo preto e vermelho.

3.1 Objetivos específicos

3.1.1 Analisar os efeitos da cocção e digestão sobre o teor de compostos fenólicos livres e complexados em arroz de pericarpo preto e vermelho.

3.1.2. Determinar os parâmetros de cocção que apresentem melhor preservação e bioacessibilidade dos compostos fenólicos de grãos cozidos de arroz de pericarpo preto e vermelho.

3.1.3. Analisar os efeitos dos diferentes parâmetros de cocção na bioacessibilidade de compostos fenólicos e na taxa de hidrólise de amido em grãos de arroz de pericarpo preto e vermelho.

3.1.4. Definir o tempo e a temperatura de resfriamento que apresente maior preservação e liberação dos compostos fenólicos de grãos cozidos de arroz de pericarpo preto e vermelho.

4 Revisão Bibliográfica

4.1 Tendências de consumo no mercado de alimentos e grãos integrais

No Brasil, apesar de uma discreta redução no consumo de alimentos tradicionais como arroz e feijão, os alimentos *in natura* ou minimamente processados representaram mais da metade das calorias consumidas pela população nos anos de 2017-2018. Dentre esses alimentos, destacaram-se o arroz, feijão, carnes, frutas, leite, macarrão, verduras, legumes, raízes e tubérculos (IBGE, 2020).

Contudo, a ocorrência da pandemia de Covid-19 trouxe consigo significativas mudanças nos hábitos alimentares da população, impactando negativamente a qualidade da dieta. Esse impacto foi notado pela diminuição do consumo de alimentos saudáveis, como frutas, hortaliças e feijão, e no aumento do consumo de alternativas menos saudáveis, incluindo alimentos congelados e doces (FIOCRUZ, 2020). Tais mudanças nos padrões alimentares estão fortemente ligadas a fatores econômicos, notadamente a redução de recursos financeiros e do poder de compra (UNICEF, 2021). Entretanto, na medida em que a sociedade se encaminha para um período pós-pandemia, nota-se uma retomada dos hábitos cotidianos normais, acompanhada de um aumento na conscientização sobre a importância de estilos de vida mais saudáveis. Essa inclinação é evidenciada pelo aumento da procura por alimentos saudáveis, com cerca de 60% dos consumidores expressando interesse nesse tipo de alimento em 2022 (IFIC, 2021; IFIC, 2022).

Neste contexto, a relevância do consumo de grãos integrais surge como uma opção de alimento saudável. Sua associação com a redução de doenças significativas, como câncer, doenças cardiovasculares e várias causas de mortalidade, destaca sua importância na promoção da saúde (AUNE et al., 2016). Além disso, de acordo com o Conselho Internacional de Informação Alimentar (IFIC) (2021), a demanda recente por alimentos que sejam ambientalmente sustentáveis tem impulsionado a adoção de grãos integrais, considerados pelos consumidores menos negativos aos impactos ambientais.

O consumo de grãos integrais exibe variações conforme características demográficas. Grupos como idosos, asiáticos e indivíduos com maior poder aquisitivo tendem a incorporar mais grãos integrais em suas dietas (AHLUWALIA et al., 2019). Entre países, é possível notar grandes discrepâncias, visto que, enquanto nos países como Dinamarca, Noruega e Suécia, o consumo médio foi de 50g por dia, na França e Itália foi menor que 5g diárias (MEYNIER et al., 2020). No contexto latino-americano, o Brasil apresenta uma das menores médias de consumo de alimentos contendo grãos integrais, com uma média diária de 10,6g (FISBERG et al, 2022).

Globalmente, a ingestão de grãos integrais permanece abaixo do ideal, com uma média de apenas 29g por dia em comparação à recomendação ótima de 125g diários (GBD, 2019).

4.2 Arroz: consumo atual e mercado brasileiro

Segundo os dados mais recentes da Organização das Nações Unidas para a Alimentação e a Agricultura (FAO), referentes a 2019, o arroz e seus produtos estão entre as quatro principais categorias alimentares consumidas dentre as 119 analisadas. Essa relevância é ampliada considerando que as três categorias mais consumidas (cereais, vegetais, vegetais-outros) englobam uma combinação de alimentos, destacando a importância global do arroz (FAO, 2020).

O consumo médio mundial de arroz, por pessoa, foi de 80,54 kg por ano. Já, nos países da América do Sul, o arroz e derivados apresentam um consumo médio anual de 39kg, o que representa metade da média mundial (FAO, 2020).

No contexto específico do Brasil, o consumo per capita de arroz está em declínio, influenciado por mudanças nos padrões alimentares, incluindo a substituição do arroz e refeições completas por lanches rápidos. Além disso, a recessão econômica decorrente do aumento da inflação impactou os gastos da população,

levando a uma redução na compra de alimentos essenciais, incluindo o reaproveitamento do arroz cozido para refeições seguintes. Apesar dessas oscilações, a perspectiva global sugere que o volume total de grãos consumidos permanecerá estável devido ao crescimento populacional (USDA, 2022).

Os dados da Companhia Nacional de Abastecimento (CONAB, 2022) confirmam que a oferta e demanda por arroz no Brasil se mantem estável em torno de 10,8 milhões de toneladas nos últimos anos. No setor agrícola, a safra brasileira de 2022/23 atingiu a produção de 10 milhões de toneladas, colocando o Brasil entre os dez maiores produtores globais desse grão (CONAB, 2023).

Embora as variedades tradicionais, de pericarpo marrom, predominem na produção e no consumo, existem, atualmente, mais de 120.000 variedades de arroz reconhecidas em todo o mundo, manifestando grande diversidade morfológica, fisiológica e genética (WANG et al., 2014). As variedades especiais, por sua vez, se referem a tipos de arroz que exibem características únicas em relação às variedades comuns. Isso abrange aspectos como aparência física, composição química e aroma. No caso das variedades pigmentadas, sua singularidade reside na pigmentação do grão, que abrange uma gama que vai desde o roxo intenso até o marrom-avermelhado, resultado do acúmulo de pigmentos naturais nas camadas externas do grão (CHAUDHARY, 2003).

4.3 Composição do arroz de pericarpo pigmentado

O arroz integral é composto por três distintas frações: o endosperma, que representa cerca de 70% do grão, o gérmen e o farelo, este último constituído pelo pericarpo e aleurona (LIMTRAKUL (DEJKRIENGKRAIKUL), SEMMARATH, e MAPOUNG, 2020).

O endosperma, camada mais abundante, é composto principalmente pelo amido, que por sua vez, é constituído por dois componentes moleculares distintos, a amilose e a amilopectina. A proporção, tamanho e estrutura dessas moléculas variam de acordo com a fonte botânica do amido. A amilose é caracterizada por uma cadeia linear relativamente extensa, compreendendo aproximadamente de 200 a 700 resíduos de glicose, os quais estão predominantemente interligados (em torno de 98 a 99%) através de ligações α -1,4 (Figura 1A). Em contrapartida, a amilopectina é uma molécula substancialmente maior e mais complexa do que a amilose, exibindo múltiplas ramificações. Cada cadeia de amilopectina carrega, em média, entre 19 e 31 unidades de glicose, unidas por ligações α -1,4 (95%) e α -1,6 (5%) (Figura 1B) (TESTER, KARKALAS e QI, 2004).

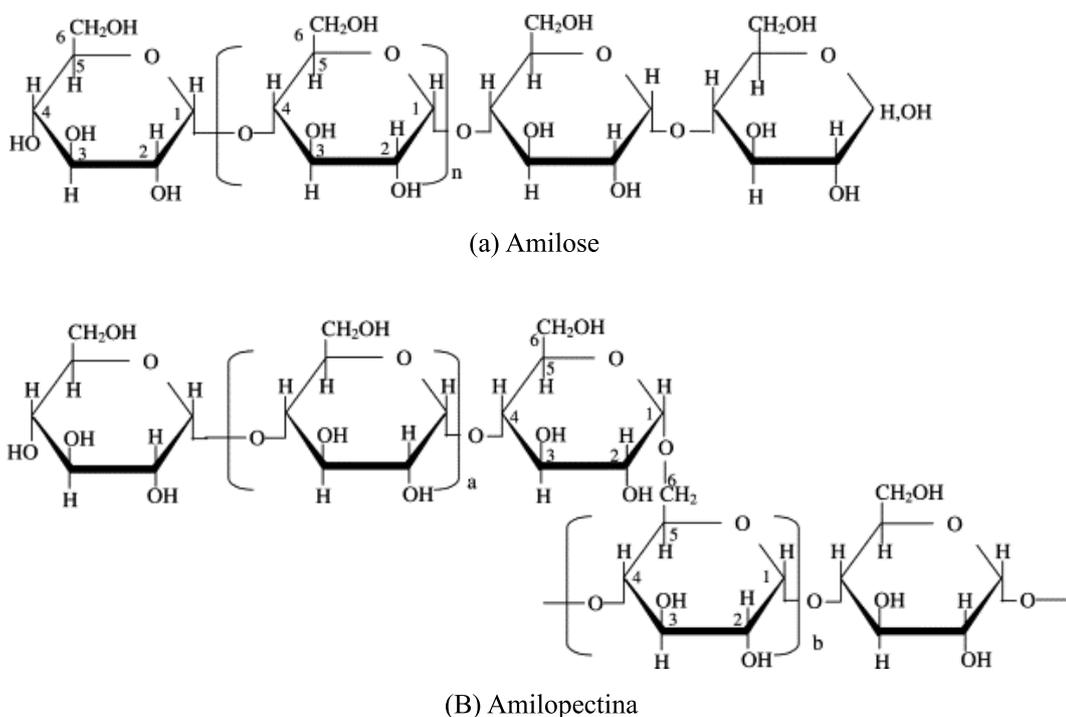


Figura 1 - Estrutura da amilose e amilopectina.
Fonte: Tester, Karkalas e Qi, 2004.

A classificação das cadeias de amilopectina é baseada em seu grau de polimerização (GP), ou seja, comprimento de cadeia, em diferentes tipos: Tipo A (GP entre 6 e 12), Tipo B1 (GP entre 13 e 24), Tipo B2 (GP entre 25 e 36) e Tipo B3 (GP acima de 36 resíduos de glicose) (HANASHIRO, ABE e HIZUKURI, 1996). Estas cadeias são ilustradas na Figura 2.

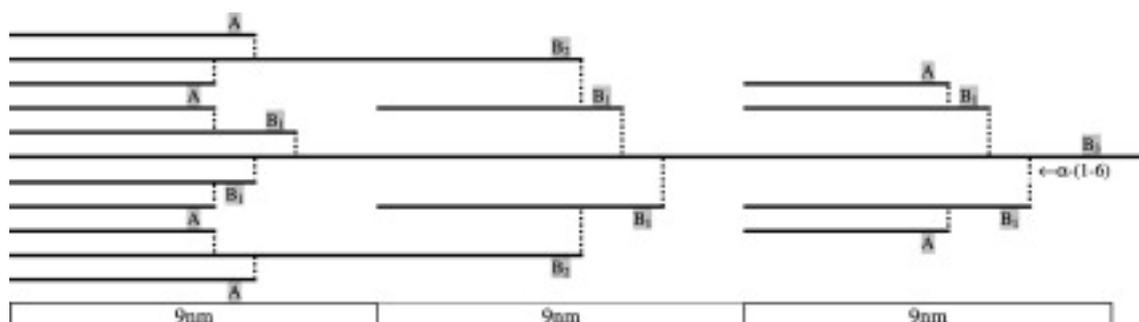


Figura 2 - Cadeias ramificadas da amilopectina.
Fonte: Tester, Karkalas e Qi, 2004.

No que diz respeito à camada superficial mais externa do grão, denominada pericarpo, é possível observar variações na coloração, englobando cores que vão desde o branco até o marrom, preto e vermelho (CHAUDHARY, 2003, XIA et al. 2021).

Essa diversidade de cores se deve à presença de polifenóis encontrados nestes grãos, com destaque para os ácidos fenólicos no arroz marrom, proantocianidinas no arroz vermelho e antocianinas no arroz preto (ZHOU et al., 2004; AL-FARSI; LEE, 2008; FINOCCHIARO, FERRARI e GIANINETTI, 2010; KONG; LEE, 2010; XIA et al., 2021).

Os compostos fenólicos têm sido objeto de interesse em diversos estudos, devido às suas propriedades antioxidantes, capacidade de sinalização celular e outros mecanismos que destacam seu potencial em benefício à saúde humana. Eles desempenham um papel crucial na prevenção de doenças como câncer, diabetes, enfermidades cardiovasculares e distúrbios neurodegenerativos (MANACH et al., 2004; LIU, 2007; LIMTRAKUL (DEJKRIENGKRAIKUL), SEMMARATH e MAPOUNG, 2020). A classe dos compostos fenólicos, também conhecida como polifenóis, é uma das mais abundantes no reino vegetal, compartilhando uma característica chave de anel aromático contendo pelo menos um grupo hidroxila (BRAVO, 1998).

A classificação desses compostos pode ser feita de diversas maneiras, incluindo fatores como a estrutura, o número de átomos de carbono e anéis fenólicos, os elementos de ligação entre esses anéis e os grupos associados aos anéis fenólicos. Uma das classificações possíveis se baseia na estrutura, classificando-os em ácidos fenólicos, estilbenos, lignanas e flavonoides (Figura 3) (MANACH et al., 2004; GE, LI e LISAK, 2020).

A classe dos flavonoides, que é a mais extensa e complexa, é composta por 15 átomos de carbono organizados em dois anéis aromáticos ligados por um anel heterocíclico pirânico. Subdividem-se em subgrupos como flavonas, isoflavonas, flavanonas, flavonóis, antocianidinas e flavanóis (MANACH et al., 2004; ZUITER, 2014). Os flavanóis incluem monômeros como catequinas e epicatequinas, que podem polimerizar em taninos, e as antocianinas, que são formas glicosídicas das antocianidinas.

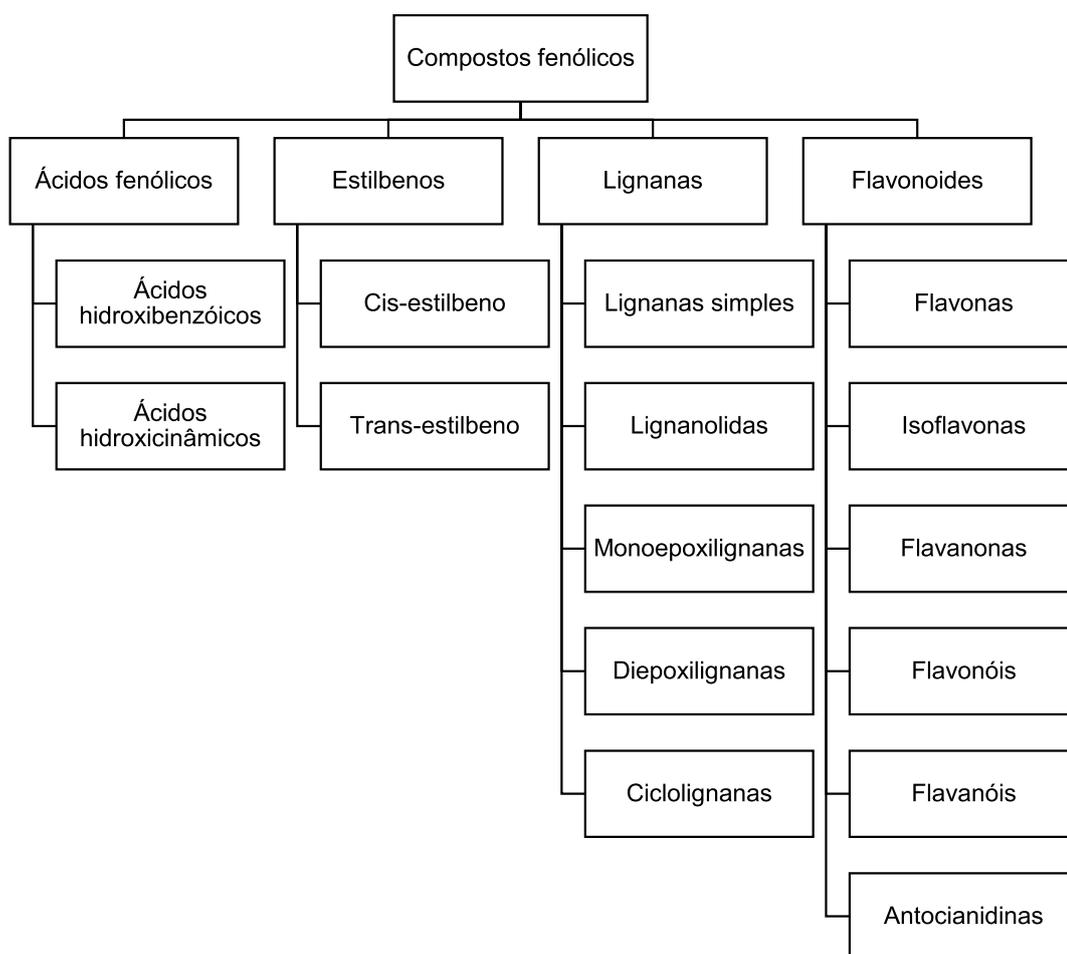
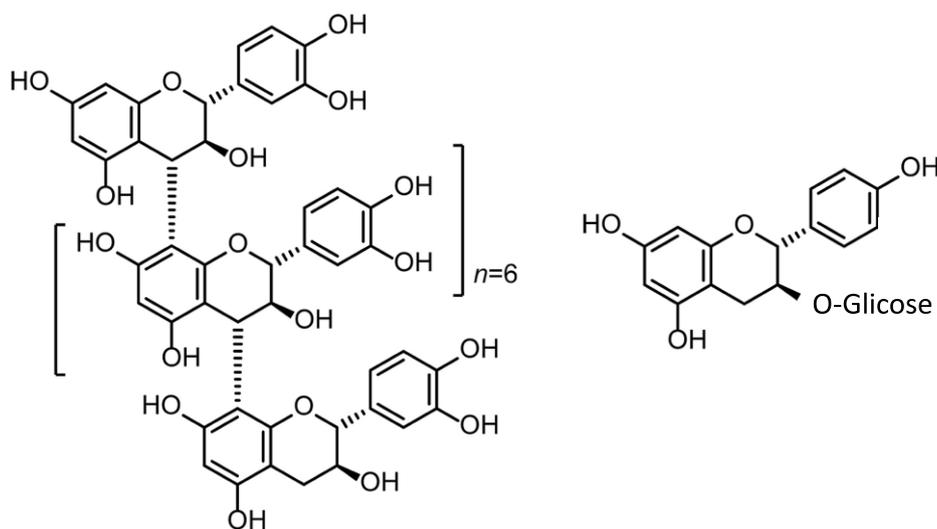


Figura 3 - Classes de compostos fenólicos.

Os flavanóis, incluem monômeros como catequinas e epicatequinas, que podem sofrer a polimerização resultando em taninos. Os taninos podem ser classificados como hidrolisáveis ou condensados. Os taninos condensados são também conhecidos como proantocianidinas, e são compostos por oito subunidades de catequina e/ou epicatequina, como exemplificado na Figura 4A (DE LA IGLESIA et al., 2010; RAUF et al., 2014, TODA et al., 2020).

Por outro lado, as antocianinas correspondem às formas glicosídicas das antocianidinas. Essas moléculas são formadas pela adição de açúcares por meio de ligações glicosídicas, geralmente na posição O-3 (Figura 4B) (CASTANEDA-OVANDO et al., 2009; KOOH et al., 2017).



(a) Proantocianidinas

(b) Antocianinas

Figura 4 - Estrutura de proantocianidinas (a) e antocianinas (b).

Fonte: Adaptado de Toda et al. (2020) e Castaneda-Ovando et al. (2009).

Os compostos fenólicos também podem ser caracterizados pela forma em que ocorrem, podendo ser encontrados na forma livre ou ligada. Os compostos fenólicos livres são sintetizados no retículo endoplasmático intracelular e posteriormente armazenados nos vacúolos. Por outro lado, os fenólicos complexados são formados por meio do transporte dos compostos fenólicos livres para a parede celular, onde se conjugam com seus componentes por meio de ligações éster e glicosídicas (ROSA et al., 2018).

4.4 Formas de preparo do arroz para o consumo: impacto na digestibilidade do amido e do conteúdo fenólico

Devido às suas propriedades sensoriais, os grãos e os produtos amiláceos são frequentemente consumidos após passarem por tratamentos térmicos, como a cocção. Yu et al. (2017) descrevem que a forma como o arroz é preparado através da cocção está intrinsecamente ligada às preferências culturais dos consumidores e podem incluir diferentes processos, como mostra a Figura 5. O preparo pode incluir a imersão para hidratação ou para lavagem do grão antes da cocção, bem como a adição de etapas após a cocção, como utilização de temperaturas altas ou baixas além do seu armazenamento.

Essas variações englobam ajustes na quantidade de água empregada no processo, variando desde o uso excessivo de água até a absorção completa do volume adicionado. Os métodos de cocção variam desde métodos tradicionais, como a cocção a vapor ou em chamas de fogão em panelas convencionais ou de pressão, até alternativas mais contemporâneas, como a utilização de panelas elétricas de arroz ou micro-ondas (YU et al., 2017).

| Pré-cocção | | Cocção | Pós-cocção | | |
|------------|---|---|---|--|--|
| Lavagem | Hidratação | Cocção | Baixa temperatura | Alta temperatura | Armazenamento |
| | <ul style="list-style-type: none"> • Pressão ambiente • Alta pressão • Vácuo | <u>Térmica</u> <ul style="list-style-type: none"> • Em excesso de água • Por absorção <u>Não-térmica</u> <ul style="list-style-type: none"> • Alta pressão | <u>Resfriamento</u> <ul style="list-style-type: none"> • Refrigeração • Água fria <u>Congelamento</u> | <u>Esterilização</u> <u>Enlatamento</u> <u>Secagem</u> <ul style="list-style-type: none"> • Secagem com ar quente • Liofilização | <ul style="list-style-type: none"> • Temperatura ambiente • Refrigeração • Congelamento |

Figura 5 - Tecnologias envolvidas no pré-cocção, cocção e pós-cocção do arroz.
Fonte: Traduzido de Yu et al, 2017.

Os procedimentos culinários que incluem a cocção provocam modificações nas propriedades como textura, estrutura, aroma e sabor dos alimentos, e isso pode impactar na disponibilidade de seus componentes para absorção, tais como o amido e os compostos fenólicos (FINOCCHIARO et al., 2007; CAPUANO e JANSSEN, 2021).

Em relação ao amido, ao submeter os grãos ao calor na presença de água, ocorre a gelatinização do amido, que consiste no intumescimento e ruptura das estruturas das moléculas que compõe os grânulos de amido e é influenciada por fatores como a taxa de aquecimento, temperatura e umidade (DONMEZ et al., 2021). A gelatinização completa torna o amido mais suscetível à ação de enzimas digestivas; enquanto a gelatinização parcial, por sua vez restringe a digestibilidade do amido (CAPUANO e JANSSEN, 2021).

Nos seres humanos, a digestão do amido ocorre no sistema gastrointestinal e é iniciada assim que o alimento é introduzido na boca para mastigação. Nessa fase, as partículas de alimento são fragmentadas e umedecidas pela saliva, entrando em contato com as enzimas salivares. Essas enzimas desempenham o papel de reduzir tanto o tamanho das moléculas quanto a viscosidade do amido. Após a etapa de mastigação, os alimentos seguem para o processamento gástrico, onde ocorre a degradação física e química por meio de um ambiente ácido e diferentes enzimas. O processo gástrico é sucedido pela digestão no intestino delgado, onde a maior parte da digestão e absorção do amido ocorre. Nessa fase, as enzimas envolvidas realizam a hidrólise do amido em unidades de glicose, que estão prontas para serem absorvidas (BELLO-PÉREZ e FLORES-SILVA, 2023).

Com isso, tanto o amido quanto os alimentos ricos em amido podem ser categorizados com base em sua digestibilidade, frequentemente avaliada pela velocidade e duração da resposta glicêmica. Desta forma, o entendimento e o controle da absorção de glicose resultante da ingestão de alimentos ricos em amido têm grande relevância no âmbito da saúde (SINGH et al., 2010).

Ao considerarmos os compostos fenólicos, é importante considerar os fatores essenciais ligados ao processo de cocção que podem influenciar significativamente o comportamento desses compostos. Entre esses fatores, destacam-se a quantidade de água utilizada, o tempo de cocção, a temperatura aplicada e os métodos de cocção empregados (FINOCCHIARO et al., 2007; HIEMORI et al., 2009; SAIKIA et al., 2012; ZAUPA et al., 2015).

