

UNIVERSIDADE FEDERAL DO PARANÁ

MARCELA RODRIGUES AIRES

HIDRATAÇÃO CONVENCIONAL E ULTRASSÔNICA DO ARROZ NATIVO DO PANTANAL.



CURITIBA  
2023

MARCELA RODRIGUES AIRES

HIDRATAÇÃO CONVENCIONAL E ULTRASSÔNICA DO ARROZ NATIVO DO  
PANTANAL.

Dissertação apresentada como requisito parcial à obtenção do grau de Mestre em Engenharia de Alimentos, no Curso de Pós-Graduação em Engenharia de Alimentos, Setor de Tecnologia da Universidade Federal do Paraná.

Orientador: Prof. Dr. Charles Windson Isidoro Haminiuk  
Coorientadora: Prof.<sup>a</sup> Dr.<sup>a</sup> Thaisa Carvalho Volpe Balbinoti

CURITIBA  
2023

DADOS INTERNACIONAIS DE CATALOGAÇÃO NA PUBLICAÇÃO (CIP)  
UNIVERSIDADE FEDERAL DO PARANÁ  
SISTEMA DE BIBLIOTECAS – BIBLIOTECA DE CIÊNCIA E TECNOLOGIA

Aires, Marcela Rodrigues  
Hidratação convencional e ultrassônica do arroz nativo do pantanal /  
Marcela Rodrigues Aires. – Curitiba, 2023.  
1 recurso on-line : PDF.

Dissertação (Mestrado) - Universidade Federal do Paraná, Setor de  
Tecnologia, Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Alimentos.

Orientador: Charles Windson Isidoro Haminiuk  
Coorientadora: Thaisa Carvalho Volpe Balbinoti

1. Arroz parboilizado. 2. Fenóis. 3. Antioxidantes. I. Universidade Federal  
do Paraná. II. Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Alimentos.  
III. Haminiuk, Charles Windson Isidoro. IV. Balbinoti, Thaisa Carvalho Volpe.  
V. Título.

Bibliotecário: Leticia Priscila Azevedo de Sousa CRB-9/2029

## TERMO DE APROVAÇÃO

Os membros da Banca Examinadora designada pelo Colegiado do Programa de Pós-Graduação ENGENHARIA DE ALIMENTOS da Universidade Federal do Paraná foram convocados para realizar a arguição da dissertação de Mestrado de **MARCELA RODRIGUES AIRES** intitulada: **Hidratação convencional e ultrassônica do arroz nativo do pantanal**, sob orientação do Prof. Dr. CHARLES WINDSON ISIDORO HAMINIUK, que após terem inquirido a aluna e realizada a avaliação do trabalho, são de parecer pela sua APROVAÇÃO no rito de defesa.

A outorga do título de mestra está sujeita à homologação pelo colegiado, ao atendimento de todas as indicações e correções solicitadas pela banca e ao pleno atendimento das demandas regimentais do Programa de Pós-Graduação.

CURITIBA, 28 de Abril de 2023.

Assinatura Eletrônica

09/05/2023 19:56:58.0

CHARLES WINDSON ISIDORO HAMINIUK

Presidente da Banca Examinadora

Assinatura Eletrônica

10/05/2023 15:14:11.0

RENATA HERNANDEZ BARROS FUCHS

Avaliador Externo (UNIVERSIDADE TECNOLÓGICA FEDERAL DO PARANÁ)

Assinatura Eletrônica

09/05/2023 11:26:37.0

LEILA LARISA MEDEIROS MARQUES

Avaliador Externo (UNIVERSIDADE TECNOLÓGICA FEDERAL DO PARANÁ)

**ATA Nº2046**

## **ATA DE SESSÃO PÚBLICA DE DEFESA DE MESTRADO PARA A OBTENÇÃO DO GRAU DE MESTRA EM ENGENHARIA DE ALIMENTOS**

No dia vinte e oito de abril de dois mil e vinte e tres às 13:30 horas, na sala Sala de Defesa, Centro Politécnico - Bloco da Engenharia Química - UFPR, foram instaladas as atividades pertinentes ao rito de defesa de dissertação da mestranda **MARCELA RODRIGUES AIRES**, intitulada: **Hidratação convencional e ultrassônica do arroz nativo do pantanal**, sob orientação do Prof. Dr. CHARLES WINDSON ISIDORO HAMINIUK. A Banca Examinadora, designada pelo Colegiado do Programa de Pós-Graduação ENGENHARIA DE ALIMENTOS da Universidade Federal do Paraná, foi constituída pelos seguintes Membros: CHARLES WINDSON ISIDORO HAMINIUK (UNIVERSIDADE FEDERAL DO PARANÁ), RENATA HERNANDEZ BARROS FUCHS (UNIVERSIDADE TECNOLÓGICA FEDERAL DO PARANÁ), LEILA LARISA MEDEIROS MARQUES (UNIVERSIDADE TECNOLÓGICA FEDERAL DO PARANÁ). A presidência iniciou os ritos definidos pelo Colegiado do Programa e, após exarados os pareceres dos membros do comitê examinador e da respectiva contra argumentação, ocorreu a leitura do parecer final da banca examinadora, que decidiu pela APROVAÇÃO. Este resultado deverá ser homologado pelo Colegiado do programa, mediante o atendimento de todas as indicações e correções solicitadas pela banca dentro dos prazos regimentais definidos pelo programa. A outorga de título de mestra está condicionada ao atendimento de todos os requisitos e prazos determinados no regimento do Programa de Pós-Graduação. Nada mais havendo a tratar a presidência deu por encerrada a sessão, da qual eu, CHARLES WINDSON ISIDORO HAMINIUK, lavrei a presente ata, que vai assinada por mim e pelos demais membros da Comissão Examinadora.

CURITIBA, 28 de Abril de 2023.

Assinatura Eletrônica

09/05/2023 19:56:58.0

CHARLES WINDSON ISIDORO HAMINIUK

Presidente da Banca Examinadora

Assinatura Eletrônica

10/05/2023 15:14:11.0

RENATA HERNANDEZ BARROS FUCHS

Avaliador Externo (UNIVERSIDADE TECNOLÓGICA FEDERAL DO PARANÁ)

Assinatura Eletrônica

09/05/2023 11:26:37.0

LEILA LARISA MEDEIROS MARQUES

Avaliador Externo (UNIVERSIDADE TECNOLÓGICA FEDERAL DO PARANÁ)

## AGRADECIMENTOS

Agradeço a Deus por ter me instruído e capacitado para concluir este mestrado.

A minha família por todo incentivo e apoio durante minha trajetória acadêmica. Agradeço pela educação que meus avós me deram, a minha avó Eleuza (*in memoriam*), pelo seu singelo carinho e força nos momentos de maior dificuldade.

Ao meu orientador, Prof. Dr. Charles Windson Isidoro Haminiuk, por acreditar em meu trabalho e por toda assistência. À coorientadora Prof.<sup>a</sup> Dr.<sup>a</sup> Thaisa Carvalho Volpe Balbinoti pela orientação, suporte, dedicação e ensinamentos que contribuíram para que essa conquista fosse possível.

Agradeço a parceria da Universidade Federal do Mato Grosso do Sul (UFMS) e Universidade Tecnológica Federal do Paraná (UTFPR) por permitirem o uso da estrutura do seu laboratório para a realização de algumas análises.

Agradeço a ajuda e cooperação da colega de trabalho Isabela Andrade na realização das análises dos compostos bioativos.

Agradeço ao meu amigo Gleiner, pela ajuda e paciência nos momentos mais críticos da execução do trabalho.

Aos membros das bancas examinadoras, pelas sugestões e melhoria com intuito de aperfeiçoar esse estudo.

Agradeço a Universidade Federal do Paraná (UFPR) e ao Programa de Pós Graduação em Engenharia de Alimentos (PPGEAL) pela oportunidade, à Secretaria, Técnicos e Professores do PPGEAL que de uma forma ou outra contribuíram durante esta caminhada e a Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior (CAPES) pela bolsa concedida durante a realização do mestrado.



## RESUMO

O arroz (*Oryza sativa* L.) apresenta grande importância por ser uma das principais culturas alimentares do mundo, sendo cultivado e consumido em todos os continentes. Dentre as formas de beneficiamento, o arroz parboilizado se sobressai em razão dos inúmeros benefícios físicos e nutricionais. Dentre as diversas cultivares de arroz produzidas no Brasil, este estudo aborda o arroz nativo do Pantanal; plantado no bioma Pantanal por comunidades ribeirinhas e povos indígenas. Na literatura são escassos os estudos com este arroz nativo. Assim sendo, este trabalho tem por objetivo avaliar e comparar, de forma pioneira, a hidratação convencional e ultrassônica do arroz nativo do Pantanal no processo de parboilização. O intuito foi verificar a capacidade da hidratação ultrassônica intensificar o processo e reduzir a perda dos compostos fenólicos do arroz em comparação à hidratação convencional. Para esse fim, o arroz nativo do Pantanal foi hidratado de forma convencional e ultrassônica em diferentes temperaturas (35, 45, 55, 65 e 75 °C). Através das hidratações foi possível obter as cinéticas do ganho de umidade, avaliar alterações na estrutura física no grão e na composição fenólica, além de sugerir modelos matemáticos que permitiram descrever a transferência de massa no processo. O comportamento cinético do ganho de umidade ao longo do tempo apresentou semelhança entre os processos de hidratação (convencional e ultrassônico) - côncava para baixo, com intensa hidratação nas primeiras horas, seguida de redução e estabilidade. Embora o comportamento tenha sido equivalente, a hidratação ultrassônica propiciou maior absorção de água em menor tempo - redução média de 58,33% no tempo de processo. Além disso, alterações de caráter irreversível na estrutura física do arroz foram observadas em tempos menores em relação ao convencional, o que confirma que a hidratação ultrassônica intensifica o processo ao parboilizar o arroz em uma única operação unitária e em menor tempo. Com relação a modelagem matemática, o modelo empírico de Peleg e o modelo fenomenológico, baseado na Segunda Lei de Fick (difusão), apresentaram bons ajustes para as duas formas de hidratação. O modelo de Peleg foi o mais satisfatório, com  $R^2$  médio de 0,96. Houve redução significativa no teor de compostos fenólicos, flavonóides e da capacidade antioxidante (quantificada pelos métodos DPPH e ABTS) do arroz submetido ao processo convencional. Por sua vez, o processo ultrassônico causou perda mínima (menos de 1%) dos compostos fenólicos. Concluiu-se que o processo de parboilização pode ser intensificado a partir da etapa de hidratação ao empregar o sistema ultrassônico. A hidratação ultrassônica, em relação a convencional, aumentou a taxa de transferência de massa, reduziu o tempo de processamento e preservou em grande parte os compostos fenólicos.

**Palavras-chave:** Arroz nativo do Pantanal, hidratação ultrassônica, modelagem matemática, compostos fenólicos, capacidade antioxidante.

## ABSTRACT

Rice (*Oryza sativa* L.) is of great importance as it is one of the main food crops in the world, being grown and consumed on all continents. Among the forms of processing, parboiled rice stands out because of the various physical and nutritional benefits. Among the different rice cultivars produced in Brazil, this study addresses the native rice of the Pantanal; planted in the Pantanal biome by riverside communities and indigenous peoples. There are few studies with this native rice in the literature. Therefore, this work aims to evaluate and compare, in a pioneering way, the conventional and ultrasonic hydration of native rice from the Pantanal in the parboiling process. The aim was to verify the ability of ultrasonic hydration to intensify the process and reduce the loss of phenolic compounds in rice compared to conventional hydration. For this purpose, native rice from the Pantanal was hydrated (conventional and ultrasonic) at different temperatures (35, 45, 55, 65 and 75 °C). Through hydration, it was possible to obtain the kinetics of moisture gain, evaluate changes in the physical structure of the grain and in the phenolic composition, in addition to suggesting mathematical models that allow describing the mass transfer in the process. The kinetic behavior of moisture gain over time showed similarity between the hydration processes (conventional and ultrasonic) - concave downwards, with intense hydration in the first hours, followed by reduction and stability. Although the behavior was equivalent, ultrasonic hydration provided greater water absorption in less time - an average reduction of 58.33% in process time. Furthermore, irreversible alterations in the physical structure of the rice were observed in shorter times compared to the conventional one; which confirms that ultrasonic hydration intensifies the process by parboiling the rice in a single unit operation and in less time. With regard to mathematical modeling, Peleg's empirical model and the phenomenological model, based on Fick's Second Law (diffusion), showed good adjustments for both forms of hydration. Peleg's model was the most satisfactory, with an average  $R^2$  of 0.96. There was a significant reduction in the content of phenolic compounds, flavonoids and antioxidant capacity (quantified by the DPPH and ABTS methods) of rice subjected to the conventional process. In turn, the ultrasonic process caused minimal loss (less than 1%) of the phenolic compounds. It was concluded that the parboiling process can be intensified from the hydration stage when using the ultrasonic system. Ultrasonic hydration, compared to conventional hydration, increased the mass transfer rate, reduced processing time and largely preserved the phenolic compounds.

**Keywords:** Pantanal native rice, ultrasonic hydration, mathematical modeling, phenolic compounds, antioxidant capacity.



## LISTA DE FIGURAS

FIGURA 1 - ESTRUTURA FÍSICA DO GRÃO DE ARROZ.....	18
FIGURA 2 - FLUXOGRAMA DO PROCESSO DE PARBOILIZAÇÃO. ....	21
FIGURA 3 - REPRESENTAÇÃO VISUAL DO ARROZ NATIVO DO PANTANAL ,COM CASCA (A) E SEM CASCA (B). ....	38
FIGURA 4 - CINÉTICA DE HIDRATAÇÃO DO PROCESSO CONVENCIONAL (A) E ULTRASSÔNICO (B) DO ARROZ NATIVO DO PANTANAL NAS TEMPERATURAS DE 35, 45, 55, 65 E 75 °C POR 10 HORAS.....	48
FIGURA 5 - MICROGRAFIA DA ESTRUTURA EXTERNA DO ARROZ NATIVO DO PANTANAL NA CONDIÇÃO <i>IN NATURA</i> . ....	53
FIGURA 6 - MICROGRAFIAS DA ESTRUTURA MORFOLÓGICA DO ARROZ NATIVO DO PANTANAL AO LONGO DA HIDRATAÇÃO CONVENCIONAL (65 E 75 °C) - AMPLIAÇÃO DE 1KX. ....	54
FIGURA 7 - MICROGRAFIAS DA ESTRUTURA MORFOLÓGICA DO ARROZ NATIVO DO PANTANAL AO LONGO DA HIDRATAÇÃO ULTRASSÔNICA (65 E 75 °C) - AMPLIAÇÃO DE 1KX. ....	55
FIGURA 8 - FLUXOGRAMA DO PROCESSO DE PARBOILIZAÇÃO PROPOSTO AO ARROZ NATIVO DO PANTANAL. ....	56
FIGURA 9 - MONITORAMENTO DO MECANISMO DE HIDRATAÇÃO CONVENCIONAL NAS TEMPERATURAS DE 65 E 75°C MEDIANTE AGENTE TRAÇADOR. ....	57
FIGURA 10 - MONITORAMENTO DO MECANISMO DE HIDRATAÇÃO ULTRASSÔNICA NA TEMPERATURA DE 65°C MEDIANTE AGENTE TRAÇADOR. ....	58
FIGURA 11 - MODELO DE PELEG AJUSTADO AOS DADOS EXPERIMENTAIS DA CINÉTICA DE HIDRATAÇÃO DO PROCESSO CONVENCIONAL (A) E ULTRASSÔNICO (B) DO ARROZ NATIVO DO PANTANAL NAS TEMPERATURAS DE 35, 45, 55, 65 E 75 °C POR 10 HORAS.....	60
FIGURA 12 - MODELO DE DIFUSÃO AJUSTADO AOS DADOS EXPERIMENTAIS DA CINÉTICA DE HIDRATAÇÃO DO PROCESSO CONVENCIONAL (A) E	

ULTRASSÔNICO (B) DO ARROZ NATIVO DO PANTANAL NAS TEMPERATURAS DE 35, 45, 55, 65 E 75 °C POR 10 HORAS.....	63
--	----

## LISTA DE QUADROS

QUADRO 1 – OBJETIVOS, CONCLUSÕES E CONDIÇÕES OPERACIONAIS EMPREGADAS NA HIDRATAÇÃO DE GRÃOS.....	26
QUADRO 2 – OBJETIVOS, CONCLUSÕES E CONDIÇÕES OPERACIONAIS EMPREGADAS NA HIDRATAÇÃO ULTRASSÔNICA DE GRÃOS .....	32

## LISTA DE TABELAS

TABELA 1 - COMPOSIÇÃO DO GRÃO DE ARROZ INTEGRAL, POLIDO E PARBOILIZADO.....	19
TABELA 2 - PARÂMETROS ESTATÍSTICOS DE QUALIDADE DO AJUSTE DO MODELO EMPÍRICO (PELEG).....	61
TABELA 3 – VALORES DOS PARÂMETROS “ $k_1$ ” E “ $k_2$ ” DO MODELO DE PELEG .....	61
TABELA 4 - PARÂMETROS ESTATÍSTICOS DE QUALIDADE DO AJUSTE DO MODELO FENOMENOLÓGICO (DIFUSÃO).....	64
TABELA 5 – VALORES DOS PARÂMETROS OBTIDOS PARA O MODELO FENOMENOLÓGICO DIFUSÃO.....	65
TABELA 6 - CONCENTRAÇÃO DE COMPOSTOS FENÓLICOS TOTAIS (CFT), FLAVONÓIDES TOTAIS (FT) E ATIVIDADE ANTIOXIDANTE (AA) DO ARROZ NATIVO DO PANTANAL <i>IN NATURA</i> E RESULTANTES DOS PROCESSOS CONVENCIONAL E ULTRASSÔNICO.....	66

## LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

AA	-	Atividade Antioxidante
AOAC	-	<i>Association of Official Analytical Chemists</i>
CA	-	Capacidade Antioxidante
CF	-	Compostos Fenólicos
CFT	-	Compostos Fenólicos Totais
CONAB	-	Companhia Nacional de Abastecimento
DSC	-	Calorimetria Exploratória Diferencial
EAG	-	Equivalente de Ácido Gálico
EC	-	Equivalente de Catequina
ET	-	Equivalente de Trolox
EMBRAPA	-	Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária
FAO	-	<i>Food and Agricultural Organization</i>
FIESC	-	<i>Fusarium incarnatum-equiseti</i>
FT	-	Flavonóides Totais
MEV	-	Microscopia Eletrônica de Varredura
UT	-	Ultrassônica
ZEN	-	Zearalenona

## LISTA DE SÍMBOLOS

$D_{ef}$	Coeficiente de difusão efetivo	( $m^2 s^{-1}$ )
$k$	Constante referente à taxa de hidratação	( $m^2 s^{-1}$ )
$k_1$	Parâmetro do modelo de Peleg	( $h \%^{-1}$ )
$k_2$	Parâmetro do modelo de Peleg	( $\%^{-1}$ )
$K_s$	Coeficiente de transferência de massa	( $cm.h^{-1}$ )
$\rho_A$	Concentração mássica do componente A	( $g cm^{-3}$ )
$N_A$	Fluxo mássico de água	( $g cm^{-2} h^{-1}$ )
$P$	Erro relativo médio	(%)
$r$	Raio do grão	(m)
RMSE	Raiz quadrada média do erro	
$R^2$	Coeficiente de determinação	



## SUMÁRIO

<b>1.</b>	<b>INTRODUÇÃO</b> .....	<b>12</b>
<b>2.</b>	<b>OBJETIVOS</b> .....	<b>15</b>
2.1	OBJETIVO GERAL.....	15
2.2	OBJETIVOS ESPECÍFICOS .....	15
<b>3.</b>	<b>REVISÃO DE LITERATURA</b> .....	<b>16</b>
3.1	O ARROZ .....	16
3.1.1	Arroz Nativo do Pantanal.....	17
3.2	ESTRUTURA, COMPOSIÇÃO E BENEFICIAMENTO DO ARROZ .....	17
3.3	PROCESSO DE PARBOILIZAÇÃO.....	20
3.3.1	Hidratação e Gelatinização na Parboilização .....	22
3.3.2	Compostos Fenólicos na Parboilização.....	23
3.4	OPERAÇÃO UNITÁRIA DE HIDRATAÇÃO .....	25
3.4.1	Hidratação Ultrassônica.....	30
3.5	MODELAGEM MATEMÁTICA DO PROCESSO DE HIDRATAÇÃO .....	36
<b>4.</b>	<b>MATERIAL E MÉTODOS</b> .....	<b>38</b>
4.1	MATÉRIA-PRIMA .....	38
4.2	CALORIMETRIA EXPLORATÓRIA DIFERENCIAL (DSC) .....	39
4.3	HIDRATAÇÃO CONVENCIONAL E ULTRASSÔNICA .....	39
4.4	MECANISMO DE INCORPORAÇÃO DA ÁGUA .....	40
4.5	MONITORAMENTO MORFOLÓGICO DO ARROZ .....	40
4.6	ANÁLISE DOS COMPOSTOS BIOATIVOS .....	41
4.6.1	Quantificação dos compostos fenólicos totais .....	41
4.6.2	Quantificação dos flavonóides totais .....	41
4.6.3	Determinação da capacidade antioxidante a partir da atividade sequestrante de radical livre (DPPH) .....	42
4.6.4	Determinação da capacidade antioxidante a partir da atividade sequestrante de radical (ABTS) .....	42
4.7	MODELAGEM MATEMÁTICA DO PERFIL DE ABSORÇÃO DE ÁGUA.....	43
4.7.1	Modelagem empírica .....	43
4.7.2	Modelagem fenomenológica.....	43
<b>5.</b>	<b>RESULTADOS E DISCUSSÕES</b> .....	<b>47</b>

5.1	COMPORTAMENTO CINÉTICO DO GANHO DE UMIDADE .....	47
5.2	MONITORAMENTO DA MORFOLOGIA DO GRÃO .....	52
5.3	MECANISMO DE HIDRATAÇÃO POR AGENTE TRAÇADOR.....	57
5.4	ANÁLISE DO AJUSTE DOS MODELOS MATEMÁTICOS.....	59
5.5	AVALIAÇÃO DOS COMPOSTOS BIOATIVOS NOS PROCESSOS DE HIDRATAÇÃO .....	65
<b>6.</b>	<b>CONCLUSÕES .....</b>	<b>68</b>
	<b>REFERÊNCIAS.....</b>	<b>69</b>

## 1 INTRODUÇÃO

Segundo a Organização das Nações Unidas para Alimentação e Agricultura (FOOD AND AGRICULTURE ORGANIZATION OF THE UNITED NATIONS – FAO, 2021), o arroz (*Oryza sativa* L.) é um dos cereais mais produzidos e consumidos no mundo, além de ser considerado uma excelente fonte alimentar para humanidade. Segundo Muller *et al.* (2022), o arroz é reconhecido como fonte de energia para o corpo humano, devido à alta concentração de amido, fornecendo também proteínas, vitaminas e minerais, o que corrobora para uma alimentação saudável da população.

O Brasil (7,8% da produção global) ocupa a quarta posição na produção mundial de grãos, depois da China (19,2%), Estados Unidos (18,7%) e Índia (8,6%) (FAO, 2021). De acordo com Lindemann *et al.* (2021), o arroz desempenha importante papel cultural, social e econômico, constituindo com o feijão base da alimentação dos brasileiros. Em 2019, o consumo médio anual de arroz beneficiado no Brasil foi de 35,2 kg/hab, aproximadamente 57% maior em relação ao consumo de feijão, 15,2 kg/hab (EMBRAPA, 2021). Por ser um alimento de baixo custo, a demanda por arroz tem crescido com o aumento populacional, o que motiva adoção de estratégias que viabilizem o aumento da capacidade de produção agrícola, bem como de processamento (BHATTACHARYA, 2013).

Dentre as diversas cultivares de arroz produzidas no Brasil, este trabalho destaca o arroz nativo do Pantanal. Este arroz é plantado às margens dos rios que compõem o bioma Pantanal por comunidades ribeirinhas e povos indígenas (TRALAMAZZA *et al.*, 2021). De acordo com relatos das lideranças indígenas das comunidades Terena e Kadiwéus da aldeia de Lalima, localizada em Miranda, Mato Grosso do Sul, Brasil, o cultivo do arroz nativo do Pantanal ocorre duas vezes ao ano, em abril e dezembro. Estima-se uma produção anual de 3000 kg de arroz, direcionado principalmente para o consumo local das famílias ribeirinhas e indígenas. O arroz cultivado por tais comunidades, matéria-prima deste trabalho, tem coloração amarelo escuro e é conhecido na localidade por arroz “crioulo” ou “ferrujão”.

Segundo o estudo de Samyor *et al.* (2017), os genótipos de arrozes de colorações escuras apresentam alto teor de compostos fenólicos, e conseqüentemente alta capacidade antioxidante, anticarcinogênica, antialérgica, anti-inflamatória e hipoglicêmica. Além disso, apresentam maior concentração de

proteínas (9,83%), quando comparado ao arroz polido (7,1%) e integral (8,3) (LIU *et al.*, 2019).

O conhecimento científico de espécies nativas, como o arroz nativo do Pantanal, tem o papel de subsidiar o entendimento da biologia da espécie, bem como buscar métodos que permitam que as comunidades ribeirinhas e indígenas busquem o equilíbrio entre natureza e utilização de suas riquezas (SOTO-GÓMEZ; PÉREZ-RODRIGUEZ, 2022). Dentro deste aspecto, torna-se de relevância que estudos sejam conduzidos com a finalidade de valorizar o cultivo e o processamento do arroz nativo do Pantanal.

As três principais formas de beneficiamento do arroz são: integral (remoção das cascas); polido (remoção das cascas e das camadas superficiais); e parboilizado (visa a gelatinização do amido) (TAGHINEZHAD *et al.*, 2016; BAO, 2019). A parboilização, consiste em um processo hidrotérmico (denominado neste estudo como hidratação convencional), no qual o grão ainda com casca é imerso em água potável aquecida (de 50 a 80 °C) até atingir ~30% de umidade (HEINEMANN *et al.*, 2005; PASCUAL *et al.*, 2013). A operação unitária de hidratação visa propiciar, para a etapa seguinte, a gelatinização total ou parcial do amido (BUGGENHOUT *et al.*, 2013).

A parboilização do arroz confere aos grãos inúmeros benefícios, como maior rendimento (menor volume de grãos quebrados), esterilização, inativação enzimática, resistência ao ataque de insetos, aumento da vida útil e retenção de vitaminas e minerais (BUGGENHOUT *et al.*, 2014; NASIRAHMADI *et al.*, 2014; PUROHIT; RAO, 2017a). Por outro lado, Min *et al.* (2014), Paiva *et al.* (2016) e Hu *et al.* (2017) mencionam que a principal desvantagem do uso da parboilização é a redução dos compostos fenólicos. Até o momento, somente Balbinoti *et al.* (2019) propôs uma solução para essa desvantagem nutricional ao empregar bagaço de uva, como fonte fenólica, na etapa de hidratação.

A etapa de hidratação do processo de parboilização, além de reduzir os compostos fenólicos do arroz, é uma operação unitária crítica para o processo, uma vez que é demorada (de 8 a 10 horas) e de alto consumo energético (SRIDHAR; MANOHAR, 2003; BALBINOTI *et al.*, 2022). Com o intuito de buscar alternativas para minimizar o tempo de hidratação, custo energético e perdas nutricionais, pesquisadores exploram o uso de tecnologias emergentes, como o ultrassom (VERUCK; PRUDENCIO, 2018). De acordo com Misra *et al.* (2017), Hernández-Hernández *et al.* (2018) e Dolas e Kaur (2019), a aplicação do ultrassom apresenta

diversas finalidades e benefícios para a indústria de alimentos, o que inclui preservação, segurança e qualidade.

No estudo de Yadav *et al.* (2021) e Vásquez *et al.* (2021), o ultrassom foi utilizado em processos de hidratação com milho e feijão, respectivamente. Os autores concluíram que uso do ultrassom promove vantagens operacionais, como maior produtividade, menor tempo de processamento, aumento da qualidade, redução de riscos, além de ser ecologicamente correto. Tais aspectos são possíveis devido à capacidade do ultrassom de potencializar os fenômenos da transferência de calor e massa (CHEMAT; ZILL-E-HUMA; KHAN, 2011).

Em relação à hidratação de arroz, poucos estudos são encontrados com o objetivo de avaliar a aplicação do ultrassom no processo. No estudo de Park e Han (2016), o tratamento ultrassônico (UT) foi aplicado no arroz integral tipo Japonica após a operação de hidratação, com a finalidade de avaliar propriedades texturais e nutricionais do grão, além de propriedades físico-químicas do amido. Os resultados obtidos indicaram melhora da textura do arroz e maior teor de vitaminas no arroz tratado por ultrassom; referente ao amido, foi observado que a estrutura cristalina tornou-se mais homogênea, enquanto a entalpia de fusão e cristalinidade do amido diminuíram significativamente por UT. Em arroz nativo, em específico do Pantanal, nenhuma pesquisa com hidratação ou hidratação ultrassônica foi identificada.

Com base no apresentado, o objetivo deste trabalho foi propor de forma pioneira a hidratação ultrassônica do arroz nativo do Pantanal, a fim de obter um processo rápido, com maior capacidade de produção e mais ecológico (menor consumo de água e energia térmica), além de preservar os compostos fenólicos do arroz em comparação à hidratação convencional. Ademais, este estudo contribui efetivamente para valorização e estímulo à produção e beneficiamento deste arroz no bioma Pantanal, gerando renda para as comunidades ribeirinhas e povos indígenas da região.

## 2 OBJETIVOS

### 2.1 OBJETIVO GERAL

Avaliar se a hidratação ultrassônica do arroz nativo do Pantanal reduz o tempo de processo e perda dos compostos fenólicos em comparação à hidratação convencional.

### 2.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS

- Determinar a temperatura de gelatinização do arroz nativo do Pantanal;
- Obter curvas cinéticas de hidratação na condição convencional;
- Obter curvas cinéticas de hidratação do arroz no processo ultrassônico;
- Avaliar o perfil da difusão da água ao longo da estrutura do grão nas hidratações;
- Avaliar alterações morfológicas na estrutura do arroz ao longo das hidratações;
- Avaliar a composição fenólica do arroz nas hidratações;
- Ajustar modelos matemáticos aos dados experimentais do ganho de umidade nas hidratações;
- Indicar condições operacionais para os processos convencional e ultrassônico do arroz nativo do Pantanal.



### 3 REVISÃO DE LITERATURA

#### 3.1 O ARROZ

O arroz é uma planta da família das gramíneas, com vinte e três espécies descritas, das quais duas espécies são comerciais (*Oryza sativa* L. e *Oryza glaberrima* Steud) (NAYAR, 2014). Dentre as duas espécies cultiváveis, a *Oryza sativa* L. possui maior produção mundial (GRAZINA *et al.*, 2022).

De acordo com Afzal *et al.* (2022), o arroz é uma das principais culturas de cereais, que alimenta quase 3,5 bilhões de pessoas em todo o mundo. Tem por características: não alergênico; não contém glúten; naturalmente pobre em sódio; excelente fonte de carboidratos, proteínas, magnésio, fósforo, manganês, selênio, ferro, ácido fólico, tiamina e niacina; pobre em fibras e gorduras (MRIDULA *et al.*, 2015; BALBINOTI *et al.*, 2018b; IGOUMENIDIS *et al.*, 2019; FUKAGAWA; ZISKA; 2019; KRISHNAN *et al.*, 2021). Segundo Muthayya *et al.* (2014), o arroz fornece até 50% do suprimento calórico da dieta para milhões de pessoas, principalmente para as que vivem em situação de pobreza. Diante disso, o arroz é fundamental para a segurança alimentar mundial (AMINOU *et al.*, 2020).

De acordo com a Food and Agriculture Organization of United States (FAO, 2022), a produção mundial de arroz em 2022 deve alcançar 568,8 milhões de toneladas, produtividade média de 3,5 toneladas por hectare. O Brasil (1,5% da produção global) ocupa a nona posição na produção mundial de arroz, sendo que China (28,1%) e Índia (23,2%) lideram a produção (FAO, 2021).

Segundo a Companhia Nacional de Abastecimento (CONAB, 2022), a produção nacional de arroz para 2022 deve atingir 10,6 milhões de toneladas, redução de 10,1% em relação à safra 2020/21 que registrou 11,75 milhões de toneladas. Tal redução é atribuída a questões climáticas, principalmente devido à falta de chuvas e geadas fora de época. No Brasil, a região Sul se destaca na produção do arroz, do qual o Estado do Rio Grande do Sul representa individualmente aproximadamente 70,7% da produção no país. Outros estados que se destacam na produção de arroz são: Santa Catarina (10,2%), Tocantins (6,1%), Mato Grosso (3,6%) e Maranhão (1,5%) (CONAB, 2021).

### 3.1.1 Arroz Nativo do Pantanal

O arroz nativo do Pantanal, da espécie *Oryza latifolia*, é um grão de cor amarelo escuro, cultivado por comunidades ribeirinhas e indígenas de regiões alagadas, dentre elas a região do Pantanal no Estado do Mato Grosso do Sul, Brasil (TRALAMAZZA, 2021). Diante da importância do arroz nativo do Pantanal para o bioma, bem como para as comunidades ribeirinhas e indígenas que o produzem, torna-se de relevância os estudos que valorizem a qualidade nutricional e explorem formas de processamento, a fim de estimular a produção e preservação deste arroz nativo (OLIVEIRA *et al.*, 2020; CHENG *et al.*, 2021). Em diferentes bancos de dados, observa-se que o arroz do Pantanal é uma variedade pouco estudada, o que limita o incentivo ao uso deste produto nativo, assim como restringe possíveis inovações e desenvolvimento de novos produtos.

Dentre os poucos estudos disponíveis, tem-se o trabalho de Tralamazza *et al.* (2021), que teve por finalidade avaliar os níveis de micotoxinas presentes no arroz do Pantanal. As espécies de fungos FIESC (*Fusarium incarnatum-equiseti*) e ZEN (Zearalenona) foram as principais fontes de contaminação encontradas neste arroz. De acordo com os pesquisadores, aspectos fundamentais da segurança alimentar, como presença de toxinas, são insuficientemente estudados para este arroz.

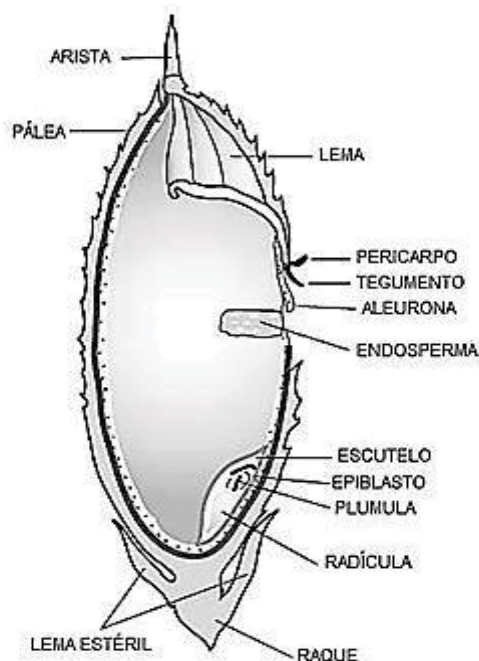
Segundo Cao *et al.* (2010) e Montalvo *et al.* (2020), o arroz nativo do Pantanal é considerado uma excelente fonte de alimentação para humanos e animais do Bioma, uma vez que possui benefícios, como altas concentrações de inibidores da ciclooxigenase e outros agentes anti-inflamatórios que proporcionam alívio dos sintomas de dor e inflamação.

## 3.2 ESTRUTURA, COMPOSIÇÃO E BENEFICIAMENTO DO ARROZ

De acordo com Pereira (2002), Abbas *et al.* (2011) e Oliveira e Amato (2021), a estrutura externa do arroz é formada pela casca (composta por pálea e lema), que se constitui de um material fibroso não comestível, cuja principal função no grão é de proteção da cariopse contra o ataque de insetos, fungos e ácaros. A cariopse (5 a 8%

do arroz integral) é organizada em camadas, sendo as externas conhecidas por pericarpo, tegumento e camada de aleurona (Figura 1). Por sua vez, o gérmen (2 a 3% do arroz) está situado no lado ventral na base do grão, rico em lipídios e proteínas. O componente do grão de maior representatividade é o endosperma, de 89 a 94%, rico em amido.

FIGURA 1 - ESTRUTURA FÍSICA DO GRÃO DE ARROZ



FONTE: Adaptado de Kennedy *et al.* (2002).

Em relação ao processamento, o arroz pode ser processado e classificado como integral, polido e parboilizado (STORCK *et al.*, 2005). O arroz integral é obtido quando o grão é submetido apenas à remoção das cascas; ou seja, esse tipo de beneficiamento mantém de forma intacta o gérmen e as camadas internas e externas do grão, que são ricas em vitaminas e minerais (OLI *et al.*, 2014). Por outro lado, o arroz polido é obtido através da remoção (polimento) das camadas externas do arroz (pericarpo, tegumento e aleurona) e grande parte do gérmen, condição que torna o grão mais fino e de aspecto esbranquiçado (KOSIK *et al.*, 2020). Ao remover esses elementos do arroz, há uma redução significativa dos nutrientes, como vitaminas (vitaminas B, tocoferóis), minerais (principalmente zinco, ferro), ácidos graxos essenciais e até 80% da fibra alimentar (CHAUDHARI *et al.*, 2018).

Por sua vez, a parboilização é o processo pelo qual o grão de arroz, ainda em casca, é submetido a um procedimento hidrotérmico, a fim de gelatinizar o amido (BALBINOTI *et al.*, 2017). Ao parboilizar o arroz, propriedades físicas, químicas e principalmente nutricionais são preservadas ou potencializadas (PAIVA *et al.*, 2016).

De acordo com Vue e Waring (1998) e Zhou *et al.* (2002) a composição nutricional do grão está sujeita, além das diferenças dos cultivares, variações ambientais, manejo e armazenamento, às diferentes formas de processamento (Tabela 1), produzindo, desta forma, arroz com atributos nutricionais diferentes.

TABELA 1 - COMPOSIÇÃO DO GRÃO DE ARROZ INTEGRAL, POLIDO E PARBOILIZADO

Componente	Integral	Polido	Parboilizado <sup>1</sup>
Amido Total (%)	74,72	87,58	85,08
Amilose (%)	19,30	22,7	19,3
Proteína (%)	10,5	8,94	9,44
Lipídeos Totais (%)	1,9	0,4	0,3
Fibra Total (%) ●	11,76	2,87	4,15
Cinza (%)	1,15	0,30	0,67
Cálcio (mg 100g <sup>-1</sup> )	32	24	60
Fósforo (mg 100g <sup>-1</sup> )	220,30	53,60	149,60
Potássio (mg 100g <sup>-1</sup> )	295,40	104,50	185,40
Ferro (mg 100g <sup>-1</sup> )	1,29	1,20	1,04
Zinco (mg 100g <sup>-1</sup> )	2,96	2,35	1,31
Magnésio (mg 100g <sup>-1</sup> )	346,6	84,70	98,20
Tiamina (mg 100g <sup>-1</sup> )	0,34	0,07	0,44
Riboflavina (mg 100g <sup>-1</sup> )	0,05	0,03	0,045
Niacina (mg 100g <sup>-1</sup> )	4,7	1,6	3,5
Ácido Fólico (mg 100g <sup>-1</sup> )	0,1-0,5	0,03-0,14	NE
Atividade Antioxidante ●●	26,5	NE	11,3

NE = não encontrado.

● Valores influenciáveis de acordo com o método aplicado.

●● Valores com base no método DPPH – unidade em  $\mu\text{mol}$  equivalentes de Trolox por 100g de arroz.

<sup>1</sup> O arroz parboilizado pode ser integral ou polido. Desta forma, valores centesimais são variáveis conforme as condições de processo, bem como características da cultivar.

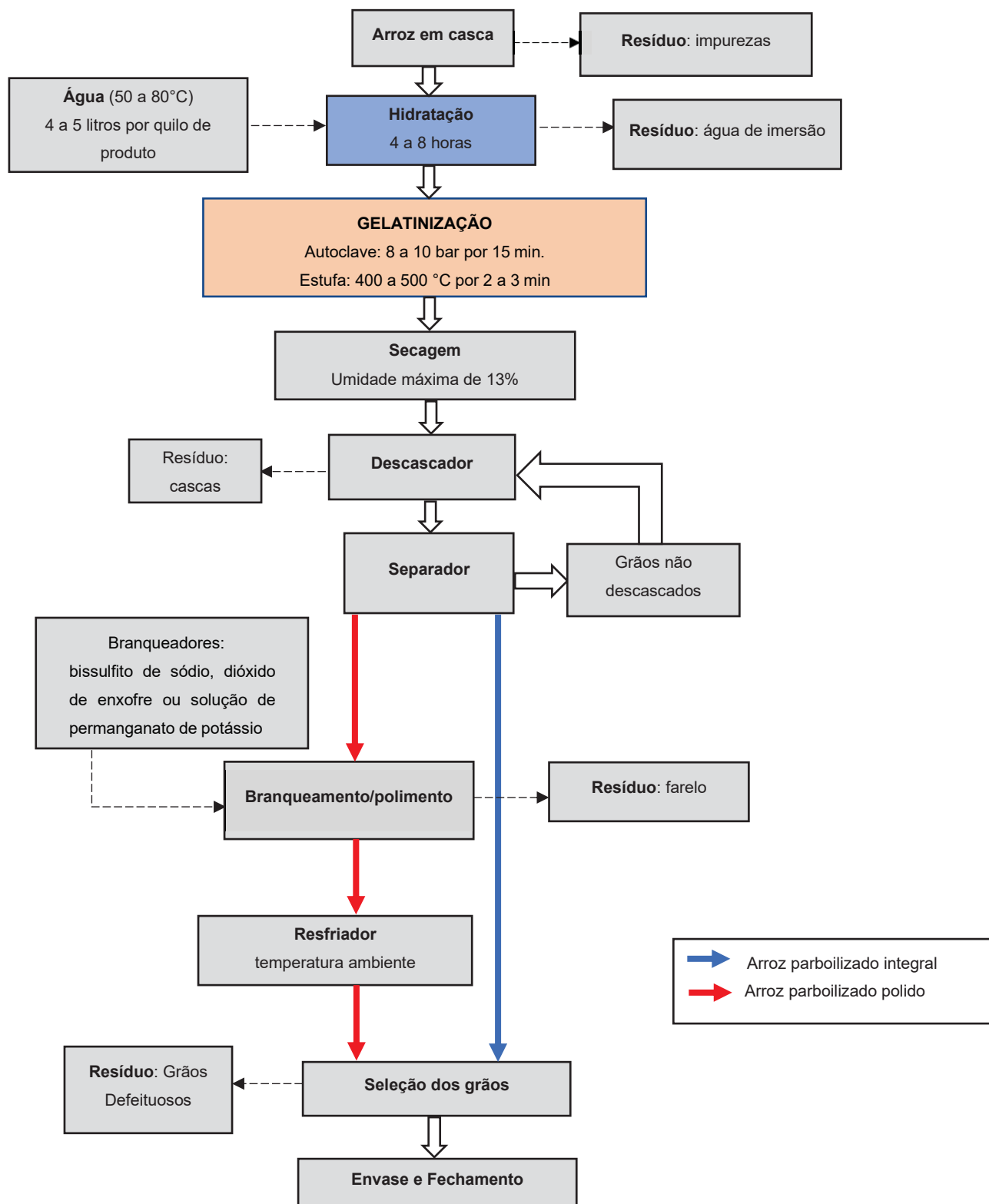
FONTE: Adaptado de Marshall *et al.* (1993); Champagne (2004); Zhou *et al.* (2004); Denardin *et al.* (2004); Storck, Silva e Fagundes (2005); Monks *et al.* (2013).

### 3.3 PROCESSO DE PARBOILIZAÇÃO

O processo de arroz parboilizado é estabelecido em muitos países, principalmente na Ásia, Europa e América (SRISANG; CHUNGCHAROEN, 2019). Dados sobre a origem deste beneficiamento confirmam a primeira utilização na Índia e alguns países da África, com o intuito de facilitar o descascamento dos grãos. Alterações químicas, físicas, físico-químicas, bioquímicas, estruturais e sensoriais provocadas no grão só foram consideradas na década de 40 com início da escala industrial (ALI; PANDYA, 1974; MCKEVITH, 2004).

Aproximadamente 20% da produção de arroz mundial é parboilizado (DA LUZ *et al.*, 2022). Este processo (Figura 2) é alcançado a partir de duas etapas principais: hidratação e gelatinização (HAN *et al.*, 2016).

FIGURA 2 - FLUXOGRAMA DO PROCESSO DE PARBOILIZAÇÃO.



FONTE: o autor (2022).



Segundo Buggenhout *et al.* (2014b), o arroz parboilizado dispõe de duas a três vezes o valor econômico do arroz polido, o que torna este processamento de grande importância para as indústrias de arroz. Além disso, de acordo com Nicolin *et al.* (2018) e Balbinoti *et al.* (2018b), a parboilização se destaca entre os métodos de processamento de arroz devido à sua capacidade de melhorar características nutricionais e físicas do grão. O arroz parboilizado contém maior teor de vitaminas e minerais, além de ser mais palatável e apresentar maior vida útil (OLI *et al.*, 2014; BALBINOTI *et al.*, 2018b). Min *et al.* (2014) e Srichamnong *et al.* (2016) observaram que a parboilização aumentou a concentração de tocotrienóis, tocoferóis e  $\gamma$ -orizanol, porém, houve redução dos compostos fenólicos e flavonóides, especialmente antocianinas. Os autores concluíram que o arroz parboilizado pode ser excelente fonte dietética de antioxidantes lipofílicos, mas o processo deve ser otimizado para minimizar a perda de fenólicos.

### 3.3.1 Hidratação e Gelatinização na Parboilização

Segundo os estudos de Miah *et al.* (2002) e Balbinoti *et al.* (2018a), a hidratação é a imersão do arroz em água (com ou sem casca; no Brasil, exclusivamente com casca). A temperatura e o tempo empregados nesta etapa devem ser suficientes para o grão alcançar umidade de gelatinização (~30% em base úmida), sem degradação do grão (CHENG *et al.*, 2019). Graham-Acquaah *et al.* (2015) e Taghinezhad *et al.* (2016) consideram que a etapa de hidratação determina em grande parte as características do produto final.

Segundo Sridhar e Manohar (2003), quanto menor a temperatura utilizada na hidratação, mais lenta é a transferência de massa (difusão de água). Hidratações a temperatura ambiente favorecem proliferação de bactérias anaeróbias, bactérias do ácido láctico, estafilococos e levedura, uma vez que o tempo de imersão é longo, entre 24 a 48 horas (RAMALINGAM; RAJ, 1996; DUTTA; MAHANTA, 2014). Em razão disso, é convencional empregar altas temperaturas (50 a 80°C) a fim de aumentar a taxa de hidratação, e conseqüentemente, reduzir o tempo de processo (HAPSARI *et al.*, 2016).

Miah *et al.* (2002) aconselham o monitoramento da umidade em altas temperaturas, visto que nestas condições há ganho excessivo de umidade que pode favorecer a ruptura das cascas, causando lixiviação de nutrientes e cozimento do grão. Como solução, Bhattacharya e Rao (1966) sugerem que a etapa de hidratação aconteça pouco abaixo da temperatura de gelatinização do grão.

Após a hidratação, a água é drenada e o arroz hidratado é submetido a condições que garantam a gelatinização do amido. Usualmente se aplica vapor à alta pressão (autoclave) ou secagem em altas temperaturas (estufa) (DEMONT *et al.*, 2012). De acordo com Buggenhout *et al.* (2014b), o arroz parboilizado obtido irá apresentar propriedades peculiares dependendo da técnica utilizada, uma vez que a cor e demais fatores de qualidade estão, segundo Taghinezhad *et al.* (2016) e Taghinezhad e Brenner (2017), fortemente correlacionados com o grau de gelatinização.