Estudos anteriores relataram que o processo de cocção geralmente resulta em reduções no conteúdo de compostos fenólicos em diversos grãos, como o arroz, feijão, soja, grão de bico, lentilha e ervilha (FINOCCHIARO et al., 2007; XU e CHANG, 2008; XU e CHANG, 2009a; XU e CHANG, 2009b; SAIKIA et al., 2012). No entanto, outros estudos relatam que não houve alterações nos teores desses compostos após

a cocção de arroz de pericarpo marrom, ou ainda, identificaram incremento na fração solúvel de compostos fenólicos em sorgo e milheto (MASSARETTO et al., 2011; N'DRI et al., 2013). Um estudo também apontou que houve aumento no teor total de fenólicos em arroz com pericarpo preto, e reduções em arroz com pericarpo vermelho e marrom (ZAUPA et al., 2015). Além disso, estes estudos ainda observaram diferentes comportamentos na capacidade antioxidante desses materiais, que nem sempre mantiveram relação com o teor de compostos fenólicos.

Suhr e Koh (2014) encontraram a maior redução de fenólicos totais na cocção por torrefação (94%), seguida de vapor (88%), fritura (86%) e ebulição (77%). Hiemori, Koh e Mitchell (2009) encontraram menores perdas de antocianinas no arroz com pericarpo preto quando cozido em fogão a gás (65%), enquanto as maiores perdas foram observadas em panela elétrica de arroz (74%) e sob pressão (79%).

Quanto à cocção de arroz pigmentado em micro-ondas, não foram observadas diferenças significativas nos teores totais de compostos fenólicos em comparação com a cocção sob pressão (COLASANTO et al., 2021). No entanto, quando comparados com a cocção em panela elétrica de arroz (CHIN, THERDTHAI e RATPHITAGSANTI, 2020) e por meio de vapor (THUENGTUNG e OGAWA, 2020), os grãos cozidos em micro-ondas apresentaram teores mais elevados de compostos fenólicos.

Conforme exposto por Minatel et al. (2017), o aquecimento pode causar a ruptura da membrana celular, levando à liberação de fitoquímicos complexados à membrana, mas nem sempre esses compostos são aumentados. Muitas vezes, eles são diminuídos e, outras vezes, o processamento térmico não afeta o teor de compostos fenólicos.

Devido aos resultados divergentes encontrados na literatura, Doudu (2011) e N'Dri et al. (2013) sugeriram que a cocção pode resultar em diferentes efeitos sobre os fenólicos, devido a: 1) ruptura da matriz, que resulta na liberação parcial dos complexos e conseqüente aumento da fração solúvel ou lixiviação para a água de cocção; 2) degradação térmica, que reduz principalmente a fração solúvel; 3) interações entre compostos fenólicos e a matriz alimentar, ou entre diferentes compostos fenólicos, levando ao aumento da fração complexada; e 4) conversão em outras formas.

4.5 Bioacessibilidade de compostos fenólicos e interações com o amido

A estabilidade e o efeito funcional dos compostos químicos em nosso corpo dependem de fatores como a quantidade presente, a ligação com outras moléculas e suas interações, bem como a presença de outros compostos fitoquímicos na matriz alimentar (MINATEL et al., 2017). Em cereais, como destacado por Wang, Hea e Chen (2014), os compostos fenólicos estão presentes em formas livres e complexadas. A fração livre é prontamente absorvida pelo intestino, enquanto a fração complexada é liberada somente após a ação de enzimas digestivas, responsáveis por liberar esses compostos da estrutura do grão. No entanto, devido a essa ligação à matriz, as enzimas têm dificuldade em acessar os compostos fenólicos, o que resulta em baixa biodisponibilidade.

Carbonell-Capella et al. (2014) explicam que a bioacessibilidade dos compostos pode ser entendida como a fração que é liberada da matriz alimentar no sistema digestivo, tornando-se disponível para ser absorvida. Isso envolve processos de digestão, absorção nas células intestinais e até metabolismo pré-sistêmico. Essa avaliação geralmente é feita através de experimentos de digestão *in vitro*. Por outro lado, a biodisponibilidade se refere à quantidade do composto que entra na corrente sanguínea, e isso é determinado em experimentos *in vivo*, com animais ou seres humanos, medindo a concentração do composto no plasma após seu consumo.

As mudanças na composição dos compostos fenólicos são complexas e variam dependendo da estrutura do alimento. Além disso, os métodos de cocção e o resfriamento ou congelamento dos alimentos podem afetar sua complexação com compostos da matriz, conseqüentemente afetando sua bioacessibilidade (MINATEL et al., 2017). Estudos indicam que a digestão no sistema gastrointestinal tem um grande impacto na bioacessibilidade desses compostos (TI et al., 2015; KOEHNLEIN et al., 2016; DE SANTIAGO et al., 2018).

Koehnlein et al. (2016), ao analisarem 36 alimentos, incluindo arroz de pericarpo branco e marrom, demonstraram que a digestão *in vitro* resultou em aumento dos níveis de compostos fenólicos e atividade antioxidante em cereais, leguminosas, hortaliças, chocolates e frutas. Em outro estudo, Ti et al. (2015) investigaram os compostos fenólicos e a atividade antioxidante do arroz de pericarpo marrom integral e polido após cocção e digestão *in vitro*. Os resultados indicaram que a cocção reduziu em até 71% o teor de fenólicos e 73% a capacidade antioxidante. No entanto, após a digestão *in vitro*, ocorreu um aumento de até 403% e 293%,

respectivamente, em comparação com as amostras cozidas. Desta forma, os efeitos negativos da cocção podem ser compensados pela digestão do arroz, e sua quantificação pode ser subestimada se não for considerado o efeito da digestibilidade gastrointestinal (TANANUWONG; TANGSRIANUGUL, 2012).

Como discutido no capítulo anterior, o arroz tem como seu principal constituinte o amido que, quando digerido, fornece energia através da liberação de glicose na corrente sanguínea, induzindo a liberação de insulina (LOCKYER e NUGENT, 2017).

Além de seus benefícios antioxidantes, as pesquisas sugerem que os compostos fenólicos podem exercer influência sobre a digestibilidade do amido, ocasionando a redução da hidrólise do amido ou liberação mais lenta da glicose (ZHU, 2015). Esses efeitos resultam da capacidade dos compostos fenólicos em inibir enzimas digestivas-chave e estabelecer interações com o amido, o que afeta o transporte da glicose, como é mostrado na Figura 6 (SUN e MIAO, 2019). Isso pode ter um impacto positivo ao reduzir os níveis de glicose após as refeições, o que é especialmente relevante para condições como diabetes e obesidade.

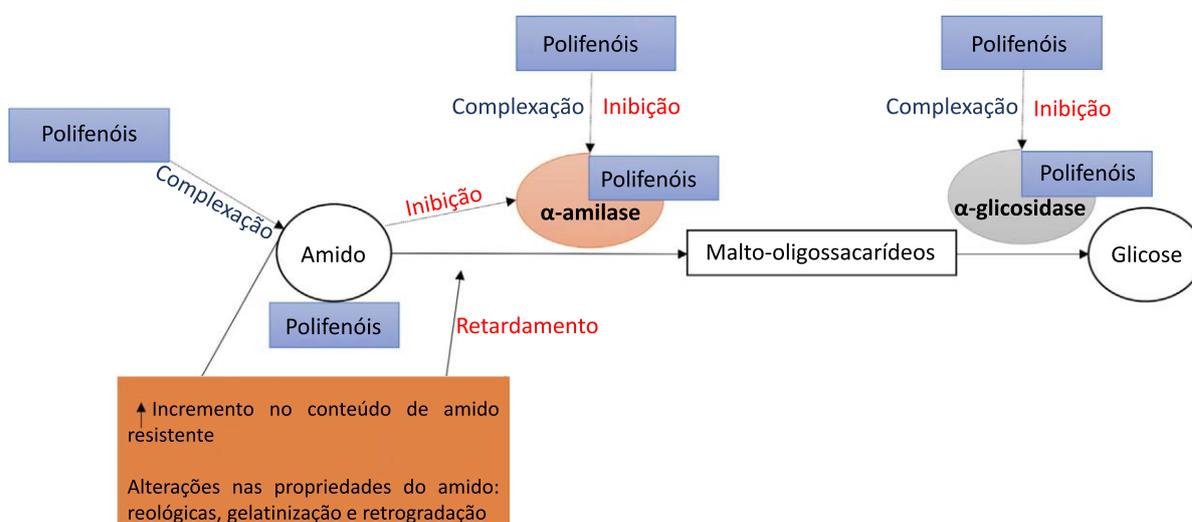


Figura 6 - Efeitos de compostos fenólicos na digestão de amido e controle glicêmico.
Fonte: Traduzido de Sun e Miao (2019).

A interação entre compostos fenólicos e a digestão do amido é complexa. Os pesquisadores associam essa complexidade à diversidade química dos compostos fenólicos, que podem afetar a digestão do amido de várias formas. De acordo com Giuberti et al. (2020), existem duas maneiras principais pelas quais os compostos fenólicos afetam a digestão do amido. A primeira é através da influência direta sobre as enzimas responsáveis pela quebra do amido, podendo inibir essas enzimas de

maneira competitiva ou não-competitiva, alterando assim a velocidade da digestão. A segunda forma é pela formação de complexos com o amido, o que pode limitar o acesso das enzimas ao amido ou modificar suas características físicas, como textura e viscosidade. Em outras palavras, esses compostos podem alterar a maneira como o amido se comporta durante mistura, aquecimento ou processamento, impactando suas características físicas.

De acordo com Zhu (2015), os efeitos dos polifenóis na atividade enzimática são influenciados pela natureza dos extratos ou compostos fenólicos, pela estrutura do amido, pelas enzimas envolvidas e pelo modo de interação entre enzima, compostos fenólicos e amido. Extratos provenientes de diversas fontes vegetais são investigados e têm demonstrado eficácia variável na inibição de atividades enzimáticas.

É importante ressaltar que o potencial de inibição enzimática varia não apenas conforme o tipo de enzima e de composto, mas também depende da complexidade da matriz alimentar (GIUBERTI et al., 2020).

5 Material e métodos

5.1 Material

Foram utilizados grãos de arroz (*Oryza sativa* L.) de pericarpo preto e pericarpo vermelho, adquiridos no mercado local e de pericarpo marrom, da cultivar IRGA 424 RI. Os grãos foram armazenados em embalagens vedadas de polietileno, em câmaras com controle de temperatura a 4 °C e ao abrigo da luz até o momento das análises. As análises foram realizadas em grãos integrais e todos os reagentes químicos utilizados eram de grau analítico.

Os grãos de pericarpo marrom foram utilizados somente no estudo de pós-coção em função de seu baixo teor de compostos fenólicos.

5.2 Métodos

5.2.1 Determinação do tempo de cocção e quantidade de água de cocção ideais

As determinações dos tempos de cocção ideais e das quantidades de água ideais foram conduzidas de forma específica para cada tipo de material, método de preparo e tratamento em questão. A avaliação do tempo de cocção foi realizada seguindo a metodologia do teste Ranghino (JULIANO e BECHTEL, 1985), no qual, após um período inicial de 10 minutos de cocção, a cada minuto, dez grãos foram analisados quando esmagados entre placas de vidro; a amostra foi considerada cozida quando 90% dos grãos não apresentassem o hilo branco no centro do grão.

Com a exceção do estudo que empregou diferentes métodos de cocção, no qual as amostras foram dispostas em recipientes próprios para cada método, os grãos foram preparados em uma panela elétrica específica para arroz (Bianca Rice 4, Mondial). A quantidade de água considerada ideal utilizada em cada método de cocção foi medida de modo a assegurar que não sobrasse água após o período de cocção predefinido, realizando testes com variação da quantidade de água.

5.2.2 Preparo das amostras

Os procedimentos de cocção foram otimizados e padronizados em ambiente laboratorial. O objetivo era reproduzir de maneira mais real possível o processo de preparo caseiro. Para garantir a uniformidade dos testes, uma quantidade fixa de 100g de arroz foi utilizada em todos os tratamentos.

5.2.2.1 Tratamentos pré-cocção: lavagem e hidratação

Foram utilizados quatro tratamentos distintos de pré-cocção, com variações relacionadas à lavagem, ao processo de hidratação e à inclusão ou exclusão da água utilizada durante a etapa de hidratação no processo de cocção, conforme descrito na Tabela 1. O tempo de hidratação foi avaliado previamente e foi determinado em 3h para o arroz preto e 2h para o arroz vermelho, conforme apresentado no item 6.1.2 Tempo de hidratação na pré-cocção.

Tabela 1 - Tratamentos de pré-cocção utilizados.

| Tratamento | Lavagem | Hidratação ¹ | Uso da água de hidratação na cocção |
|------------|---------|-------------------------|-------------------------------------|
| PRÉ1 | Não | Não | - |
| PRÉ2 | Sim | Não | - |
| PRÉ3 | Não | Sim | Sim |
| PRÉ4 | Não | Sim | Não |

5.2.2.2 Métodos de cocção

Quatro diferentes métodos de cocção foram empregados, sendo eles: panela aberta, panela elétrica, panela de pressão e micro-ondas. As especificações referentes aos recipientes de cocção e o modo de utilização dos respectivos equipamentos são descritos na Tabela 2. Já na Tabela 3, estão detalhadas as condições específicas de cocção aplicadas a cada método e tipo de material vegetal.

Tabela 2 - Métodos de cocção utilizados.

| Tratamento | Recipiente | Condição |
|----------------------|--|--|
| Panela aberta (PA) | Panela de Inox, fundo triplo, diâmetro de 16 cm, capacidade de 1,5 L (Allegra, Tramontina) | Fogão com chama baixa |
| Panela elétrica (PE) | Panela Elétrica de Arroz, antiaderente, capacidade de 4 xícaras (Bianca Rice 4, Mondial) | 220V, potência de 400W |
| Sob pressão (SP) | Panela de Pressão, antiaderente, diâmetro de 18 cm, capacidade de 2 Litros (Oliveira) | Fogão com chama baixa |
| Micro-ondas (MO) | Panela de Arroz para Micro-ondas, diâmetro de 20 cm, capacidade de 2 Litros (Marbel) | 220V, potência alta (650 W), MS2347G(A)/LG |

Tabela 3 - Condições para cada método de cocção utilizado.

| Tratamento ¹ | Arroz preto | | Arroz vermelho | |
|-------------------------|-----------------|------------------------|-----------------|------------------------|
| | Tempo de cocção | Proporção de grão:água | Tempo de cocção | Proporção de grão:água |
| PA | 27min 30s | 1:4,3 | 38min | 1:5,5 |
| PE | 30min | 1:3,7 | 35min | 1:4,5 |
| SP ² | 15min | 1:3 | 16min | 1:3,6 |
| MO ³ | 26min 30s | 1:5 | 34min | 1:6 |

¹ A água foi aquecida até a temperatura de 90°C antes da adição dos grãos.

² O tempo para que a panela adquirisse alta pressão foi de 2min após seu fechamento.

³ A cocção foi interrompida a cada 10min para homogeneizar os grãos, com auxílio de uma colher.

5.2.2.3 Proporção de grãos:água na cocção

Foram adotadas cinco diferentes proporções de grãos em relação à água de cocção. No caso do arroz preto, essas proporções foram de 1:4 a 1:8. Para o arroz vermelho, as proporções utilizadas foram 1:5 a 1:9. É importante ressaltar que as proporções mínimas empregadas foram previamente determinadas para cada tipo de material, conforme descrito no item 5.2.1 Determinação do tempo de cocção e quantidade de água de cocção ideais.

5.2.2.4 Variação do tempo de cocção

Os tempos de cocção adotados abrangeram os seguintes intervalos: 10, 20, 30, 40, 50 e 60 minutos. A quantidade de água utilizada correspondeu a uma proporção de grãos:água de 1:16, de maneira a garantir uma quantidade adequada de água para um período total de 60 minutos de cocção.

5.2.2.5 Tratamentos pós-cocção: resfriamento e congelamento

Após o processo de cocção, os grãos foram mantidos à temperatura ambiente por um período de 10 minutos. Eles foram acondicionados em recipientes de plástico PET com tampa e, em seguida, foram transferidos para a refrigeração a uma temperatura de aproximadamente 4°C ou para o congelamento a cerca de -20°C, utilizando um refrigerador do modelo BIPLEX-CRD48/CONSUL. Os grãos permaneceram nessas condições por períodos de 12, 24, 36, 48 e 72 horas.

Em seguida, as amostras que passaram pelo processo de congelamento foram submetidas a um processo de descongelamento utilizando micro-ondas (MS2347G(A), LG), configurado no modo automático de "Descongelamento". Os grãos já descongelados foram submetidos a um aquecimento por um período de 2 minutos e 30 segundos, utilizando uma potência alta (650W), sendo homogeneizados a cada 30 segundos. Os grãos submetidos ao resfriamento foram submetidos ao mesmo processo de aquecimento que aqueles submetidos ao congelamento.

5.2.3 Digestibilidade *in vitro* do amido

5.2.3.1. Preparo de amostra

Para obter uma amostra de grão cozido com uma consistência semipastosa, simulando o processo de mastigação, com a adição de água a amostra foi submetida a um processo de homogeneização utilizando um liquidificador doméstico por um período de 3 segundos, seguindo a abordagem descrita por TAMURA et al. (2017).

5.2.3.2. Procedimento para digestibilidade gastrointestinal *in vitro*

O modelo de digestão gastrointestinal *in vitro* foi conduzido conforme o método descrito por Dartois et al. (2010) com as modificações propostas por Batista et al. (2019). Este procedimento foi executado utilizando um banho ultra termostático microcontrolado com circulação (modelo 0214M2, Quimis) e simulando a fase de digestão gástrica por meio da adição de suco gástrico simulado, que continha pepsina e apresentava um pH de 1,2 e a fase intestinal foi reproduzida pela adição de fluido intestinal simulado contendo pancreatina, invertase e amiloglucosidase, com um pH de 6,8.

5.2.3.3. Quantificação do amido hidrolisado

Durante o processo de digestibilidade, foram realizadas coletas de alíquotas na fase gástrica nos tempos de 0, 15 e 30 minutos, enquanto na fase intestinal as coletas ocorreram nos tempos de 0, 10, 20, 30, 40, 60, 90 e 120 minutos. Para determinar a concentração de glicose, foi utilizado um kit de ensaio específico para D-glicose (Formato GOPOD K-GLUK 07/11, Megazyme International Ireland Ltd., Wicklow, Irlanda). Os resultados foram expressos como a porcentagem de hidrólise do amido, sendo calculados através das seguintes equações:

$$\% SH = \frac{Sh}{Si}$$

$$= 0,9 \times \frac{Gp}{Si}$$

sendo: % SH o percentual de hidrólise do amido (total); Sh a quantidade de amido hidrolisado (g); Si a quantidade inicial de amido (g); Gp a quantidade de glicose produzida (g). Foi utilizado o fator de conversão de 0,9 que é calculado a partir do peso molecular do monômero de amido/peso molecular de glicose ($162/180=0,9$) (GOÑI; GARCIA-ALONSO; SAURA-CALIXTO, 1997).

O amido total foi determinado de acordo com os métodos AOAC números 996.11 e 76–13.01, utilizando kit de ensaio de amido total (α -amylase/amyloglucosidase) (TOTAL STARCH-FORMAT, Megazyme International Ireland Ltd).

5.2.3.3. Cinética de hidrólise, índice de hidrólise e índice glicêmico

A cinética da hidrólise do amido, o índice de hidrólise e o índice glicêmico estimado foram calculados de acordo com Goñi et al. (1996), pelas seguintes equações:

- cinética da hidrólise do amido:

$$C = C_{\infty}(1 - e^{-kt})$$

- índice de hidrólise do amido:

$$HI = C_{\infty}t_x + \left(\frac{C_{\infty}}{k}\right) \times (e^{-kt} - 1)$$

- índice glicêmico estimado

$$eGI = 39,71 + 0,549 \times HI$$

sendo: C_{∞} as porcentagens de equilíbrio da hidrólise do amido ao final da reação; C o percentual de hidrólise do amido; k constante de velocidade que mede a taxa de liberação de glicose.

5.2.3.3. Determinação das frações do amido quanto à sua hidrólise

As frações de amido foram identificadas e quantificadas de acordo com as metodologias propostas por Englyst et al. (1992) e Aalim e Luo (2021). Os cálculos foram realizados da seguinte forma:

- Amido rapidamente digerível (RDS) (porção hidrolisada em 0-20 min)

$$RDS (\%) = \left((G_{20} - G_0) \times \left(\frac{0,9}{TS}\right) \right) \times 100$$

- Amido lentamente digerível (SDS) (porção hidrolisada em 20-120 min)

$$SDS (\%) = \left((G_{120} - G_{20}) \times \left(\frac{0,9}{TS} \right) \right) \times 100$$

- Amido resistente (RS) (a porção não digerida após 120 min)

$$RS (\%) = (100 - RDS - SDS)$$

sendo: G a concentração de glicose (g/100 g de peso seco) e TS o conteúdo total de amido (peso seco g/100 g).

5.2.4. Obtenção da farinha para análises

As análises de compostos fenólicos, teor de amilose e propriedades térmicas foram conduzidas utilizando a farinha obtida a partir do arroz integral, tanto antes da cocção (considerada como o grupo controle), quanto após a aplicação dos tratamentos de cocção. Após a etapa de cocção, os grãos foram imediatamente congelados em um ultrafreezer e posteriormente submetidos ao processo de liofilização. Em seguida, o arroz foi moído utilizando um moinho de laboratório (modelo Perten3100, Perten Instruments, Suécia), equipado com uma peneira 70-Mesh, com o propósito de obter a farinha necessária para as análises.

5.2.5 Compostos fenólicos

5.2.5.1 Extração de compostos fenólicos livres

A extração de fenólicos livres foi realizada de acordo com o método descrito por Qiu, Liu e Beta (2010), utilizando solvente acetona/água (70:30 v/v).

5.2.5.2 Extração de compostos fenólicos complexados

A extração de fenólicos complexados foi realizada de acordo com o método descrito por Alves et al. (2016), utilizando acetato de etila.

5.2.5.3 Quantificação de compostos fenólicos

O conteúdo fenólico total foi avaliado pelo método de Folin-Ciocalteu (SINGLETON e ROSSI, 1965), e os resultados foram expressos em mg de equivalentes de ácido gálico (GAE) por 1g de arroz em peso seco.

5.2.6. Bioacessibilidade de compostos fenólicos após a digestibilidade *in vitro*

Para avaliar a bioacessibilidade dos compostos fenólicos, após a conclusão do processo de simulação de digestibilidade *in vitro* do amido, conforme detalhado na seção 5.2.3 Digestibilidade *in vitro* do amido, foi realizada a coleta de alíquotas do conteúdo residual (amostra + suco gastrointestinal), seguindo o método de Lindemann et al. (2020). Essas alíquotas foram devidamente acondicionadas em tubos falcon e imediatamente submetidas ao ultrafreezer para interromper as reações enzimáticas.

Após um período de 24 horas, as alíquotas foram retiradas do ultrafreezer e mantidas sob refrigeração para o descongelamento. Uma vez completamente descongeladas, as alíquotas foram centrifugadas (K14-4000/KASVI) a 4000 rpm por 10 minutos, resultando na obtenção de duas frações: uma líquida (o sobrenadante) e uma sólida (os resíduos de grãos). Ambas as frações foram novamente congeladas em um ultrafreezer e, então, submetidas ao processo de liofilização.

Para a obtenção dos extratos contendo os compostos fenólicos bioacessíveis, a fração líquida foi ressuspendida em acetona a 70%. Nessa fração, consideramos apenas como compostos fenólicos livres. Quanto à fração sólida, a extração foi realizada conforme descrito no item 5.2.5.2 Extração de compostos fenólicos complexados.

A quantificação dos compostos fenólicos durante o processo de digestibilidade foi realizada conforme detalhado na seção 5.2.5.3 Quantificação de compostos fenólicos, utilizando os extratos das alíquotas coletadas após a digestibilidade.

5.2.7 Teor de amilose

O teor de amilose aparente será determinado de acordo com o método amilose-iodo descrito por Mcgrance, Cornell e Rix (1998), usando farinha desengordurada (método Soxhlet, utilizando hexano), conforme recomendações da American Association of Cereal Chemistry (AACC, 2002). Os resultados foram apresentados como porcentagem do conteúdo, e foi utilizada a seguinte equação, obtida de curva de calibração: $y = 0,5219x + 0,0069$, onde $R^2 = 0,9978$.

5.2.8 Teor de umidade

O teor de umidade foi determinado de acordo com o método número 44-15.02 da American Association of Cereal Chemistry International (AACCI, 2010).