Ainda em relação à gelatinização, Basutkar *et al.* (2015) enfatizam que cultivares com alta temperatura de gelatinização (Tg) não devem se misturar com os de baixas Tg, de modo a evitar qualidade inconsistente entre os produtos. Segundo Lanning e Siebenmorgen (2011), a Tg difere entre os cultivares, afetando a taxa de hidratação e o grau de gelatinização. No estudo de Islam *et al.* (2002), com a cultivar Belle Patna, a Tg foi de 80 a 100 °C, enquanto no estudo de Balbinoti *et al.* (2018a), com a cultivar BR-IRGA 409 a temperatura foi de 55 °C.

### 3.3.2 Compostos Fenólicos na Parboilização

Os compostos fenólicos (CF) constituem um dos mais numerosos grupos de metabólitos secundários em plantas, com aproximadamente 10000 estruturas fenólicas conhecidas; sendo essenciais para a proteção das plantas contra herbívoros e microrganismos patogênicos (DE LA ROSA *et al.*, 2019). Os CF geralmente são categorizados como ácidos fenólicos, flavonóides, estilbenos, cumarinas e taninos (SHAO; BAO; 2015; LOURENÇO *et al.*, 2019). Esses compostos têm sido estudados extensivamente devido aos seus diversos benefícios à saúde humana, como a ação antioxidante e por seus potenciais efeitos protetores na atividade antimutagênica, antitumoral, antiviral, antimicrobiana e antienvhecimento (LI *et al.*, 2021).

Em grãos integrais os CF comumente encontrados são os ácidos fenólicos e os flavonóides (VARGA *et al.*, 2018). Os flavonóides, uma das categorias de compostos fenólicos mais associadas à atividade antioxidante, são reconhecidos tanto pela capacidade de doar elétrons, quanto de parar reações em cadeia (HUDSON *et al.*, 2000; CHO *et al.*, 2013).

No arroz, os CFs são sintetizados devido aos problemas ecológicos e estresses fisiológicos, como patógenos, insetos, radiação ultravioleta e ferimentos (KONG *et al.*, 2004; PARK *et al.*, 2013). De acordo com Mira *et al.* (2009), os CFs presentes no arroz existem na forma solúvel e insolúvel (conjugados); tal que aproximadamente 81% do conteúdo está representado na forma solúvel, localizado principalmente no pericarpo do grão.

De acordo com Thammapat *et al.* (2016), antioxidantes lipofílicos e compostos fenólicos, como ácidos fenólicos e flavonóides são abundantes no arroz integral, e sua atividade antioxidante protege os constituintes celulares, reduzindo assim o risco de desenvolver distúrbios associados ao estresse oxidativo. No trabalho de Min *et al.* (2012) foram observadas concentrações de fenólicos e flavonóides, bem como capacidades antioxidantes significativamente maiores no arroz com pigmentações escuras, quando comparado aos de coloração clara. Walter *et al.* (2013) demonstram que os genótipos de colorações preta, avermelhadas e marrons apresentam alto teor de compostos fenólicos e, conseqüentemente, maior atividade antioxidante.

Por sua vez, Scaglioni *et al.* (2014) verificaram que a atividade antioxidante do arroz foi afetada negativamente pelo processo de parboilização, apresentando redução de até 66% na capacidade de sequestrar radicais livres. Tendo em vista a importância dos compostos fenólicos para a saúde humana, e considerando que no processo de parboilização há redução do teor desses compostos, Balbinoti *et al.* (2019) propuseram uma solução para essa redução. Os pesquisadores inseriram bagaço de uva, resíduo da indústria vinícola, como fonte de compostos fenólicos na etapa de hidratação do processo de arroz parboilizado. O uso do bagaço na parboilização permitiu aumentar no arroz as concentrações de compostos fenólicos totais, flavonóides e antocianinas. Em virtude da absorção dos compostos bioativos do bagaço, a atividade antioxidante do arroz também melhorou, contribuindo para o caráter funcional deste alimento.

### 3.4 OPERAÇÃO UNITÁRIA DE HIDRATAÇÃO

Assim como o arroz, outros grãos podem ser submetidos ao processo de hidratação durante seu beneficiamento, como milho (MARQUES *et al.*, 2014), grão de bico (PRAMIU *et al.*, 2015), cevada (BORSATO *et al.*, 2019) e aveia (OLADELE, 2019). A hidratação, de acordo com Pramiu *et al.* (2019), é uma etapa importante de ser aplicada antes de outros processos, como cozimento, germinação, gelatinização, extração, maltagem e fermentação. No caso da cevada, a hidratação é empregada antes da maltagem, a fim de acelerar a hidrólise do amido presente nos grãos, favorecendo reações enzimáticas. Além disso, a hidratação da cevada reduz a concentração de  $\beta$ -glucanas, que são prejudiciais ao processo de produção da cerveja (GUIGA *et al.*, 2008; MONTANUCI *et al.*, 2017).

Na indústria, tem sido amplamente utilizada a hidratação isotérmica, também conhecida como hidratação convencional (MATTIODA *et al.*, 2019; PANDA *et al.*, 2021). A hidratação convencional é feita através da imersão dos grãos em água aquecida mediante o controle do binômio tempo e temperatura (MIAH *et al.* 2002; BALBINOTI *et al.*, 2018a). O Quadro 1 apresenta condições operacionais utilizadas na aplicação da hidratação para diferentes grãos, bem como o objetivo e as principais conclusões dos estudos.

QUADRO 1 – OBJETIVOS, CONCLUSÕES E CONDIÇÕES OPERACIONAIS EMPREGADAS NA HIDRATAÇÃO DE GRÃOS

Grão	Hidratação convencional		Objetivo	Principais conclusões	Referência
	Temperatura (°C)	Tempo			
Milho	40 a 67	30h	Avaliar a cinética de hidratação de três variedades de milho durante processo de hidratação e coletar informações sobre a mudança de textura (dureza) no grão durante este processo, em função da umidade e temperatura.	Com maior período de hidratação, as três variedades não apresentaram diferenças significativas na dureza dos grãos. A força de deformação final exigida pelas variedades não foi afetada pela temperatura de hidratação.	Marques <i>et al.</i> (2014)
Soja	25 a 65	7h 30min	Avaliar a influência da temperatura no processo de hidratação da soja convencional e transgênica. Ajustar os modelos matemáticos de Peleg e parâmetros concentrados aos dados experimentais e avaliar a influência da transgênese na absorção de água.	Os modelos matemáticos de Peleg e parâmetros concentrados foram capazes de representar as principais tendências do processo. O aumento da temperatura influenciou positivamente na taxa de hidratação. Em relação à transgênese, não foi observada diferença significativa para a taxa de hidratação e o teor de umidade de equilíbrio, o que sugere que a transgênese não afetaria operações posteriores à hidratação, como moagem e extração.	Fracasso <i>et al.</i> (2014)
Grão de bico	10 a 40	24h	Ajustar modelos matemáticos para descrever a absorção de água pelos grãos de bico. Utilizar as constantes cinéticas obtidas para avaliar o efeito da temperatura e da baixa pressão no processo de hidratação usando as equações de Arrhenius-Eyring.	Foi possível determinar o coeficiente de difusão da água no grão, bem como a energia de ativação, o volume de ativação e fração de colisões durante a hidratação. Além disso, a partir da equação do tipo Arrhenius-Eyring foi possível explicar a dependência do coeficiente de difusão com a temperatura e pressão de hidratação. A solução numérica utilizada forneceu uma aproximação confiável para a variação do teor de umidade no interior do produto, cuja distribuição depende da temperatura e pressão, que são as variáveis consideradas no modelo.	Pramiu <i>et al.</i> (2015)

Cevada	10 a 35	32h	<p>Avaliar o comportamento dos grãos de cevada durante a hidratação, quanto à incorporação de água, variações de densidade, volume e perda de sólidos.</p>	<p>Conclui-se que o processo de hidratação é por camadas e quanto maior a temperatura maior foi a absorção de água. O coeficiente de difusão foi maior na temperatura de 20°C e menor nas temperaturas de 30 e 35°C, provavelmente porque essas temperaturas são altas para o processo de hidratação ocorrendo perda de sólidos.</p>	Montanuci <i>et al.</i> (2015)
Tremoço Andino	23 a 60	6h40min	<p>Correlacionar a morfologia, comportamento de hidratação e modelos matemáticos para explicar e prever a cinética de hidratação de grãos de tremoço andino (<i>L. mutabilis Sweet</i>).</p>	<p>Foi demonstrado que a entrada de água no grão é realizada tanto por capilaridade através da fissura hilar, quanto por difusão através do tegumento da semente. A medida que a temperatura da água de imersão aumentava, a taxa de ingestão de água também aumentava, reduzindo o tempo de processo e aumentando o teor de umidade de equilíbrio. A hidratação dos grãos foi descrita com sucesso por dois modelos sigmoidais (Kaptso <i>et al.</i> e Ibarz–Augusto).</p>	Miano <i>et al.</i> (2015)
Trigo	30 a 70	13h e 30min	<p>Desenvolver um modelo inteligente para previsão direta do teor de umidade, razão de umidade e taxa de hidratação do grão de trigo durante a embebição com base na mudança simultânea de temperatura e tempo de hidratação.</p>	<p>O estudo e a simulação inteligente das características de hidratação do grão de trigo resultou na obtenção das seguintes conclusões: O efeito simultâneo do tempo de hidratação e temperatura na absorção de água foi mais forte do que o efeito do tempo ou temperatura de hidratação, isoladamente. O melhor sistema inteligente desenvolvido para descrever as características de hidratação foi o modelo de RNA baseado em MLP com R<sup>2</sup> de 0,994. O sistema pode ser usado para a previsão direta das características de hidratação usando dados de temperatura e tempo de hidratação.</p>	Shafaei <i>et al.</i> (2016)
Soja	30 a 60	8h	<p>Avaliar o processo de hidratação da soja, para diferentes condições de tempo e temperatura. Os modelos de Peleg e Omoto-Jorge e suas equações generalizadas foram utilizados para descrever a cinética de absorção de água.</p>	<p>Para todas as temperaturas os modelos representaram as principais tendências do processo de hidratação, com desvios inferiores a 3%. No entanto, o modelo de Peleg apresentou o melhor ajuste aos dados</p>	Borges <i>et al.</i> (2017)



				experimentais.	
Arroz com casca	35 a 60	15h	Modelar a hidratação do arroz durante o processo de parboilização, utilizando simulação transiente tridimensional com o software COMSOL Multiphysics.	Não houve degradação térmica da matéria orgânica na faixa de temperatura aplicada (35-60 °C) durante as 15 h de hidratação. No entanto, houve o fenômeno da gelatinização. O modelo desenvolvido e construído no software COMSOL apresentou boa adequação aos dados experimentais, com erro relativo médio de 1,7%. Devido a capacidade preditiva do modelo, o mesmo é capaz de simular (3D e 2D) as principais características da hidratação do arroz no processo de parboilização.	Balbinoti <i>et al.</i> (2018)
Feijão Mungo	25 a 55	8h20min	Determinar o caráter de absorção de água do feijão mungo ao longo da faixa de temperatura, e modelar a cinética de absorção de água.	Durante o processo de hidratação, o teor de umidade aumentou rapidamente no início da imersão. No entanto, a taxa de absorção de água diminuiu e estabilizou com o passar do tempo e o teor de umidade atingiu o ponto de saturação. A difusividade foi afetada pelo aumento da temperatura.	Sharanagat <i>et al.</i> (2018)
Cevada	30 a 40	12 h	Avaliar a hidratação isotérmica em diferentes temperaturas e obter as propriedades termodinâmicas, bem como caracterizar a termoestabilidade da cultivar Scarlet (cevada) e avaliar a temperatura de gelatinização do amido.	A avaliação da cinética de hidratação demonstra que o aumento da temperatura melhora a taxa de transferência de massa no grão. Os parâmetros termodinâmicos obtidos pela modelagem do processo fornecem informações sobre a afinidade entre a água e o grão, a espontaneidade da reação, o grau de desordem e a energia necessária para o processo.	Borsato <i>et al.</i> (2019)
Sorgo	30 a 60	12 h	Avaliar a hidratação dos grãos de sorgo e os efeitos do tempo e temperatura na umidade e modelagem do processo.	O processo de hidratação foi modelado com as equações empíricas de Peleg e Page e com os modelos fenomenológicos de Difusão e Omoto-Jorge. O tempo e a temperatura afetaram significativamente a cinética de hidratação dos grãos de sorgo. Tendo em vista que os modelos de Peleg e de Difusão apresentaram ajustes mais satisfatórios para o	Silva <i>et al.</i> (2019)

					processo. O comportamento dos grãos durante a hidratação apresentou um formato côncavo para baixo, com alta taxa de absorção inicial de água. Embora o modelo de Peleg pudesse descrever os dados adequadamente, este mostrou incapacidade em partes específicas do processo de hidratação. Portanto, o modelo de Miano–Ibarz–Augusto também foi avaliado, com melhor descrição. Os modelos generalizados obtidos foram então validados em condições isotérmicas e não isotérmicas.	Oladele <i>et al.</i> (2019)
Aveia	25 a 55	8h		Avaliar a cinética e o comportamento do modelo matemático na hidratação dos grãos de aveia ( <i>Avena sativa</i> ).	Concluiu-se que em comparação com 25°C e temperaturas mais altas de hidratação, 35°C pode ser considerada como a temperatura ótima de hidratação do GC, favorecendo menor tempo e energia de hidratação.	Kumar <i>et al.</i> (2021)
Grão de bico verde	25 a 65	3h e 30 min		Modelar a hidratação do grão de bico verde (GC) e examinar a capacidade preditiva da modelagem em rede neural artificial (RNA).	Concluiu-se que foi alcançado as condições operacionais de intensificação do processo de parboilização do arroz através da etapa de hidratação. A gelatinização no processo de hidratação foi dependente da temperatura e do teor de água. A simulação da transferência de calor e massa permitiu elucidar o real comportamento do arroz durante a hidratação, o que torna este modelo uma ferramenta valiosa para modelagem e otimização do processo de parboilização do arroz.	Balbinoti <i>et al.</i> (2022)
Arroz com casca	36,5 a 86,5	10 h		Simular em 3D a transferência de massa e calor. Avaliar eventos térmicos e alterações morfológicas de grãos durante a hidratação do arroz em casca.		

FONTE: o autor (2022).

### 3.4.1 Hidratação Ultrassônica

O processo de hidratação convencional é demorado e pode resultar em contaminação microbiana, fermentação do produto, desenvolvimento de sabor estranho e lixiviação de nutrientes (YADAV, 2021). Com intuito de buscar soluções, novas tecnologias estão sendo testadas, incluindo a hidratação ultrassônica. Segundo Li *et al.* (2019), a aplicação de novas tecnologias é importante e necessária para melhorar as condições operacionais da hidratação de grãos, afetando positivamente na capacidade de absorção de água e na qualidade do produto final. Em processos de hidratação, as principais vantagens do tratamento ultrassônico são: fácil operação; menor consumo de energia; e atóxico (MIANO *et al.*, 2016; LI *et al.*, 2019). Os autores consideram que a hidratação ultrassônica é a tecnologia emergente mais promissora para os processos de hidratação, principalmente por reduzir o tempo de processo.

No trabalho de Miano *et al.* (2017), a hidratação ultrassônica reduziu o tempo de hidratação dos grãos de milho em ~35%. Demais pesquisadores também verificaram otimização do tempo de processo e aumento da umidade de equilíbrio ao empregarem a hidratação ultrassônica em grão de bico (YILDIRIM *et al.*, 2011), feijão (GHAFOR *et al.*, 2014; MIANO; AUGUSTO, 2018) e grãos de sorgo (Patero e Augusto, 2015).

Em arroz, Yang *et al.* (2020) observaram que, após o tratamento ultrassônico, a superfície do arroz se tornou mais áspera e porosa. Segundo os autores, a estrutura da superfície do grão colapsa pela alta força de cisalhamento resultante das bolhas de ar e do fluxo de água durante o tratamento ultrassônico, o que potencializa a difusão de água para o interior do arroz. Bonto *et al.* (2021) observaram que o tratamento ultrassônico induz rachaduras nos grãos de arroz, além de que, dependendo do tempo de sonicação, pode ocorrer um aumento no grau de grãos quebrados – condição não desejável.

Park e Han (2016) avaliaram que hidratação ultrassônica no arroz aumentou a capacidade de absorção de água devido à formação de rachaduras, tanto na morfologia do grão quanto do amido. Kalita *et al.* (2021), por sua vez, observaram que a hidratação ultrassônica possibilitou altas taxas de transferência de massa, acelerando o processo germinativo do arroz.

Li *et al.* (2019) igualmente verificaram em seus estudos que as mudanças na microestrutura do arroz foram perceptíveis, com formação de regiões microporosas nos grãos tratados sob diferentes potências ultrassônicas. Deste modo, o tratamento ultrassônico promove o aumento da taxa de hidratação ao aumentar as regiões porosas que, por consequência, contribuem para migração da água e absorção de umidade.

Diante do exposto, a hidratação ultrassônica é uma tecnologia promissora para as indústrias alimentícias, uma vez que apresenta inúmeras vantagens, como maior retenção de nutrientes, aumento da taxa de transferência de massa, tecnologia segura, economizador de energia, eficiente, ausente de resíduos químicos e ecologicamente correta (ZHU, 2015; YADAV *et al.*, 2021). O Quadro 2 apresenta objetivos, principais conclusões e condições operacionais utilizadas na aplicação da hidratação ultrassônica para diferentes grãos.

QUADRO 2 – OBJETIVOS, CONCLUSÕES E CONDIÇÕES OPERACIONAIS EMPREGADAS NA HIDRATAÇÃO ULTRASSÔNICA DE GRÃOS

Grão	Hidratação ultrassônica			Objetivo	Principais conclusões	Referência
	Temperatura (°C)	Tempo	Frequência			
Grão de bico	20 a 97	3 h e 30 min	25 kHz 100 W, 40 kHz 100 W e 25 kHz 300 W	Determinar a aplicabilidade da Segunda Lei de Fick na modelagem das características de difusão de água no grão-de-bico tratado com ultrassom, na tentativa de determinar condições adequadas para reidratação.	O uso do ultrassom, o aumento da potência do ultrassom e a temperatura de embebição aumentaram significativamente o coeficiente de difusão de água durante a hidratação. A hidratação ultrassônica diminui o tempo de imersão do grão de bico.	Yildirim <i>et al.</i> (2011)
Feijão	16	4 h e 30min	47 kHz e 750 W	Avaliar o efeito da sonicação na taxa de hidratação e perfil do feijão marinho.	A hidratação ultrassônica melhorou a cinética de transferência de massa e reduziu o tempo de processo de imersão.	Ghafoor <i>et al.</i> (2014)
Grão de sorgo	30	3 h	40 kHz	Avaliar a utilização da tecnologia de ultrassom (US) para otimização do processo de hidratação dos grãos de sorgo.	A hidratação ultrassônica pode ser utilizada com sucesso para otimizar o processo de hidratação de grãos. O comportamento de hidratação do sorgo apresentou uma curva com formato côncavo para baixo, sendo então avaliado pelo Modelo de Peleg. O tempo para atingir 90% do teor de umidade de equilíbrio do processo de controle foi 40% menor quando o ultrassom foi aplicado.	Patero e Augusto (2015)
Milho	25	6 h	25 kHz e 41 W/L	Descrever o efeito do tratamento com ultrassom no processo de hidratação de grãos de milho, verificando os possíveis efeitos nas propriedades do amido.	Foi demonstrado que os grãos de milho podem ser rapidamente hidratados por meio de tratamento por ultrassom sem modificar nenhuma das propriedades do amido. O processo de hidratação ultrassônico reduziu o tempo necessário em ~35%.	Miano <i>et al.</i> (2017)

Feijão carioca	25	8 h e 30 min	25 kHz e 91 W/L	Estudar a incorporação de ferro no feijão durante a hidratação com e sem ultrassom, descrevendo a cinética de absorção de água e ferro, a via de entrada e seu efeito na germinação e no processo de cozimento. Avaliar se a combinação do uso ultrassom e água quente podem acelerar o processo de hidratação de feijão.	É possível incorporar ferro nos grãos durante o processo de hidratação e a tecnologia de ultrassom potencializa esse processo.	Miano e Augusto (2018)
Feijão branco	25 a 55	8 h	40 kHz, 28 W/L	Suprir o déficit dos parâmetros termodinâmicos (energia de ativação, entalpia, entropia e o Gibbs energia livre) associada ao efeito do ultrassom na hidratação de grão de trigo.	Tanto a temperatura quanto a tecnologia de ultrassom melhoraram o processo de hidratação, aumentando a taxa de hidratação e reduzindo a fase lag. O ultrassom reduziu a energia necessária (entalpia de ativação) para formar o complexo ativado durante a hidratação das moléculas do feijão.	Miano <i>et al.</i> (2018)
Trigo	30 a 70	13 h	40 kHz, 480 W	Descrever o efeito da hidratação em condição de sonicação e não sonicação de grãos de cevada e avaliar os parâmetros de qualidade do malte e a capacidade de incorporação de água.	O efeito do ultrassom e temperatura no processo de hidratação foi promissora e aumentou a transferência de massa durante o processo.	Shafaei <i>et al.</i> (2018)
Cevada	35 e 40	8 h	37 kHz, 154 W	Estudar o efeito da tecnologia de ultrassom na cinética de hidratação	A hidratação dos grãos de cevada apresentou curvas cinéticas semelhantes e uma redução no tempo de hidratação sonicada de cerca de 33% quando comparado ao tratamento térmico a 35 e 40 C. A hidratação ultrassônica melhorou a difusão inicial da água e otimizou a obtenção de produção de malte O modelo de Peleg pode ser usado para prever esse processo.	Borsato <i>et al.</i> (2019)
Tremoço	25	8 h	25 kHz, 41 W/L		A hidratação ultrassônica reduziu em 40% o tempo do processo de	Miano <i>et al.</i>

andino				de grãos de tremoço, levando a melhoria da extração de alcalóides.	hidratação, além de potencializar a extração do alcalóide em quase 21%, quando comparado ao processo convencional.	(2019)
Milheto	70	2 h	20 kHz, 700W	Explorar a possibilidade de um protocolo de hidratação ultrassônica para milheto.	A hidratação ultrassônica é a melhor alternativa para o processamento do milheto, com redução de antinutrientes e melhor qualidade do amido. O processo pode ser ampliado para uso industrial. Melhor qualidade pode ser alcançada em condições otimizadas de hidratação ultrassônica a 66% da amplitude do ultrassom, 26 min de tempo de tratamento e 1:3 de proporção grão/água.	Yadav <i>et al.</i> (2021)
Arroz	25 a 40	12 h	40 kHz, 50 W	Determinar o efeito do <i>hidropriming</i> e <i>sono-hydro priming</i> na taxa de hidratação em arroz. Avaliar a aplicabilidade do modelo de difusão de Fick e do modelo Peleg para prever a absorção de umidade em arroz. Avaliar o efeito do hidrocondicionamento e sono-hidrocondicionamento no potencial de germinação de arroz e na alteração da estrutura morfológica.	Obteve-se alta taxa de transferência de massa com a hidratação ultrassônica, permitindo a aceleração do potencial de germinação. O processo de <i>sono-hydro priming</i> potencialmente reduziu o tempo para atingir o teor de umidade de saturação. O modelo de difusão de Fick e o modelo de Peleg apresentaram qualidade no ajuste para o processo de hidratação ( <i>hidropriming</i> e <i>ultrassom priming</i> ) de arroz, com baixo valor de RMSE.	Kalita <i>et al.</i> (2021)
Feijão caupi	25 e 30	30 min	20 kHz	Avaliar e comparar o efeito de tratamentos sobre os aspectos estruturais, tecnofuncionais, térmicos e propriedades nutricionais do amido de feijão.	A hidratação ultrassônica oferece grande potencial para a modificação do amido do feijão, aumentando as oportunidades de seu uso em diferentes aplicações alimentícias. Todos os	Acevedo <i>et al.</i> (2022)





### 3.5 MODELAGEM MATEMÁTICA DO PROCESSO DE HIDRATAÇÃO

Para o processo de hidratação, a modelagem matemática pode ser útil na compreensão dos fenômenos envolvidos, principalmente transferência de massa e de calor. Além disso, vantagens operacionais viabilizam a utilização da modelagem no meio industrial, como capacidade de diminuir o número de experimentos e produção de informações de forma rápida e confiável (TAGHINEZHAD; BRENNER, 2017). Por esta razão, a modelagem é uma ferramenta economicamente importante para as indústrias, incluindo a de arroz parboilizado (BAKALIS *et al.*, 2009; BALBINOTI *et al.*, 2018a).

Nos processos de hidratação, os modelos matemáticos são especificamente utilizados para predição do ganho de umidade ao longo do tempo, em função da variação da temperatura (MATTIODA *et al.*, 2019). Tais informações são de interesse e fundamentais para garantia do controle de qualidade dos processos de hidratação de forma barata e simples (BALBINOTI *et al.*, 2018). Assim, a modelagem matemática é essencial para a compreensão do comportamento de processos e sistemas, sendo utilizada como ferramenta para redução de custos e melhoria da qualidade dos processos industriais (ZAVVAR SABEGH *et al.*, 2016).

Os modelos matemáticos usualmente empregados podem ser classificados como empíricos ou fenomenológicos (MATTIODA *et al.*, 2018). Os modelos empíricos são obtidos a partir de correlações matemáticas ajustadas a dados experimentais (MATIAS *et al.*, 2018). A principal vantagem das equações empíricas é a facilidade de solução e obtenção dos dados (MARQUES *et al.*, 2014). Dentre os modelos empíricos utilizados para processos de hidratação, o modelo de Peleg é o mais utilizado, alcançando coeficientes de correlação da ordem de 0,95 a 0,99 (PELEG, 1988). Estudos como de Montanuci *et al.* (2015) com cevada, Khazaei e Mohammadi (2009) com gergelim, e Borges *et al.* (2017) com soja, são exemplos de trabalhos que obtiveram bons ajustes do modelo de Peleg aos dados experimentais. Botelho *et al.* (2010) com arroz e Maskan (2002) com trigo obtiveram coeficiente de determinação ( $R^2$ ) entre 0,97 a 0,99. Trabalhos com grão de bico (PRASAD *et al.*, 2010) e gergelim (KHAZAEI; MOHAMMADI, 2009) igualmente relataram altos valores para o coeficiente de correlação ao utilizarem o modelo de Peleg.

Por sua vez, os modelos fenomenológicos consideram em suas equações os fenômenos envolvidos no processo, como a transferência de massa por difusão (MONTANUCI *et al.*, 2014). O modelo de difusão, vastamente abordado em estudos com hidratação, é um modelo fenomenológico que considera em seu equacionamento conceitos e leis da transferência de massa, como a Segunda Lei de Fick (BALBINOTI *et al.*, 2018). A partir deste modelo obtem-se um parâmetro fundamental para compreensão do processo, a difusividade (D), que representa a quantidade de água difundida através de uma área em uma unidade de tempo ( $m^2/s$ ) (MATTIODA *et al.*, 2019). O conhecimento dessa propriedade é necessário para modelar e buscar alternativas de otimizar o transporte de água para o interior dos grãos (MONTANUCI *et al.*, 2014). Em trabalhos de hidratação com arroz (BALBINOTI *et al.*, 2018; BELLO *et al.*, 2004), cevada (MAYOLLE *et al.*, 2012 ) e trigo (YILDIRIM, 2022) o modelo de difusão representou adequadamente os dados experimentais, como  $R^2$  entre 0,95 a 0,99.

## 4 MATERIAL E MÉTODOS

### 4.1 MATÉRIA-PRIMA

Os ensaios experimentais foram realizados com o arroz nativo do Pantanal (Figura 3) safra 2021, obtido através de doações da comunidade indígena Lalima localizada em Miranda, Mato Grosso do Sul, Brasil.

Após a coleta da matéria-prima, fez-se seleção do material a fim de eliminar grãos defeituosos, cascas e materiais estranhos. Posteriormente, as amostras foram acondicionadas em pacotes hermeticamente selados nas quantidades necessárias para cada experimento e armazenadas em temperatura ambiente e local escuro.

A cultivar de arroz nativo apresentou  $13,50\% \pm 0,01$  (b.u) de umidade inicial;  $95,61 \pm 1,62$  mm de comprimento de grão longo e  $30,38 \pm 1,52$  mm de raio. As medidas obtidas de comprimento e raio caracterizam este grão como arroz tipo longo fino.

FIGURA 3 - REPRESENTAÇÃO VISUAL DO ARROZ NATIVO DO PANTANAL , COM CASCA (A) E SEM CASCA (B).



FONTE: o autor (2022).

## 4.2 CALORIMETRIA EXPLORATÓRIA DIFERENCIAL (DSC)

A gelatinização, por ser um fenômeno endotérmico, foi identificada por Calorimetria Exploratória Diferencial (DSC), conforme metodologia proposta por Balbinoti *et al.* (2018). Massa de 15 mg de arroz moído a ~30% de umidade foi depositada em cápsulas de alumínio (580-10437, Perkin-Elmer) com capacidade para 50  $\mu\text{L}$ . O material foi submetido ao ciclo de aquecimento de 30 a 100°C a uma taxa de 5°C  $\text{min}^{-1}$ . O equipamento (DSC1HT/1324/MettlerToledo/Brasil) foi calibrado com índio (99,99% de pureza, PE=156,6°C e  $\Delta H=28,56 \text{ J g}^{-1}$ ) e cápsula vazia foi utilizada como referência. Gás de purga Nitrogênio (White Martins; 5.0), sob vazão de 20  $\text{mL min}^{-1}$ , foi utilizado como meio inerte. A temperatura (°C) de gelatinização e a entalpia ( $\text{J g}^{-1}$ ) do evento foram determinadas pelo software (STARe) acoplado ao equipamento.

## 4.3 HIDRATAÇÃO CONVENCIONAL E ULTRASSÔNICA

A metodologia foi baseada nos procedimentos realizados por Bello *et al.* (2004), Kashaninejad *et al.* (2007) e Botelho *et al.* (2010) para arroz. Para cada ensaio foi utilizada proporção mássica de 1:4 de arroz (em casca) em água destilada, dispostos em formas de alumínio, sem agitação em banho termostático (Solab/SL-154/ Brasil).

As temperaturas pré-estabelecidas do banho foram 35, 45, 55, 65 e 75 °C. Temperaturas inferiores não foram aplicadas, visto não propiciarem ao grão umidade mínima de ~30% (BALBINOTI *et al.*, 2018). Temperaturas superiores também não foram ensaiadas, por propiciar a desintegração do grão (rompimento total das cascas e cozimento do grão), conforme observado por Balbinoti *et al.* (2018). Os ensaios de hidratação foram realizados em triplicata.

Porções de aproximadamente 20 g de amostra foram retiradas em intervalos de 30 minutos até 3 horas e depois de hora em hora até atingir 10 horas de hidratação. As amostras coletadas foram avaliadas quanto ao ganho de umidade ( $\text{g g}^{-1}$ , base úmida b.u). A umidade foi determinada de acordo com a metodologia da AOAC (2000),

na qual ~5 g de amostra foi seca em estufa (Deleo/TLK 48/Brasil) a 105 °C por 24 h. Os resultados foram expressos em g g<sup>-1</sup> b.u.

Por sua vez, os ensaios de hidratação ultrassônica foram conduzidos nas mesmas condições operacionais da hidratação convencional, utilizando-se como meio de hidratação a água, no banho ultrassônico (LSLOGEN/SB-5200DTN/Brasil).

#### 4.4 MECANISMO DE INCORPORAÇÃO DA ÁGUA

Na condição desejável do processo, o arroz foi submetido à hidratação na presença de uma molécula traçadora, com a finalidade de identificar, a partir da pigmentação no grão, o mecanismo de difusão da água durante a hidratação convencional e ultrassônica. A metodologia empregada foi baseada na realizada por Miano *et al.* (2015). O traçador empregado foi o corante artificial azul de metileno, na proporção de 1:100 (g mL<sup>-1</sup>). As amostras coletadas foram secas superficialmente em papel toalha e cortadas ao meio na direção transversal ao comprimento (lamina/Wilkinson/Brasil), a fim de promover a visualização da região interna do arroz. A difusão do corante no grão durante a hidratação foi registrada por meio de imagens fotográficas (Samsung Galaxy A50, Sistema operacional Android, 2019).

#### 4.5 MONITORAMENTO MORFOLÓGICO DO ARROZ

A microestrutura externa do grão durante as hidratações (convencional e ultrassônica) foi avaliada a partir de imagens em Microscópio Eletrônico de Varredura (JEOL/JSM- 6380LV/Japão). Os grãos analisados foram completamente secos (110 °C por 24 horas) e as imagens foram estabelecidas em aumento de 1.0 kx em tensão de 5.0 kV. Houve metalização no equipamento Sputter (Denton Vacuum/Desk III/EUA) no tempo de 5 min, com pressão a 160 mTorr e corrente de alta voltagem de 46 mA.

## 4.6 ANÁLISE DOS COMPOSTOS BIOATIVOS

Primeiramente, foi realizada a extração dos compostos bioativos, conforme adaptações da metodologia de Haminiuk *et al.* (2012). Foi utilizado a proporção de 1:10 (m v<sup>-1</sup>), na qual 1 g de arroz moído (condição ótima de hidratação convencional e ultrassônica) com 10 mL de solução hidroetanólica (etanol 40%) foi mantida sob agitação (Solab/SL222/Brasil) a 130 rpm por 2 horas a temperatura ambiente. Após esse período, as amostras foram centrifugadas (Excelsa/206 BL-Fanem/Brasil) a 5000 rpm por 10 minutos e o sobrenadante utilizado para quantificação dos Compostos Fenólicos Totais, Flavonóides Totais e Atividade Antioxidante.

### 4.6.1 Quantificação dos compostos fenólicos totais

A análise foi estabelecida segundo Singleton e Rossi (1965), com modificações. Em balões volumétricos de 10 mL será adicionado 0,1 mL de extrato da amostra, 7 mL de água destilada e 0,5 mL de reagente Folin-Ciocalteu. A solução obtida permaneceu em repouso por 3 minutos antes da adição de 1,5 mL de carbonato de sódio (20%) e de água para completar o volume. Ao finalizar essa etapa, o conteúdo permaneceu em repouso por 2 horas na ausência da luz. Posteriormente, foram realizadas leituras em espectrofotômetro (Biovera/ UV-M51/Brasil) a 765 nm. A curva analítica foi estabelecida com ácido gálico em concentrações que variam de 45 a 455 mg L<sup>-1</sup>. Os resultados obtidos foram expressos em equivalentes de ácido gálico (mg EAG) para cada 100 g de amostra.

### 4.6.2 Quantificação dos flavonóides totais

A quantificação foi estabelecida segundo Chang *et al.* (2002), com modificações. Em tubos de ensaio, foram adicionados 250 µL de extrato da amostra, 1250 µL de água destilada e 75 µL de nitrito de sódio (5%). A solução obtida permaneceu em repouso por 6 minutos; após, foi adicionado 150 µL de cloreto de

alumínio hexahidratado (10%), ficou em espera por 5 minutos, para posterior adição de 0,5 mL de Hidróxido de sódio (1 M) e 275 µL de água. Em seguida, foram realizadas leituras em espectrofotômetro (Biovera/UV-M51/Brasil) a 510 nm. Catequina em concentrações de 5 a 65 mg L<sup>-1</sup> foi utilizada para aquisição da curva analítica e os resultados obtidos foram expressos em equivalentes de catequina (mg EC) por 100 g de amostra.

#### 4.6.3 Determinação da capacidade antioxidante a partir da atividade sequestrante de radical livre (DPPH)

O método da inibição do radical 2,2-difenil-1-picrilidrazila (DPPH) foi adaptado de Brand-Williams *et al.* (1995). Em tubos de ensaio, foram adicionados 2,75 mL de etanol, 1,75 mL de solução de DPPH (0,0022 g de DPPH em 25 mL de etanol) e 0,5 mL do extrato. Antes da leitura em espectrofotômetro (Biovera/ UVM51/Brasil) a 517 nm, as amostras ficaram em repouso por 30 minutos em ausência da luz. Para a curva analítica ( $R^2=0,996$ ) foi utilizada a solução de Trolox (25 mg de trolox em 50 mL de álcool etílico) com concentrações de 0 a 250 µmol L<sup>-1</sup>. Os resultados foram expressos em (µmol ET) de Trolox equivalente por 100 g de amostra.

#### 4.6.4 Determinação da capacidade antioxidante a partir da atividade sequestrante de radical (ABTS)

Os ensaios foram conduzidos conforme método proposto por Re *et al.* (1999), com algumas modificações. Primeiramente, foi preparada solução radical ABTS, por meio da junção de 3 mL da solução de Persulfato de potássio (2,45 mmol L<sup>-1</sup>) com 3 mL da solução de ABTS (7 mmol L<sup>-1</sup>). Essa solução foi mantida em repouso por 16 horas em ausência da luz. Para leitura em espectrofotômetro (Biovera/ UV-M51/Brasil) a 734 nm foi misturado 4 mL da solução radical ABTS, com 40 µL do extrato. A curva ( $R^2=0,994$ ) foi construída utilizando solução de Trolox (25 mg de trolox em 50 mL de álcool etílico) em concentrações de 0 a 1000 µmol L<sup>-1</sup>. A atividade antioxidante foi expressa em (µmol ET) de Trolox equivalente por 100 g de amostra.

## 4.7 MODELAGEM MATEMÁTICA DO PERFIL DE ABSORÇÃO DE ÁGUA

### 4.7.1 Modelagem empírica

Foi utilizado o modelo empírico de Peleg (1988), Equação 1, para ajuste aos dados experimentais de hidratação (convencional e ultrassônica).

$$M(t) = M_0 + \frac{t}{k_1 + k_2 t} \quad (\text{Equação 1})$$

Tal que,  $M(t)$  (g g<sup>-1</sup> b.u) é a umidade em função do tempo;  $t$  (min) é o tempo de hidratação;  $M_0$  (g g<sup>-1</sup> b.u) é a umidade inicial do grão;  $k_1$  (min g g<sup>-1</sup> b.u) é o parâmetro relacionado à taxa de absorção de água no início do processo; e  $k_2$  (g g<sup>-1</sup> b.u) é a capacidade máxima de absorção de água.

O ajuste dos dados experimentais ao modelo foi obtido por regressão não-linear, utilizando o algoritmo de Levenberg-Marquardt. A qualidade do ajuste foi determinada com base no coeficiente de determinação ( $R^2$ ), na raiz quadrada do erro médio (RMSE) e no erro médio relativo (P) (BORGES *et al.*, 2017).

### 4.7.2 Modelagem fenomenológica

Foi utilizado o modelo fenomenológico baseado na Equação da Continuidade da Transferência de Massa (Equação 2), pela qual foi possível determinar a distribuição da umidade no grão ao longo do tempo.

$$\frac{\partial \rho_A}{\partial t} + \vec{\nabla} \cdot \vec{n}_A = r_A \quad (\text{Equação 2})$$

Tal que,  $\rho_A$  é a concentração mássica do componente A (A = água);  $\vec{\nabla}$  é o operador divergente;  $\vec{n}_A$  é fluxo mássico absoluto devido a contribuição difusiva e convectiva; e  $r_A$  é a reação química no interior do volume de controle. O volume de controle é o grão de arroz.

Para o operador divergente da Equação 2, foram consideradas coordenadas



cilíndricas (Equação 3), tendo em vista as características físicas do arroz.

$$\frac{\partial \rho_A}{\partial t} + \left[ \frac{1}{r} \frac{\partial (r n_{A,r})}{\partial r} + \frac{1}{r \sin \theta} \frac{\partial n_{A,\theta}}{\partial \theta} + \frac{\partial n_{A,z}}{\partial z} \right] = r_A \quad (\text{Equação 3})$$

Na qual, o termo  $\left[ \frac{1}{r} \frac{\partial (r n_{A,r})}{\partial r} \right]$  remete a direção radial,  $\left[ \frac{1}{r \sin \theta} \frac{\partial n_{A,\theta}}{\partial \theta} \right]$  a direção circunferencial e  $\left[ \frac{\partial n_{A,z}}{\partial z} \right]$  a direção axial.

Para escrevermos o fluxo difusivo do soluto A em termos da velocidade de difusão, a Equação da Continuidade (Equação 3) foi adaptada conforme a Lei Ordinária da Difusão (Primeira Lei de Fick), que é caracterizada por apresentar o Coeficiente de Difusão ( $D_{AB}$ ), que é a grandeza que melhor traduz a interação soluto-meio (água-arroz), pois está diretamente relacionada com o mecanismo que rege a difusão.

Sabe-se que o termo  $[\vec{n}_A]$  é o fluxo global de A, que leva em consideração a soma da contribuição difusiva  $[-D_{AB} \vec{\nabla} \rho_A]$  e convectiva  $[\rho_A \vec{v}]$ . Incluindo essas informações na Equação 2, obtém a Equação 4.

$$\frac{\partial \rho_A}{\partial t} + \vec{\nabla}[\rho_A \vec{v}] = \vec{\nabla}[D_{AB} \vec{\nabla} \rho_A] + r_A \quad (\text{Equação 4})$$

A Equação 4 fornece a distribuição da concentração mássica de A (água) dentro do volume de controle (arroz) em decorrência das diversas influências sobre o transporte desse soluto. Essa equação é geral e relativamente complexa de ser resolvida. Portanto, a Equação 4 foi simplificada mediante as seguintes suposições:

- A hidratação acontece em regime transiente  $\left( \frac{\partial \rho_A}{\partial t} \right)$ ;
- Velocidade do meio é nula ( $\vec{v} = 0$ );
- Temperatura e pressão ao longo da hidratação é constante. Em razão disso, o termo  $D_{AB}$  também será;
- Sem reação química ( $r_A = 0$ );

Tais simplificações resultam na Equação 5, denominada como Segunda Lei de Fick.

$$\frac{\partial \rho_A}{\partial t} = D_{AB} \nabla^2 \rho_A \quad (\text{Equação 5})$$

Considerando coordenadas cilíndricas e fluxo difusivo predominante na direção radial, obtém a Equação 6.

$$\frac{\partial \rho_A}{\partial t} = D_{AB} \left[ \frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} \left( r \frac{\partial \rho_A}{\partial r} \right) \right] \quad (\text{Equação 6})$$

Para solução da Equação 6 é necessário informar o Coeficiente de Difusão ( $D_{AB}$ ), que é definido como a mobilidade do soluto (água) no meio (arroz). A determinação deste parâmetro leva em consideração a característica do arroz; ou seja, um sólido poroso com porosidade ( $\varepsilon_p$ ) e tortuosidade ( $\tau$ ). A partir disso,  $D_{AB}$  será denominado Coeficiente Efetivo de Difusão ( $D_{ef}$  – Equação 7), o que remete finalmente à Equação 8. Esse coeficiente depende também das variáveis que influenciam a difusão, como temperatura e pressão. Tendo em vista que o processo de hidratação será realizado em diferentes temperaturas, haverá um  $D_{ef}$  para cada condição testada.

$$D_{ef} = D_{AB} \left( \frac{\varepsilon_p}{\tau} \right) \quad (\text{Equação 7})$$

$$\frac{\partial \rho_A}{\partial t} = D_{ef} \left[ \frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} \left( r \frac{\partial \rho_A}{\partial r} \right) \right] \quad (\text{Equação 8})$$

Além de definir o  $D_{ef}$ , a solução da Equação 8 requer a consideração de uma condição inicial (CI) e duas condições de contorno (CC1 e CC2). Foram utilizadas as seguintes condições:

- CI: umidade no arroz conhecida e homogênea no início do processo (para  $t = 0$ ,  $\rho_A = \rho_{A_0}$ ,  $0 < r < L$ );
- CC1: fluxo nulo na região de simetria, Equação 9;

$$\text{para } t > 0, \quad \frac{\partial \rho_A}{\partial r} \Big|_{r=0} = 0 \quad (\text{Equação 9})$$

- CC2: fluxo convectivo de massa na superfície do arroz, Equação 10.

$$-D_{ef} \frac{\partial \rho_A}{\partial r} \Big|_{r=L} = h_m (\rho_{A_s} - \rho_{A_\infty}) \quad (\text{Equação 10})$$

Tal que  $h_m$  é o coeficiente convectivo de transferência de massa,  $\rho_{A_s}$  é a concentração de A na superfície em  $r = L$ , e  $\rho_{A_\infty}$  é a concentração de A no seio do fluido em escoamento.

De acordo com Crank (1975) e Balbinoti *et al.* (2018a), a solução da Equação 8 é dada pela Equação 11, tal que  $\lambda$  é a raiz da equação de Bessel de ordem zero, à qual é atribuído o valor de 2,405 (MCLACHLAN, 1955).

$$\frac{\rho_{A_t} - \rho_{A_e}}{\rho_{A_0} - \rho_{A_e}} = \left[ \frac{4}{\lambda^2} \exp\left(-\frac{D_{ef} t \lambda^2}{r}\right) \right] \quad (\text{Equação 11})$$

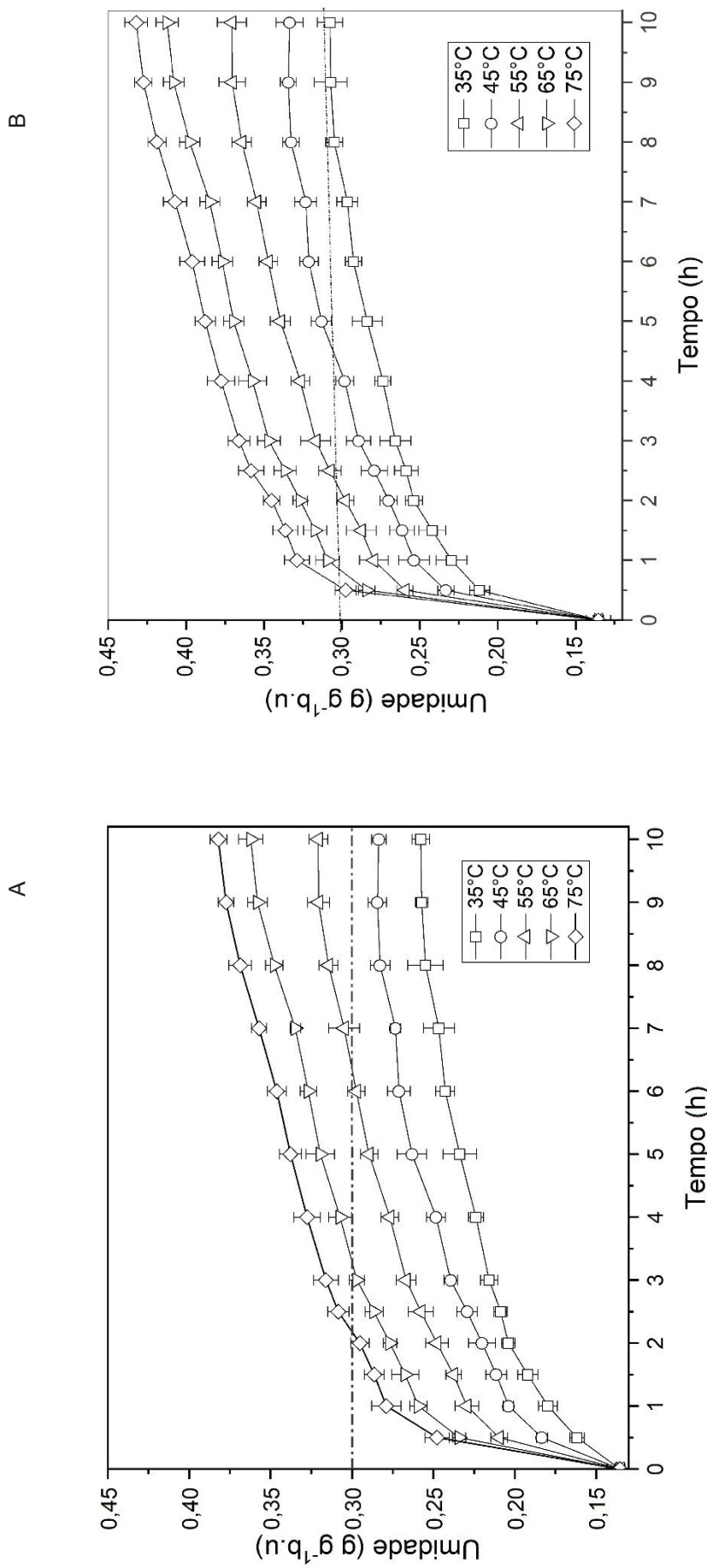
O ajuste dos dados experimentais ao modelo fenomenológico foi obtido por regressão não-linear, utilizando o algoritmo de Levenberg-Marquardt. A qualidade do ajuste foi determinado com base no coeficiente de determinação ( $R^2$ ), na raiz quadrada do erro médio (RMSE) e no erro médio relativo (P).