5.2.9 Propriedades térmicas

As temperaturas de início (T_0), de pico (T_p) e de conclusão (T_c) de gelatinização, a entalpia de gelatinização (ΔH) foram determinadas de acordo com Patindol e Wang (2003), em um Differential Scanning Calorimetry (DSC) (Calorimetria Diferencial de Varredura) (modelo Diamond, Perkin-Elmer Co., Norwalk, CT). A varredura térmica foi realizada de 25 °C a 130 °C, com taxa de aquecimento de 5 °C/min. A análise foi realizada no Carbohydrate Chemistry Laboratory, no Department of Food Science da University of Arkansas.

5.2.10 Distribuição das estruturas moleculares da amilopectina

Utilizando a farinha de arroz do grão cru, o isolamento de amido foi realizado pelo método de extração alcalino (SUKSOMBOON e NAIVIKUL, 2006; PINKAEW et al., 2016) e desengordurado utilizando butanol (PATINDOL e WANG, 2002).

A distribuição do comprimento de cadeias laterais de amilopectina foi determinada através de cromatografia de troca aniônica de alto desempenho equipada com um detector amperométrico pulsado (HPAEC-PAD) conforme descrito por Pinkaew et al. (2016). A análise foi realizada no Carbohydrate Chemistry Laboratory, no Department of Food Science da University of Arkansas.

5.2.11 Análise estatística

Os resultados obtidos foram submetidos a uma análise de variância (ANOVA) e, em seguida, foram comparados utilizando o teste de Tukey ou o teste t de Student com um nível de significância de 5%. Em alguns casos, quando necessário, foi realizada uma análise de correlação de Pearson. O software utilizado para essas análises foi o Statistical Analysis System (SAS, INSTITUTE, 2002). As análises foram conduzidas em triplicata, com exceção da digestibilidade *in vitro*, propriedades térmicas e distribuição das estruturas moleculares da amilopectina, que foram realizadas em duplicata.

6 Resultados e discussão

6.1 Características dos materiais utilizados

6.1.1 Tempo de cocção e quantidade de água

O tempo de cocção e a quantidade de grão:água ideais, utilizando a panela elétrica de arroz para a cocção, foi de 3 min e 1:4 (m/v), para o arroz preto, 36min e 1:5 para o arroz vermelho e 38min e 1:5 para o arroz marrom (Tabela 4).

Tabela 4 - Tempo e proporção de água de cocção ideal dos arrozes utilizados.

| Amostra | Tempo de cocção | Quantidade de grão:água (m/v) |
|----------------|-----------------|-------------------------------|
| Arroz marrom | 38min | 1:5 |
| Arroz preto | 30min | 1:4 |
| Arroz vermelho | 36min | 1:5 |

6.1.2 Tempo de hidratação na pré-cocção

Ambas as variedades de arroz foram submetidas a um processo de imersão em água, em temperatura ambiente, realizado em triplicata, com duração de 24 horas, com o propósito de avaliar sua taxa de hidratação de forma dinâmica e semelhante ao preparo caseiro (Figura 7). Os tempos de hidratação foram determinados com base na estabilização do ganho de água pelos grãos. Constatou-se que o arroz preto alcançou uma taxa de hidratação de aproximadamente 30% após 3 horas de imersão, enquanto o arroz vermelho atingiu cerca de 27% de hidratação após 2 horas.

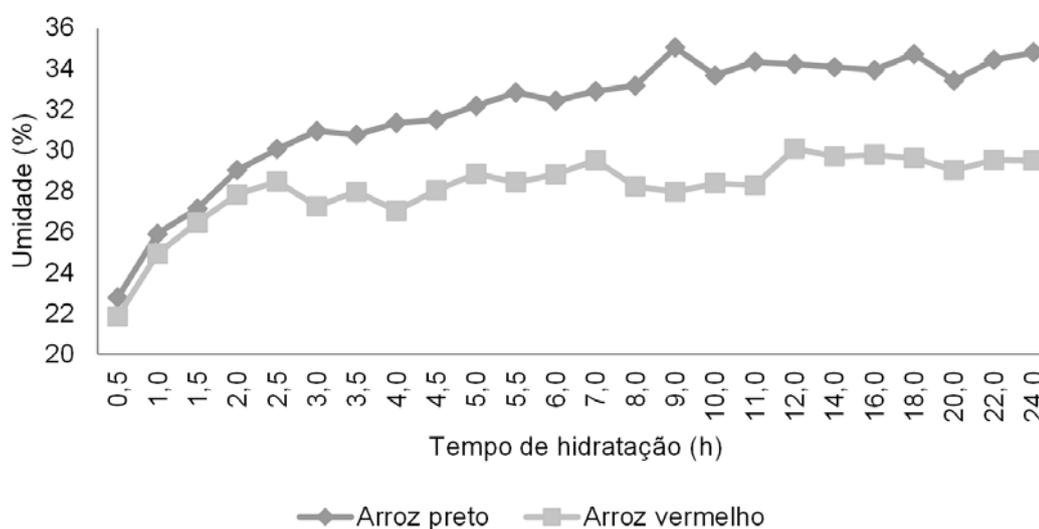


Figura 7 - Taxa de hidratação de arroz preto e do arroz vermelho cru.

6.1.3 Teor de amilose da farinha

O teor de amilose dos materiais utilizados, estão apresentados na Tabela 5.

Tabela 5 - Teor de amilose (%) dos diferentes tipos de arroz utilizados.

| Amostra | Teor de amilose (%) | Classificação¹ |
|----------------|----------------------------|----------------------------------|
| Arroz marrom | 24,36 ± 0,15 ^a | Intermediário |
| Arroz preto | 13,56 ± 0,15 ^c | Baixo |
| Arroz vermelho | 19,51 ± 1,25 ^b | Baixo |

¹Classificação segundo Juliano (1979).

Letras diferentes na mesma coluna indicam diferença estatística pelo teste de Tukey ($P < 0,05$) entre os arrozes.

Dentre os materiais analisados, o arroz marrom se destacou por apresentar o maior teor de amilose (24,36%). De acordo com a classificação de Juliano (1979) esse tipo de arroz pode ser categorizado como de amilose intermediária. Por outro lado, as variedades pigmentadas, tanto o arroz preto quanto o vermelho, foram classificadas como de baixo teor de amilose. O arroz preto apresentou o menor teor entre todos, com 13,56%, enquanto o arroz vermelho apresentou um teor de 19,51%.

6.1.4 Distribuição das estruturas moleculares da amilopectina do amido

As moléculas de amilopectina presentes no arroz consistem em cadeias que apresentam variados graus de polimerização (GP). A análise do amido dos três tipos de arroz abordou a distribuição das estruturas moleculares da amilopectina com base em seu grau de polimerização, conforme apresentado na Tabela 6.

Tabela 6 - Distribuição (%) do comprimento de cadeias laterais de amilopectina dos amidos isolados dos diferentes tipos de arroz utilizados.

| Amostra | GP6-12¹ | GP13-24¹ | GP25-36¹ | GP37-65¹ | CM² |
|----------------|---------------------------|----------------------------|----------------------------|----------------------------|---------------------------|
| Arroz marrom | 28,54 ± 0,08 ^b | 47,87 ± 0,07 ^b | 13,12 ± 0,23 ^{ns} | 10,47 ± 0,07 ^a | 19,81 ± 0,02 ^b |
| Arroz preto | 28,95 ± 0,06 ^a | 48,13 ± 0,2 ^b | 13,23 ± 0,07 | 9,68 ± 0,08 ^b | 19,53 ± 0,02 ^c |
| Arroz vermelho | 24,22 ± 0,02 ^c | 52,34 ± 0,04 ^a | 13,09 ± 0,12 | 10,34 ± 0,18 ^a | 20,19 ± 0,03 ^a |

¹GP: Grau de polimerização – expresso em unidades de resíduos de glicose;

²CM: Comprimento médio de cadeia de amilopectina – expresso em unidades de resíduos de glicose;

Letras diferentes na mesma coluna indicam diferença estatística pelo teste de Tukey ($P < 0,05$) entre os tratamentos, enquanto a abreviatura “ns” significa não significativo.

Conforme Hanashiro, Abe e Hizukuri (1996), as cadeias de amilopectina foram classificadas em diferentes tipos com base em seu grau de polimerização (GP), de acordo com o seguinte critério: Tipo A: GP variando de 6 a 12; Tipo B1: GP entre 13 e 24; Tipo B2: GP entre 25 e 36 e Tipo B3: GP acima de 36.

Todos os materiais utilizados exibiram uma maior concentração de cadeias classificadas como B1, caracterizadas por uma polimerização entre 13 e 24 unidades de glicose. Nesse contexto, o arroz vermelho se destacou ao apresentar uma porcentagem significativamente superior destas cadeias (52,34%) em comparação com os outros dois tipos de arroz, que registraram 42,13% (arroz preto) e 47,87% (arroz marrom).

Os três materiais analisados demonstraram diferenças significativas no comprimento médio das cadeias laterais de amilopectina (CM), determinado pelo número de resíduos de glicose. O arroz vermelho apresentou as maiores cadeias laterais (20,19), seguido pelo arroz marrom (19,81) e, por último, o arroz preto (19,53).

É relevante destacar que o arroz de pericarpo preto apresentou o maior teor de cadeias do tipo A (GP6-12=28,95%), caracterizadas por cadeias mais curtas, enquanto apresentou o menor teor de cadeias do tipo B3 (GP37-65=9,68%), que são cadeias mais longas.

6.1.5 Propriedades térmicas da farinha

As propriedades térmicas dos materiais utilizados foram analisadas através de calorimetria exploratória diferencial (DSC), que possibilita a identificação das temperaturas de início (T_o), de pico (T_p) e fim (T_c) do processo de gelatinização dos grânulos de amido, além de mensurar a energia térmica (ΔH) requerida para essa gelatinização. Estes resultados estão apresentados na Tabela 7.

Tabela 7 - Propriedades térmicas da farinha dos diferentes tipos de arroz utilizados.

| Amostra | T_o (°C) | T_p (°C) | T_c (°C) | ΔH (J/g) |
|----------------|---------------------------|---------------------------|---------------------------|---------------------------|
| Arroz marrom | 59,02 ± 0,79 ^b | 65,52 ± 0,21 ^c | 72,26 ± 0,56 ^b | 5,83 ± 0,79 ^{ns} |
| Arroz preto | 58,99 ± 0,37 ^b | 66,24 ± 0,19 ^b | 73,75 ± 0,01 ^b | 6,65 ± 0,63 |
| Arroz vermelho | 68,76 ± 0,16 ^a | 74,60 ± 0,18 ^a | 81,14 ± 0,04 ^a | 7,07 ± 0,97 |

¹ T_o = temperatura de início de gelatinização, T_p = temperatura de pico de gelatinização, T_c = temperatura de conclusão de gelatinização e ΔH = entalpia de gelatinização
Letras diferentes na mesma coluna indicam diferença estatística pelo teste de Tukey ($P < 0,05$) entre os tratamentos, enquanto a abreviatura “ns” significa não significativo.

Durante os testes preliminares, quando os grãos foram analisados após a cocção, não foram encontradas diferenças significativas nas propriedades térmicas. Isso se deve ao fato de que o amido já estava gelatinizado devido ao processo de cocção, e por isso, essa análise não teve prosseguimento nestas amostras.

Não foram notadas diferenças na entalpia de gelatinização entre os três tipos de arroz analisados, mas sim entre as temperaturas de gelatinização. Dentre os materiais pigmentados, as temperaturas de gelatinização mais elevadas encontradas no arroz vermelho contribuem para a compreensão do maior tempo e volume de água exigidos durante a cocção deste tipo de arroz em comparação ao arroz de pericarpo preto. Isso ocorre devido à relação positiva entre a temperatura de gelatinização e esses fatores (JULIANO e VILLAREAL, 1993).

6.1.6 Umidade dos grãos cozidos

O teor de umidade dos grãos apresentou diferenças significativas somente entre os diferentes tempos de cocção, apresentando incremento gradual com o maior tempo de cocção, como apresentado na Tabela 8. Aos 10 minutos de cocção, ambos os materiais apresentaram um teor de umidade de 48%. No entanto, ao atingir o tempo de 60 minutos, observou-se que os teores de umidade aumentaram para 77% no caso do arroz preto e 81% no arroz vermelho. Isso representa uma absorção de água 4% maior no arroz vermelho em comparação ao arroz preto.

Tabela 8 - Teor de umidade dos grãos cozidos por diferentes tempos.

| Tempo de cocção | Arroz preto | Arroz vermelho |
|------------------------|--------------------|-----------------------|
| 10 min | 48,30 ± 0,51 f | 48,09 ± 0,05 f |
| 20 min | 56,43 ± 0,05 e | 58,71 ± 0,28 e |
| 30 min | 64,47 ± 0,12 d | 68,93 ± 0,28 d |
| 40 min | 68,85 ± 0,24 c | 74,51 ± 0,56 c |
| 50 min | 72,15 ± 0,01 b | 76,51 ± 0,18 b |
| 60 min | 77,04 ± 0,09 a | 81,10 ± 0,01 a |

Letras diferentes na mesma coluna indicam diferença estatística pelo teste de Tukey ($P < 0,05$) entre os tratamentos.

Entre os demais tratamentos, incluindo variações no método de cocção, quantidade de água na cocção e tratamentos após a cocção, não houve diferença significativa e o teor de umidade médio foi de 64,91% no arroz preto, 71,30% no arroz vermelho e no arroz marrom, foi de 70,40%.

6.2 Compostos fenólicos após a cocção

6.2.1 Efeitos da cocção e do método de cocção

Durante o processo de cocção, os compostos fenólicos sofrem mudanças físicas e químicas complexas, incluindo a liberação de formas vinculadas, degradação, polimerização, oxidação e a formação de produtos da reação de Maillard. A natureza dessas mudanças depende da ligação dos compostos com a matriz e da sua estrutura química, que pode ser simples ou altamente polimerizada (MASSARETTO et al., 2011).

Na Tabela 9, são apresentados os teores de compostos fenólicos livres, complexados e totais encontrados em grãos de arroz de pericarpo preto e vermelho, submetidos a diferentes métodos de cocção (A), quantidade de grãos:água na cocção (B) e tempos de cocção (C). Além disso, a Tabela 9 também exhibe os efeitos da cocção nos compostos fenólicos, representados como percentual de aumento (se valor positivo) ou diminuição (se valor negativo), em comparação com o teor de fenólicos presente na amostra crua.

Os teores de fenólicos totais, livres e complexados encontrados nos grãos crus foram de 9,27, 3,97 e 5,29 mg/g para o arroz de pericarpo preto e 8,57, 3,38 e 5,19 mg/g para o arroz de pericarpo vermelho, respectivamente. Os resultados obtidos no presente estudo, conforme apresentados na Tabela 9, revelam que o arroz de pericarpo vermelho sofreu maior impacto da cocção em seus compostos fenólicos em comparação com o arroz preto. Isso se deve ao fato de o arroz vermelho ter apresentado, em média, maiores reduções no teor de fenólicos totais (-39%), livres (-64%) e complexados (-22%). O arroz preto mostrou, em média, redução nos fenólicos livres (-17%), mas, em contrapartida, um aumento nos complexados (+20%) e totais (+4%).

Essas observações corroboram com estudos anteriores que encontraram diferenças entre arrozes de diferentes cores de pericarpo. Por exemplo, Melini e Acquistucci (2017) constataram que o arroz preto não foi afetado pela cocção em nenhuma das frações de fenólicos, enquanto o vermelho apresentou redução na fração livre e aumento na ligada, resultando em aumento nos fenólicos totais.

Da mesma forma, Massaretto et al. (2011) observaram uma redução de 83% no teor de fenólicos livres no arroz pigmentado, enquanto o arroz não pigmentado sofreu redução de apenas 40% na mesma fração. Esses dados destacam a importância de considerar a cor do pericarpo do arroz no contexto do processamento e dos efeitos sobre os compostos fenólicos presentes.

A diferença no comportamento durante o processo de cocção entre os dois materiais pode ser atribuída à variação na composição fenólica dos grãos estudados. Nas variedades não-pigmentadas, como o arroz de pericarpo marrom, predominam os ácidos fenólicos, especialmente o ácido ferúlico e o ácido p-cumárico, que estão presentes em maiores concentrações (TIAN, NAKAMURA e KAYAHARA, 2004). Por outro lado, nas variedades pigmentadas, como o arroz preto e o arroz vermelho, predominam os flavonoides, mas cada um com sua composição específica.

No arroz preto, o destaque é para as antocianinas, responsáveis pela sua coloração característica, enquanto isso, no arroz vermelho, as proantocianidinas são os principais flavonoides presentes (RYU, PARK e HO, 1998; FINOCCHIARO, FERRARI e GIANINETTI, 2010; HIEMORI, KOH e MITCHELL, 2009).

Embora as antocianinas e as proantocianidinas sejam classificadas como flavonoides, apresentam propriedades distintas. As antocianinas são flavonoides monoméricos, geralmente glicosilados, enquanto as proantocianidinas são flavonoides oligoméricos ou poliméricos (ARON e KENNEDY, 2008; MACGHIE e WALTON, 2007). Essas duas classes de flavonoides apresentam respostas diferentes ao processo de cocção, e tais alterações são influenciadas por fatores como pH, temperatura, ligações glicosídicas e a matriz alimentar em que estão presentes (SUHR e KOH, 2014).

Nas proantocianidinas, as condições de cocção podem causar degradação, levando à despolimerização de suas estruturas, tornando-as mais simples, além de serem suscetíveis à ocorrer reações de polimerização (FULEKI e RICARDO-DASILVA, 2003).

Por outro lado, a redução das antocianinas durante a cocção pode ser atribuída a diferentes fatores, como a lixiviação na água de cocção, interações com outros compostos e, principalmente, a decomposição térmica (DELGADO-VARGAS; JIMENEZ e PAREDES-LOPEZ, 2000; ABDEL-AAL e HUCL, 2003; HOU et al., 2013; SUHR e KOH, 2014).

Tabela 9 - Conteúdo (mg/g) de compostos fenólicos totais, livres e complexados do arroz preto e vermelho cru e cozido e porcentagem (%) de aumento e redução após a cocção em relação ao grão cru.

| Tratamento | Arroz preto | | | Arroz vermelho | | |
|---|--|---------------|--------------------|-----------------|---------------|--------------------|
| | Total mg/g | Livre mg/g | Complexado mg/g | Total mg/g | Livre mg/g | Complexado Mg/g |
| Arroz cru | 9,27 ± 0,15 | 3,97 ± 0,09 | 5,29 ± 0,06 | 8,57 ± 0,04 | 3,38 ± 0,01 | 5,19 ± 0,03 |
| | % | - | - | % | - | % |
| Método de cocção¹ | | | | | | |
| PA | 9,92 ± 0,64 ns | 3,43 ± 0,63 b | 6,49 ± 0,01 ns | 5,03 ± 0,78 ns | 1,15 ± 0,01 b | 3,88 ± 0,77 ns |
| PE | 9,48 ± 0,14 | 3,14 ± 0,11 c | 6,34 ± 0,03 | 5,04 ± 0,78 | 1,17 ± 0,02 b | 3,87 ± 0,76 |
| SP | 8,99 ± 0,08 | 2,93 ± 0,06 d | 6,06 ± 0,02 | 5,27 ± 0,51 | 1,17 ± 0,02 b | 4,10 ± 0,49 |
| MO | 10,27 ± 0,48 | 3,65 ± 0,46 a | 6,62 ± 0,02 | 5,71 ± 0,47 | 1,35 ± 0,03 a | 4,36 ± 0,44 |
| Média | 9,67 ± 0,56 | 3,29 ± 0,32 | 6,38 ± 0,24 | 5,26 ± 0,32 | 1,21 ± 0,09 | 4,05 ± 0,23 |
| | % | +7 | -14 | +23 | -41 | -66 |
| | % | +2 | -21 | +20 | -41 | -65 |
| | % | -3 | -26 | +14 | -38 | -65 |
| | % | +11 | -8 | +25 | -33 | -60 |
| | % | +4 | -17 | +20 | -39 | -64 |
| Quantidade de água na cocção (m:v) | | | | | | |
| 1:4 | 9,51 ± 0,44 ab | 2,82 ± 0,32 a | 6,69 ± 0,13 b | 7,01 ± 0,53 d | 1,42 ± 0,03 a | 5,60 ± 0,50 d |
| 1:5 | 10,11 ± 0,33 a | 2,14 ± 0,31 b | 7,97 ± 0,02 a | 8,11 ± 0,75 cd | 1,20 ± 0,03 b | 6,91 ± 0,71 cd |
| 1:6 | 9,33 ± 0,13 ab | 1,64 ± 0,13 c | 7,70 ± 0,00 ab | 9,82 ± 0,53 bc | 1,14 ± 0,04 b | 8,68 ± 0,49 bc |
| 1:7 | 8,83 ± 0,36 ab | 1,44 ± 0,32 c | 7,39 ± 0,03 ab | 10,75 ± 0,55 ab | 0,97 ± 0,00 c | 9,78 ± 0,55 ab |
| 1:8 | 8,31 ± 0,42 b | 1,40 ± 0,42 c | 6,90 ± 0,00 ab | 12,14 ± 0,48 a | 0,92 ± 0,00 c | 11,22 ± 0,48 a |
| 1:9 | Condição não utilizada no arroz preto. | | | | | |
| | % | +3 | -29 | +26 | -18 | -58 |
| | % | +9 | -46 | +50 | -5 | -65 |
| | % | +1 | -59 | +45 | +15 | -66 |
| | % | -5 | -64 | +40 | +25 | -71 |
| | % | -10 | -65 | +30 | +42 | -73 |
| Tempo de cocção | | | | | | |
| 10 min | 6,94 ± 0,32 b | 0,88 ± 0,29 d | 6,06 ± 0,03 b | 3,81 ± 0,26 d | 0,43 ± 0,26 d | 3,37 ± 0,00 c |
| 20 min | 8,27 ± 0,16 a | 0,84 ± 0,16 d | 7,42 ± 0,00 a | 5,04 ± 0,52 c | 0,42 ± 0,52 d | 4,62 ± 0,00 b |
| 30 min | 8,10 ± 0,10 a | 0,98 ± 0,10 c | 7,12 ± 0,00 a | 5,86 ± 0,32 bc | 0,55 ± 0,30 c | 5,31 ± 0,02 ab |
| 40 min | 8,32 ± 0,23 a | 1,04 ± 0,23 c | 7,27 ± 0,00 a | 6,56 ± 0,25 ab | 0,79 ± 0,27 b | 5,77 ± 0,02 ab |
| 50 min | 8,02 ± 0,25 a | 1,20 ± 0,23 b | 6,81 ± 0,02 ab | 6,31 ± 0,30 ab | 0,79 ± 0,29 b | 5,52 ± 0,01 ab |
| 60 min | 8,14 ± 0,25 a | 1,39 ± 0,21 a | 6,76 ± 0,04 ab | 7,34 ± 0,04 a | 0,93 ± 0,00 a | 6,41 ± 0,03 a |
| | % | -25 | -78 | +14 | -56 | -87 |
| | % | -11 | -79 | +40 | -41 | -88 |
| | % | -13 | -75 | +34 | -32 | -84 |
| | % | -10 | -74 | +37 | -23 | -77 |
| | % | -14 | -70 | +29 | -26 | -77 |
| | % | -12 | -65 | +28 | -14 | -73 |

¹ PA = panela aberta, PE = panela elétrica, SP = sob pressão, MO = micro-ondas.

Letras diferentes na mesma coluna indicam diferença estatística pelo teste de Tukey ($P < 0,05$) entre os tratamentos, enquanto a abreviatura "ns" significa não significativo.

Essas diferentes classes de compostos fenólicos reagem de maneiras distintas durante o processo de cocção, resultando em variações nas concentrações após a cocção. Portanto, a presença predominante de ácidos fenólicos nos grãos não-pigmentados e de flavonoides, como antocianinas e proantocianidinas, nos grãos pigmentados, pode explicar as diferenças observadas nos teores de fenólicos livres, complexados e totais após a cocção entre o arroz preto e o arroz vermelho.

Ainda na Tabela 9, os teores de polifenóis complexados e totais não apresentaram diferenças estatisticamente significativas entre os diferentes métodos de cocção aplicados aos dois tipos de arroz estudados. No entanto, em relação à fração livre, os maiores valores (3,65 e 1,35 mg/g, para o arroz preto e vermelho, respectivamente) foram observados no arroz cozido utilizando o método de micro-ondas (MO), resultando em uma redução de 8% no arroz preto e de 60% no arroz vermelho em comparação com suas respectivas amostras não cozidas.

No caso do arroz vermelho, os demais métodos de cocção (PA, PE e SP) não mostraram diferenças significativas entre si, apresentando uma redução média de 65% nos teores de fenólicos livres após a cocção.

Quanto ao arroz preto, as menores perdas na fração livre foram observadas utilizando o PA como método de cocção (redução de 14%), seguido pelos métodos PE (redução de 21%) e SP (redução de 26%), sendo o método MO o que resultou em menor redução na concentração de fenólicos livres, como já mencionado.

Os estudos prévios que investigaram diferentes métodos de cozimento do arroz mostraram efeitos variados no conteúdo fenólico. Por exemplo, Chemiel et al. (2017) também encontraram uma redução no teor de fenólicos após o cozimento do arroz, sem diferenças significativas entre os métodos de cozimento utilizados. No entanto, em outra pesquisa conduzida por Yu et al. (2021), a maior redução do teor de fenólicos foi atribuída ao método que exigia maior tempo de cozimento, que, em seu estudo, foi a panela elétrica.

Outro fator importante é o material da panela utilizada durante a cocção. Catena et al. (2019) descreveram que o uso de panelas metálicas, como no caso dos métodos PA, PE e SP, pode resultar em alta temperatura na superfície interna da panela, favorecendo a degradação térmica dos compostos fenólicos. Por outro lado, a cocção em micro-ondas (MO) foi realizada em um recipiente de polietileno próprio para esse fim, o que não gera um aquecimento tão elevado. No estudo em questão, o método MO manteve os maiores teores fenólicos após a cocção, possivelmente devido à menor degradação desses compostos.

No entanto, em nosso estudo, este método (MO) resultou em maior desintegração da matriz dos grãos de arroz, evidenciada visualmente. Essa desintegração pode ter permitido a liberação dos fenólicos complexados para a forma livre, enquanto facilita a extração dos fenólicos complexados, conforme discutido na próxima seção (6.2.2), resultando em um conteúdo complexo semelhante aos demais métodos estudados.

Para o arroz preto, o método SP, embora gelatinize os grãos e os exponha a altas temperaturas por menos tempo, preservou melhor a estrutura dos grãos ao final da cocção, o que pode ter dificultado a extração dos compostos fenólicos.

A cocção do arroz pode ter efeitos variados nos compostos fenólicos, dependendo da variedade do arroz e do método de cocção utilizado. Em alguns estudos anteriores, foi observado que a cocção pode promover a liberação de fenólicos complexados, resultando em um aumento nos teores de compostos fenólicos livres (PALERMO et al., 2014), o que não foi observado no presente estudo.

De acordo com os resultados do presente estudo, todos os processos de cocção levaram à uma redução significativa no teor de fenólicos livres em comparação com o arroz cru, em ambos os tipos de arroz estudados. Isso indica que a fração livre de fenólicos é a mais afetada negativamente pelo processo de cocção, uma vez que a fração complexada apresentou menores perdas ou até mesmo aumento em alguns casos. Além disso, apesar da redução nos teores de fenólicos livres, alguns estudos, assim como o nosso, reportam um aumento no teor total de fenólicos após o cozimento, utilizando arroz de pericarpo marrom, vermelho e roxo (MIN, MCCLUNG e CHEN, 2014, YU et al., 2021).

Essas informações são relevantes para entender como os diferentes métodos de cocção afetam a disponibilidade de compostos fenólicos em cada tipo de arroz, contribuindo para o entendimento dos efeitos do processamento térmico na qualidade nutricional desses alimentos. É importante destacar que o método de cocção pode desempenhar um papel crucial na preservação ou degradação dos compostos fenólicos presentes no arroz, e que outros fatores, como o tempo de cocção, quantidade de água na cocção e a estrutura dos grãos, também podem influenciar os resultados. Desta forma, estes resultados podem ser úteis para a seleção adequada de métodos de cocção visando à preservação de compostos fenólicos.

6.2.2 Efeitos da quantidade de água e tempo de cocção

Os efeitos da quantidade de água e do tempo de cocção foram investigados no presente estudo, em ambos os tipos de arroz (Tabela 9). Os resultados mostraram uma redução linear no teor de fenólicos livres com o aumento da quantidade de água de cocção em ambos os arrozes, assim como observado no estudo de Palermo et al. (2014) que relataram uma maior evidência da perda de antocianinas com a maior quantidade de água utilizada na cocção. Como pode ser constatado, houve uma redução de 36% nesta fração no arroz preto, enquanto no arroz vermelho, a variação foi de apenas 15% entre as maiores e menores quantidades de água utilizadas na cocção.

No caso do arroz vermelho, observou-se um aumento gradativo da fração ligada com o aumento do volume de água utilizado, que variou de 8% a 116% em relação ao grão cru. O conteúdo total de fenólicos apresentou um resultado estatisticamente idêntico ao conteúdo complexado, sugerindo que a maior parte dos fenólicos presentes no arroz vermelho estão na sua forma complexada.

Para o arroz preto, os resultados mostraram aumentos na fração complexada de no mínimo 26% (na quantidade de 1:4) e de até 50% (na quantidade de 1:5). Em relação ao teor total de fenólicos, assim como no teor de complexados, o maior valor (10,1 mg/g) foi encontrado quando se utilizou uma quantidade de água de 1:5, ou seja, uma acima do ideal, conforme mencionado no item 2.2.

Os resultados encontrados no presente estudo são consistentes com estudos anteriores que também encontraram maiores perdas de compostos fenólicos quando o arroz pigmentado foi cozido em excesso de água (Zaupa et al., 2015; Chmiel et al., 2017). Esse efeito foi especialmente observado nos compostos fenólicos predominantes em cada um dos arrozes pigmentados, ou seja, nas proantocianidinas (FINOCCHIARO et al., 2007) e nas antocianinas (PALERMO et al., 2014).

Os resultados também mostraram que, no presente estudo, houve uma relação linear entre o teor de fenólicos e a quantidade de água utilizada apenas na fração livre, indicando que essa fração é mais suscetível à lixiviação e está diretamente relacionada com a quantidade de água utilizada durante a cocção. Por outro lado, a fração complexada, especialmente no caso do arroz vermelho, apresentou incrementos conforme o aumento da quantidade de água utilizado, sugerindo que maiores quantidades de água favorecem a liberação desses compostos da matriz do grão.

Conforme citado no item 2.2, o tempo ideal de cocção é de 30 minutos para o arroz de pericarpo preto e 36 minutos para o arroz de pericarpo vermelho. Portanto, é compreensível que os materiais de arroz cozidos por apenas 10 e 20 minutos ainda estivessem parcialmente cozidos. Os menores valores de fenólicos totais foram observados quando ambos os tipos de arroz foram cozidos por apenas 10 minutos (Tabela 9) e compreendem os valores de 6,94mg/g, no arroz preto e 3,81mg/g, no arroz vermelho.

Em relação à fração fenólica livre, constatou-se um aumento proporcional em relação ao tempo de cocção. Os menores valores de fenólicos livres foram registrados após 10 minutos de cocção no caso do arroz preto (0,88 mg/g) e após 10 e 20 minutos no arroz vermelho (0,43 e 0,42 mg/g, respectivamente). Por outro lado, os maiores valores, alcançando 1,39 mg/g no arroz preto e 0,93 mg/g no arroz vermelho, foram observados após 60 minutos de cocção.

Ainda conforme apresentado na Tabela 9, em comparação com os grãos crus, observou-se que ambos os tipos de arroz apresentaram reduções nos teores de fenólicos das frações total e livre, independente do tempo de cozimento. No arroz preto, essa redução foi mantida na faixa de 10% a 25% para a fração total e de 65% a 79% para a fração de fenólicos livres. No caso do arroz vermelho, os decréscimos corresponderam à faixa de 14% a 56% para a fração total e entre 73% e 87% para a fração livre.

No entanto, observou-se um aumento no teor de fenólicos complexados no arroz preto cozido, independentemente do tempo de cocção, que chegaram a 40% (20min). De maneira similar, o arroz vermelho exibiu aumentos de até 24% no teor de fenólicos complexados quando cozido por um tempo igual ou superior a 30 minutos.

Além disso, os resultados do presente estudo nos levam a supor que a cocção pode ter levado à lixiviação e degradação principalmente dos compostos fenólicos na forma livre, resultando em uma redução dessa fração. Ao mesmo tempo, houve um aumento na fração de compostos fenólicos complexados, possivelmente devido à ruptura da matriz do grão durante a cocção, permitindo uma maior extração dos compostos fenólicos (WACHTEL-GALOR et al., 2008; DUODU, 2011; MELINI e ACQUISTUCCI, 2017; NAYEEM et al., 2021). Isso fica evidente quando os maiores teores de compostos fenólicos foram encontrados nos grãos que apresentaram, visualmente, maior desintegração da matriz.

Em relação ao tempo de cocção, nossos resultados corroboram com outros estudos que também encontraram uma correlação negativa entre o tempo de cocção e o teor de fenólicos livres (TANG, CAI e XU, 2016). Os menores teores de fenólicos foram observados quando os grãos não estavam completamente cozidos, ou seja, quando a matriz estava mais intacta. À medida que o tempo de cocção aumentou, houve uma maior liberação da matriz, facilitando a extração e quantificação dos compostos fenólicos.

Tais resultados sugerem que a cocção por pressão, apesar de gelatinizar os grãos e exigir menos tempo de exposição a altas temperaturas, pode ter dificultado a extração dos compostos fenólicos no caso do arroz preto, justificado pela maior integridade dos grãos.

Esses resultados destacam o quanto a quantidade de água, o tempo de cocção e até mesmo a integridade dos grãos têm um papel importante na quantidade de compostos fenólicos no arroz, demonstrando a importância de levar em consideração esses aspectos ao cozinhar o arroz, a fim de manter os benefícios à saúde atribuídos a estes compostos.

6.2.3 Efeitos dos tratamentos de pré e pós-cocção

No processo de pré-cocção, que inclui lavagem e hidratação dos grãos (PRÉ1, PRÉ2 e PRÉ3) antes da cocção, não foram observadas alterações significativas nas frações de compostos fenólicos (livres, complexados e totais) após a cocção (Tabela 10). No entanto, quando a água de hidratação foi descartada e não utilizada na cocção (tratamento PRÉ4), houve uma redução de 29% no arroz preto e 70% no arroz vermelho na fração de compostos fenólicos livres.

Dentre os processos envolvidos no preparo para a cocção, Yamuangmorn, Dell e Prom-U-Thai (2018) afirmaram que o processo de hidratação teve grande influência na deterioração de compostos fenólicos solúveis de arroz pigmentado, quando imersos pelo período de 12h.

Outros trabalhos corroboram com os resultados encontrados em nosso estudo, mostrando que tratamentos pré-cocção, como a imersão em menores tempos, não afetam significativamente os teores de compostos fenólicos, especialmente de antocianinas (HIEMORI, KOH e MITCHELL, 2009; SUHR E KOH, 2014) e alterações ocasionadas pela substituição da água de hidratação na cocção indicam a perda destes compostos por lixiviação.

Portanto, os resultados encontrados no presente trabalho sugerem que o processo de hidratação prévia aos métodos de cocção, quando realizadas por períodos mais curtos, não influencia significativamente no conteúdo de compostos fenólicos, porém, o descarte da água de hidratação pode resultar em perdas na fração livre desses compostos.

Tabela 10 - Conteúdo (mg/g) de compostos fenólicos totais, livres e complexados do arroz preto e vermelho cru e cozido e submetido a tratamento de lavagem e hidratação antes da cocção e porcentagem (%) de aumento e redução após a cocção em relação ao grão cru.

| Tratamento | Arroz preto | | | | Arroz vermelho | | | | | | | |
|------------|----------------------------|------------|--------------------------|------------|---------------------------|------------|---------------------------|------------|--------------------------|------------|---------------------------|------------|
| | Total | | Livres | | Complexado | | Livres | | Complexado | | | |
| | mg/g | % | mg/g | % | mg/g | % | mg/g | % | mg/g | % | | |
| Arroz cru | 9,27 ± 0,15 | - | 3,97 ± 0,09 | - | 5,29 ± 0,06 | - | 8,57 ± 0,04 | - | 3,38 ± 0,01 | - | 5,19 ± 0,03 | - |
| PRÉ1 | 12,13 ± 0,16 ^{ns} | +31 | 3,48 ± 0,00 ^a | -13 | 8,65 ± 0,16 ^{ns} | +63 | 7,45 ± 0,36 ^{ns} | -13 | 1,40 ± 0,01 ^a | -59 | 6,05 ± 0,35 ^{ns} | +17 |
| PRÉ2 | 11,85 ± 0,10 | +28 | 3,57 ± 0,03 ^a | -10 | 8,28 ± 0,07 | +56 | 7,37 ± 0,05 | -14 | 1,35 ± 0,03 ^a | -60 | 6,02 ± 0,02 | +16 |
| PRÉ3 | 11,19 ± 0,48 | +21 | 3,36 ± 0,03 ^a | -15 | 7,83 ± 0,45 | +48 | 7,76 ± 0,03 | -9 | 1,29 ± 0,01 ^a | -62 | 6,47 ± 0,02 | +25 |
| PRÉ4 | 10,74 ± 0,25 | +16 | 2,80 ± 0,07 ^b | -29 | 7,94 ± 0,18 | +50 | 7,79 ± 0,09 | -9 | 1,02 ± 0,05 ^b | -70 | 6,77 ± 0,04 | +30 |

¹ PRÉ1 = sem lavagem e sem hidratação, PRÉ2 = com lavagem e sem hidratação, PRÉ3 = sem lavagem e com hidratação, utilizando a água de hidratação na cocção e PRÉ4 = sem lavagem e com hidratação, descartando a água de hidratação.

Letras diferentes na mesma coluna indicam diferença estatística pelo teste de Tukey (P < 0,05) entre os tratamentos, enquanto a abreviatura “ns” significa não significativo.

Na Tabela 11, apresentamos os teores de compostos fenólicos totais, livres e complexados de arroz de pericarpo preto e vermelho, após o processo de cocção e posterior resfriamento e congelamento.

A comparação entre as duas temperaturas utilizadas, 4°C para o resfriamento e -20°C para o congelamento, por análise de variância (ANOVA) e teste *t*, indica que apenas o arroz preto, mantido pelo tempo de 36h apresentou diferença significativa entre as duas temperaturas analisadas, sendo encontrado um conteúdo de compostos fenólicos livres de 3,16 mg/g nos grãos resfriados e 3,09 mg/g nos congelados. Isto indica que a temperatura não é um fator determinante no teor de fenólicos quando os grãos são armazenados após a cocção.

Observamos que tanto o resfriamento quanto o congelamento após a cocção apresentaram diferentes efeitos nos teores de compostos fenólicos em cada tipo de arroz. Nos grãos de arroz preto, os teores totais de compostos fenólicos permaneceram relativamente estáveis após o resfriamento e congelamento, com acréscimo médio de 3% comparado ao grão cru, indicando uma boa estabilidade desses compostos durante o armazenamento a baixas temperaturas.

No entanto, houve redução significativa na fração de compostos fenólicos livres após 72 horas de resfriamento (27%) e congelamento (26%), sugerindo que parte desses compostos podem ter sido perdidos ou complexados durante esse processo.

A fração complexada, não apresentou diferenças significativas, com uma média de aumento de 22 e 23% quando mantidos em refrigerador e congelador, respectivamente, quando comparado ao grão cru.

Por outro lado, nos grãos de arroz vermelho, os teores totais de compostos fenólicos apresentaram decréscimos que variaram de 2 a 15%, quando refrigerados, e de 1 a 25%, quando mantidos sob congelamento. Neste tipo de arroz, os maiores teores de compostos fenólicos livres, complexados e totais foram encontrados no arroz mantido em baixas temperaturas por períodos mais longos, com exceção do teor de fenólicos livres das amostras resfriadas, onde não houve diferenças significativas entre os tempos em que os grãos foram mantidos sob resfriamento.

Tabela 11 - Conteúdo (mg/g) de compostos fenólicos totais, livres e complexados do arroz preto e vermelho cru e cozido e submetido a tratamento de resfriamento e congelamento após cocção e porcentagem (%) de aumento e redução após a cocção em relação ao grão cru.

| Tratamento | Arroz preto | | | Arroz vermelho | | |
|--------------------|---------------------------|----------------------------|------------|---------------------------|---------------------------|----------------------------|
| | Total mg/g | Libre mg/g | % | Complexado mg/g | Libre mg/g | Complexado mg/g |
| Arroz cru | 9,27 ± 0,15 | 3,97 ± 0,09 | - | 5,29 ± 0,06 | 3,38 ± 0,01 | 5,19 ± 0,03 |
| Refrigerado | | | | | | |
| 12h | 9,61 ± 0,38 ^{ab} | 3,05 ± 0,35 ^b | -23 | 6,56 ± 0,03 ^{ns} | 0,90 ± 0,03 ^{ns} | 6,62 ± 0,25 ^{bc} |
| 24h | 10,02 ± 0,22 ^a | 3,23 ± 0,19 ^a | -19 | 6,79 ± 0,03 | 0,89 ± 0,01 | 6,35 ± 0,36 ^c |
| 36h | 9,58 ± 0,04 ^{ab} | *3,16 ± 0,02 ^{ab} | -20 | 6,41 ± 0,02 | 0,86 ± 0,02 | 6,53 ± 0,30 ^c |
| 48h | 9,35 ± 0,06 ^{ab} | 3,06 ± 0,01 ^b | -23 | 6,28 ± 0,05 | 0,87 ± 0,01 | 7,38 ± 0,07 ^{ab} |
| 72h | 9,23 ± 0,04 ^b | 2,91 ± 0,02 ^c | -27 | 6,32 ± 0,02 | 0,91 ± 0,04 | 7,49 ± 0,15 ^a |
| Média | 9,56 ± 0,30 | 3,08 ± 0,12 | -22 | 6,47 ± 0,21 | 0,89 ± 0,02 | 6,88 ± 0,52 |
| Congelado | | | | | | |
| 12h | 9,50 ± 0,12 ^{ns} | 3,02 ± 0,12 ^c | -24 | 6,48 ± 0,00 ^{ns} | 0,87 ± 0,02 ^b | 5,54 ± 0,38 ^c |
| 24h | 9,73 ± 0,15 | 3,19 ± 0,14 ^a | -20 | 6,54 ± 0,01 | 0,90 ± 0,01 ^b | 5,90 ± 0,16 ^{bc} |
| 36h | 9,97 ± 0,48 | 3,09 ± 0,47 ^b | -22 | 6,87 ± 0,01 | 0,86 ± 0,01 ^b | 6,64 ± 0,26 ^{ab} |
| 48h | 9,42 ± 0,20 | 3,06 ± 0,17 ^{bc} | -23 | 6,36 ± 0,03 | 0,91 ± 0,02 ^b | 6,49 ± 0,30 ^{abc} |
| 72h | 9,24 ± 0,03 | 2,92 ± 0,02 ^d | -26 | 6,32 ± 0,01 | 1,06 ± 0,04 ^a | 7,46 ± 0,11 ^a |
| Média | 9,57 ± 0,28 | 3,06 ± 0,10 | -23 | 6,51 ± 0,22 | 0,92 ± 0,08 | 6,41 ± 0,74 |

Letras diferentes na mesma coluna indicam diferença estatística pelo teste de Tukey ($P < 0,05$) entre os tempos de armazenamento. ^{“**”} significa diferença estatística pelo teste t ($P < 0,05$) entre as temperaturas de armazenamento e a abreviatura “ns” significa não significativo.

Em relação aos tratamentos pós-cocção, a ausência de diferenças significativas nos teores de compostos fenólicos entre o resfriamento e o congelamento do arroz, mantidos por um período máximo de 72 horas, sugere que as temperaturas adotadas não exerceram influência na concentração desses compostos. No entanto, as discrepâncias observadas em diferentes períodos de armazenamento indicam que o tempo é um fator determinante nesse parâmetro, especialmente no caso do arroz vermelho. Esses resultados fornecem informações importantes para o armazenamento adequado desses alimentos, visando a preservação dos compostos bioativos após o seu preparo.

6.3 Bioacessibilidade de compostos fenólicos após o processo de digestão simulada

6.3.1 Efeitos da digestão e métodos de cocção

No que se refere à bioacessibilidade dos compostos fenólicos após o processo de digestão simulada, foram investigados os efeitos dos diferentes métodos de cocção, quantidade grãos:água e tempo de cocção no arroz de pericarpo preto e vermelho, como mostrados na Figura 8A e B, C e D, E e F, respectivamente. A bioacessibilidade é definida como a quantidade de componentes liberados da matriz alimentar para o trato gastrointestinal, tornando-os disponíveis para absorção (HEANEY, 2001). A fração de compostos fenólicos totais dos grãos crus, ou seja, que não tenham passado pelo processo de cocção e de digestibilidade são apresentados na primeira coluna de cada painel, identificadas como “Cru”.

Da mesma forma que a concentração de compostos fenólicos após a cocção dos grãos, a sua bioacessibilidade é influenciada por fatores relacionados à composição e à integridade da matriz alimentar (ORTEGA et al., 2011), bem como características intrínsecas dos compostos fenólicos, como polimerização e tamanho, solubilidade (número de grupos hidroxila externos), índice de glicosilação e conjugação com outras moléculas. Polifenóis maiores e mais complexos apresentam menor bioacessibilidade, pois apenas as agliconas são absorvidas no intestino delgado, enquanto os glicosídeos e polímeros requerem hidrólise por enzimas ou microfauna intestinais antes da absorção (MANACH et al., 2004; CARBONELL-CAPELLA et al., 2014).

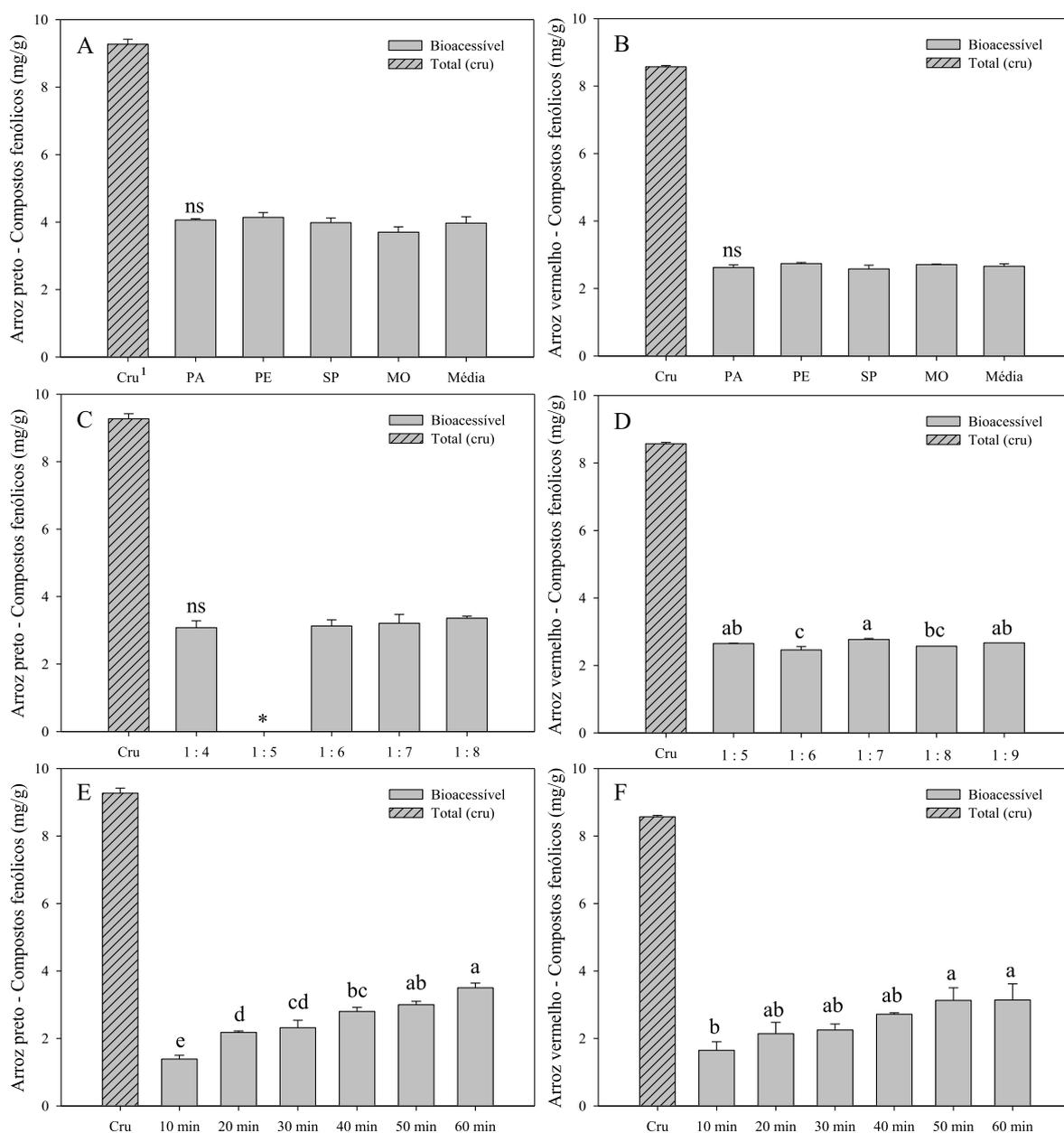


Figura 8 - Compostos fenólicos bioacessíveis de arrozes de pericarpo preto e vermelho submetido a diferentes métodos de cocção (A e B), quantidade de água (C e D) e tempo de cocção (E e F).