## 5 RESULTADOS E DISCUSSÕES

### 5.1 COMPORTAMENTO CINÉTICO DO GANHO DE UMIDADE

A capacidade de hidratação do arroz nativo do Pantanal foi monitorada quanto ao ganho de umidade (base úmida) ao longo de 10 horas de processo convencional e ultrassônico para cinco condições térmicas (35, 45, 55, 65 e 75 °C), Figura 4.

FIGURA 4 - CINÉTICA DE HIDRATAÇÃO DO PROCESSO CONVENCIONAL (A) E ULTRASSÔNICO (B) DO ARROZ NATIVO DO PANTANAL NAS TEMPERATURAS DE 35, 45, 55, 65 E 75 °C POR 10 HORAS.



FONTE: O autor (2022).

O comportamento cinético do ganho de umidade ao longo do tempo apresentou semelhança entre os processos de hidratação (convencional e ultrassônico); ou seja, forma côncava para baixo. Tal comportamento atribui-se ao perfil de incorporação da água no grão, no qual observa-se intensa hidratação nas primeiras horas de processo, seguida de redução e equilíbrio (MIANO *et al.*, 2017; SILVA *et al.*, 2019).

Diante deste perfil de incorporação de umidade (côncavo para baixo), foi possível classificar as curvas cinéticas de hidratação em três fases. Na primeira fase, estabelecida entre 0 e 3 horas de hidratação, observa-se uma rápida taxa de absorção de água. O ganho médio de umidade nessa fase para as hidratações realizadas de maneira convencional foi de 97,23%, enquanto para as hidratações ultrassônicas foi observado média de 134,16%. Nessa primeira fase, o gradiente de concentração entre o grão e o meio de hidratação provocam uma intensa transferência de massa, favorecida pelas fissuras e poros presentes no arroz (BALBINOTI; JORGE; JORGE, 2018). Segundo Tagawa *et al.* (2003), Kashaninejad *et al.* (2009), Cavariani *et al.* (2009) e Botelho *et al.* (2010), a presença de poros e fissuras permitem maior ação capilar na superfície do pericarpo e facilitam a difusão da água para as regiões mais internas do grão.

A segunda fase (entre três e oito horas de processo) é denominada fase de transição, caracterizada por uma taxa de absorção moderada - média de 17,57% e 14,75% de ganho de umidade para as hidratações convencionais e ultrassônicas, respectivamente. Percebe-se que nesta fase o ganho de umidade foi significativamente reduzido quando comparado à primeira. Essa redução é efeito da transição entre o ganho de umidade expressivo e a condição de saturação. Nesta transição, a transferência de massa é menos intensa, visto que o potencial motriz para o transporte da água é menor (BORGES, *et al.* 2017).

Na sequência, tem-se a terceira e última fase do processo de hidratação (entre 8 e 10 horas). Nesta fase, a transferência de massa é quase insignificante; ganho médio de umidade de 2,21% e 1,93% para as hidratações convencional e ultrassônica, respectivamente. Esse comportamento pode ser conferido ao preenchimento dos espaços vazios existentes no grão pela água, bem como pela redução de ligações químicas com os constituintes nutricionais do arroz (NICOLIN, *et al.* 2016; BORGES, *et al.* 2017).

Abu-Ghannam e Mckenna (1997), Sayar *et al.* (2001), Kornarzyński *et al.* (2002), Thakur e Gupta (2006), kashaninejad *et al.* (2007), Omoto *et al.* (2009), Montanuci *et al.* (2013), Nicolin *et al.* (2014), Marques *et al.* (2014), Borges *et al.* (2017), Oladele *et al.* (2019), Kumar *et al.* (2021) e Balbinoti *et al.* (2022) estabeleceram igualmente as três fases em seus experimentos de hidratação. De acordo com os pesquisadores, delimitar as fases possibilita compreender o comportamento cinético do ganho de umidade, assim como avaliar o impacto do tempo e da temperatura na capacidade de hidratação (alta absorção, moderada hidratação e condição de equilíbrio).

Em relação à temperatura foi observado para ambos os processos de hidratação que o aumento da temperatura provocou aumento no ganho de umidade, bem como reduziu o tempo de processo. Tal constatação foi igualmente relatada por Khazaei e Mohammadi (2009), Kashaninejad *et al.* (2009), Sharanagat *et al.* (2018), Borsato *et al.* (2019), Kumar *et al.* (2021) e Balbinoti *et al.* (2022). De acordo com os pesquisadores, a temperatura afeta diretamente o fenômeno da difusão ao expandir e amolecer as microestruturas dos grãos, facilitando a migração e ligações químicas com a água. Além disso, o aumento da temperatura eleva a vibração das moléculas da água, o que favorece a mobilidade da mesma na estrutura do grão.

Ao analisar as curvas cinéticas dos ensaios na condição convencional (Figura 4-A) observa-se que as temperaturas de 35 e 45 °C não possibilitaram ao grão alcançar umidade ideal de processo (~30%) em 10 horas. Tal característica torna essas condições operacionais inviáveis industrialmente, uma vez que 10 horas de processo são insuficientes para o ganho de umidade desejável. Hidratações demoradas (acima de 10 horas) em temperaturas amenas, por exemplo 35 e 45 °C, podem favorecer a contaminação microbiana, bem como desencadear a fermentação e alterações sensoriais do produto (DUTTA; MAHANTA, 2014). Todavia, ao realizar hidratações ultrassônicas nestas temperaturas a umidade ideal de processo foi alcançada (Figura 4 – B); ou seja, industrialmente seriam condições possíveis de serem utilizadas: 35 °C por aproximadamente 10 horas e 45 °C por 4,5 horas. Estes resultados corroboram para considerar o uso do ultrassom como uma técnica de intensificação da etapa de hidratação do processo de parboilização ao possibilitar que temperaturas amenas sejam utilizadas para alcançar a umidade desejada em tempos reduzidos.

Nas hidratações a 55 °C foi observado que ambos os processos (convencional e ultrassônico) permitiram ao grão atingir umidade desejável a partir de 6 e 2,5 h, respectivamente. A hidratação ultrassônica nesta condição proporcionou redução de 58,33% no tempo de processo. De acordo com Li *et al.* (2019), o tratamento ultrassônico promove aumento da taxa de hidratação pois dilata as regiões porosas, o que contribui para uma maior migração de água e, conseqüentemente, maior absorção de umidade pelo grão.

A partir destes resultados, recomenda-se que as temperaturas de 35 e 45 °C não sejam utilizadas em processos de hidratação convencional, mas consideradas em hidratações ultrassônicas. Por sua vez, 55 °C pode ser utilizada para ambas as hidratações, porém com redução de aproximadamente 3,5 h de processo se realizada de forma ultrassônica. Outro aspecto a ser considerado é que hidratações realizadas a 35, 45 e 55 °C, embora possibilitem alcançar umidade de processo, não são capazes de desencadear o fenômeno endotérmico da gelatinização. Assim, se tais condições forem empregadas industrialmente, será necessária uma etapa posterior a hidratação para que a gelatinização ocorra. De acordo com Balbinoti *et al.* (2018a), a gelatinização no processo de parboilização do arroz requer a combinação do binômio umidade e temperatura; isto é, o arroz deve atingir umidade ideal (~30%) e estar em temperatura de gelatinização (T<sub>g</sub>).

De acordo com os resultados obtidos através da metodologia de DSC, o arroz nativo do Pantanal explorado neste estudo apresentou T<sub>g</sub> a 64,96 °C. Desta forma, hidratações a 65 e 75 °C foram analisadas com maior acurácia, observando o ganho de umidade ao longo do tempo, rompimento das cascas e alterações morfológicas na superfície do grão.

Segundo Kornarzyński *et al.* (2002), Silva *et al.* (2006) e Han e Lim (2009), no processo de obtenção do arroz parboilizado a temperatura ideal de hidratação é aquela na qual os grãos alcançam umidade necessária para ocorrência da gelatinização, sem o rompimento das cascas. Nos ensaios convencionais, houve evidência de rompimentos das cascas apenas na condição experimental a 75 °C após 8 horas de processo. Por sua vez, ao empregar o ultrassom, houve rompimento a 65 °C após 6 horas e a 75 °C a partir de 4 h. Segundo Maskan (2002), Resio *et al.* (2006), Yadav e Jindal (2007) e Botelho *et al.* (2010), o rompimento das cascas evidencia condição de cozedura do grão, característica indesejável ao processo de



parboilização. Ademais, ao romper as cascas, há diminuição da qualidade nutricional do arroz devido a perda de sólidos solúveis, como proteína, minerais e vitaminas para a água de imersão (MIAH *et al.* (2002).

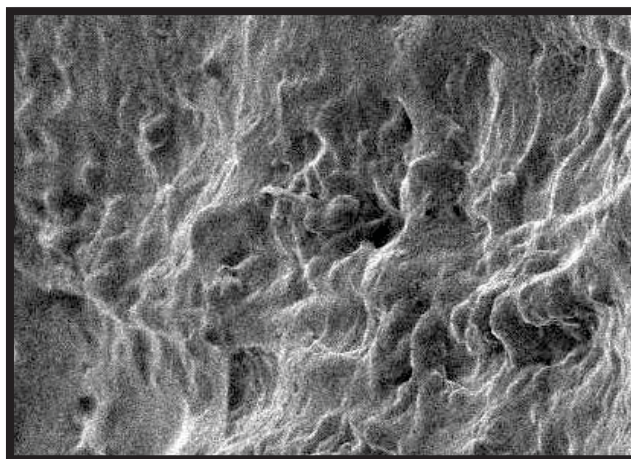
Embora condições operacionais a 65 e 75 °C propiciem rompimento das cascas, esse rompimento acontece após o grão alcançar a umidade desejável de processo. Na hidratação convencional, o tempo necessário para alcançar 30% de umidade foi de 4 e 2,5 horas para as temperaturas de 65 e 75 °C, respectivamente. Por sua vez, na ultrassônica o tempo foi de 1 hora para tais condições. Desta forma, temperaturas a 65 e 75 °C podem ser utilizadas industrialmente, desde que os processos sejam encerrados quando a umidade desejada for alcançada. Além disso, ao considerar o uso da hidratação ultrassônica para tais condições operacionais menor tempo de processo foi requerido - redução de 3 e 1,5 h ao utilizar 65 e 75 °C, respectivamente.

## 5.2 MONITORAMENTO DA MORFOLOGIA DO GRÃO

A estrutura externa do arroz nativo do Pantanal, na condição *in natura*, apresentou morfologia irregular (Figura 5). De acordo com Oli *et al.* (2014), essa conformação estrutural favorece o aparecimento de rachaduras, fissuras e ruptura dos grãos durante o transporte e beneficiamento. Com a finalidade de eliminar/reduzir tais desvantagens operacionais e proporcionar maior rendimento industrial, o processo de parboilização é empregado (PUROHIT; RAO, 2017). Genkawa *et al.* (2011) observaram que o tratamento hidrotérmico da parboilização provocou redução considerável das fissuras em comparação ao arroz integral. Amato e Filho (1991), Bhattacharya (1995) e Igathinathane *et al.* (2005) complementaram que, além da eliminação de fissuras, o processo de parboilização promoveu maior retenção de nutrientes e ofereceu maior resistência ao ataque de insetos e microrganismos. Essas vantagens do arroz parboilizado frente aos demais tipos de arroz (integral e polido) são alcançadas devido a parboilização alterar a estrutura física do grão; isto significa, passar de uma superfície irregular, com fissuras e poros, para uma superfície lisa e compacta (BALBINOTI *et al.*, 2018a). Ao adquirir essa nova conformação estrutural,

o grão parboilizado ganha maior proteção nutricional, biológica e física (PAIVA *et al.*, 2016).

FIGURA 5 - MICROGRAFIA DA ESTRUTURA EXTERNA DO ARROZ NATIVO DO PANTANAL NA CONDIÇÃO *IN NATURA*.



Legenda: Ampliação de 1 Kx.

FONTE: o autor (2022).

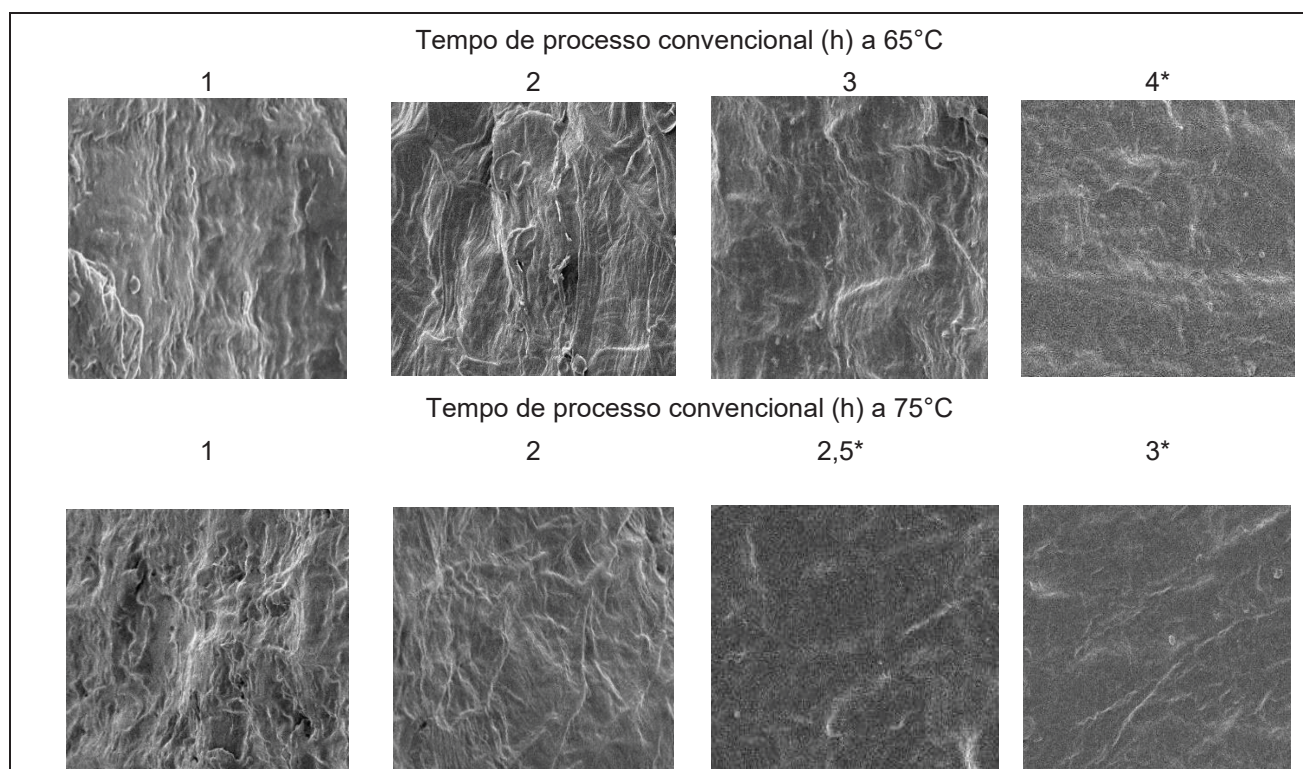
Conforme discutido anteriormente (tópico 5.1), os ensaios realizados a 65 e 75 °C estão acima da T<sub>g</sub>. Em razão disso, tais condições podem paralelamente a hidratação parboilizar o arroz. Com intuito de confirmar essa hipótese, imagens por MEV foram feitas ao longo do tempo de processo na condição convencional (Figura 6) e ultrassônica (Figura 7).

Ao correlacionar a micrografia do grão *in natura* (Figura 5) com as obtidas ao longo dos processos para as temperaturas de 65 e 75°C (Figuras 6 e 7) foi observado que a estrutura morfológica externa do arroz, nos tempos de umidade ideal de processo (30%), se diferenciaram. Embora na literatura determinados estudos relatam que o ultrassom afeta a porosidade, podendo causar o aparecimento de maiores rachaduras do grão, de acordo com Bonto *et al.* (2021), este estudo observou que a tecnologia não afetou na porosidade, exatamente pelo processo ser conduzido na condição de gelatinização, o que caracterizou o grão parboilizado.

Foi constatado que o arroz ao ser submetido às hidratações (convencional e ultrassônica) a 65 e 75°C apresentou alterações irreversíveis da estrutura; a qual

transformou-se de irregular para lisa e compacta, conferindo caráter homogêneo. Essas alterações comprovam a parboilização do arroz nas seguintes condições: convencional e ultrassônica a 65°C por 4 e 1; e convencional e ultrassônica a 75°C por 2,5 e 1h, respectivamente. Zhou *et al.* (2007), Ghasemi *et al.* (2009) e Witek *et al.* (2010) relataram as mesmas observações ao estudarem arroz parboilizado; tal que, com umidade em concentração ideal e aplicação de calor na Tg, tem-se a alteração da microestrutura do grão causada pela parboilização. Wu *et al.* (2010) e Pineda-Gómez *et al.* (2012) também obtiveram respostas similares, nas quais o grão parboilizado expõe estrutura superficial preenchida em comparação com a condição inicial.

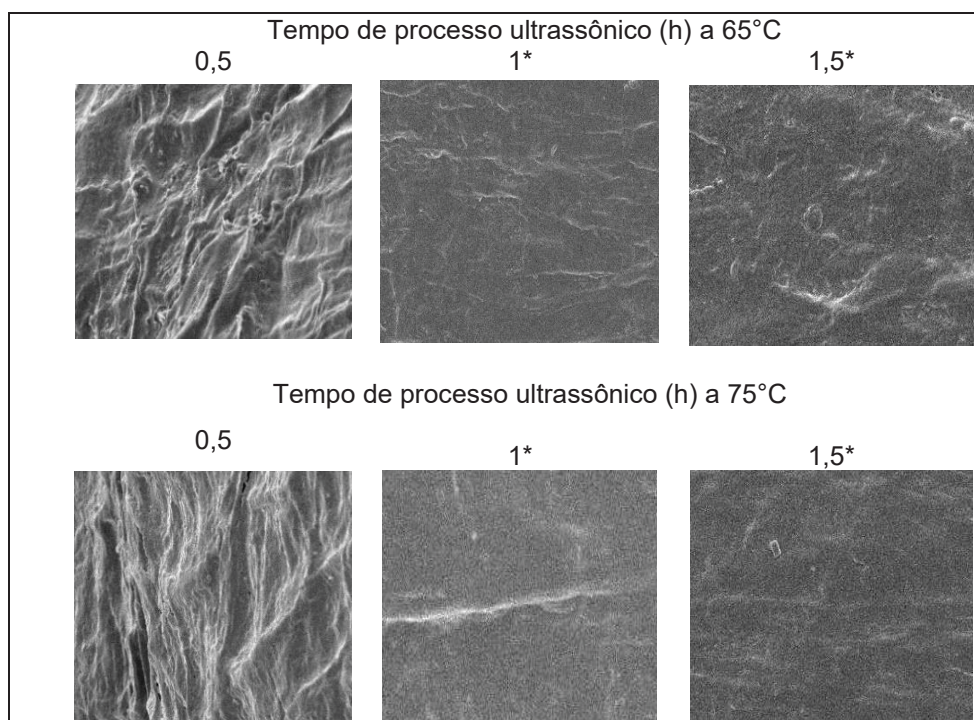
FIGURA 6 - MICROGRAFIAS DA ESTRUTURA MORFOLÓGICA DO ARROZ NATIVO DO PANTANAL AO LONGO DA HIDRATAÇÃO CONVENCIONAL (65 E 75 °C) - AMPLIAÇÃO DE 1KX.



Legenda: \* tempo no qual foi alcançada umidade desejável de processo, 30%.

FONTE: o autor (2022).

FIGURA 7 - MICROGRAFIAS DA ESTRUTURA MORFOLÓGICA DO ARROZ NATIVO DO PANTANAL AO LONGO DA HIDRATAÇÃO ULTRASSÔNICA (65 E 75 °C) - AMPLIAÇÃO DE 1KX.



Legenda: \* tempo no qual foi alcançada umidade desejável de processo.

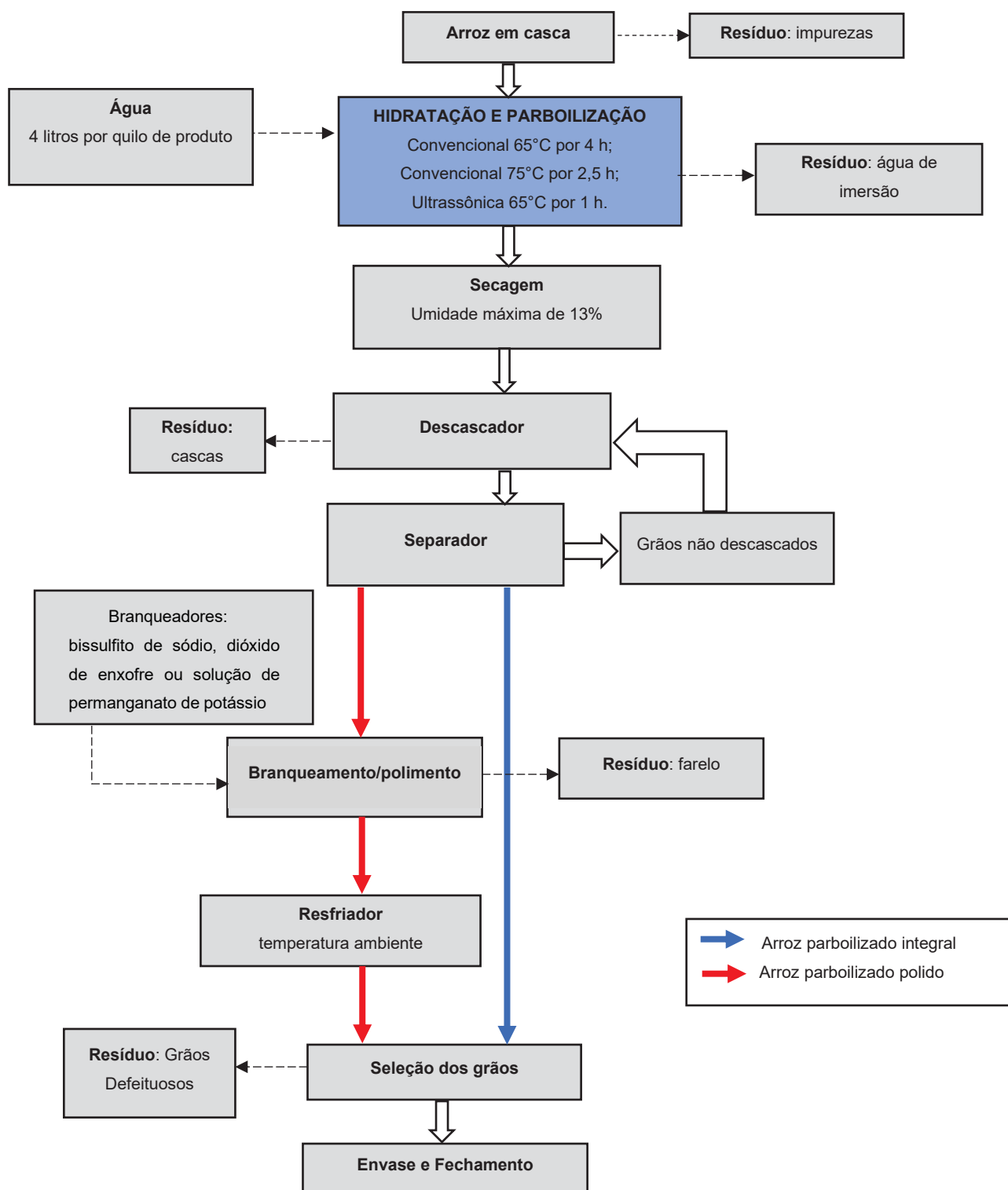
FONTE: o autor (2022).

Mediante esses resultados, conclui-se que a etapa de hidratação do processo de parboilização do arroz nativo do Pantanal pode ser empregada com finalidade dupla (hidratar e parboilizar na mesma operação unitária – Figura 8) nas condições de 65 e 75°C ao utilizar a hidratação convencional. Tendo em vista que as hidratações ultrassônicas a 65 e 75°C não apresentaram diferenciação no tempo de processo necessário para alterar a morfologia do grão - ambas aconteceram em 1 h (Figura 7) – sugere-se operar somente com a condição de 65°C na ultrassônica.

Ao utilizar tais condições, haverá redução na quantidade de operações unitárias do fluxograma original do processo de parboilização (Figura 2, página 14). A eliminação de uma operação unitária promove a intensificação do processo (BALBINOTI *et al.*, 2022). Neste caso, a intensificação com a utilização do ultrassom reduz custos operacionais e energéticos, bem como tempo de processamento, com aumento da capacidade produtiva.



FIGURA 8 - FLUXOGRAMA DO PROCESSO DE PARBOILIZAÇÃO PROPOSTO AO ARROZ NATIVO DO PANTANAL.



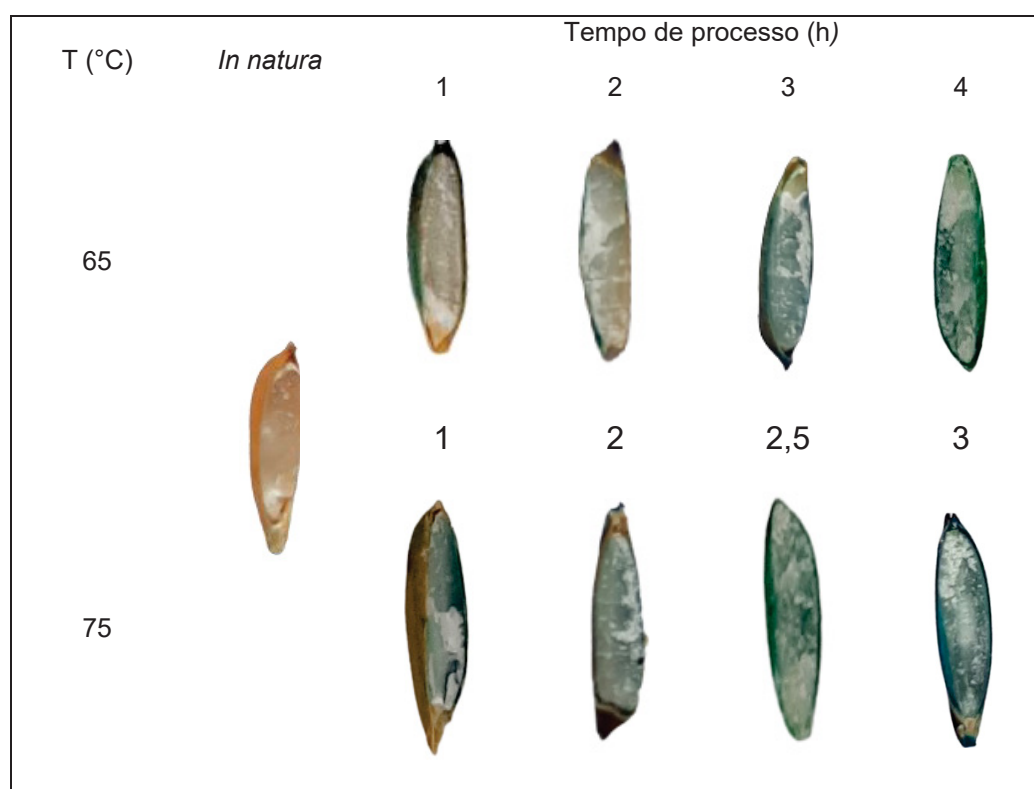
FONTE: o autor (2022).

### 5.3 MECANISMO DE HIDRATAÇÃO POR AGENTE TRAÇADOR

Com a finalidade de identificar o perfil de migração da água no arroz nativo do Pantanal submetido aos processos de hidratação, uma molécula traçadora (corante azul de metileno) foi inserida nos processos convencional (Figura 9) e ultrassônico (Figura 10).

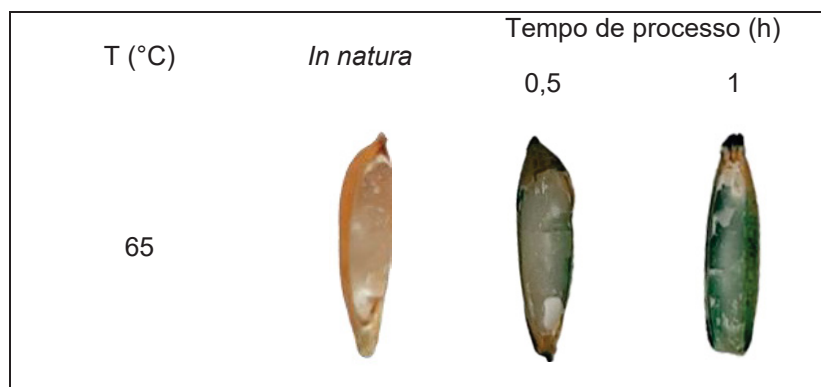
De acordo com Billiris *et al.* (2012), os tecidos embrionários se hidratam de forma rápida em relação ao endosperma, uma vez que a proteína apresenta maior avidez por água do que o amido. Miano *et al.*, (2016) e Balbinoti *et al.*, (2022) utilizaram o corante azul brilhante e amarelo crepúsculo para monitorar a difusão de água em feijão e arroz, respectivamente. Os pesquisadores observaram que a água do meio de hidratação difundiu-se, principalmente, através do hilo.

FIGURA 9 - MONITORAMENTO DO MECANISMO DE HIDRATAÇÃO CONVENCIONAL DO ARROZ NAS TEMPERATURAS DE 65 E 75°C MEDIANTE AGENTE TRAÇADOR.



FONTE: o autor (2022).

FIGURA 10 - MONITORAMENTO DO MECANISMO DE HIDRATAÇÃO ULTRASSÔNICA DO ARROZ NA TEMPERATURA DE 65°C MEDIANTE AGENTE TRAÇADOR.



FONTE: o autor (2022).

Neste estudo, por sua vez, não foi possível observar tal comportamento para os processos de hidratação testados (Figura 9 e 10). Por meio das imagens obtidas, nota-se uma distribuição homogênea da água por toda a estrutura do grão. Após a água vencer a barreira da casca, a mesma difundiu-se para as regiões mais internas do grão através de toda sua superfície, não sendo detectada uma região específica que favoreceu sua migração. Esse comportamento contribui para definição de hipóteses utilizadas na solução de modelos matemáticos, bem como na escolha dos modelos, por exemplo, optar por modelos de parâmetros concentrados. De acordo com Coutinho *et al.* (2007), parâmetros concentrados não contemplam variações espaciais das propriedades físicas no sistema, sendo utilizado para simular o comportamento dos grãos durante a hidratação.

As imagens também possibilitaram visualizar que o grão hidratado no sistema ultrassônico apresentou maior intensidade de cor quando comparado as imagens obtidas para o processo convencional. Essa percepção pode ser explicada devido o sinal ultrassônico favorecer as interações (ligação) da água com as moléculas localizadas nas regiões mais internas do grão. De acordo com Miano *et al.* (2016), Villamiel *et al.* (2017) e Vasquez *et al.* (2021) o ultrassom tem capacidade de superar as resistências à transferência de massa por difusão, conseqüentemente, favorece a mobilidade da água e torna o processo de hidratação mais rápido.

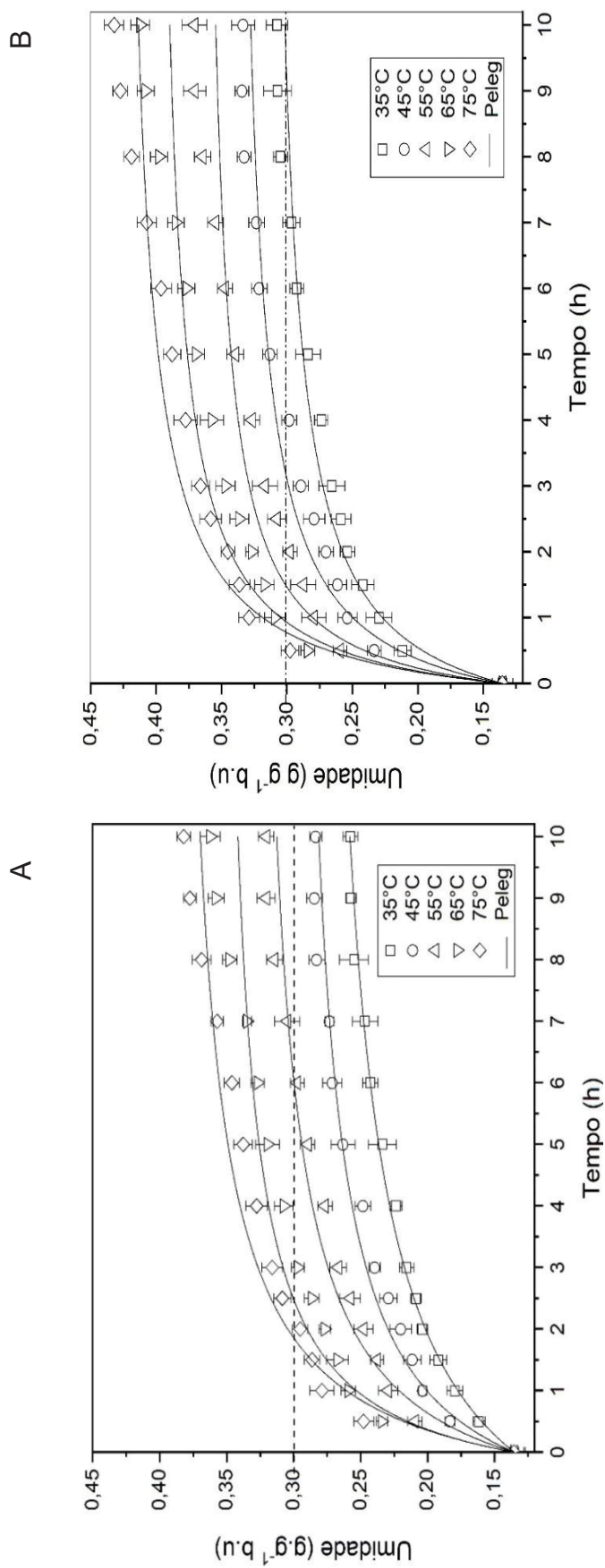
#### 5.4 ANÁLISE DO AJUSTE DOS MODELOS MATEMÁTICOS

O modelo de Peleg foi ajustado aos dados experimentais do processo convencional e ultrassônico (Figura 11). Para ambos os processos, Peleg foi capaz de representar satisfatoriamente as três fases do mecanismo de hidratação, com valores médios de  $R^2$ , P e RMSE de 0,97, 2,89% e 0,033, respectivamente (Tabela 2). Embora não exista um valor exato a partir do qual o coeficiente  $R^2$  indique uma representação satisfatória dos dados experimentais, anedotalmente considera-se que um  $R^2$  maior do que 0,90 indica uma boa correlação, principalmente quando combinado com outras métricas estatísticas, como P e RMSE. De acordo com Mohapatra e Rao (2005), um modelo matemático é aceitável quando os valores de P são menores que 10% e os valores de RMSE são inferiores a 5%. Shafaei, Masoumi e Roshan (2014), ao ajustarem Peleg aos dados da hidratação de feijão e grão-de-bico, obtiveram  $R^2$  superior a 0,96 e P entre 0,95 e 4,45%. Resende e Corrêa (2007) encontraram valores de P entre 0,38% e 0,93% ao modelar a hidratação de grãos de feijão com a equação de Peleg. Botelho *et al.* (2010) para arroz e Maskan (2002) com trigo, obtiveram  $R^2$  entre 0,97 e 0,99. No estudo de Pramiu *et al.* (2015), com grão-de-bico, o modelo de Peleg apresentou  $R^2$  entre 0,96 e 0,99 e RMSE inferior a 0,0342.

Os resultados deste e outros estudos indicam que o modelo de Peleg pode ser empregado com confiança no ajuste dos dados experimentais do processo de hidratação do arroz, tanto convencional quanto ultrassônico. O bom ajuste aos dados possibilita que um modelo empírico, de fácil resolução e aplicação, seja usado de forma confiável para descrever o comportamento da hidratação. Assim sendo, este modelo pode ser empregado como uma ferramenta de controle de qualidade nas indústrias de arroz parboilizado, contribuindo para o controle do ganho de umidade.



FIGURA 11 - MODELO DE PELEG AJUSTADO AOS DADOS EXPERIMENTAIS DA CINÉTICA DE HIDRATAÇÃO DO PROCESSO CONVENCIONAL (A) E ULTRASSÔNICO (B) DO ARROZ NATIVO DO PANTANAL NAS TEMPERATURAS DE 35, 45, 55, 65 E 75 °C POR 10 HORAS.



FONTE: O autor (2022).

**TABELA 2 - PARÂMETROS ESTATÍSTICOS DE QUALIDADE DO AJUSTE DO MODELO EMPÍRICO (PELEG)**

<b>MODELO DE PELEG</b>				
<b>Processo</b>	<b>Temperatura (°C)</b>	<b>R<sup>2</sup> (%)</b>	<b>P (%)</b>	<b>RMSE(%)</b>
Convencional	35	0,9956	0,8721	0,0102
	45	0,9828	2,2204	0,0252
	55	0,9638	2,8909	0,0328
	65	0,9445	3,6562	0,0422
	75	0,9632	3,5284	0,0412
Ultrassônica	35	0,9753	2,1625	0,0256
	45	0,9567	2,8841	0,0332
	55	0,9507	3,4567	0,0403
	65	0,9415	3,6702	0,0430
	75	0,9553	3,5913	0,0407

Diante da qualidade do modelo de Peleg, os parâmetros de ajuste  $k_1$  e  $k_2$  podem ser analisados como descritores do processo ao variar a temperatura do meio de hidratação (Tabela 3).

**TABELA 3 – VALORES DOS PARÂMETROS “ $k_1$ ” E “ $k_2$ ” DO MODELO DE PELEG**

<b>Processo</b>	<b>Temperatura (°C)</b>	<b><math>k_1 \times 10^3</math> (h.%<sup>-1</sup>)</b>	<b><math>k_2 \times 10^2</math> (%<sup>-1</sup>)</b>
Convencional	35	17,360 ± 0,586	6,420 ± 0,124
	45	9,411 ± 0,684	5,913 ± 0,167
	55	6,659 ± 0,744	4,975 ± 0,191
	65	4,042 ± 0,549	4,444 ± 0,164
	75	4,121 ± 0,512	3,855 ± 0,122
Ultrassônica	35	5,431 ± 0,572	5,474 ± 0,155
	45	3,933 ± 0,509	4,804 ± 0,151
	55	2,585 ± 0,392	4,306 ± 0,137
	65	2,185 ± 0,346	3,716 ± 0,126
	75	2,070 ± 0,308	3,388 ± 0,101

Os parâmetros  $k_1$  e  $k_2$  do Modelo de Peleg relacionam-se à taxa de transferência de massa e à capacidade de absorção de água, respectivamente. Quanto menor  $k_2$ , maior a taxa de absorção de água; ou seja, o aumento da temperatura, independente do processo empregado, tem o potencial de aumentar a

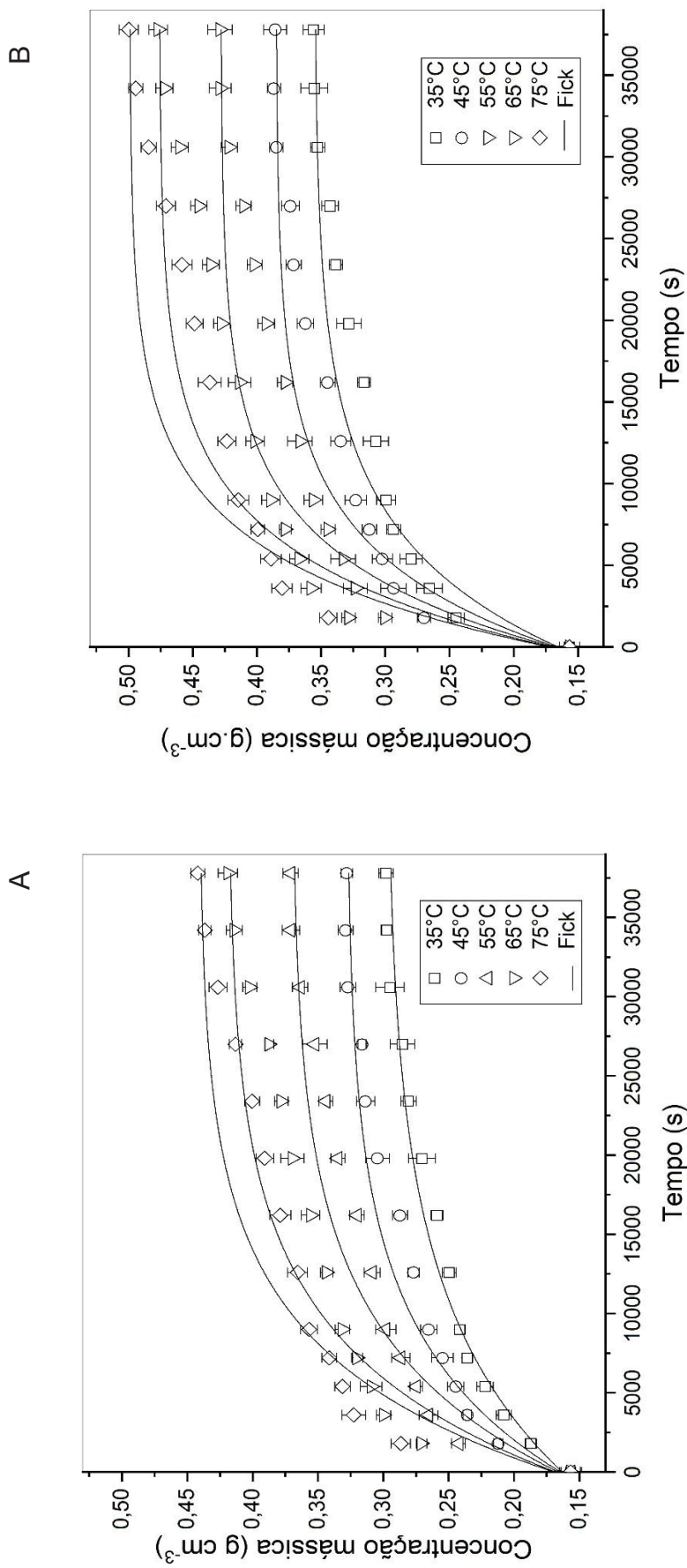
capacidade de hidratação dos grãos. A constante  $k_1$ , por sua vez, por estar relacionada com a transferência de massa, tem relação com o coeficiente de difusão aparente (TURHAN *et al.*, 2002; MASKAN, 2002; CUNNINGHAM *et al.*, 2007; PEREZ *et al.*, 2011). Quanto menor seu valor, mais rápido a água se difunde pela estrutura do grão. Botelho *et al.* (2010) igualmente observaram que o parâmetro  $k_1$  decresceu ao variar a temperatura (35 até 75°C), sugerindo aumento na taxa de absorção de água com o aumento da temperatura; comportamento também observado em outros trabalhos (MASKAN, 2002; BADAU; NKAMA; JIDEANI, 2005; YILDIRIM; ÖNER; BAYRAM, 2010).

Diante da análise dos parâmetros do modelo de Peleg, em específico os de  $k_1$ , observa-se que o comportamento observado corrobora para sugerir o processo ultrassônico como mais eficiente (rápido) para hidratação do arroz nativo do Pantanal.

O modelo de Difusão (Fick) também foi ajustado aos dados experimentais da cinética de hidratação do processo convencional e ultrassônico do arroz nativo do Pantanal (Figura 12). Embora, os valores de  $R^2$  ficaram acima de 72,64% para ambos os processos, o modelo apresentou dificuldade em representar os dados quando comparado ao modelo de Peleg, principalmente em relação aos parâmetros  $P$  e RMSE (Tabela 4). No processo convencional, os menores desempenho foram verificados nas temperaturas de 65 °C e 75 °C, com  $P$  médio de 7,43%. Por sua vez, os dados experimentais da hidratação ultrassônica, para todas as temperaturas, divergiram do ajuste do modelo ( $P$  e RMSE médio de 8,05% e 0,092%, respectivamente).

É possível justificar o desempenho do modelo de Fick com base na fundamentação teórica da sua equação. Este modelo apresenta base fenomenológica, em específico o fenômeno da difusão. Diante da qualidade do ajuste do modelo aos dados experimentais é provável que, além do fenômeno da difusão, capilaridade e o efeito do ultrassom também necessitassem ser considerados. Contudo, tais critérios tornariam a resolução/solução deste modelo complexa, tornando inviável sua aplicação para a indústria de alimentos.

FIGURA 12 - MODELO DE DIFUSÃO AJUSTADO AOS DADOS EXPERIMENTAIS DA CINÉTICA DE HIDRATAÇÃO DO PROCESSO CONVENCIONAL (A) E ULTRASSÔNICO (B) DO ARROZ NATIVO DO PANTANAL NAS TEMPERATURAS DE 35, 45, 55, 65 E 75 °C POR 10 HORAS.



FONTE: O autor (2022).

TABELA 4 - PARÂMETROS ESTATÍSTICOS DE QUALIDADE DO AJUSTE DO MODELO FENOMENOLÓGICO (DIFUSÃO).

Processo	Temperatura (°C)	R <sup>2</sup> (%)	P (%)	RMSE (%)
Convencional	35	0,9463	2,2299	0,0216
	45	0,8764	3,3983	0,0362
	55	0,8974	4,8667	0,0544
	65	0,7421	7,0380	0,0855
	75	0,7264	7,8151	0,0988
Ultrassônica	35	0,9043	7,6399	0,0904
	45	0,8532	8,8941	0,1065
	55	0,8544	7,5264	0,0844
	65	0,8725	8,0915	0,0894
	75	0,7949	8,0811	0,0894

O coeficiente de difusão efetivo ( $D_{ef}$ ), resultado do ajuste do modelo aos dados experimentais, apresentou tendência crescente com o aumento da temperatura de hidratação (Tabela 5). Para o processo convencional, o parâmetro variou de 4,026 a  $4,703 \times 10^{-6} \text{ m}^2/\text{s}$ , enquanto para hidratação ultrassônica foi de 5,081 a  $7,094 \times 10^{-6} \text{ m}^2/\text{s}$ . Esse comportamento foi igualmente averiguado por demais pesquisadores ao hidratarem arroz (BELLO; TOLABA; SUAREZ, 2004), grão de bico (PRASAD; VAIRAGAR; BERA, 2010), quinoa (RAMOS *et al.*, 2016), feijão mungo (SHARANAGAT; KANSAL; KUMAR, 2018), trigo (MATTIODA; JORGE; JORGE, 2018; MATTIODA; JORGE; JORGE, 2019b), soja (BORGES; JORGE; JORGE, 2019) e cevada (CHACÓN ALVAREZ; JORGE; JORGE, 2020). Como discutido anteriormente, o aumento da temperatura tem efeito positivo na capacidade de hidratação, uma vez que aumenta a agitação das moléculas da água e amolece a estrutura física dos grãos, conseqüentemente, favorece a mobilidade da água, com aumento da taxa de hidratação (MIANO; AUGUSTO, 2018).