¹ Cru, PA = panela aberta, PE = panela elétrica, SP = sob pressão, MO = micro-ondas.

* A amostra foi desconsiderada.

Letras diferentes indicam diferença estatística pelo teste de Tukey ($P < 0,05$) entre diferentes tratamentos na fração bioacessível de compostos fenólicos enquanto a abreviação “ns” significa não significativo.

As características do alimento referem-se ao estado físico da matriz, interação dos componentes da matriz e os tratamentos térmicos aos quais são submetidos. Pesquisas indicam que o processamento de alimentos pode ter um impacto tanto positivo como negativo na bioacessibilidade dos compostos fenólicos, além de resultar na perda de compostos fenólicos durante a promoção de sua bioacessibilidade (MELINI, MELINI e ACQUISTUCCI, 2020).

O teor médio de fenólicos bioacessíveis no arroz preto foi de 4 mg/g (Figura 8A), enquanto no arroz vermelho foi de 2,7 mg/g (Figura 8B), não havendo diferença significativa entre os métodos de cocção utilizados em ambos os tipos de arroz. Em relação ao teor total de compostos fenólicos antes da cocção, a digestibilidade resultou em reduções médias de aproximadamente 57% no arroz preto e 61% no arroz vermelho.

Entre as diferentes proporções de água utilizadas durante a cocção, no arroz preto (Figura 8C), não foi observada variação significativa no teor de fenólicos bioacessíveis, mantendo-se uma média de 3,2mg/g. É relevante mencionar que a amostra submetida à quantidade de 1:5 apresentou vazamento do conteúdo do tubo durante o processo de liofilização e, portanto, foi excluída das análises.

No caso do arroz vermelho, o teor de compostos fenólicos bioacessíveis encontrado variou de maior para menor nas proporções 1:7 (2,8mg/g), 1:9 (2,7mg/g), 1:5 e 1:8 (ambas com 2,6mg/g) e 1:6 (2,5mg/g). Observou-se uma redução média de aproximadamente 66% do teor de fenólicos da fração bioacessível com o teor total presente nos grãos crus.

Observou-se um aumento gradativo no teor de fenólicos após a digestão com o aumento do tempo de cocção, conforme evidenciado na Figura 8E e F. Os valores encontrados no sobrenadante, variaram de 1,4 a 3,5mg/g no arroz preto e de 1,6 a 3,1mg/g no arroz vermelho, do tempo mais curto (10 minutos) ao mais longo (60 minutos) de cocção, respectivamente.

Ao comparar a fração bioacessível com o teor de fenólicos totais presentes antes da cocção, observou-se uma redução semelhante entre os dois materiais, que variou de 85% a 62% no arroz preto e de 81% a 63% no arroz vermelho, aos 10 minutos e 60 minutos de cocção, respectivamente.

A fração bioacessível nos grãos cozidos apresentou teores de compostos fenólicos superiores aos compostos fenólicos livres, porém inferiores aos totais, independente do tratamento utilizado. Esse resultado sugere que os processos envolvidos na digestão gastrointestinal, como a ruptura da matriz e a ação enzimática, levaram à liberação de compostos complexados, tornando-os livres e acessíveis.

É notável que os fatores mencionados no item 6.2 Compostos fenólicos após , afetam tanto o teor de compostos fenólicos após a cocção quanto a bioacessibilidade destes compostos.

6.3.2 Efeitos da digestão e tratamentos de pós cocção

A Figura 9 apresenta os teores de fenólicos bioacessíveis nos grãos de arroz preto (A e C) e arroz vermelho (B e D) após a cocção, quando armazenados em baixas temperaturas. Os períodos de armazenamento foram de 12 a 72 horas, com análises realizadas a cada 12 horas dentro desse intervalo. Os painéis A e B referem-se ao armazenamento sob resfriamento, enquanto os painéis C e D correspondem ao armazenamento sob congelamento.

Em ambos os materiais, não foram observadas variações significativas nos teores de fenólicos bioacessíveis entre os diferentes tempos de armazenamento sob a mesma temperatura, nem entre as diferentes temperaturas de armazenamento.

O arroz preto apresentou um teor médio de fenólicos bioacessíveis de 4,00 mg/g, com uma redução média de 57% em comparação com os grãos crus. Por sua vez, o arroz vermelho apresentou um teor médio de 2,42 mg/g, com uma redução média de 72% em relação aos grãos crus.

Em relação aos tratamentos pós-cocção e sua influência na bioacessibilidade, as diferenças observadas nos teores de fenólicos após a cocção foram atenuadas durante a digestão, uma vez que não foram encontradas diferenças significativas entre os tratamentos.

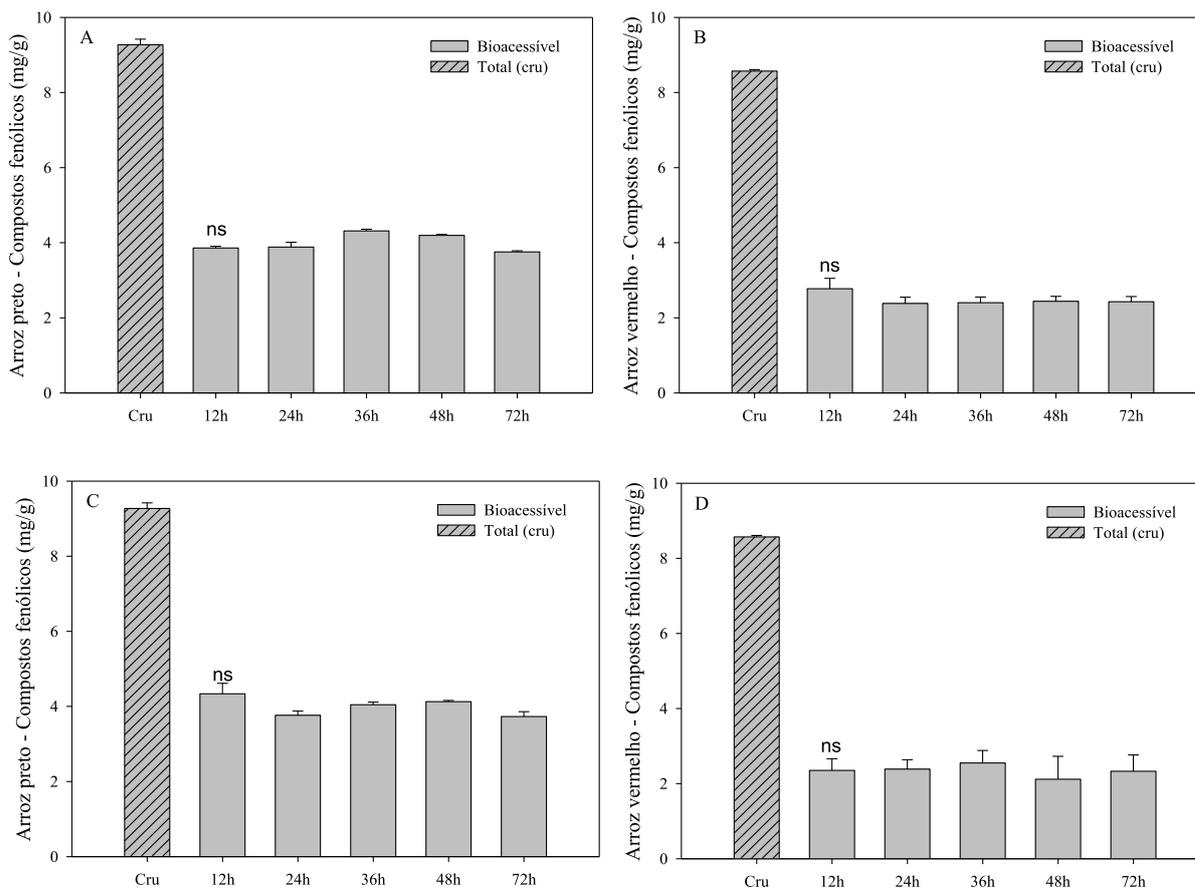


Figura 9 - Compostos fenólicos bioacessíveis de arrozes de pericarpo preto e vermelho submetidos a tratamentos de resfriamento (A e B) e congelamento (C e D) após a cocção. A abreviatura “ns” significa não significativo, indicando que foi encontrada significativa diferença estatística entre as temperaturas de armazenamento, pelo teste t ($P < 0,05$), e entre os tempos de armazenamento, pelo teste de Tukey ($P < 0,05$).

6.3.3 Compostos fenólicos nos grãos residuais da digestão simulada

No estudo variando os diferentes métodos de cocção, após a digestão, além da fração do sobrenadante, ou seja, fração líquida (denominado como digerido – líquido) já discutida nos tópicos anteriores, os fenólicos foram quantificados também na fração sólida, ou seja, nos grãos residuais, que mantiveram certa integridade ao final do processo. Esta fração foi denominada como digerido – sólido. Para a obtenção do teor total de fenólicos da fração digerida, além do teor complexado, encontrado somente na fração sólida após a digestão, foram somados os teores de fenólicos livres das duas frações (líquida e sólida). Os dados são apresentados na Figura 10.

Conforme os dados apresentados na Tabela 12, os grãos residuais, apresentaram um aumento notável nos teores de fenólicos totais em comparação com os grãos cozidos. Especificamente, o arroz preto demonstrou um aumento médio de 100%, enquanto o arroz vermelho teve um aumento médio de cerca de 117% na fração total de fenólicos. Esse aumento é uma descoberta relevante, pois sugere que o processo de digestão pode liberar e tornar acessíveis os compostos fenólicos anteriormente complexados ou não-disponíveis nos grãos de arroz.

De forma mais específica, a fração livre de fenólicos, que abrange os compostos fenólicos não complexados com outras moléculas, mostrou um aumento ainda mais expressivo. No arroz preto, houve um aumento médio de cerca de 325%, enquanto no arroz vermelho, esse aumento foi ainda mais notável, atingindo uma média de 589%.

Em contrapartida, houve uma diminuição de cerca de 20% nos teores de fenólicos complexados em ambos os tipos de arroz.

Os resultados indicam que há uma subestimação tanto nos teores de fenólicos potencialmente biodisponíveis de grãos crus quanto de cozidos. Esse fenômeno é observado devido ao fato de que, após o processo de digestão, os valores relativos aos fenólicos livres nos grãos que mantiveram a matriz parcialmente íntegra demonstraram aumentos significativos, variando entre aproximadamente 300% e 600%.

Esses resultados indicam que o processo de digestão *in vitro* desempenha um papel fundamental na liberação e disponibilização de compostos fenólicos no arroz, tornando-os mais acessíveis. Isso tem implicações significativas para a biodisponibilidade desses compostos e seu potencial impacto na saúde, uma vez que os fenólicos têm sido associados a uma série de benefícios a saúde, como já mencionado anteriormente.

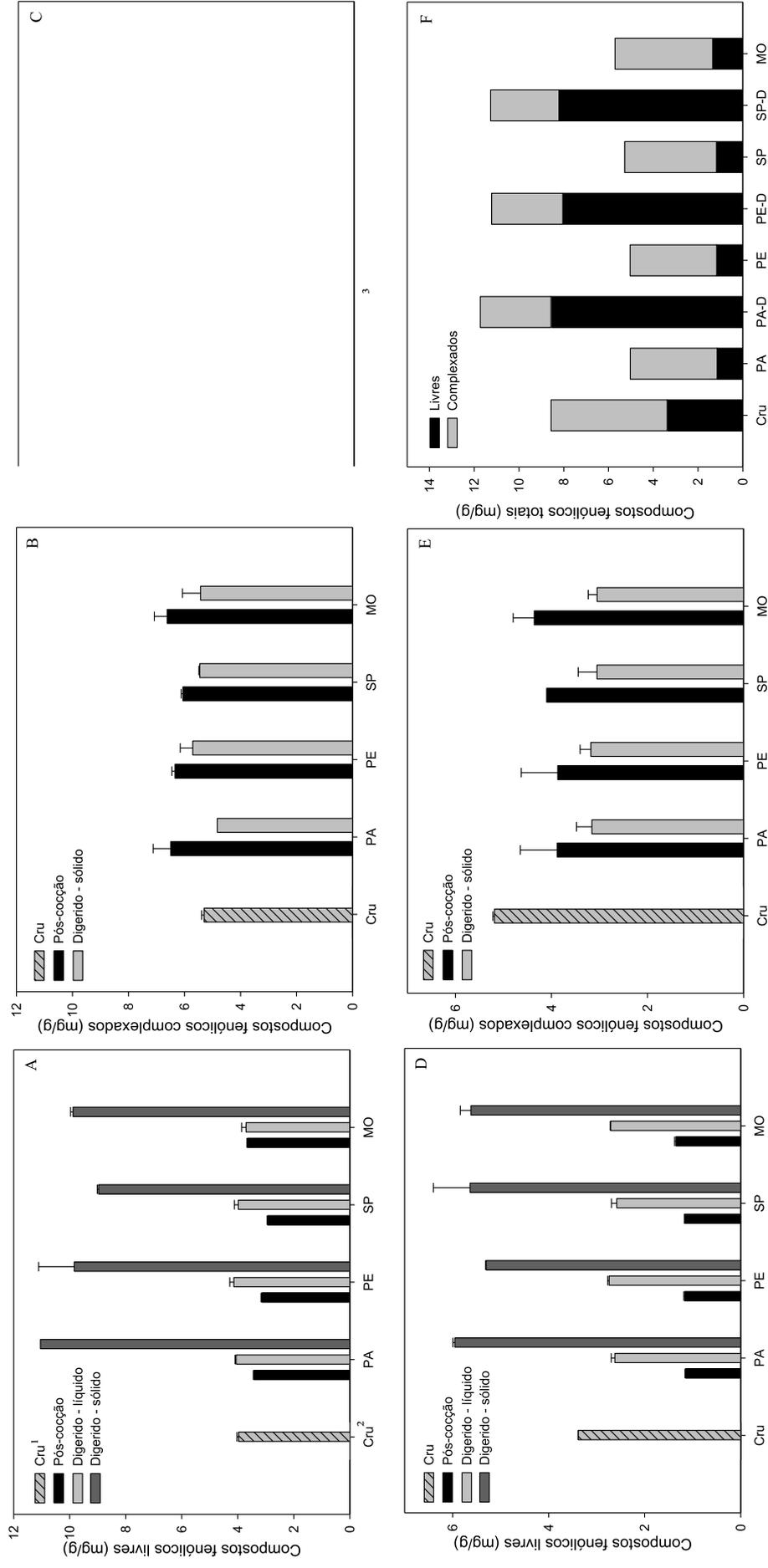


Figura 10 - Compostos fenólicos livres, complexados e totais de arroz de pericarpo pigmentado de preto (A, B e C) e vermelho (D, E e F) submetidos a diferentes métodos de cocção e ao processo de digestão *in vitro*.

¹ Cru, Pós-cocção = grãos analisados após a cocção, Digerido – líquido = fração líquida coletada ao final do processo de digestão *in vitro*, Digerido – sólido = fração sólida (grãos e fragmentos de grãos) coletada ao final do processo de digestão *in vitro*.

² Cru, PA = panela aberta, PE = panela elétrica, SP = sob pressão, MO = micro-ondas.

³ Letra D se refere a soma das duas frações analisadas após a digestão (digerido-líquido e digerido-sólido).

Tabela 12 - Porcentagem (%) de aumento e redução de compostos fenólicos totais, livres e complexados na fração sólida após a digestão em relação ao grão cozido.

| Tratamento ¹ | Arroz preto | | | Arroz vermelho | | |
|-------------------------|-------------|-------------|------------|----------------|-------------|------------|
| | Total | Livre | Complexado | Total | Livre | Complexado |
| PA | +101 | +340 | -26 | +133 | +647 | -19 |
| PE | +108 | +345 | -10 | +123 | +589 | -18 |
| SP | +105 | +342 | -10 | +114 | +600 | -26 |
| MO | +85 | +272 | -18 | +99 | +518 | -30 |
| <i>Média</i> | <i>+100</i> | <i>+325</i> | <i>-16</i> | <i>+117</i> | <i>+589</i> | <i>-23</i> |

¹ PA = panela aberta, PE = panela elétrica, SP = sob pressão, MO = micro-ondas.

Conforme destacado por Barba et al. (2017), mesmo que os polifenóis não sejam prontamente absorvidos, sua presença como compostos antioxidantes no estômago e no intestino ainda exerce efeitos benéficos, contribuindo para evitar o desenvolvimento de doenças gastrointestinais. Esses órgãos estão constantemente expostos a compostos nocivos, como as Espécies Reativas de Oxigênio (ROS), que são compostos altamente instáveis e reativos derivados do oxigênio, capazes de causar danos aos tecidos. Portanto, a manutenção do conteúdo de compostos fenólicos no arroz após a digestão é de extrema importância para a saúde gastrointestinal e deve ser devidamente considerada.

6.3.4 Correlação entre compostos fenólicos após a cocção e compostos fenólicos bioacessíveis

Para estabelecer uma relação entre os teores de compostos fenólicos após a cocção e a fração bioacessível, realizou-se a análise estatística de correlação de Pearson, cujos resultados são apresentados na Tabela 13. Os dados indicam que a presença de compostos fenólicos bioacessíveis está principalmente relacionada à fração livre de fenólicos após a cocção, pois apenas essa fração apresentou uma correlação significativa em ambos os tipos de arroz e no total, ou seja, utilizando os resultados de ambos os materiais. De acordo com a classificação proposta por Callegari-Jacques (2009), essa correlação é considerada forte tanto no total (0,69 - ambos materiais), quanto no caso do arroz preto (0,68) e moderada no caso do arroz vermelho (0,49).

A fração ligada não demonstrou qualquer correlação com a fração bioacessível em ambos os tipos de arroz, e a fração total apresentou uma correlação significativa apenas no caso do arroz preto, sendo classificada como moderada (0,48).

Tabela 13 - Correlação de Pearson entre o teor de compostos fenólicos com a bioacessibilidade.

| Fração fenólica | Bioacessibilidade | | |
|-----------------|---------------------|--------------------|--------------------|
| | Arroz preto | Arroz vermelho | Total ¹ |
| Total | 0,48 * | 0,32 ^{ns} | 0,40 ^{ns} |
| Livre | 0,68 * | 0,49 * | 0,69 * |
| Complexada | -0,36 ^{ns} | 0,26 ^{ns} | 0,12 ^{ns} |

¹ Considerando ambos materiais.

* As correlações têm uma significância de 1% ($P < 0,01$).

^{ns} As correlações não são significativas ($P > 0,01$).

6.4. Digestibilidade de amido: taxa de hidrólise

6.4.1 Efeitos das condições de cocção na digestibilidade do amido

O amido representa a principal fonte de carboidratos digestíveis na dieta humana, sendo responsável por fornecer glicose, que desempenha papel energético fundamental no metabolismo. É notável que alimentos com teores semelhantes de amido podem induzir respostas variadas de glicose no sangue após a refeição (PATEL et al., 2014).

A taxa de digestão é intrinsecamente influenciada pelas propriedades químicas e físicas dos alimentos, assim como pelos eventos fisiológicos que ocorrem no trato gastrointestinal (KONG e SINGH, 2008). Enquanto os carboidratos simples são geralmente inteiramente absorvidos no intestino delgado, alguns carboidratos mais complexos resistem à digestão nesta fase e podem alcançar o intestino grosso, onde servem como substrato para a microbiota intestinal (DANNESKIOLD-SAMSØE et al., 2019). Além disso, é importante ressaltar que as transformações que ocorrem durante o processamento dos alimentos também exercem uma influência significativa sobre essa digestibilidade (KONG e SINGH, 2008).

A Figura 11 apresenta os resultados da taxa de hidrólise do amido de grãos de arroz de pericarpo preto e vermelho, respectivamente, quando submetidos a diferentes métodos de cocção (A e B), diferentes proporções grão:água na cocção (C e D) e diferentes tempos de cocção (E e F).

A porcentagem final de hidrólise do amido (em I120), em média, foi de 65% no arroz preto (Figura 11A) e 57% no arroz vermelho (Figura 11B), quando submetidos a diferentes métodos de cocção.

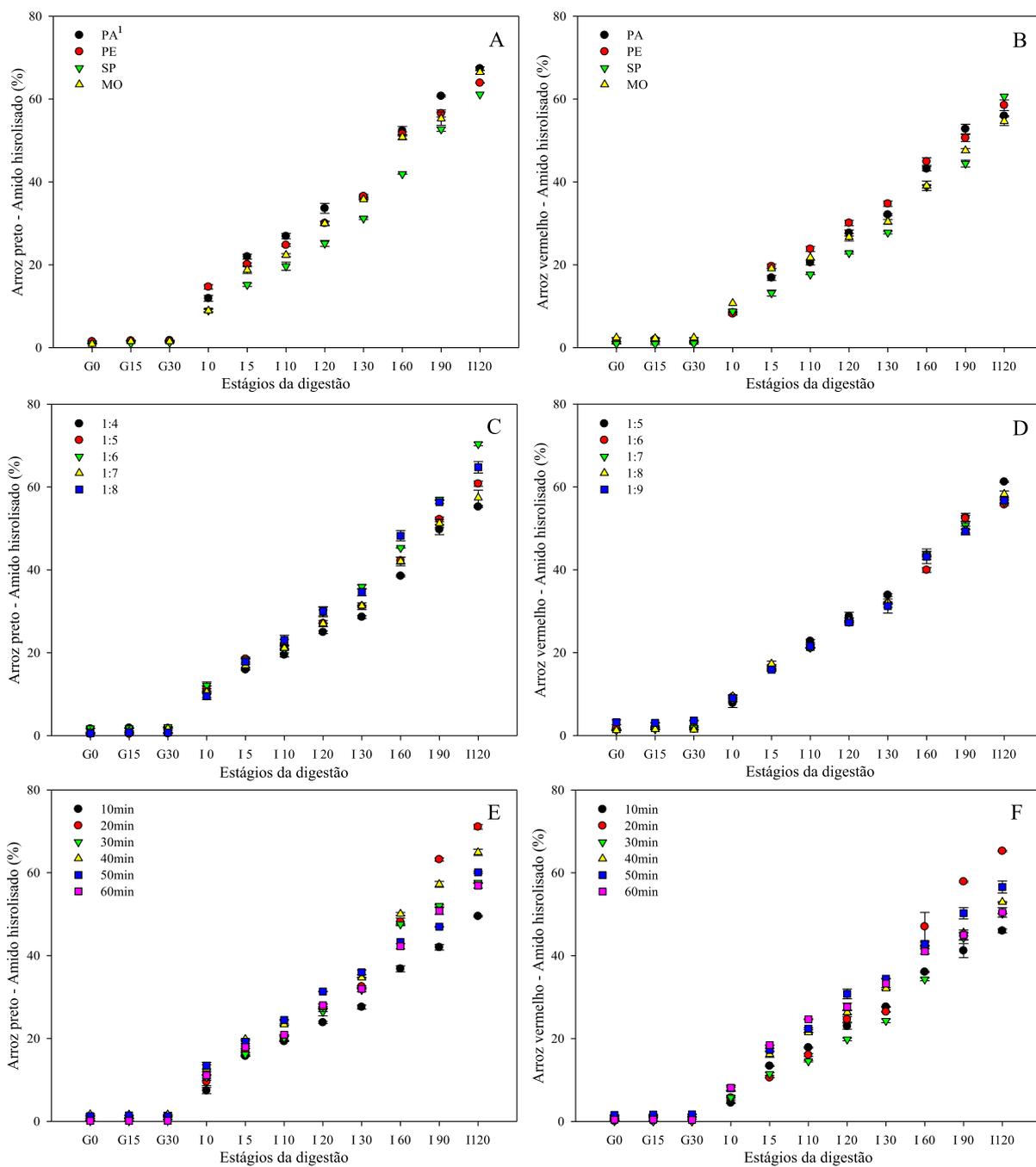


Figura 11 - Digestibilidade (%) do amido de arroz de pericارو pigmentado preto e vermelho submetidos a diferentes métodos de cocção (A e B), quantidade de água (C e D) e tempo de cocção (E e F).

¹ Cru, PA = panela aberta, PE = panela elétrica, SP = sob pressão, MO = micro-ondas.