Foi observado, para todas as temperaturas, que os valores de  $D_{ef}$  obtidos para o processo ultrassônico foram maiores em relação ao processo convencional. Tal constatação, confirma que o fenômeno de difusão da água acontece com maior rapidez quando a hidratação é conduzida de forma ultrassônica.

TABELA 5 – VALORES DOS PARÂMETROS OBTIDOS PARA O MODELO FENOMENOLÓGICO DIFUSÃO

Processo	Temperatura (°C)	$D_{ef} \times 10^{-6} (m^2.s^{-1})$
Convencional	35	4,026
	45	4,129
	55	4,298
	65	3,134
	75	4,703
Ultrassônica	35	5,081
	45	5,830
	55	6,171
	65	6,338
	75	7,094

### 5.5 AVALIAÇÃO DOS COMPOSTOS BIOATIVOS NOS PROCESSOS DE HIDRATAÇÃO

Foi avaliado o teor de compostos fenólicos totais (CFT), flavonóides totais (FT) e a Atividade Antioxidante (AA), pelos métodos DPPH e ABTS, do arroz nativo do Pantanal *in natura* e hidratado a 65 e 75 °C de forma convencional e ultrassônica. O ponto de coleta das amostras foi na condição de parboilização do arroz; ou seja: convencional e ultrassônica a 65°C por 4h e 1h; e convencional e ultrassônica a 75° C por 2,5h e 1h, respectivamente (Tabela 6).

**TABELA 6** - CONCENTRAÇÃO DE COMPOSTOS FENÓLICOS TOTAIS (CFT), FLAVONÓIDES TOTAIS (FT) E ATIVIDADE ANTIOXIDANTE (AA) DO ARROZ NATIVO DO PANTANAL *IN NATURA* E RESULTANTES DOS PROCESSOS CONVENCIONAL E ULTRASSÔNICO.

Tratamento		CFT (mg Eag/L)	FT (mg/L)	AA (µmol/L) (DPHH)	AA (µmol/L) (ABTS)
65 °C	<i>in natura</i>	50,13 ± 1,66 <sup>a</sup>	34,68 ± 1,04 <sup>a</sup>	229,67 ± 0,81 <sup>a</sup>	1074,67 <sup>a</sup>
	Convencional	42,13 ± 1,36 <sup>c</sup>	24,31 ± 0,68 <sup>c</sup>	178,25 ± 0,63 <sup>d</sup>	729,67 <sup>c</sup>
	Ultrassônico	49,65 ± 2,54 <sup>b</sup>	32,36 ± 0,99 <sup>b</sup>	221,28 ± 0,62 <sup>b</sup>	974,857 <sup>b</sup>
75 °C	Convencional	40,62 ± 0,22 <sup>d</sup>	20,76 ± 0,53 <sup>d</sup>	183,20 ± 1,25 <sup>b,c</sup>	655,17 <sup>d</sup>
	Ultrassônico	49,76 ± 2,31 <sup>b</sup>	32,17 ± 2,10 <sup>b</sup>	217,13 ± 1,39 <sup>c</sup>	942,33 <sup>b</sup>

Legenda: os dados estão expressos em média ± desvio padrão. Letras minúsculas diferentes na mesma coluna diferem estatisticamente ( $p < 0,05$ ) pelo teste de Tukey.

O grão *in natura* do arroz nativo apresentou concentração de 50,13 mg EAG 100g<sup>-1</sup> de Compostos Fenólicos Totais (CFT). No estudo de Min *et al.* (2014) e Balbinoti *et al.* (2019), com arroz IITA119 e arroz SCS117CL, respectivamente, a concentração média de CFT foi de aproximadamente 700 mg EAG 100g<sup>-1</sup> e 108,030 mg EAG 100g<sup>-1</sup>. A diferença das concentrações entre os estudos pode ser justificada pela coloração dos grãos testados que possuem coloração marrom escuro, bem como aspectos de cultivo e armazenamento.

Ao submeter o arroz ao processo convencional, a CFT foi reduzida nas temperaturas de 65 e 75 °C – perda de 15,95% e 18,97% em relação ao arroz *in natura*, respectivamente. Para FT, a redução média foi de 29,90% (65 °C) e 40,13% (75 °C), enquanto para AA foi observado redução média de 27,02% e 36,28%, respectivamente, para 65 e 75 °C. A diminuição dos compostos bioativos, bem como de sua atividade antioxidante, deve-se à lixiviação destes compostos na água de hidratação (MECHA *et al.*, 2019). Além disso, segundo Mir *et al.* (2016), o processamento térmico, na presença de oxigênio e umidade, acelera a degradação dos compostos fenólicos. No estudo de Balbinoti *et al.* (2019), houve redução de 21,32% da CFT após a hidratação convencional.

Ao hidratar o arroz por hidratação ultrassônica, a perda de CFT foi insignificante, independente da temperatura (menos de 1% em relação ao grão *in natura*). A mesma tendência foi observada para os FT e a AA, com redução média de 6,95% e 4,55%, respectivamente. Portanto, a hidratação ultrassônica garante a preservação dos CFT, FT e AA do arroz, o que justifica o uso desta tecnologia para a maior qualidade nutricional do produto quando comparada ao processo convencional. De acordo com Barghava *et al.*, (2021); Nie *et al.*, (2021); Yadav *et al.*, (2021), a hidratação ultrassônica está associada a menor tempo de processo, menor consumo de energia e maior retenção de nutrientes, como os compostos bioativos. Os pesquisadores Singla e Sit. (2021) e Sengar *et al.* (2022) igualmente afirmaram que o uso do ultrassom, além de aumentar a sustentabilidade do processo de hidratação de grãos, retém melhor os nutrientes.



## 6 CONCLUSÕES

A hidratação ultrassônica aumentou a taxa de transferência de massa, reduziu o tempo de processamento e, conseqüentemente, preservou melhor os compostos bioativos do arroz nativo do Pantanal em comparação com a hidratação convencional. Quando hidratado pela hidratação convencional, o arroz sofreu redução significativa no teor de compostos fenólicos, flavonoides e capacidade antioxidante. Por sua vez, com a hidratação ultrassônica preservou grande parte dos compostos fenólicos totais (>99%), flavonoides (>93%) e atividade antioxidante (88-96%).

Por meio do estudo cinético das hidratações (HC e HU), foi possível definir o mecanismo do ganho de umidade em três fases distintas: Fase I – taxa rápida de absorção de água; Fase II – taxa de hidratação moderada; e Fase III – condição de equilíbrio.

O traçador permitiu definir o perfil da difusão da água ao longo da estrutura do grão submetido aos processos de hidratação. Após a água vencer a barreira da casca, migrou para as regiões mais internas do grão através de toda a sua superfície, visto que não foi identificado um comportamento migratório preferencial. Este regime de hidratação justifica o uso de modelos de parâmetros concentrados para o ajuste dos dados experimentais.

O modelo empírico de Peleg e o modelo fenomenológico baseado no fenômeno da difusão apresentaram bons ajustes aos dados experimentais. O modelo de Peleg foi o mais satisfatório, sendo este indicado para descrever ambos os processos convencional e ultrassônico. A modelagem pode ser utilizada para fins de predição e otimização de processos de hidratação e parboilização de arroz.

Esses resultados contribuem para uma nova forma de beneficiamento do arroz no Pantanal, o que poderá gerar maior renda e melhoria da qualidade de vida para as comunidades nativas em estado de vulnerabilidade financeira.

## REFERÊNCIAS

- ABBAS, A.; MURTAZA, S.; ASLAM, F.; KHAWAR, A. Effect of Processing on Nutritional Value of Rice ( *Oryza sativa* ). **World Journal of Medical Sciences**, v. 6, n. 2, p. 68–73, 2011.
- ABU-GHANNAM, N.; MCKENNA, B. The application of Peleg's equation to model water absorption during the soaking of red kidney beans (*Phaseolus vulgaris* L. **Journal of Food Engineering**, v. 32, n. 4, p. 391-401, 1997.
- ACEVEDO, B. A; VILLANUEVA, M; CHAVES, M.G; AVANZA, M.V; RONDA, F. Modification of structural and physicochemical properties of cowpea (*Vigna unguiculata*) starch by hydrothermal and ultrasound treatments. **Food Hydrocolloids**.v.124, Part A, 2022.
- AFZAL, S; SINGH, M. S; CHAUDHARY. N; SING, N. K. Chapter 9- Application of nanoparticles in developing resilience against abiotic stress in rice plant (*Oryza sativa* L.). **Plant Perspectives to Global Climate Changes**. Developing Climate-Resilient Plants. p. 151-172, 2022.
- AFOLABI, T. A.; OLU-OWOLABI, B. I.; ADEBOWALE, K.O.; AWAL, O. S.; AKINTAYO, C. O. Functional and tableting properties of etylated and oxidised finger millet (*Eleusine coracana*) starch. **Starch-Stärke**, v.64, n. 4, p.326–337, 2012.
- ALI, N.; PANDYA, A. C. Basic Concept of Parboiling of Paddy. **Journal Agricultural Engineering Research**. v.19, p. 111-115, 1974.
- ALVAREZ, D. C; JORGE, L. M. M., JORGE, J. M. M. The impact of periodic operation on barley hydration. **Journal Food Process Engineering**. v. 43, n. 2. 2020.
- AMATO, G. W.; FILHO, S. S. **Parboilização de arroz no Brasil**. Lavoura Arrozeira. IRGA, Porto Alegre, v.41, n.38, p. 9-11,1991.
- AMINOU, A; SOULLIER, G; MENDES DEL VILLAR, P; DEMONT, M. Policy options for mitigating impacts of COVID-19 on domestic rice value chains and food security in West Africa. **Global Food Security**. v. 26, 2020.
- ASHOKKUMAR, M. FENG, H. Applications of ultrasound in food and bioprocessing. **Ultrasonics Sonochemistry**,v. 25, p. 17-23, 2015.
- BADAU, M. H.; NKAMA, I.; JIDEANI, I. A. Water-absorption characteristics of various pearl millet cultivars and sorghum grown in Northern Nigeria. **Journal of Food Process Engineering**, v. 28, n. 3, p. 282–298, 2005.
- BAKALIS, S.; KYRITSI, A.; KARATHANOS, V. T.; YANNIOTIS, S. Modeling of rice hydration using finite elements. **Journal of Food Engineering**, v. 94, n. 3–4, p. 321–325, 2009.

- BALBINOTI, T. C. V; JORGE, L. M. DE M; JORGE, R. M. M .Modeling the hydration step of the rice (*Oryza sativa*) parboiling process. **Journal of Food Engineering**, v. 216, p. 81-89, 2017.
- BALBINOTI, T.C. V.; JORGE, L. M. DE M.; JORGE, R. M. M. Modeling the hydration step of the rice ( *Oryza sativa* ) parboiling process. **Journal of Food Engineering**, v. 216, p. 81–89, 2018.
- BALBINOTI, T. C. V.; JORGE, L. M. DE M.; JORGE, R. M. M. Mathematical modeling and thermodynamic properties of rice parboiling. **Journal of Food Process Engineering**, v. 1, p. e12691, 2018a.
- BALBINOTI, T.C. V.; JORGE, L. M. DE M.; JORGE, R. M. M. Mathematical modeling of paddy (*Oryza sativa*) hydration in different thermal conditions assisted by Raman spectroscopy. **Journal Cereal Science.**, v. 79, p. 390-398, 2018b.
- BALBINOTI, T.C.V; STAFUSSA, A.P; HAMINIUK, C.W.I; MACIEL, G, M; SASSAKI, G.L; JORGE, L.M.M; JORGE, R.M.M. Addition of grape pomace in the hydration step of parboiling increases the antioxidant properties of rice. **International Journal of Food Science & Technology**, v. 55, n. 6, p. 2370-2380, 2019.
- BALBINOTI, T.C.V; JORGE, L.M.M ; HAMINIUK, C.W.I; JORGE, R.M.M.Multiphysics simulation and characterisation of parboiling of long grain rice during hydration. **Journal of Cereal Science.** v. 103, 2022.
- BAO, J. **Rice milling quality**. Rice, 339–369. 2019 Disponível em : doi:10.1016/b978-0-12-811508-4.00010-1.
- BHARGAVA, N; MOR, R.S; KUMAR, K; SHARANAGAT, V.S. Advances in application of ultrasound in food processing: A review. **Ultrasonics Sonochemistry**.v. 70, 2021.
- BASUTKAR, N. N.; SIEBENMORGEN, T. J.; WANG, Y.-J.; PATINDOL, J. A.Functional Properties of Commingled Rice-Cultivar Lots. **Cereal Chemistry Journal**, v. 92, n. 1, p. 114–119, 2015.
- BHATTACHARYA, K. R. Rice breeding for desirable quality. (2013). **Rice Quality**, 410–430. Disponível em: doi:10.1533/9780857092793.410.
- BHATTACHARYA, S. Kinetics on Colour Changes in Rice due to Parboiling. **Journal of Food Engineering**, v. 29, p. 99-106, 1995.
- BRAND-WILLIAMS, W.; CUVELIER, M. E.; BERSET, C. Use of a free radical method to evaluate antioxidant activity. **LWT - Food Science and Technology**, v. 28, n. 1, p. 25–30, 1995.
- BELLO, M.; TOLABA, M. P.; SUAREZ, C. Factors affecting water uptake of rice grain during soaking. **LWT - Food Science and Technology**, v. 37, n. 8, p. 811816, 2004.
- BILLIRIS, M. A.; SIEBENMORGEN, T. J.; WANG, Y.-J. Rice degree of milling

effects on hydration, texture, sensory and energy characteristics. Part 2. Cooking using fixed, water-to-rice ratios. **Journal of Food Engineering**, v. 113, p. 589–597, 2012.

BORGES, C. W. C.; JORGE, L. M. de M.; JORGE, R. M. M. Kinetic modeling and thermodynamic properties of soybean cultivar (BRS257) during hydration process. **Journal of Food Process Engineering**, v. 40, n. 6, 2017.

BORSATO, V. M.; JORGE, L. M. M.; MATHIAS, A. L.; JORGE, R. M. M. Thermodynamic properties of barley hydration process and its thermostability. **Journal of Food Process Engineering**, v. 42, n. 2, 2019.

BORSATO, V. M.; JORGE, L. M. M.; MATHIAS, A. L.; JORGE, R. M. M. Ultrasound assisted hydration improves the quality of the malt barley. **Journal of Food Process Engineering**, v. 42, Issue6, October 2019.

BONTO, A. P., TIOZON JR, R. N., SREENIVASULU, N., CAMACHO, D. H. Impact of ultrasonic treatment on rice starch and grain functional properties: a review. **Ultrasonics Sonochemistry**, v. 71, 2021.

BOTELHO, F. M., CORRÊA, P. C., GONELI, A. L. D., MARTINS, M. A., BAPTESTINI, F. M. Análise da hidratação do arroz na parboilização. **Ciênc. Tecnol. Aliment.**, Campinas, v. 30, p. 713-718, 2010.

BUGGENHOUT, J.; BRIJS, K.; CELUS, I.; DELCOUR, J. A. The breakage susceptibility of raw and parboiled rice: A review. **Journal of Food Engineering**, v. 117, n. 3, p. 304–315, 2013.

BUGGENHOUT, J.; BRIJS, K.; VAN OEVELEN, J.; DELCOUR, J. A. Milling breakage susceptibility and mechanical properties of parboiled brown rice kernels. **LWT - Food Science and Technology**, v. 59, n. 1, p. 369–375, 2014.

CAO, H; YU, R; CHOI, Y; MA, Z. Z ; ZHANG, H; XIANG, W; LEE, D,Y-W; BERMAN, B. W; MOUDGIL, K. D, FONG, H. H. S; BREEMEN, R. B. V. Discovery of cyclooxygenase inhibitors from medicinal plants used to treat inflammation. **Pharmacological Research**, v. 61, pp. 519 – 524, 2010.

CAVARIANI, C.; TOLEDO, M. Z.; RODELLA, R. A.; NETO, J. de B. F.; NAKAGAWA, J. Velocidade de hidratação em função de características do tegumento de sementes de soja de diferentes cultivares e localidades. **Revista Brasileira de Sementes**, v. 31, n. 1, p. 30-39, 2009.

CHAUDHARI, PR.; TAMRAKAR, N.; SINGH, L.; TANDON, A.; SHARMA, D. Rice nutritional and medicinal properties: a review article. **Journal Pharmacognosy. Phytochemistry.**, v .7, pp. 150-156. 2018.

CHAMPAGNE, E. T. **Rice: Chemistry and technology**. New Orleans: American Association of Cereal Chemists, 2004.

CHANG, C.-C.; YANG, M.-H.; WEN, H.-M. Estimation of Total Flavonoid Content in Propolis by Two Complementary Colorimetric Methods. **Journal of Food and Drug Analysis**, v. 10, n. 3, p. 178–182, 2002.

CHEMAT, F.; ZILL-E-HUMA; KHAN, M. K. Applications of ultrasound in food technology: Processing, preservation and extraction. **Ultrasonics Sonochemistry**, v. 18, n. 4, p. 813–835, 2011.

CHENG, K. C; CHEN, S.- H; SIM, A.- I. Physicochemical properties and in vitro digestibility of rice after parboiling with heat moisture treatment. **Journal of Cereal Science**. v. 85, p. 98-104, 2019.

CHENG, B; JIANG, Y; CAO, C. Balance rice yield and eating quality by changing the traditional nitrogen management for sustainable production in China. **Journal of Cleaner Production**. v. 312, 2021.

CHO, J.G.; SONG, N.Y.; NAM, T.G.; SHRESTHA, S.; PARK, H.J.; LYU, H.N.; KIM, D.O.; LEE, G.; WOO, Y.M.; JEONG, T.S.; BAEK, N.I. Flavonoids from the grains of C1/R-S transgenic rice, the transgenic *Oryza sativa* spp. japonica, and their radical scavenging activities. **Journal of Agricultural and Food Chemistry**, v. 61, n. 43, p. 10354-10359, 2013.

CRANK, J. (1975). **The mathematics of diffusion (2th ed.)**. Oxford: Clarendon Press, p. 69–88.

CONAB - COMPANHIA NACIONAL DE ABASTECIMENTO. **PROGRESSO DE SAFRA**. Acompanhamento das Lavouras - 18 a 24/04/21. Disponível em: <https://www.conab.gov.br/info-agro/safras/progresso-de-safra?start=40>. Acesso: em Dezembro de 2021.

CONAB - COMPANHIA NACIONAL DE ABASTECIMENTO. **Acompanhamento da Safra Brasileira de Grãos**, Brasília, DF, v. 9, safra 2021/22, n. 5 quinto levantamento, Fevereiro de 2022.

CUNNINGHAM, S. E.; MCMINN, W. A. M.; RICHARDSON, P. S. Modelling water absorption of pasta during soaking. **Journal of Food Engineering**, v. 82, p. 600-607, 2007.

DA LUZ, S.R., ALMEIDA VILLANOVA, F., TUCHTENHAGEN ROCKEMBACH, C., DIETRICH FERREIRA, C., JOSÉ DALLAGNOL, L., LUIS FERNANDES MONKS, J., DE OLIVEIRA, M. Reduced of mycotoxin levels in parboiled rice by using ozone and its effects on technological and chemical properties. **Food Chemistry**, v. 372, 2022.

DE CASTRO, M. D. L; CAPOTE, P.F. Ultrasound-assisted crystallization (sonocrystallization). **Ultrasonics Sonochemistry**, v. 14, n. 6, p. 717-724.

DE LA ROSA, L. A.; MORENO-ESCAMILLA, J. O.; RODRIGO-GARCÍA, J.; ALVAREZ-PARRILLA, E. Phenolic Compounds. Postharvest. **Physiology and Biochemistry of Fruits and Vegetables**, 1 .ed. Elsevier, p. 510, 2019.

DEMONT, M.; ZOSSOU, E.; RUTSAERT, P.; NDOUR, M.; MELE, P. V.; VERBEKE, W. Consumer valuation of improved rice parboiling technologies in Benin. **Food Quality and Preference**, p. 63–70, 2012.

DENARDIN, C. C.; SILVA, L. P. DA; STORCK, C. R.; NÖRNBERG, J. L. Composição mineral de cultivares de arroz integral, parboilizado e branco. **Alim. Nutr**, v. 15, n. 2, p. 125–130, 2004.

DOLAS, R., SARAVANAN, C., & KAUR, B. P. (2019). Emergence and era of ultrasonic's in fruit juice preservation: A review. **Ultrasonics Sonochemistry**, v.58, 2019.

DUTTA, H.; MAHANTA, C. L.; SINGH, V. Changes in the properties of rice varieties with different amylose content on dry heat parboiling. **Journal of Cereal Science**, v. 65, p. 227–235, 2015.

EMPRESA BRASILEIRA DE PESQUISA AGROPECUÁRIA - EMBRAPA. **Consumo Per capita de Arroz (*Oryza sativa* L.) e de Feijão-comum (*Phaseolus vulgaris* L.), no Brasil, de 1985 a 2019.**: Disponível em <https://www.cnpaf.embrapa.br/socioeconomia/docs/arroz/consumopercapitaarrozefeijao.htm>> Acesso em:30 de Agosto de 2021.

FRACASSO, A. F; PERUSSELO, C. A.; HAMINIUK, C. W. I; JORGE, L.M.M; JORGE, R. M.M. Hydration kinetics of soybeans: Transgenic and conventional cultivars. **Journal of Cereal Science**, v. 60, n. 3, p. 584-588, 2014.

FOOD AND AGRICULTURE ORGANIZATION OF THE UNITED NATIONS.**FAOSTAT**. Disponível em: <http://www.fao.org/faostat>> Acesso em: 20 de Outubro de 2021.

FOOD AND AGRICULTURE ORGANIZATION OF THE UNITED NATIONS.**FAOSTAT**. Disponível em: <http://www.fao.org/faostat>> Acesso em: 28 de Outubro de 2021.

FOOD AND AGRICULTURE ORGANIZATION OF THE UNITED NATIONS.**FAOSTAT**. Disponível em: <http://www.fao.org/faostat>> Acesso em: 28 de Dezembro de 2021.

FOOD AND AGRICULTURE ORGANIZATION OF THE UNITED NATIONS.**FAOSTAT**. Disponível em: <<http://www.fao.org/faostat>>. Acesso em: 20 de Fevereiro de 2022.

FUKAGAWA, N.K; ZISKA, L.H. Rice: importance for global nutrition. **Journal of Nutrition Science and Vitaminology** (2019). Disponível em: doi 10.3177/jnsv.65S2.

GHAFOOR, M.; MISRA, N. N.; MAHADEVAN, K.; TIWARI, B. K. Ultrasound assisted hydration of navy beans (*Phaseolus vulgaris*). **Ultrasonics sonochemistry**, v. 21, n. 1, p. 409-414, 2014.



GRAHAM-ACQUAAH, S.; MANFUL, J. T.; NDINDENG, S. A.; TCHATCHA, D. A. Effects of Soaking and Steaming Regimes on the Quality of Artisanal Parboiled Rice. **Journal of Food Processing and Preservation**, v. 39, n. 6, p. 2286–2296, 2015.

GHASEMI, E.; MOSAVIAN, M. T. H.; KHODAPARAST, M. H. H. Effect of Stewing in Cooking Step on Textural and Morphological Properties of Cooked Rice. **Rice Science**, v. 16, n. 3, p. 243–246, 2009.

GRAZINA, L.; COSTA, J.; AMARAL, J. S.; GARINO, G.; ARLORIO, M. Authentication of carnaroli rice by HRM analysis targeting nucleotide polymorphisms in the Alk and Waxy genes. **Food Control**. v.135, May 2022.

GENKAWA, T.; TANAKA, F.; HAMANAKA, D.; UCHINO, T. Incidence of open crack formation in short-grain polished rice during soaking in water at different temperatures. **Journal of Food Engineering**, v. 103, p. 457–463, 2011.

GIUSTI, M. M.; WROLSTAD, R. E. Characterization and Measurement of Anthocyanins by UV-Visible Spectroscopy. **Current Protocols in Food Analytical Chemistry**, 2001.