Estudos têm associado uma menor hidrólise do amido no arroz de alta amilose (HU et al., 2004). Esse fenômeno pode ser explicado pelo fato de a amilopectina ser uma molécula significativamente maior do que a amilose, o que resulta em uma área de superfície/molécula maior, tornando-a um substrato preferencial para o ataque das enzimas amilolíticas (SINGH, DARTOIS e KAUR, 2010). Vale ressaltar que ambos os materiais apresentaram baixo teor de amilose, como é apresentado na Tabela 5, porém o arroz vermelho, que apresentou menores valores de amido hidrolisado, apresentou maior teor de amilose, quando comparado ao arroz preto.

Já considerando o arranjo da matriz, especificamente a estrutura da amilopectina, o arroz vermelho exibe um maior comprimento médio de cadeia e uma menor quantidade de cadeias mais curtas de amilopectina (Tabela 6). Essa estrutura mais complexa e a presença de moléculas maiores podem ajudar a explicar as menores taxas de hidrólise observadas nesse tipo de arroz, uma vez que as enzimas α -amilases iniciam o ataque nas extremidades da cadeia de amido (SMITH, ZEEMAN e SMITH, 2005).

Independente do tratamento empregado, conforme esperado, durante a simulação da digestão, não foi observada hidrólise do amido na fase gástrica (G0 a G30). Esse resultado pode ser atribuído à ausência de enzimas amilases no suco gástrico. No entanto, o teor de hidrólise do amido aumentou significativamente durante a fase intestinal (I0 a I120) devido à presença e ação das enzimas amilase pancreáticas (TAMURA et al., 2016). Essas enzimas desempenham um papel crucial na quebra do amido em moléculas menores, facilitando a sua absorção pelo organismo.

Quando empregados diferentes métodos de cocção, observou-se uma diferença na liberação de glicose entre os grãos cozidos pelo método de pressão em ambos os materiais. Para o arroz preto, essa diferença começou a ser notada a partir da fase I5 e perdurou até I120. Já no caso do arroz vermelho, a diferença foi notável até a fase I90. Tais resultados indicam que o método de pressão influenciou a taxa de hidrólise do amido nos dois tipos de arrozes, resultando em uma liberação de glicose menor em comparação com outros métodos de cocção.

No caso do arroz vermelho (Figura 11D), não foi observada diferença significativa entre as proporções de água utilizadas, mantendo a média de 57% de amido hidrolisado ao final da digestão (I120).

Por outro lado, no arroz preto (Figura 11C), a maior quantidade de água utilizada (1:8) resultou em uma maior hidrólise do amido nas fases finais da digestão, sendo superada apenas pela quantidade intermediária de 1:6 na última etapa, com taxas de 70% e 65%, respectivamente. Ainda, a cocção com a menor quantidade de água que foi totalmente absorvida até o final do tempo de cocção (1:4) apresentou as menores taxas de hidrólise do amido.

Os resultados também demonstraram que o tempo de cocção de 10 minutos resultou nos menores índices de hidrólise, com 50% para o arroz preto (Figura 18E) e 46% para o arroz vermelho (Figura 11F). Em seguida, o tempo de 30 minutos apresentou índices de 58% para o arroz preto e 50% para o arroz vermelho (Figura 11F).

Curiosamente, os maiores índices de hidrólise foram observados após 20 minutos de cocção: 71% no arroz preto e 65% no arroz vermelho. Os demais tempos de cocção de 40, 50 e 60 minutos mostraram índices de 65%, 60% e 56% para o arroz preto e 53%, 57% e 50% para o arroz vermelho, respectivamente. Visto que em tais amostras houve variação no teor de umidade (Tabela 8), foi realizada a análise de correlação de tal parâmetro com o teor de hidrólise do amido e não foi encontrada correlação significativa através da análise de correlação de Pearson ($P < 0,01$).

O processo de cocção promove um aumento na taxa de hidrólise ao gelatinizar o amido, tornando-o mais facilmente disponível para o ataque enzimático (SINGH, KAUR e SINGH, 2013). Além disso, Berg et al. (2012) constataram que uma maior hidrólise do amido ocorreu quando houve o rompimento da camada mais externa dos grãos de feijão, em comparação com os tratamentos que mantiveram a estrutura intacta.

Conforme descrito por Ogawa et al. (2018), tanto a matriz do grão quanto a matriz das células protegem os grânulos de amido contra a ação das enzimas digestivas durante o processo de digestão. No entanto, quando essas matrizes são fragmentadas, ocorre uma maior facilidade de acesso enzimático ao conteúdo celular, resultando em um aumento significativo da hidrólise do amido.

Estudos recentes têm apontado que a integridade do grão exerce uma influência maior na taxa de hidrólise do amido do que a concentração de α -amilase salivar (TAMURA et al., 2017) e o grau de gelatinização do amido (TAMURA et al., 2016). De acordo com Tamura et al. (2016), não foram encontradas diferenças significativas na taxa de hidrólise do amido ao variar o tempo de cocção entre 10 e 20

minutos. Isso sugere que a hidrólise está relacionada à área superficial dos grânulos de amido que são expostos durante a digestão, estando diretamente ligada à integridade da matriz e ao tamanho das partículas (TESTER e KARKALAS, 2006; AL-RABADI, GILBERT e GIDLEY, 2009; RANAWANA, et al., 2010; TAMURA et al., 2017).

No presente estudo, observamos que procedimentos envolvidos na cocção, que resultam em grãos com estrutura matricial mais exposta, como o uso de excesso de água e um tempo de cocção prolongado, favoreceram o ataque enzimático, devido à maior área de contato exposta. Como resultado, houve maior hidrólise do amido. Por outro lado, a cocção sob pressão (PC), assim como o menor tempo de cocção avaliado (10 minutos), que manteve, visualmente, a maior integridade dos grãos após a cocção, mesmo após a homogeneização, apresentou uma superfície menos exposta e maior resistência à ação enzimática, resultando em uma liberação de glicose reduzida durante a digestão.

Os resultados obtidos indicam que a ruptura da camada externa do grão de arroz favorece significativamente o processo de digestão do amido, tornando-o mais acessível às enzimas digestivas. Isso ressalta a relevância das estruturas de proteção presentes no grão e nas células como elementos reguladores críticos do processo digestivo. Além disso, os resultados nos mostram a importância das técnicas de cocção sobre a digestão do grão de arroz, demonstrando que diferentes métodos podem influenciar a hidrólise do amido e desta forma, auxiliar na seleção dos parâmetros para atender diferentes exigências ou necessidades alimentares.

6.4.2 Efeito dos tratamentos de resfriamento e congelamento após a cocção

A Figura 12 ilustra as taxas de hidrólise do amido das três variedades de arroz, o arroz de pericarpo marrom (painéis A e B), o arroz de pericarpo preto (painéis C e D) e o arroz de pericarpo vermelho (painéis E e F). Essas amostras foram submetidas a diferentes tratamentos de resfriamento e congelamento após o processo de cocção, com períodos de armazenamento variando entre 12, 24, 36, 48 e 72 horas.

Em média, ao avaliarmos o comportamento do arroz marrom, observamos que ele apresentou uma taxa de hidrólise de aproximadamente 56% quando submetido ao processo de resfriamento (Figura 12A) e cerca de 59% quando submetido ao congelamento (Figura 12B).

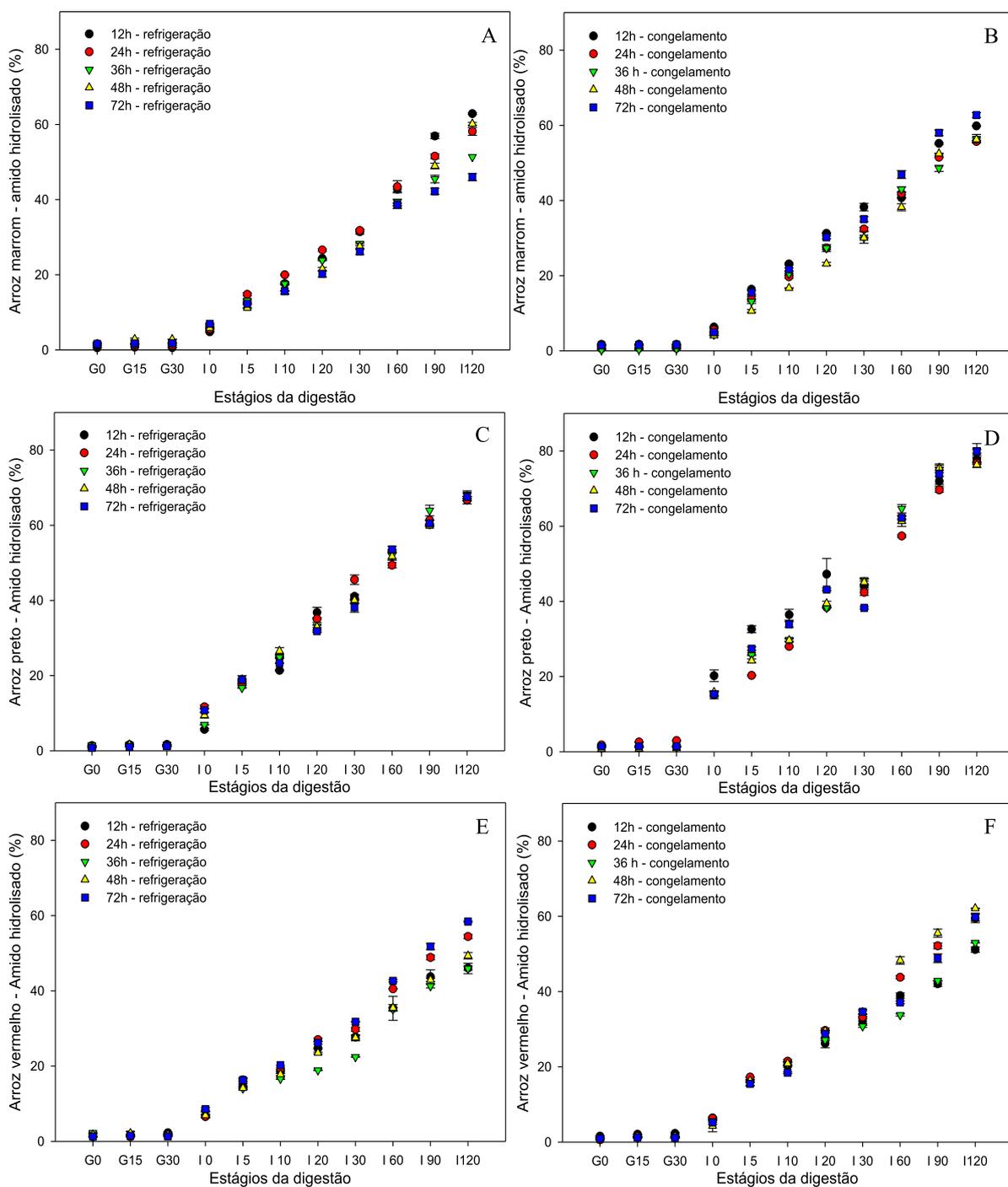


Figura 12 - Digestibilidade (%) do amido de arrozes de pericarpo marrom (A e B), preto (C e D) e vermelho (E e F) submetidos a tratamentos de resfriamento e congelamento após a cocção.

É interessante notar que as amostras mantidas sob refrigeração demonstraram variações mais acentuadas ao longo dos diferentes períodos de armazenamento em comparação com as amostras congeladas. A maior taxa de hidrólise, atingindo 63%, foi observada após um período de 12 horas de armazenamento sob refrigeração. No entanto, após 72 horas de armazenamento sob refrigeração, observou-se uma redução de 17% na taxa de hidrólise, resultando em uma taxa final de hidrólise de aproximadamente 46%.

Vale ressaltar que tanto o arroz mantido sob refrigeração por 12 horas quanto o arroz mantido sob congelamento por 72 horas apresentaram a mesma taxa de hidrólise, atingindo 63%.

O arroz vermelho, assim como o arroz marrom, demonstrou variações nas taxas de hidrólise dependendo do tempo e da temperatura de armazenamento após o processo de cocção. Tanto para os grãos refrigerados quanto para os congelados, os períodos de armazenamento de 12 e 36 horas apresentaram as menores taxas de hidrólise (Figura 12E), com médias de 42% nas amostras refrigeradas e cerca de 52% nas amostras congeladas (Figura 12F). Em média, a taxa de hidrólise foi de aproximadamente 52% quando as amostras foram mantidas sob refrigeração e cerca de 58% quando congeladas.

No arroz de pericarpo preto, não foram observadas alterações entre os tratamentos em relação ao tempo em uma mesma temperatura (Figura 12C e D). No entanto, a média de hidrólise nos grãos refrigerados foi de 68% (Figura 12C), enquanto a média nos grãos congelados foi cerca de 10% maior (Figura 12D).

Um resultado interessante foi observado na fase I30 da digestão dos grãos submetidos ao congelamento, onde houve uma queda na liberação de glicose, contrariando a tendência geral de aumento gradual com o passar do tempo.

Durante a gelatinização do amido, ocorre a ruptura dos grânulos de amido devido à desintegração da estrutura cristalina da amilopectina. No entanto, durante o processo de retrogradação, que acontece quando o amido é resfriado, ocorre a reorganização dessas cadeias, sendo mais rápida nas moléculas de amilose do que nas de amilopectina (SINGH et al., 2008). Esse fenômeno de retrogradação não teve impacto significativo na hidrólise de amido do arroz marrom, mas afetou os arrozes de pericarpo pigmentado, sendo que o arroz de pericarpo preto foi o mais intensamente afetado, resultando em uma redução de aproximadamente 10% na hidrólise de amido.

Essas informações são de relevância para o entendimento dos efeitos do processamento culinário na digestibilidade dos carboidratos e podem ser valiosas para o planejamento de dietas específicas e para indivíduos que necessitam de um controle mais rigoroso da liberação de glicose na corrente sanguínea. Essas observações ressaltam a importância das técnicas de cocção na digestibilidade do amido e como diferentes métodos podem afetar a disponibilidade de nutrientes e o perfil glicêmico após a ingestão de alimentos à base de grãos. Compreender esses efeitos pode auxiliar na escolha adequada de técnicas culinárias, visando melhorar a qualidade nutricional das refeições e atender a diferentes necessidades dietéticas.

6.4.3 Correlação entre compostos fenólicos e percentual de hidrólise do amido

As mudanças na digestibilidade do amido podem ser atribuídas não apenas a alterações estruturais, mas também ao arranjo e à composição da sua matriz e, o processamento de cereais pode desempenhar um papel importante no aprimoramento da digestibilidade, pois reduz a presença de compostos que normalmente diminuem a digestibilidade, tais como ácido fítico, taninos e polifenóis, que inibem a atividade da enzima α -amilase (SINGH, DARTOIS e KAUR, 2010).

Os polifenóis, em particular, têm a capacidade de inibir a atividade enzimática, resultando em uma resposta glicêmica mais baixa. Essa resposta está diretamente relacionada aos teores e ao perfil dos compostos fenólicos presentes nas amostras, bem como à complexação desses fenólicos com outros componentes da matriz (KONISHI et al., 2006; SUN e MIAO, 2019).

Através da análise de correlação de Pearson, assim como foi realizado na bioacessibilidade, procurou-se verificar a relação entre a presença de compostos fenólicos em todas as suas frações (livres, complexados, totais e bioacessíveis) e a hidrólise do amido. No entanto, os resultados apresentados na Tabela 14 não indicaram nenhuma correlação significativa ($P < 0,01$) entre esses parâmetros. Isso sugere que, apesar de os compostos fenólicos apresentarem potencial de inibir enzimas digestivas (ZHU, 2015; SUN e MIAO, 2019), não foi possível observar tais efeitos por meio da análise de digestão *in vitro* no presente estudo.

Tabela 14 - Correlação de Pearson entre o teor de compostos fenólicos e a bioacessibilidade com o teor de hidrólise do amido.

| Fração fenólica | Hidrólise do amido | |
|-----------------|--------------------|--------------------|
| | Arroz preto | Arroz vermelho |
| Total | 0,43 ^{ns} | 0,13 ^{ns} |
| Livre | 0,21 ^{ns} | 0,32 ^{ns} |
| Complexada | 0,33 ^{ns} | 0,09 ^{ns} |
| Bioacessível | 0,35 ^{ns} | 0,18 ^{ns} |

¹ Considerando ambos materiais.

^{ns} As correlações não são significativas ($P > 0,01$).

6.5. Digestibilidade de amido: cinética de digestão do amido e frações do amido quanto à sua hidrólise

Com o objetivo de realizar uma avaliação quantitativa dos resultados de hidrólise do amido, foram calculados diversos parâmetros, incluindo o percentual de equilíbrio (C_{∞}), a constante de cinética, o índice de hidrólise e o índice glicêmico estimado. Além disso, foram realizados cálculos para determinar as frações de amido com base no tempo de liberação durante a digestão *in vitro*. Nesse contexto, o amido foi categorizado em três grupos: amido rapidamente digerível (RDS), que representa a quantidade de glicose liberada nos primeiros 20 minutos; amido lentamente digerível (SDS), que abrange a quantidade de glicose liberada entre 20 e 120 minutos; e amido resistente (RS), obtido subtraindo a quantidade total de glicose liberada em 120 minutos do amido total, conforme definido por Singh, Dartois e Kaur, 2010.

Esses resultados foram compilados em um Apêndice, uma vez que não foram identificadas evidências que justificassem sua inclusão no corpo principal do texto. No entanto, essas informações foram mantidas para potencial uso em futuras pesquisas. Os resultados detalhados estão apresentados nas seguintes tabelas: Tabela I, que descreve os resultados com base no método de cocção; Tabela II, que apresenta os resultados em relação à quantidade de água utilizada durante a cocção; Tabela III, que apresenta os resultados em função do tempo de cocção; e, por fim, as Tabelas IV, V e VI, que disponibilizam os resultados para o resfriamento e congelamento após a cocção, respectivamente para os tipos de arroz marrom, preto e vermelho.

7 Considerações finais

Os resultados deste estudo revelam que os métodos de cocção aplicados ao arroz de pericarpo preto e vermelho influenciam significativamente o teor de compostos fenólicos, sua bioacessibilidade e a hidrólise do amido. Além disso, o processo de digestão também desempenha um papel relevante na concentração de compostos quantificados. Essas variações nos teores e nas respostas aos parâmetros de cocção estão intrinsecamente relacionadas às diferenças na composição fenólica e na estrutura da matriz desses materiais.

O arroz vermelho apresentou uma taxa de hidrólise do amido mais baixa durante a digestão *in vitro*, o que pode ser atribuído à sua estrutura mais complexa de sua amilopectina, ou seja, uma menor quantidade de cadeias mais curtas e maior comprimento médio de cadeias de amilopectina.

Durante o processo de cocção foi observada a lixiviação e degradação de compostos fenólicos que anteriormente não estavam complexados na matriz dos grãos. Isso conduziu a uma diminuição nos teores de fenólicos livres. Nota-se que os fatores que promovem uma maior desintegração da matriz dos grãos, como a ruptura da estrutura, favorecem uma maior quantificação de compostos fenólicos complexados. Assim, as perdas resultantes da degradação térmica, complexação ou lixiviação possuem um impacto menor sobre a bioacessibilidade quando comparadas à ruptura da matriz. Parâmetros que resultam em uma maior ruptura proporcionam a maior quantificação desses compostos.

Adicionalmente, a quantidade de água utilizada na cocção também exerce um efeito na fração complexada de compostos fenólicos, especialmente no caso do arroz vermelho. O aumento da quantidade de água parece favorecer a liberação desses compostos da matriz dos grãos.

De maneira semelhante, no processo de digestão *in vitro*, ocorre a ruptura da matriz devido ao ataque enzimático, resultando na liberação de fenólicos previamente complexados. Da mesma forma, a liberação de glicose (hidrólise do amido) após a cocção e a digestão segue um padrão semelhante, sendo mais elevada quando a matriz dos grãos é exposta.

Vale destacar que a temperatura de armazenamento do arroz cozido não demonstrou influência significativa no teor de compostos fenólicos, entretanto, o tempo de armazenamento em baixas temperaturas afeta os teores de fenólicos após a cocção. Também, a imersão prévia dos grãos antes da cocção também resulta em perda de compostos fenólicos livres devido à lixiviação.

Não foi identificada uma correlação significativa entre a presença de compostos fenólicos e a hidrólise do amido durante a digestão *in vitro* em nossas condições experimentais. Em contrapartida, a presença de compostos fenólicos bioacessíveis mostrou estar principalmente associada à fração livre de fenólicos após a cocção.

Portanto, considerar a bioacessibilidade de compostos fenólicos em alimentos e avaliar os métodos de cocção mais adequados para preservá-los é crucial. Os resultados deste estudo contribuem para pesquisas futuras e podem beneficiar tanto a população em geral, no contexto do preparo caseiro, quanto a indústria alimentícia na produção de alimentos mais saudáveis e nutritivos. Além disso, a análise dos grãos após a cocção e a investigação sobre como esses compostos são absorvidos durante a digestão, tanto *in vitro* quanto *in vivo*, representam áreas que merecem mais atenção e estudos para compreender melhor os efeitos dos processos de cocção e digestão nos teores de compostos fenólicos do arroz.

Referências

- AACC. American Association of Cereal Chemists. **Approved methods of the American Association of Cereal Chemists**. St. Paul, MN, US: AACC International, 2002.
- AACCI. American Association of Cereal Chemists International. **Approved Methods of Analysis**, Eleventh ed. AACC International. St Paul, MN, USA, 2010.
- AALIM, H.; LUO, Z. Insight into rice (*Oryza sativa* L.) cooking: Phenolic composition, inhibition of α -amylase and α -glucosidase, and starch physicochemical and functional properties. **Food Bioscience**, v. 40, p. 100917, 2021.
- ABDEL-AAL, E.-S. M.; HUCL, P. Composition and stability of anthocyanins in blue-grained wheat. **Journal of Agricultural and Food Chemistry**, v. 51, n. 8, p. 2174–2180, 2003.
- AHLUWALIA N. et al. Contribution of whole grains to total grains intake among adults aged 20 and over: United States, 2013–2016. NCHS Data Brief, no 341. Hyattsville, MD: **National Center for Health Statistics**, 2019.
- AL-FARSI, M.A.; LEE, C.Y. Optimization of phenolic and dietary fibre extraction from date seeds. **Food Chemistry**, v. 108, p. 977-985, 2008.
- AL-RABADI, G. J. S.; GILBERT, R. G.; GIDLEY, M. J. Effect of particle size on kinetics of starch digestion in milled barley and sorghum grains by porcine alpha-amylase. **Journal of Cereal Science**, v. 50, n. 2, p. 198–204, 2009.
- ALVES, G. H. et al. The revisited levels of free and bound phenolics in rice: Effects of the extraction procedure. **Food Chemistry**, v. 208, p. 116–123, 2016.
- ARON, P. M., KENNEDY, J. A. Flavan-3-ols: nature, occurrence and biological activity. **Molecular Nutrition & Food Research**, v. 52, p. 79–104, 2008.
- AUNE, D. et al. Whole grain consumption and risk of cardiovascular disease, cancer, and all cause and cause specific mortality: systematic review and dose-response meta-analysis of prospective studies. **BMJ (Clinical research ed.)**, v. 353, p. i2716, 2016.
- BARBA, F. J. et al. Bioaccessibility of bioactive compounds from fruits and vegetables after thermal and nonthermal processing. **Trends in Food Science & Technology**, v. 67, p. 195–206, 2017.
- BATISTA, C. De S. et al. Impact of cooking temperature on the quality of quick cooking brown rice. **Food Chemistry**, v. 286, p. 98–105, 2019.

- BELLO-PÉREZ, L. A.; FLORES-SILVA, P. C. Interaction between starch and dietary compounds: New findings and perspectives to produce functional foods. **Food Research International**, v. 172, p. 113182, 2023.
- BERG, T. et al. The role of cotyledon cell structure during *in vitro* digestion of starch in navy beans. **Carbohydrate Polymers**, v. 87, n. 2, p. 1678–1688, 2012.
- BRAND-WILLIAMS, W.; CUVELIER, M. E.; BERSET, C. Use of a free radical method to evaluate antioxidant activity. **Lebensm-Wiss Technology**, v. 28, p. 25-30, 1995.
- BRAVO, L. Polyphenols: chemistry, dietary sources, metabolism, and nutritional significance. **Nutrition Reviews**, v. 56, n. 11, p. 317–333, 1998.
- CALLEGARI-JACQUES, S. M. **Bioestatística: princípios e aplicações**. Tradução. [s.l.] Artmed Editora, 2009.
- CAPUANO, E.; JANSSEN, A. E. M. Food Matrix and Macronutrient Digestion. **Annual Review of Food Science and Technology**, v. 12, n. 1, p. 193-212, 2021.
- CARBONELL-CAPELLA, J. M. et al. Analytical Methods for Determining Bioavailability and Bioaccessibility of Bioactive Compounds from Fruits and Vegetables: A Review. **Comprehensive Reviews in Food Science and Food Safety**, v. 13, n. 2, p. 155–171, 2014.
- CASTAÑEDA-OVANDO, A. et al. Chemical studies of anthocyanins: A review. **Food Chemistry**, v. 113, n. 4, p. 859-871, 2009.
- CATENA, S. et al. Effects of different cooking conditions on the anthocyanin content of a black rice (*Oryza sativa* L. 'Violet Nori'). **European Food Research and Technology**, v. 245, n. 10, p. 2303–2310, 2019.
- CHAUDHARY, R. C. Speciality rices of the world: Effect of WTO and IPR on its production trend and marketing. **Food, Agriculture & Environment**, v.1, n. 2, p. 34-41, 2003.
- CHIN, L.; THERDTHAI, N.; RATPHITAGSANTI, W. Effect of Microwave Cooking on Quality of Riceberry Rice (*Oryza sativa* L.). **Journal of Food Quality**, v. 2020, p. e4350274, 2020.
- CHMIEL, T.; SAPUTRO, I. E.; KUSZNIEREWICZ, B.; BARTOSZEK, A. The impact of cooking method on the phenolic composition, total antioxidant activity and starch digestibility of rice (*Oryza sativa* L.). **Journal of Food Processing and Preservation**, v. 42, n. 1, p. e13383, 2017.
- COLASANTO, A. et al. Cooking of Artemide Black Rice: Impact on Proximate Composition and Phenolic Compounds. **Foods**, v. 10, n. 4, p. 824, 2021.

- CONAB - Companhia Nacional de Abastecimento, 2022. **AgroConab – Abril e Maio/2022**, v.2, n.3. Disponível em: <<https://www.conab.gov.br/info-agro/analises-do-mercado-agropecuario-e-extrativista/analises-do-mercado/historico-mensal-de-agroconab>>. Acesso em: junho de 2022.
- CONAB - Companhia Nacional de Abastecimento. **Acompanhamento da Safra Brasileira de Grãos**, Brasília, v. 10 – Safra 2022/23, n.11 - Décimo primeiro levantamento, p. 1-102, 2023.
- DANNESKIOLD-SAMSØE, N. B. et al. Interplay between food and gut microbiota in health and disease. **Food Research International**, v. 115, p. 23–31, 2019.
- DARTOIS, A. et al. Influence of guar gum on the *in vitro* starch digestibility-rheological and microstructural characteristics. **Food Biophysics**, v. 5, n. 3, p. 149–160, 2010.
- DE LA IGLESIA, R. et al. Healthy properties of proanthocyanidins. **BioFactors**, v. 36, n. 3, p. 159–168, 2010.
- DE SANTIAGO, E. et al. Digestibility of (Poly)phenols and Antioxidant Activity in Raw and Cooked Cactus Cladodes (*Opuntia ficus-indica*). **Journal of Agricultural and Food Chemistry**, v. 66, n. 23, p. 5832–5844, 2018.
- DELGADO-VARGAS, F.; JIMÉNEZ, A. R.; PAREDES-LÓPEZ, O. Natural pigments: carotenoids, anthocyanins, and betalains--characteristics, biosynthesis, processing, and stability. **Critical Reviews in Food Science and Nutrition**, v. 40, n. 3, p. 173–289, 2000.
- DONMEZ, D. et al. Characterization of starch–water interactions and their effects on two key functional properties: starch gelatinization and retrogradation. **Current Opinion in Food Science**, v. 39, p. 103-109, 2021.
- DUODU, K. G. Effects of Processing on Antioxidant Phenolics of Cereal and Legume Grains. In: AWIKA, J. M.; PIIRONEN, V.; BEAN, S. (Eds.). **ACS Symposium Series**. Washington, DC: American Chemical Society, v. 1089, p. 31–54, 2011.
- ENGLYST, H. N.; KINGMAN, S. M.; CUMMINGS, J. H. Classification and measurement of nutritionally important starch fractions. **European Journal of Clinical Nutrition**, v. 46, n. 2, p. S33-S50, 1992.
- FAO - Organização das Nações Unidas para a Alimentação e a Agricultura. **Food Balances (2010-). 2020**. Disponível em: <<https://www.fao.org/faostat/en/#data/FBS/report>>. Acesso em: 21 de fevereiro de 2022.

- FINOCCHIARO, F. et al. Characterization of antioxidant compounds of red and white rice and changes in total antioxidant capacity during processing. **Molecular Nutrition & Food Research**, v. 51, n. 8, p. 1006–1019, 2007.
- FINOCCHIARO, F.; FERRARI, B.; GIANINETTI, A. A study of biodiversity of flavonoid content in the rice caryopsis evidencing simultaneous accumulation of anthocyanins and proanthocyanidins in a black-grained genotype. **Journal of Cereal Science**, v. 51, n. 1, p. 28–34, 2010.
- FIOCRUZ - Fundação Oswaldo Cruz. **Resultados da ConVid, Pesquisa de Comportamentos, Comportamentos saudáveis, Alimentação**. Rio de Janeiro: Fiocruz; 2020. Disponível em:
<<https://convid.fiocruz.br/index.php?pag=alimentacao>>. Acesso em janeiro de 2022.
- FISBERG, R. M. et al. Total and whole grain intake in Latin America: findings from the multicenter cross-sectional Latin American Study of Health and Nutrition (ELANS). **European Journal of Nutrition**, v. 61, p. 489–501, 2022.
- FULEKI, T.; RICARDO-DA-SILVA, J. M. Effects of Cultivar and Processing Method on the Contents of Catechins and Procyranidins in Grape Juice. **Journal of Agricultural and Food Chemistry**, v. 51, n. 3, p. 640–646, 2003.
- GBD - Global Burden of Disease Study, Diet collaborators. **Health effects of dietary risks in 195 countries, 1990–2017: a systematic analysis for the Global Burden of Disease Study 2017**. *Lancet*, v. 393, p. 1958–1972, 2019.
- GE, L.; LI, S.-P.; LISAK, G. Advanced sensing technologies of phenolic compounds for pharmaceutical and biomedical analysis. **Journal of Pharmaceutical and Biomedical Analysis**, v. 179, p. 112913, 2020.
- GIUBERTI, G.; ROCCHETTI, G.; LUCINI, L. Interactions between phenolic compounds, amylolytic enzymes and starch: An updated overview. **Current Opinion in Food Science**, v. 31, p. 101-113, 2020.
- GOÑI, I. et al. Analysis of resistant starch: a method for foods and food products. **Food Chem**, v. 56, p. 445-449, 1996.
- GOÑI, I.; GARCIA-ALONSO, A.; SAURA-CALIXTO, F. A starch hydrolysis procedure to estimate glycemic index. **Nutrition Research**, v. 17, p. 427-437, 1997.
- HANASHIRO, I.; ABE, J.; HIZUKURI, S. A periodic distribution of the chain length of amylopectin as revealed by high-performance anion-exchange chromatography. **Carbohydrate Research**, v. 283, p. 151–159, 1996.

- HEANEY, R. P. Factors Influencing the Measurement of Bioavailability, Taking Calcium as a Model. **The Journal of Nutrition**, v. 131, n. 4, p. 1344S–1348S, 2001.
- HIEMORI, M.; KOH, E.; MITCHELL, A. E. Influence of Cooking on Anthocyanins in Black Rice (*Oryza sativa* L. japonica var. SBR). **Journal of Agricultural and Food Chemistry**, v. 57, n. 5, p. 1908–1914, 2009.
- HIZUKURI, S. Polymodal distribution of the chain lengths of amylopectins, and its significance. **Carbohydrate Research**, v. 147, p. 342-347, 1986.
- HOU, Z. et al. Identification of anthocyanins isolated from black rice (*Oryza sativa* L.) and their degradation kinetics. **Food Research International**, v. 50, n. 2, p. 691–697, 2013.
- HU, P. et al. Starch digestibility and the estimated glycemic score of different types of rice differing in amylose contents. **Journal of Cereal Science**, v. 40, n. 3, p. 231–237, 2004.
- IBGE - Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística. **Pesquisa de orçamentos familiares 2017-2018: Análise do Consumo Alimentar Pessoal no Brasil**. Rio de Janeiro: IBGE, 2020. 125 p. Disponível em: <<https://biblioteca.ibge.gov.br/visualizacao/livros/liv101742.pdf>>. Acesso em: janeiro de 2022.
- IFIC - International Food Information Council. 2021. **Food and Health Survey**. Disponível em: <<https://foodinsight.org/2021-food-health-survey/>>. Acesso em: junho 2022.
- IFIC - International Food Information Council. 2022. **Food and Health Survey**. 18 May 2022. Disponível em: <<https://foodinsight.org/2022-food-and-health-survey/>>. Acesso em: junho de 2022.
- INOUCHI, N. et al. The effect of environmental temperature on distribution of unit chains of rice amylopectin. **Starch** v. 52, p. 8-12, 2000.
- JULIANO, B. O.; BECHTEL, D. B. The rice grain and its gross composition. In: **Rice: Chemistry and Technology** (editado por E.T. Champagne). Pp. 17–57. New Orleans, MN, USA: **American Association of Cereal Chemists**. Capítulo 2, 1985.
- JULIANO, B. O; VILLAREAL, C. P. **Grain quality evaluation of world rices**. Manila, The Philippines: International Rice Research Institute (IRRI), 1993.
- JULIANO, B.O. 1979. The Chemical Basis of Rice Grain Quality. In **Proceedings of the Workshop on Chemical Aspects of Rice Grain Quality**, p. 69-90. Los Baños, Laguna, the Philippines, IRRI.

- KHOO, H. E. et al. Anthocyanidins and anthocyanins: colored pigments as food, pharmaceutical ingredients, and the potential health benefits. **Food & Nutrition Research**, v. 61, n. 1, p. 1361779, 2017.
- KIM, S.-H.; YU, B.-R.; CHUNG, I.-M. Changes in the contents and profiles of selected phenolics, soyasapogenols, tocopherols, and amino acids during soybean-rice mixture cooking: Electric rice cooker vs electric pressure rice cooker. **Food Chemistry**, v. 176, p. 45–53, 2015.
- KOEHNLEIN, E. A. et al. Analysis of a whole diet in terms of phenolic content and antioxidant capacity: effects of a simulated gastrointestinal digestion. **International Journal of Food Sciences and Nutrition**, v. 67, n. 6, p. 614–623, 2016.
- KONG, F.; SINGH, R. P. Disintegration of Solid Foods in Human Stomach. **Journal of Food Science**, v. 73, n. 5, p. R67–R80, 2008.
- KONG, S.; LEE, J. Antioxidants in milling fractions of black rice cultivars. **Food Chemistry**, v. 120, p. 278–281, 2010.
- KONISHI, Y. et al. Method of treating diabetes and obesity using carbohydrate absorption inhibitors, [s.d.]. US Patent 20060024396 Disponível em: <<https://patents.google.com/patent/US20060024396A1/en>>. Acesso em: janeiro de 2022.
- LIMTRAKUL (DEJKRIENGKRAIKUL), P.; SEMMARATH, W.; MAPOUNG, S. Anthocyanins and Proanthocyanidins in Natural Pigmented Rice and Their Bioactivities. In: RAO, V.; MANS, D.; RAO, L. (Eds.). **Phytochemicals in Human Health**. [s.l.] IntechOpen, 2020.
- LINDEMANN, I. DA S et al. Rice and common bean blends: Effect of cooking on *in vitro* starch digestibility and phenolics profile. **Food Chemistry**, 127908, 2020.
- LIU, R. H. Whole grain phytochemicals and health. **Journal of Cereal Science**, v. 46, n. 3, p. 207–219, 2007.
- MANACH, C. et al. Polyphenols: food sources and bioavailability. **The American Journal of Clinical Nutrition**, v. 79, n. 5, p. 727-747, 2004.
- MASSARETTO, I. L. et al. Phenolic compounds in raw and cooked rice (*Oryza sativa* L.) and their inhibitory effect on the activity of angiotensin I-converting enzyme. **Journal of Cereal Science**, v. 54, n. 2, p. 236–240, 2011.
- MCGHIE, T. K.; WALTON, M. C. The bioavailability and absorption of anthocyanins: Towards a better understanding. **Molecular Nutrition & Food Research**, v. 51, n. 6, p. 702–713, 2007.

- MCGRANCE, S. J.; CORNELL, H. J.; RIX, C. J. A Simple and Rapid Colorimetric Method for the Determination of Amylose in Starch Products. **Starch/Stärke**, v. 50, p. 158–163, 1998.
- MELINI, V.; ACQUISTUCCI, R. Health-Promoting Compounds in Pigmented Thai and Wild Rice. **Foods**, v. 6, n. 1, p. 9, 2017.
- MELINI, V.; MELINI, F.; ACQUISTUCCI, R. Phenolic Compounds and Bioaccessibility Thereof in Functional Pasta. **Antioxidants**, v. 9, n. 4, p. 343, 2020.
- MEYNIER, A., CH BOURNE -ROLLÉ, A., RIOU, E. Main Factors Influencing Whole Grain Consumption in Children and Adults—A Narrative Review. **Nutrients**, v. 12, n. 8, p. 2217, 2020.
- MIN, B.; MCCLUNG, A.; CHEN, M.-H. Effects of hydrothermal processes on antioxidants in brown, purple and red bran whole grain rice (*Oryza sativa* L.). **Food Chemistry**, v. 159, p. 106–115, 2014.
- MINATEL, I. O., et al. Phenolic Compounds: Functional Properties, Impact of Processing and Bioavailability. In: SOTO-HERNANDEZ, M., PALMA-TENANGO, M., GARCIA-MATEOS, M. d. R, editores. **Phenolic Compounds - Biological Activity**. London: IntechOpen; 2017.
- N'DRI, D. et al. Effect of cooking on the total antioxidant capacity and phenolic profile of some whole-meal African cereals. **Journal of the Science of Food and Agriculture**, v. 93, n. 29–36, 2013.
- NAYEEM, S. et al. Effects of cooking on phytochemical and antioxidant properties of pigmented and non-pigmented rare Indian rice landraces. **Biocatalysis and Agricultural Biotechnology**, v. 32, p. 101928, 2021.
- OGAWA, Y. et al. Impact of food structure and cell matrix on digestibility of plant-based food. **Current Opinion in Food Science**, v. 19, p. 36–41, 2018.
- ORTEGA, N. et al. Matrix composition effect on the digestibility of carob flour phenols by an in-vitro digestion model. **Food Chemistry**, v. 124, n.1, p. 65-71, 2011.
- PALERMO, M.; PELLEGRINI, N.; FOGLIANO, V. The effect of cooking on the phytochemical content of vegetables. **Journal of the Science of Food and Agriculture**, v. 94, n. 6, p. 1057–1070, 2014.
- PATEL, H. et al. A mechanistic approach to studies of the possible digestion of retrograded starch by α -amylase revealed using a log of slope (LOS) plot. **Carbohydrate Polymers**, v. 113, p. 182-188, 2014.

- PATINDOL, J., WANG, Y.-J. Fine structures and physicochemical properties of starches from chalky and translucent rice kernels. **Journal of Agricultural and Food Chemistry**, v. 51, p. 2777 – 2784, 2003.
- PATINDOL, J.; WANG, Y.-J. Fine Structures of Starches from Long-Grain Rice Cultivars with Different Functionality. **Cereal Chemistry**, v. 79(3), p. 465–469, 2002.
- PIASEK, A. et al. The influence of sterilization with EnbioJet® Microwave Flow Pasteurizer on composition and bioactivity of aronia and blue-berried honeysuckle juices. **Journal of Food Composition and Analysis**, v. 24, n. 6, p. 880–888, 2011.
- PINKAEW, H. et al. Isolated rice starch fine structures and pasting properties changes during pre-germination of three Thai paddy (*Oryza sativa* L.) cultivars. **Journal of Cereal Science**, v. 70, p. 116-122, 2016.
- PORTER, L. J.; HRSTICH, L. N.; CHAN, B. G. The conversion of procyanidins and prodelphinidins to cyanidin and delphinidin. **Phytochemistry**, v.25, p.223-230, 1986.
- QIU, Y.; LIU, Q.; BETA, T. Antioxidant properties of commercial wild rice and analysis of soluble and insoluble phenolic acids. **Food Chemistry**, v. 121, p. 140-147, 2010.
- RANAWANA, V. et al. Degree of particle size breakdown during mastication may be a possible cause of interindividual glycemic variability. **Nutrition Research**, v. 30, n. 4, p. 246–254, 2010.
- RAUF, A. et al. Proanthocyanidins: A comprehensive review. **Biomedicine & Pharmacotherapy**, v. 116, p. 108999, 2019.
- SINGH, J. et al. Starch digestibility in food matrix: A review. **Trends in Food Science & Technology**, v. 21, n 4, p. 167-180, 2010.
- ZHU, F. Interactions between starch and phenolic compound. **Trends in Food Science & Technology**, v. 43, n. 2, p. 129-143, 2015.
- RE, R. et al. Antioxidant activity applying an improved ABTS radical cation decolorization assay. **Free Radical Biology & Medicine**, v.26, p.1231-1237, 1999.
- ROSA, L. A. de la, et al. CHAPTER 12 Phenolic Compounds. In: Yahia, E., Carrillo-Lopez, A. (eds). **Postharvest Physiology and Biochemistry of Fruits and Vegetables**, 2018.
- RYU, S. N.; PARK, S. Z.; HO, C.-T. High Performance Liquid Chromatographic Determination of Anthocyanin Pigments in Some Varieties of Black Rice. **Journal of Food and Drug Analysis**, v. 6, n. 4, p. 729-736, 1998.

- SAIKIA, S. et al. Quality characterisation and estimation of phytochemicals content and antioxidant capacity of aromatic pigmented and non-pigmented rice varieties. **Food Research International**, v. 46, p. 334–340, 2012.
- SINGH, J. et al. Low temperature post-harvest storage of New Zealand Taewa (Maori potato): Effects on starch physico-chemical and functional characteristics. **Food Chemistry**, v. 106, n. 2, p. 583–596, 2008.
- SINGH, J.; DARTOIS, A.; KAUR, L. Starch digestibility in food matrix: a review. **Trends in Food Science & Technology**, v. 21, n. 4, p. 168–180, 2010.
- SINGH, J.; KAUR, L.; SINGH, H. Chapter Four - Food Microstructure and Starch Digestion. In: HENRY, J. (Ed.). **Advances in Food and Nutrition Research**. [s.l.] Academic Press, 2013. v. 70p. 137–179.
- SINGH, N.; SANDHU, K. S.; KAUR, M. Characterization of starches separated from Indian chickpea (*Cicer arietinum* L.) cultivars. **Journal of Food Engineering**, v.63, n.4, p.441-449, 2004.
- SINGLETON, V. L.; ROSSI JR., J. A. Colorimetry of total phenolics with phosphomolybdic-phosphotungstic acid reagents. **American Journal of Enology and Viticulture**, v. 16, p. 144-158, 1965.
- SMITH, A. M.; ZEEMAN, S. C.; SMITH, S. M. Starch degradation. **Annual Review of Plant Biology**, v. 56, n. 1, p. 73–98, 2005.
- SUKSOMBOON, A.; NAIVIKUL, O. Effect of dry- and wet-milling processes on chemical, physicochemical properties and starch molecular structures of rice starches. **Kasetsart Journal - Natural Science**, v. 40, p. 125-134, 2006.
- SUN, L.; MIAO, M. Dietary polyphenols modulate starch digestion and glycaemic level: a review. **Critical Reviews in Food Science and Nutrition**, v. 60, n. 4, p. 541–555, 2019.
- SURH, J.; KOH, E. Effects of four different cooking methods on anthocyanins, total phenolics and antioxidant activity of black rice: cooking effect on antioxidant compounds. **Journal of the Science of Food and Agriculture**, v. 94, n. 15, p. 3296–3304, 2014.
- TAMURA, M. et al. Impact of the degree of cooking on starch digestibility of rice - An *in vitro* study. **Food Chemistry**, v. 191, p. 98–104, 2016.
- TAMURA, M. et al. The importance of an oral digestion step in evaluating simulated *in vitro* digestibility of starch from cooked rice grain. **Food Research International**, v. 94, p. 6–12, 2017.

- TANANUWONG, K.; TANGSRIANUGUL, N. Effects of storage conditions and cooking on colour and antioxidant activities of organic pigmented rice. **International Journal of Food Science & Technology**, v. 48, n. 1, p. 67–73, 2012.
- TANG, Y.; CAI, W.; XU, B. From rice bag to table: Fate of phenolic chemical compositions and antioxidant activities in waxy and non-waxy black rice during home cooking. **Food Chemistry**, v. 191, p. 81–90, 2016.
- TESTER, R. F.; QI, X.; KARKALAS, J. Hydrolysis of native starches with amylases. **Animal Feed Science and Technology**, v. 130, n. 1, p. 39–54, 2006.
- TESTER, R.F.; KARKALAS, J.; QI, X. Starch- composition, fine structure and architecture. **Journal Cereal Science**, v. 39, p. 151-165, 2004.
- THUENGTUNG, S.; OGAWA, Y. Comparative study of conventional steam cooking and microwave cooking on cooked pigmented rice texture and their phenolic antioxidant. **Food Science & Nutrition**, v. 8, n. 2, p. 965–972, 2020.
- TI, H. et al. Effects of cooking and *in vitro* digestion of rice on phenolic profiles and antioxidant activity. **Food Research International**, v. 76, p. 813–820, 2015.
- TIAN, S.; NAKAMURA, K.; KAYAHARA, H. Analysis of Phenolic Compounds in White Rice, Brown Rice, and Germinated Brown Rice. **Journal of Agricultural and Food Chemistry**, v. 52, n. 15, p. 4808–4813, 2004.
- TODA, K. et al. Red-kerneled rice proanthocyanidin inhibits arachidonate 5-lipoxygenase and decreases psoriasis-like skin inflammation. **Archives of Biochemistry and Biophysics**, v. 689, p. 108307, 2020.
- UNICEF. **Alimentação na primeira infância : conhecimentos, atitudes e práticas de beneficiários do Programa Bolsa Família**. Brasília: UNICEF, 2021.
- USDA - United States Department of Agriculture, 2022. **Brazil: Grain and Feed Annual 2022**. Disponível em:
<https://apps.fas.usda.gov/newgainapi/api/Report/DownloadReportByFileName?fileName=Grain%20and%20Feed%20Annual_Brasilia_Brazil_BR2022-0021.pdf>.
Acesso em: maio de 2022.
- WACHTEL-GALOR, S.; WONG, K. W.; BENZIE, I. F. F. The effect of cooking on Brassica vegetables. **Food Chemistry**, v. 110, n. 3, p. 706–710, 2008.
- WANG, C.-H. et al. Genetic diversity and classification of *Oryza sativa* with emphasis on Chinese rice germplasm. **Heredity**, v. 112, n. 5, p. 489–496, 2014.

- WANG, T.; HEA, F.; CHEN, G. Improving bioaccessibility and bioavailability of phenolic compounds in cereal grains through processing technologies: A concise review. **Journal of Functional Foods**, v. 7, p. 101-111, 2014.
- XIA, D. et al. How rice organs are colored: The genetic basis of anthocyanin biosynthesis in rice. **The Crop Journal**. v. 9, n. 3, p. 598–608, 2021.
- XU, B. J.; CHANG, S. K. Phytochemical profiles and health-promoting effects of cool-season food legumes as influenced by thermal processing. **Journal of Agriculture and Food Chemistry**, v. 57, p. 10718–10731, 2009b.
- XU, B.; CHANG, S. K. C. Total phenolics, phenolic acids, isoflavones, and anthocyanins and antioxidant properties of yellow and black soybeans as affected by thermal processing. **Journal of Agricultural and Food Chemistry**, v. 56, n. 16, p. 7165–7175, 2008.
- XU, B.; CHANG, S. K. Total phenolic, phenolic acid, anthocyanin, flavan-3-ol, and flavonol profiles and antioxidant properties of pinto and black beans (*Phaseolus vulgaris* L.) as affected by thermal processing. **Journal of Agriculture and Food Chemistry**, v. 57, p. 4754–4764, 2009a.
- YAHIA E. M.; CARRILLO-LÓPEZ, A.; BELLO-PEREZ, L. A. Chapter 9 - Carbohydrates, In: YAHIA, E. M. **Postharvest Physiology and Biochemistry of Fruits and Vegetables**, Woodhead Publishing, 1ª edição, p. 175-205, 2018.
- YAMUANGMORN, S.; DELL, B.; PROM-U-THAI, C. Effects of Cooking on Anthocyanin Concentration and Bioactive Antioxidant Capacity in Glutinous and Non-Glutinous Purple Rice. **Rice Science**, v. 25, n. 5, p. 270–278, 2018.
- YU et al. Review of the effects of different processing technologies on cooked and convenience rice quality. **Trends in Food Science & Technology**, v. 59, p. 124-138, 2017.
- YU, C. et al. Effect of cooking pressure on phenolic compounds, gamma-aminobutyric acid, antioxidant activity and volatile compounds of brown rice. **Journal of Cereal Science**, v. 97, p. 103127, 2021.
- ZAUPA, M. et al. Characterization of total antioxidant capacity and (poly)phenolic compounds of differently pigmented rice varieties and their changes during domestic cooking. **Food Chemistry**, v. 187, p. 338–347, 2015.
- ZHOU, Z. K., et al. The distribution of phenolic acids in rice. **Food Chemistry**, v. 87, p. 401-406, 2004.

ZHU F. Interactions between starch and phenolic compound. **Trends in Food Science & Technology**, v. 43, p. 129-143, 2015.

ZIEGLER, V., et al. Cooking quality properties and free and bound phenolics content of brown, black, and red rice grains stored at different temperatures for six months. **Food Chemistry**, v. 242, p. 427–434, 2017.

ZUITER, A. S. Proanthocyanidin: Chemistry and Biology: From Phenolic Compounds to Proanthocyanidins. In: Reedijk, J. (ed). **Reference Module in Chemistry, Molecular Sciences and Chemical Engineering**, Publisher: Waltham, United States – USA, 2014, p. 1-29.

Apêndice

Tabela I - Cinética da porcentagem de hidrólise do amido, índice de hidrólise (HI), índice glicêmico estimado (EGI), amido rapidamente digerível (RDS), amido lentamente digerível (SDS) e amido resistente (RS) de arroz de pericarpo preto e de pericarpo vermelho cozidos sob diferentes métodos de cocção durante o processo de digestão *in vitro* simulado.

| Tratamento | C _∞ (%) | K x 10 ⁻² (min ⁻¹) | HI | eIG | RDS (%) | SDS (%) | RS (%) |
|-----------------------|----------------------------|---|----------------------------|----------------------------|----------------------------|----------------------------|----------------------------|
| <i>Arroz preto</i> | | | | | | | |
| Panela | 65,52 ± 0,78 ^a | 2,99 ± 0,01 ^b | 34,28 ± 4,05 ^{ns} | 58,53 ± 2,22 ^{ns} | 28,19 ± 1,26 ^a | 43,77 ± 2,02 ^{ns} | 28,04 ± 0,77 ^b |
| P. elétrica | 61,91 ± 0,07 ^b | 2,95 ± 0,16 ^b | 28,66 ± 2,84 | 55,45 ± 1,56 | 19,94 ± 0,11 ^b | 43,91 ± 1,43 | 36,15 ± 1,54 ^a |
| Sob pressão | 59,83 ± 0,03 ^b | 3,21 ± 0,04 ^{ab} | 26,12 ± 3,43 | 54,05 ± 1,88 | 20,96 ± 1,09 ^b | 46,65 ± 1,88 | 32,40 ± 0,79 ^a |
| Micro-ondas | 65,34 ± 0,83 ^a | 3,41 ± 0,06 ^a | 31,93 ± 5,85 | 57,24 ± 3,21 | 27,28 ± 0,34 ^a | 47,40 ± 0,29 | 25,32 ± 0,06 ^b |
| <i>Arroz vermelho</i> | | | | | | | |
| Panela | 54,03 ± 0,17 ^{ab} | 2,83 ± 0,05 ^b | 21,94 ± 3,37 ^{ns} | 51,75 ± 1,85 ^{ns} | 23,72 ± 1,08 ^{ab} | 34,89 ± 1,63 ^b | 41,39 ± 0,55 ^{ab} |
| P. elétrica | 56,73 ± 2,44 ^{ab} | 2,90 ± 0,04 ^b | 21,82 ± 4,36 | 51,69 ± 2,39 | 27,09 ± 0,82 ^a | 35,09 ± 1,58 ^b | 37,82 ± 2,40 ^b |
| Sob pressão | 59,37 ± 0,11 ^a | 3,27 ± 0,15 ^a | 19,86 ± 2,40 | 50,61 ± 1,32 | 17,36 ± 1,27 ^c | 46,68 ± 0,55 ^a | 35,96 ± 0,72 ^b |
| Micro-ondas | 51,59 ± 1,90 ^b | 2,40 ± 0,01 ^c | 15,49 ± 1,45 | 48,21 ± 0,80 | 19,69 ± 2,18 ^{bc} | 34,56 ± 0,33 ^b | 45,75 ± 2,51 ^a |

Letras diferentes, na mesma coluna, indicam diferença estatística pelo teste de Tukey ($P < 0,05$).

Tabela II - Cinética da porcentagem de hidrólise do amido, índice de hidrólise (HI) e índice glicêmico estimado (EGI), amido rapidamente digerível (RDS), amido lentamente digerível (SDS) e amido resistente (RS) de arroz de pericarpo preto e de pericarpo vermelho cozidos com diferentes quantidades de grãos:água na cocção durante o processo de digestão *in vitro* simulado.

| Tratamento | C _∞ (%) | K x 10 ⁻² (min ⁻¹) | HI | eIG | RDS (%) | SDS (%) | RS (%) |
|-----------------------|-----------------------------|---|----------------------------|----------------------------|----------------------------|----------------------------|----------------------------|
| Arroz preto | | | | | | | |
| 1:4 | 52,93 ± 0,38 ^c | 2,64 ± 0,01 ^c | 18,65 ± 3,46 ^b | 49,95 ± 1,90 ^b | 18,68 ± 2,73 ^b | 39,27 ± 0,34 ^{ns} | 42,05 ± 3,07 ^{ns} |
| 1:5 | 60,22 ± 1,19 ^{abc} | 3,92 ± 0,14 ^a | 29,02 ± 2,45 ^a | 55,64 ± 1,35 ^a | 19,47 ± 1,65 ^{ab} | 41,62 ± 1,64 | 38,91 ± 3,29 |
| 1:6 | 68,05 ± 0,86 ^a | 2,83 ± 0,03 ^c | 30,91 ± 2,80 ^a | 56,68 ± 1,54 ^a | 21,87 ± 0,89 ^{ab} | 49,90 ± 3,96 | 28,23 ± 3,07 |
| 1:7 | 56,36 ± 3,54 ^{bc} | 3,38 ± 0,13 ^b | 24,20 ± 1,57 ^{ab} | 52,99 ± 0,86 ^{ab} | 22,96 ± 1,24 ^{ab} | 42,14 ± 7,19 | 34,90 ± 5,95 |
| 1:8 | 64,00 ± 2,63 ^{ab} | 3,76 ± 0,20 ^{ab} | 33,82 ± 1,33 ^a | 58,28 ± 0,73 ^a | 25,92 ± 0,75 ^a | 44,04 ± 6,29 | 30,04 ± 5,55 |
| Arroz vermelho | | | | | | | |
| 1:5 | 59,35 ± 0,40 ^a | 2,92 ± 0,06 ^a | 24,39 ± 3,46 ^{ns} | 53,10 ± 1,90 ^{ns} | 25,91 ± 0,24 ^{ns} | 40,08 ± 1,92 ^a | 34,01 ± 2,16 ^b |
| 1:6 | 53,30 ± 0,37 ^b | 2,62 ± 0,01 ^{ab} | 20,26 ± 2,64 | 50,83 ± 1,45 | 22,28 ± 0,90 | 34,51 ± 0,97 ^b | 43,21 ± 1,87 ^a |
| 1:7 | 54,67 ± 0,90 ^b | 2,97 ± 0,16 ^a | 21,40 ± 2,68 | 51,46 ± 1,47 | 22,91 ± 0,67 | 35,29 ± 1,13 ^b | 41,81 ± 0,45 ^a |
| 1:8 | 56,65 ± 1,56 ^{ab} | 3,01 ± 0,07 ^a | 21,49 ± 3,71 | 51,51 ± 2,04 | 21,94 ± 1,35 | 36,84 ± 0,05 ^{ab} | 41,22 ± 1,40 ^{ab} |
| 1:9 | 53,17 ± 1,51 ^b | 2,21 ± 0,29 ^b | 15,70 ± 2,76 | 48,33 ± 1,51 | 22,01 ± 1,93 | 35,32 ± 0,77 ^b | 42,67 ± 2,70 ^a |

Letras diferentes, na mesma coluna, indicam diferença estatística pelo teste de Tukey ($P < 0,05$).

Tabela III - Cinética da porcentagem de hidrólise do amido, índice de hidrólise (HI) e índice glicêmico estimado (EGI), amido rapidamente digerível (RDS), amido lentamente digerível (SDS) e amido resistente (RS) de arroz de pericarpo preto e de pericarpo vermelho cozidos por diferentes tempos de cocção durante o processo de digestão *in vitro* simulado.

| Tratamento | C _∞ (%) | K x 10 ⁻² (min ⁻¹) | HI | eIG | RDS (%) | SDS (%) | RS (%) |
|-----------------------|----------------------------|---|----------------------------|----------------------------|----------------------------|----------------------------|----------------------------|
| <i>Arroz preto</i> | | | | | | | |
| 10 min | 49,16 ± 0,35 ^d | 4,16 ± 0,06 ^b | 18,26 ± 2,56 ^b | 49,74 ± 1,41 ^b | 23,43 ± 1,33 ^{ns} | 36,57 ± 0,27 ^c | 40,00 ± 1,60 ^a |
| 20 min | 70,10 ± 1,11 ^a | 3,12 ± 0,24 ^c | 40,12 ± 1,92 ^a | 61,73 ± 1,06 ^a | 21,72 ± 2,29 | 53,79 ± 1,30 ^a | 24,49 ± 3,59 ^b |
| 30 min | 57,33 ± 0,10 ^c | 4,54 ± 0,13 ^b | 29,61 ± 3,59 ^{ab} | 55,96 ± 1,97 ^{ab} | 19,04 ± 0,64 | 37,62 ± 2,21 ^c | 43,34 ± 1,57 ^a |
| 40 min | 62,59 ± 1,69 ^b | 2,83 ± 0,15 ^c | 28,80 ± 3,35 ^{ab} | 55,52 ± 1,84 ^{ab} | 17,98 ± 0,21 | 45,88 ± 0,48 ^b | 36,14 ± 0,28 ^a |
| 50 min | 58,47 ± 0,39 ^c | 2,97 ± 0,08 ^c | 20,06 ± 2,57 ^b | 50,72 ± 1,41 ^b | 22,70 ± 2,11 | 36,57 ± 0,66 ^c | 40,73 ± 1,45 ^a |
| 60 min | 56,75 ± 1,17 ^c | 5,08 ± 0,02 ^a | 29,90 ± 4,83 ^{ab} | 56,13 ± 2,65 ^{ab} | 21,03 ± 0,45 | 35,85 ± 0,84 ^c | 43,12 ± 1,29 ^a |
| <i>Arroz vermelho</i> | | | | | | | |
| 10 min | 45,90 ± 0,99 ^c | 5,20 ± 0,22 ^a | 18,05 ± 3,87 ^b | 49,62 ± 2,12 ^b | 32,84 ± 3,16 ^a | 40,82 ± 0,89 ^b | 26,34 ± 2,27 ^c |
| 20 min | 64,25 ± 0,40 ^a | 3,50 ± 0,11 ^{bc} | 34,11 ± 3,02 ^a | 58,43 ± 1,66 ^a | 24,51 ± 0,34 ^b | 52,69 ± 1,26 ^a | 22,79 ± 0,92 ^c |
| 30 min | 50,02 ± 0,10 ^{bc} | 4,57 ± 0,63 ^{ab} | 20,40 ± 4,18 ^{ab} | 50,91 ± 2,29 ^{ab} | 17,19 ± 0,61 ^c | 37,26 ± 1,01 ^{bc} | 45,55 ± 0,40 ^a |
| 40 min | 51,48 ± 0,38 ^{bc} | 2,96 ± 0,10 ^c | 16,79 ± 2,04 ^b | 48,93 ± 1,12 ^b | 23,57 ± 0,16 ^b | 33,82 ± 1,84 ^c | 42,60 ± 1,68 ^{ab} |
| 50 min | 54,56 ± 2,85 ^{bc} | 2,79 ± 0,04 ^c | 20,28 ± 4,46 ^{ab} | 50,84 ± 2,45 ^{ab} | 29,00 ± 1,54 ^{ab} | 32,89 ± 0,68 ^c | 38,11 ± 2,23 ^b |
| 60 min | 49,91 ± 2,31 ^{bc} | 3,80 ± 0,02 ^{bc} | 18,92 ± 4,09 ^b | 50,10 ± 2,25 ^b | 24,11 ± 0,69 ^b | 28,22 ± 0,64 ^d | 47,67 ± 1,33 ^a |

Letras diferentes, na mesma coluna, indicam diferença estatística pelo teste de Tukey ($P < 0,05$).

Tabela IV - Cinética da porcentagem de hidrólise do amido, índice de hidrólise (HI) e índice glicêmico estimado (EGI), amido rapidamente digerível (RDS), amido lentamente digerível (SDS) e amido resistente (RS) de arroz de pericarpo marrom cozido submetido ao congelamento e resfriamento após a cocção durante o processo de digestão *in vitro* simulado.

| Tratam. | C _∞ (%) | | K x 10 ⁻² (min ⁻¹) | | HI | | eIG | | RDS (%) | | SDS (%) | | RS (%) | | | |
|---------------------|--------------------|----|---|----|----|--------------|-----|----|--------------|----|-----------------|----|-----------------|----|-----------------|----|
| | | | | | | | | | | | | | | | | |
| <i>Refrigeração</i> | | | | | | | | | | | | | | | | |
| 12h | * 62,12 ± 0,53 | a | * 3,77 ± 0,21 | a | ns | 33,43 ± 3,51 | a | ns | 58,06 ± 1,92 | a | * 25,81 ± 0,28 | ab | * 50,98 ± 0,48 | a | * 23,21 ± 0,20 | d |
| 24h | ns 56,57 ± 1,54 | b | ns 2,87 ± 0,46 | ab | ns | 22,21 ± 6,47 | ab | ns | 51,90 ± 3,55 | ab | ns 27,76 ± 0,19 | a | ns 41,74 ± 1,91 | b | ns 30,51 ± 2,10 | c |
| 36h | ns 49,44 ± 0,14 | c | ns 2,70 ± 0,13 | ab | ns | 15,17 ± 3,18 | b | ns | 48,04 ± 1,75 | b | * 23,18 ± 0,05 | bc | ns 36,37 ± 0,22 | c | * 40,45 ± 0,18 | b |
| 48h | ns 57,92 ± 1,19 | ab | ns 2,87 ± 0,36 | ab | ns | 20,77 ± 1,10 | ab | ns | 51,11 ± 0,61 | ab | * 20,77 ± 0,80 | cd | * 51,11 ± 0,26 | a | ns 28,12 ± 0,54 | cd |
| 72h | * 43,78 ± 1,95 | d | * 2,57 ± 0,10 | b | * | 11,44 ± 1,86 | b | * | 45,99 ± 1,02 | b | * 17,57 ± 1,68 | d | * 34,06 ± 0,34 | c | * 48,37 ± 2,02 | a |
| <i>Congelamento</i> | | | | | | | | | | | | | | | | |
| 12h | 57,69 ± 0,30 | ab | 2,76 ± 0,05 | b | ns | 24,60 ± 2,85 | ns | ns | 53,21 ± 1,56 | ns | 32,99 ± 0,97 | a | 37,78 ± 0,18 | ns | 29,23 ± 0,78 | ab |
| 24h | 54,94 ± 0,71 | b | 3,56 ± 0,06 | ab | ns | 24,56 ± 2,20 | ns | ns | 53,20 ± 1,21 | ns | 28,82 ± 1,34 | bc | 37,49 ± 3,41 | ns | 33,68 ± 2,08 | a |
| 36h | 56,11 ± 2,34 | ab | 4,50 ± 0,61 | a | ns | 25,95 ± 2,84 | ns | ns | 53,95 ± 1,56 | ns | 30,44 ± 0,51 | ab | 38,54 ± 1,98 | ns | 31,03 ± 2,49 | a |
| 48h | 54,65 ± 0,64 | b | 2,93 ± 0,12 | b | ns | 22,39 ± 2,90 | ns | ns | 52,00 ± 1,59 | ns | 25,23 ± 0,94 | c | 43,76 ± 0,08 | ns | 31,00 ± 0,86 | a |
| 72h | 60,83 ± 1,24 | a | 2,92 ± 0,01 | b | ns | 29,26 ± 4,43 | ns | ns | 55,78 ± 2,43 | ns | 33,44 ± 0,49 | a | 43,01 ± 0,67 | ns | 23,55 ± 1,16 | b |

À direita, letras diferentes, na mesma coluna, indicam diferença estatística pelo teste de Tukey ($P < 0,05$) entre os tempos de refrigeração ou congelamento. À esquerda direita, o símbolo * indica diferença estatística pelo teste t ($P < 0,05$) entre o mesmo tempo de refrigeração e congelamento, enquanto a abreviação "ns" significa não significativo.

Tabela V - Cinética da porcentagem de hidrólise do amido, índice de hidrólise (HI) e índice glicêmico estimado (EGI), amido rapidamente digerível (RDS), amido lentamente digerível (SDS) e amido resistente (RS) de arroz de pericarpo preto cozido submetido ao congelamento e resfriamento após a cocção durante o processo de digestão *in vitro* simulado.

| Tratam. | C _∞ (%) | K x 10 ⁻² (min ⁻¹) | HI | eIG | RDS (%) | SDS (%) | RS (%) |
|---------------------|--------------------|---|-------------------|-------------------|--------------------|--------------------|--------------------|
| Refrigeração | | | | | | | |
| 12h | * 64,93 ± 1,95 ns | * 3,04 ± 0,01 bc | * 33,84 ± 4,47 ns | * 58,29 ± 2,45 ns | ns 40,33 ± 2,84 a | ns 38,71 ± 0,93 ns | ns 20,96 ± 1,91 b |
| 24h | * 64,99 ± 0,72 | ns 3,03 ± 0,04 bc | ns 34,81 ± 3,32 | ns 58,82 ± 1,82 | ns 30,33 ± 0,91 bc | * 41,09 ± 0,53 | * 28,58 ± 0,38 a |
| 36h | * 66,22 ± 1,87 | * 2,97 ± 0,02 c | ns 37,40 ± 4,85 | ns 60,24 ± 2,67 | ns 33,95 ± 0,66 b | ns 45,43 ± 3,28 | ns 20,62 ± 2,62 b |
| 48h | * 66,38 ± 0,07 | ns 3,35 ± 0,13 ab | * 36,14 ± 2,25 | * 59,55 ± 1,24 | ns 30,48 ± 1,25 bc | ns 44,98 ± 3,21 | ns 24,54 ± 1,96 ab |
| 72h | * 66,47 ± 2,00 | ns 3,51 ± 0,13 a | ns 37,88 ± 5,36 | ns 60,51 ± 2,94 | * 27,27 ± 0,47 c | ns 46,29 ± 1,70 | * 26,44 ± 1,22 ab |
| Congelamento | | | | | | | |
| 12h | 76,31 ± 2,08 ns | 3,30 ± 0,04 bc | 54,32 ± 0,29 ns | 69,53 ± 0,16 ns | 35,74 ± 7,01 ns | 40,46 ± 13,97 ns | 23,80 ± 6,96 ns |
| 24h | 74,57 ± 0,61 | 2,92 ± 0,09 d | 47,57 ± 7,04 | 65,82 ± 3,87 | 30,82 ± 2,57 | 50,77 ± 0,85 | 18,41 ± 1,72 |
| 36h | 78,97 ± 3,51 | 3,47 ± 0,04 b | 61,56 ± 10,54 | 73,51 ± 5,79 | 30,08 ± 1,63 | 55,40 ± 4,70 | 14,52 ± 3,07 |
| 48h | 75,47 ± 1,36 | 3,74 ± 0,02 a | 61,16 ± 5,20 | 73,28 ± 2,85 | 31,22 ± 1,32 | 48,78 ± 0,19 | 20,00 ± 1,52 |
| 72h | 77,94 ± 1,05 | 3,12 ± 0,11 cd | 56,60 ± 10,94 | 70,78 ± 6,01 | 36,82 ± 0,87 | 48,63 ± 0,21 | 14,55 ± 0,67 |

À direita, letras diferentes, na mesma coluna, indicam diferença estatística pelo teste de Tukey ($P < 0,05$) entre os tempos de refrigeração ou congelamento. À esquerda direita, o símbolo * indica diferença estatística pelo teste t ($P < 0,05$) entre o mesmo tempo de refrigeração e congelamento, enquanto a abreviação "ns" significa não significativo.

Tabela VI - Cinética da porcentagem de hidrólise do amido, índice de hidrólise (HI) e índice glicêmico estimado (EGI), amido rapidamente digerível (RDS), amido lentamente digerível (SDS) e amido resistente (RS) de arroz de pericarpo vermelho cozido submetido ao congelamento e resfriamento após a cocção durante o processo de digestão *in vitro* simulado.

| Tratam. | C _∞ (%) | | K x 10 ⁻² (min ⁻¹) | | HI | | eIG | | RDS (%) | | SDS (%) | | RS (%) | | | | | |
|---------------------|--------------------|----|---|----|--------------|----|-----|--------------|---------|----|--------------|----|--------|--------------|-----|----|--------------|----|
| | ns | * | ns | * | ns | * | ns | * | ns | * | ns | * | ns | * | | | | |
| Refrigeração | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| 12h | 44,57 ± 0,92 | c | 2,81 ± 0,19 | ns | 13,35 ± 4,19 | ab | ns | 47,04 ± 2,30 | ab | ns | 24,48 ± 1,45 | b | ns | 28,86 ± 1,96 | c | * | 46,66 ± 0,51 | a |
| 24h | 52,68 ± 1,14 | ab | 2,88 ± 0,05 | * | 19,05 ± 2,67 | ab | ns | 50,17 ± 1,47 | ab | ns | 27,56 ± 0,48 | a | ns | 37,06 ± 0,29 | ab | ns | 35,37 ± 0,77 | bc |
| 36h | 43,16 ± 2,32 | b | 2,29 ± 0,17 | * | 9,86 ± 2,62 | b | ns | 45,13 ± 1,44 | b | * | 14,88 ± 0,20 | c | ns | 36,56 ± 3,51 | abc | * | 48,56 ± 3,71 | a |
| 48h | 46,84 ± 2,01 | bc | 2,59 ± 0,26 | ns | 12,54 ± 0,85 | ab | * | 46,60 ± 0,47 | ab | * | 22,44 ± 0,38 | b | * | 34,92 ± 1,68 | bc | * | 42,64 ± 1,30 | ab |
| 72h | 56,56 ± 0,51 | a | 2,94 ± 0,16 | ns | 22,74 ± 2,47 | a | ns | 52,20 ± 1,36 | a | * | 23,84 ± 0,38 | b | ns | 43,56 ± 0,35 | a | * | 32,60 ± 0,73 | c |
| Congelamento | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| 12h | 49,11 ± 1,36 | b | 2,69 ± 0,01 | c | 13,12 ± 2,31 | c | ns | 46,91 ± 1,27 | c | ns | 26,77 ± 2,30 | ns | ns | 33,73 ± 1,21 | b | ns | 39,50 ± 1,09 | a |
| 24h | 58,65 ± 2,16 | a | 3,62 ± 0,07 | a | 26,97 ± 2,43 | a | ns | 54,52 ± 1,34 | a | ns | 31,58 ± 1,52 | ns | ns | 40,32 ± 4,84 | ab | ns | 28, ± 3,32 | bc |
| 36h | 51,61 ± 0,00 | b | 3,06 ± 0,04 | b | 15,57 ± 1,28 | bc | ns | 48,26 ± 0,70 | bc | ns | 29,08 ± 1,52 | ns | ns | 34,96 ± 0,56 | ab | ns | 35,97 ± 0,96 | ab |
| 48h | 60,62 ± 0,08 | a | 3,13 ± 0,06 | b | 28,21 ± 0,43 | a | ns | 55,20 ± 0,24 | a | ns | 34,15 ± 3,58 | ns | ns | 44,08 ± 0,76 | a | ns | 21,77 ± 4,34 | c |
| 72h | 58,49 ± 2,13 | a | 3,25 ± 0,14 | b | 22,83 ± 3,92 | ab | ns | 52,24 ± 2,15 | ab | ns | 31,86 ± 1,13 | ns | ns | 41,96 ± 0,40 | ab | ns | 26,18 ± 1,54 | bc |

À direita, letras diferentes, na mesma coluna, indicam diferença estatística pelo teste de Tukey ($P < 0,05$) entre os tempos de refrigeração ou congelamento. À esquerda direita, o símbolo * indica diferença estatística pelo teste t ($P < 0,05$) entre o mesmo tempo de refrigeração e congelamento, enquanto a abreviação "ns" significa não significativo.