GUIGA, W., BOIVIN, P., OUARNIER, N., FOURNIER, F., & FICK, M. (2008). Quantification of the inhibitory effect of steep effluents on barley germination. **Process Biochemistry**, v.43, p. 311– 319.

GOWEN, A.; ABU-GHANNAM, N.; FRIAS, J.; OLIVEIRA, J. Influence of preblanching on the water absorption kinetics of soybeans. **Journal of Food Engineering**, v. 78, n. 3, p. 965–971, 2007.

HAMINIUK, C. W. I.; MACIEL, G. M.; PLATA-OVIEDO, M.S.V; PERALTA, R. M. Phenolics compounds in fruits. **International Journal of Food Science & Technology**, v. 47, n. 10, p. 2023-2044, 2012. doi.org/10.1111/j.1365-2621.2012.03067.x.

HAN, J. A.; LIM, S. T. Effect of Presoaking on Textural, Thermal, and Digestive Properties of Cooked Brown Rice. **Cereal Chemistry**, v. 86, n. 1, p. 100–105, 2009.

HAN, A.; JINN, J.; MAUROMOUSTAKOS, A.; WANG, Y. Effect of Parboiling on Milling, Physicochemical, and Textural Properties of Medium- and Long Grain Germinated Brown Rice. **Cereal Chemistry**, v. 93, p. 47–52, 2016.

HAPSARI, A. H.; KIM, S.-J.; EUN, J.-B. Physical characteristics of parboiled Korean glutinous rice (*Olbyeossal*) using a modified method. **LWT - Food Science and Technology**, v. 68, p. 499–505, 2016.

HEINEMANN, R. J. B.; FAGUNDES, P. L.; PINTO, E. A.; PENTEADO, M. V. C.; LANFER-MARQUEZ, U. M. Comparative study of nutrient composition of commercial brown, parboiled and milled rice from Brazil. **Journal of Food Composition and Analysis**, v. 18, n. 4, p. 287–296, 2005.

- HERNÁNDEZ-HERNÁNDEZ, H. M., MORENO-VILET, L., & VILLANUEVA-RODRÍGUEZ, S. J. Current status of emerging food processing technologies in Latin America: Novel non-thermal processing. **Innovative Food Science & Emerging Technologies**, v. 58, 102233, 2018. doi.org/10.1016/j.ifset.2019.102233.
- HU, Z.; TANG, X.; LIU, J.; ZHU, Z.; SHAO, Y. Effect of parboiling on phytochemical content, antioxidant activity and physicochemical properties of germinated red rice. **Food Chemistry**, v. 214, p. 285–292, 2017.
- HUDSON, E.A.; DINH, P.A.; KOKUBUN, T.; SIMMONDS, M.S.J.; GESCHER, A. Characterization of potentially chemopreventive phenols in extracts of brown rice that inhibit the growth of human breast and colon cancer cells. **Cancer Epidemiology, Biomarkers & Prevention**, v. 9, p.1163-1170, 2000.
- KALITA, D; JAIN, S; SRIVASTAVA, B; GOUD, V.V. Sono-hydro priming process (ultrasound modulated hydration): Modelling hydration kinetic during paddy germination. **Ultrasonics Sonochemistry**. v.70, 2021.
- KASHANINEJAD, M.; MAGHSOUDLOU, Y.; RAFIEE, S.; KHOMEIRI, M. Study of hydration kinetics and density changes of rice (*Tarom Mahali*) during hydrothermal processing. **Journal of Food Engineering**, v. 79, n. 4, p. 1383–1390, 2007.
- KASHANINEJAD, M.; DEHGHANI, A. A.; KASHIRI, M. Modeling of wheat soaking using two artificial neural networks( MLP and RBF). **Journal of Food Engineering**, v. 91, p. 602–607, 2009.
- KASHIRI, M.; KASHANINEJAD, M.; AGHAJANI, N. Modeling water absorption of sorghum during soaking. **Latin American Applied Research**, v. 40, n. 4, p. 383–388, 2010.
- KHAZAEI, J.; MOHAMMADI, N. Effect of temperature on hydration kinetics of sesame seeds (*Sesamum indicum* L.). **Journal of Food Engineering**, v. 91, p. p. 542-552, 2009.
- KENNEDY, G.; BURLINGAME, B.; NGUYEN, N. Nutrient impact assessment of rice in major rice-consuming countries. **International Rice Commission Newsletter**, v. 51, p. 33-42, 2002.
- KIM, B; WOO, S; KIM, M, J; SUNG, S, H; KOH, K, J. Identification and quantification flavonoids in yellow grain mutant of rice (*Oryza sativa* L.). **Food Chemistry**. v. 241, p. 154-162, 2018.
- KONG, C. H., XU, X. H., ZHOU, B., HU, F., ZHANG, C. X. Two compounds from allelopathic rice accession and their inhibitory activity on weeds and fungal pathogens. **PHYTOCHEMISTRY**, v.65, p.1123 – 1128, 2004.
- KORNARZYNSKI, K.; PIETRUSZEWSKI, S.; LACEK, R. Measurement of the water absorption rate in wheat grain. **International Agrophysics**, v. 16, p. 33-36, 2002.



KOSIK, O.; ROMERO, V. M.; BANDONIL, E. V.; ABILGOS-RAMOS, G. R.; SREENIVASULU, N.; SHEWRY, P.; LOVEGROVE, A. Diversity of content and composition of cell wall-derived dietary fibre in polished rice. **Journal of Cereal Science**. v. 96, November 2020, 103122. doi.org/10.1016/j.jcs.2020.103122.

KUMAR, K; SRIVASTAV, S; SHARANAGAT, V.S. Ultrasound assisted extraction (UAE) of bioactive compounds from fruit and vegetable processing by-products: A review. **Ultrasonics Sonochemistry**. v.70, 2021.

KUMAR, Y; SINGH, L; SHARANAGAT, V. S; TARAFDAR, A. Artificial neural network (ANNs) and mathematical modelling of hydration of green chickpea. **Information Processing in Agriculture**, v. 8, n. 1, p. 75-86, 2021.

IGATHINATHANE, C.; CHATTOPADHYAY, P. K.; PORDESIMO L. O. Combination soaking procedure for rough rice parboiling. **Transactions of the ASAE**, v. 48, n. 2, p. 665-671, 2005.

IGOUMENIDIS, P.E., IOSIFIDIS, S.V., LOPEZ-QUIROGA, E., BAKALIS, S. & KARATHANOS, V.T. (2019). Absorption of phenolic acids in rice kernels after boiling in spearmint aqueous extracts of different concentrations. A diffusion study. **Journal of Food Science**, v.89, p. 2859– 2867.

ISLAM, M. R.; ROY, P.; SHIMIZU, N.; KIMURA, T. Effect of Processing Conditions on Physical Properties of Parboiled Rice. **Food Science and Technology Research**, v. 8, n. 2, p. 106–112, 2002.

LANNING, S. B.; SIEBENMORGEN, T. J. Comparison of Milling Characteristics of Hybrid and Pureline Rice Cultivars. **Applied Engineering in Agriculture**, v.27, n. 5, p. 787–795, 2011.

LEETHANAPANICH, K; MAUROMOUSTAKOS, A; WANG, Y. J. Effect of soaking temperature on commingled rice properties. **Journal of Cereal Science**. v. 69, p. 267-274, 2016.

LI, S., LUO, Z., GUAN, X., HUANG, K., LI, Q., ZHU, F., LIU, J. Effect of ultrasonic treatment on the hydration and physicochemical properties of brewing rice. **Journal of Cereal Science**, v. 87, p. 78-84, 2019.

LI, C; YOU, Y; CHEN, D; GU, Z; ZHANG, Y; HOLLER, T. P; BAN, X; HONG, Y; CHENG, L. A systematic review of rice noodles: Raw material, processing method and quality improvement. **Trends in Food Science & Technology**. v.107, p. 389-400, 2021.

LINDEMANN, I. S; DITTGEN, C. L; BATISTA, C. S. SANTOS, J. P; BRUNI, G.P; ELIAS, M.C; VANIER, N.L. Rice and common bean blends: Effect of cooking on in vitro starch digestibility and phenolics profile. **Food Chemistry**.v. 340, 15 March 2021.

LIU, K; ZHENG, J; CHEN, F. Effect of domestic cooking on rice protein digestibility. **Food Science e Nutrition**. v.7, n. 2, p. 608-616, 2019.

MADAMBA, P. S.; DRISCOLL, R. H.; BUCKLE, K. A. The thin layer drying characteristics of garlic slices. **Journal of Food Engineering**, v.29, n.11, p.75-98, 1996.

MAYOLLE, J. E.; LULLIEN-PELLERIN, V.; CORBINEAU, F.; BOIVIN, P.; GUILLARD, V. Water diffusion and enzyme activities during malting of barley grains: A relationship assessment. **Journal of Food Engineering**, v. 109, n. 3, p. 358–365, 2012.

MARQUES, B. C.; JORGE, L. M. DE M.; JORGE, R. M. M. Hydration kinetics, physicochemical composition, and textural changes of transgenic corn kernels of flint, semi-flint, and dent varieties. **Food Science and Technology**, v. 34, n. 1, p. 88–93, 2014.

MARSHALL, W. E.; WADSWORTH, J. I.; VERMA, L. R.; VELUPILLAI, L. Determining the Degree of gelatinization in parboiled rice: comparison of a subjective and an objective method. **Cereal Chemistry**, v. 70, n. 2, p. 226–230, 1993.

MASKAN, M. Effect of maturation and processing on water uptake characteristics of wheat. **Journal of Food Engineering**, v. 47, p. 51-57, 2001.

MASKAN, M. Effect of processing on hydration kinetics of three wheat products of the same variety. **Journal of Food Engineering**, v. 52, p. 337-341, 2002.

MATIAS, G. S., BISSARO, C. A., ROSSONI, D. F., JORGE, L. M. M. The fractional calculus in studies on drying: A new kinetic semi-empirical model for drying. **Journal of Food Process Engineering**. v. 1, p. e12955-7, 2018.

MATTIODA, F.; JORGE, L. M. M.; JORGE, R. M. M. Evaluation of water diffusivity in wheat hydration (*Triticum spp*): Isothermal and periodic operation. **Journal of Food Process Engineering**, v. 41, n. 4, 2018.

MATTIODA, F.;DE MATOS ,JORGE L.M.; JORGE ,R.M.M. Mathematical modeling of wheat hydration: Process and starch properties. **Journal of Food Process Engineering**. v. 42, n. 1, 2019.

MATTIODA, F.;JORGE, L. M. M.; JORGE, R. M. M. Wheat hydration process intensification by periodic operation. **Journal of Food Engineering**. v. 246, p. 153-159, 2019.

MCLACHLAN, N. W. **Bessel functions for engineers (2th ed.)**. Oxford:Clarendon Press, p. 5–8, 1955.

MCKEVITH, B. Nutritional aspects of cereals. **Nutrition Bulletin**, v. 29, p. 111-142, 2004.

MECHA, E.; LEITÃO, S. T.; CARBAS, B.; SERRA, A. T.; MOREIRA, P. M.; VELOSO, M. M.; ...; BRONZE, M. R. Characterization of soaking process' impact in common

beans phenolic composition: Contribute from the unexplored Portuguese germplasm. **Foods**, v. 8, n. 8, p. 296, 2019.

MAIH, M. A. K.; HAQUE, A.; DOUGLASS, M. P.; CLARKE, B. Parboiling of rice . Part I : Effect of hot soaking time on quality of milled rice. **International Journal of Food Science and Technology**, v. 37, p. 527–537, 2002.

MIANO, A. C.; GARCÍA, J. A.; AUGUSTO, P. E. D. Correlation between morphology, hydration kinetics and mathematical models on Andean lupin (*Lupinus mutabilis* Sweet) grains. **LWT - Food Science and Technology**, v. 61, n. 2, p. 290–298, 2015.

MIANO, A. C; AUGUSTO.P. E. D. From the sigmoidal to the downward concave shape behavior during the hydration of grains: Effect of the initial moisture content on Adzuki beans (*Vigna angularis*). **Food and Products Processing**, v. 96, p.43-51, 2016.

MIANO, A. C., PEREIRA, C., CASTANHA, N., DIVINO, M., ESTEVES, P., AUGUSTO, D. Enhancing mung bean hydration using the ultrasound technology: description of mechanisms and impact on its germination and main components. **Scientific Reports**, v. 6, 2016.

MIANO, A. C; AUGUSTO, P. E. D. Ultrasonic technology improves the hydration of corn kernels without their starch properties. **Journal of Food Engineering**,v. 197, p 34-43, 2017.

MIANO, A. C; AUGUSTO, P. E. D. The ultrasound assisted hydration as an opportunity to incorporate nutrients into grains. **Food Research International**, v. 106, p. 928 – 935, 2018.

MIANO, A. C; SABADOTI, V .D; AUGUSTO, P. E. D. Enhancing the hydration process of common beans by ultrasound and high temperatures: Impact on cooking and thermodynamic properties. **Journal of Food Engineering**, v. 225, p. 53-61, 2018.

MIANO, A.C; ROJAS, M.L; AUGUSTO, P. E .D. Using ultrasound for improving hydration and debittering of Andean lupin grains. **Journal of Food Engineering**. 2019. Disponível em : <https://dx.doi.org/10.1111/jfpe.13170>.

MIANO, A.C; AUGUSTO, P. E .D .The Hydration of Grains: A Critical Review from Description of Phenomena to Process Improvements. **Comprehensive Reviews in Food Science and Food Safety**. v.17, n 2, p. 352-370, 2018.

MIN, B.; MCCLUNG, A.; CHEN, M. 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.

MIN, B., GU, L., MCCLUNG, A. M., BERGMAN, C. J., & CHEN, M. H. (2012). Free and bound total phenolic concentrations, antioxidant capacities, and profiles of proanthocyanidins and anthocyanins in whole grain rice (*Oryza sativa* L.) of different bran colours. **Food Chemistry**, v. 133, 715– 722.

MIR, S. A.; BOSCO, S. J. D.; SHAH, M. A.; MIR, M. M. Effect of puffing on physical and antioxidant properties of brown rice. **Food Chemistry**, v. 191, p. 139–146, 2016.

MRIDULA, D., SAHAY, D., GUPTA, R.K. & GOSWAMI, D. Development of biopolymer coated calcium fortified rice using spraying and soaking methods. **LWT - Food Science and Technology**, v.61, 209– 215.

MIRA, N. V. M., DE MASSARETTO, I. L., PASCUAL, C. S. C. I., LANFERMARQUEZ, U. M. Comparative study of phenolic compounds in different Brazilian rice (*Oryza sativa L.*) genotypes. **Journal of Food Composition and Analysis**, v. 22, p. 405–409, 2009.

MISRA, N. N., KOUBAA, M., ROOHINEJAD, S., JULIANO, P., ALPAS, H., INÁCIO, R. S., SARAIVA, J. A., & BARBA, F. J. (2017). Landmarks in the historical development of twenty first century food processing technologies. **Food Research International**, v. 97, p. 318-339.

MOHAPATRA, D.; RAO, P. S. A thin layer drying model of parboiled wheat. **Journal of Food Engineering**, v. 66, p. 13-18, 2005.

MONTANUCI, F.; D.; JORGE, L. M. de M.; JORGE, R. M. M. Kinetic, thermodynamic properties, and optimization of barley hydration. **Food Science and Technology**, v. 33, n. 4, p. 690-698, 2013.

MONTANUCI, F. D; PERUSSELLO, C. A; JORGE, L. M. M.; JORGE, R. M. M. Experimental analysis and finite element simulation of the hydration process of barley grains. **Journal of Food Engineering**.v. 131, p. 44-49, 2014.

MONTANUCI, F. D.; JORGE, L. M. M.; JORGE, R. M. M. Effect of time and temperature on the hydration process of barley grains. **Heat and Mass Transfer**, v. 51, n. 3, p. 363–372, 2015.

MONTANUCI, F.D; RIBANI ,M; DE MATOS JORGE L.M; MATOS JORGE R.M. Effect of steeping time and temperature on malting process. **Journal of Food Process Engineering**. v. 40, n. 4, 2017.

MONTALVO, V; SÁENZ- BOLANOS, C ; CRUZ, J. C; HAGNAUER, I; CARRILO, E. Consumption of wild rice (*Oryza latifolia*) by free-ranging jaguars, pumas, and ocelots (*Carnivora-Felidae*) in northwestern Costa Rica. **Food Webs**.v. 22, 2020.

MONKS, J. L. F.; VANIER, N. L.; CASARIL, J.; et al. Effects of milling on proximate composition, folic acid, fatty acids and technological properties of rice. **Journal of Food Composition and Analysis**, v. 30, n. 2, p. 73–79, 2013

MÜLLER,A; NUNES, T.M; MALDANER, V; CORADI, P.C; MORAES,R. S; MARTENS, S; LEAL, A. F; PEREIRA, V. F; MARIN, C.K. Rice Drying, Storage and Processing: Effects of Post-Harvest Operations on Grain Quality. **Rice Science**. v. 29, n. 1, p. 16-30, 2022.

MUTHAYYA, S; SUGIMOTO, J.D; MONTGOMERY, MABERLY, S.G.F. An overview of global rice production, supply, trade, and consumption. v.1324, n.1. **Technical Considerations for Rice Fortification in Public Health**. September 2014. Disponível em: <https://doi.org/10.1111/nyas.12540>.

NAYAR, M. N. Chapter 4 - **Oryza Species and Their Interrelationships. Origin and Phylogeny of Rices**. 2014, p. 59-115. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-417177-0.00004-8>.

NASIRAHMADI, A.; EMADI, B.; ABBASPOUR-FARD, M. H.; AGHAGOLZADE, H. Influence of Moisture Content, Variety and Parboiling on Milling Quality of Rice Grains. **Rice Science**, v. 21, n. 2, p. 116–122, 2014.

NICOLIN, D. J.; JORGE, R. M. M.; JORGE, L. M. M. Stefan Problem Approach Applied to the Diffusion Process in Grain Hydration. **Transport in Porous Media**, v. 102, p. 387-402, 2014.

NICOLIN, D. J.; JORGE, R. M. M.; JORGE, L. M. M. Effects of Variable Diffusivity on Soybean Hydration Modelling as a Stefan Problem. **The Canadian Journal of Chemical Engineering**. v. 9999, 2016.

NICOLIN, D. J.; MARQUES, B. C.; BALBINOTI, T. C. V.; JORGE, R. M. M.; JORGE, L. M. DE M. Modeling rice and corn hydration kinetic by Nicolin-Jorge model. **Journal of Food Process Engineering**, v. 40, n. 6, 2017.

NICOLIN, D.J; BALBINOTI, T.C.V; JORGE R.M.M; DE. JORGE.M. L.M.Generalisation of a lumped parameters model using fractional derivatives applied to rice hydration. **Journal of Food Process Engineering** , v. 41, 2018.

NIE, J; CHEN, D; YE, J; LU, Y; DAI, Z. Optimization and kinetic modeling of ultrasonic-assisted extraction of fucoxanthin from edible brown algae *Sargassum fusiforme* using green solvents. **Ultrasonics Sonochemistry**. v.77, 2021.

OLADELE, S. O; AGBETOYE, L. A. S; OSUNDAHUNSI, O. F; AUGUSTO, P.E.D. Oat hydration kinetics at different temperatures: Evaluation, model, and validation. **Journal of Food Engineering**. v. 42, n. 6, 2019.

OLI, P.; WARD, R.; ADHIKARI, B.; TORLEY, P. Parboiled rice: Understanding from materials science approach. **Journal of Food Engineering**, v. 124, p. 173– 183, 2014.

OLIVEIRA, L. C. DE; JORGE, L. M. DE M.; JORGE, R. M. M. Intensification of the triticale (triticosecale *Wittmac*) hydration process using periodic operation. **Journal of Food Process Engineering**, v. 43, n. 7, 2020.

OLIVEIRA, M ; AMATO, G. W; **Arroz.Tecnologia, processos e usos**. Editora Blucher, 1ª ed. 2021.

OLIVEIRA, A. C.; PEGORARO, C.; VIANA, V. E. **The future of rice demand quality beyond productivity**. Ed. Springer 2020. Disponível em: <https://doi.org/10.1007/978-3-030-37510-2>.

OMOTO, E. S.; ANDRADE, C. M. G.; JORGE, R. M. M. J.; COUTINHO, M. R.; PARAÍSO, P. R.; JORGE, L. M. M. Modelagem matemática e análise da hidratação de grãos de ervilha. **Ciência e Tecnologia de Alimentos**, v. 29, n. 1, p. 12-18, 2009.

PAIVA, F.F.; VANIER, N. L.; BERRIOS, J. J.; PAN, J., VILLANOVA, F. A.; TAKEOKA, G., et al. Physicochemical and nutritional properties of pigmented rice subjected to different degrees of milling. **Journal of Food Composition and Analysis**, v. 35, p. 10-17, 2014.

PAIVA, F. F.; VANIER, N. L.; BERRIOS, J. D. J.; et al. Polishing and parboiling effect on the nutritional and technological properties of pigmented rice. **Food Chemistry**, v. 191, p. 105–112, 2016.

PANDA, B. K; MISHRA, G; PANIGRAHI, S.S; SHRIVASTAVAA, S. L. Microwave-assisted parboiling of high moisture paddy: A comparative study based on energy utilization, process economy and grain quality with conventional parboiling. **Energy**. v. 232, 2021.

PARK, H. L., LEE, S. W., JUNG, K. H., HAHN, T. R., CHO, M. H. Transcriptomic analysis of UV-treated rice leaves reveals UV-induced phytoalexin biosynthetic pathways and their regulatory networks in rice. **Phytochemistry**, v. 96, p. 57- 71, 2013.

PARK, D.J; HAN, J. Quality controlling of brown rice by ultrasound treatment and its effect on isolated starch. **Carbohydrate Polymers**. v. 137, 2016, p. 30-38. [doi.org/10.1016/j.carbpol.2015.10.045](https://doi.org/10.1016/j.carbpol.2015.10.045). Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/journal/01448617>.

PASCUAL, C. DE S. C. I.; MASSARETTO, I. L.; KAWASSAKI, F.; et al. Effects of parboiling, storage and cooking on the levels of tocopherols, tocotrienols and  $\gamma$ -oryzanol in brown rice (*Oryza sativa* L.). **Food Research International**, v. 50, n. 2, p. 676–681, 2013.

PATERO, T; AUGUSTO, P. E.D .Ultrasound (US) enhances the hydration of sorghum (*Sorghum bicolor*) grains. **Ultrasonics Sonochemistry**. v. 23, p. 11-15, 2015.

PRAMIU, P. V.; RIZZI, R. L.; DO PRADO, N. V.; COELHO, S. R. M.; BASSINELLO, P. Z. Numerical modeling of chickpea (*Cicer arietinum*) hydration: The effects of temperature and low pressure. **Journal of Food Engineering**, v. 165, p. 112–123, 2015.

PRAMIU, P. V.; RIZZI, R. L; GALANTE, G; RIZZI, C.B; COELHO, S. R. M. Modeling grains hydration considering volumetric variations of spherical and elliptical geometries. **Computers and Electronics in Agriculture**, v. 166, 2019.



- PRASAD, K.; VAIRAGAR, P. R.; BERA, M. B. Temperature dependent hydration kinetics of *Cicer arietinum splits*. **Food Research International**, v. 43, n. 2, p. 483–488, 2010.
- PELEG, M. An empirical model for the description of moisture sorption curves. **Journal of Food Science**, v. 53, n. 4, p. 1216–1217, 1988.
- PEREIRA, J. A. **Cultura do arroz no Brasil: Subsídios para a sua história**. 1. ed. Teresina: Embrapa, 2002.
- PEREZ, J. H.; TANAKA, F.; UCHINO, T. Comparative 3D simulation on water absorption and hygroscopic swelling in japonica rice grains under various isothermal soaking conditions. **Food Research International**, v. 44, n. 9, p. 2615–2623, 2011.
- PINEDA-GÓMEZ, P.; ROSALES-RIVERA, A.; RODRÍGUEZ-GARCÍA, M. E. Modeling calcium and water intake in threshed corn grain during thermoalkaline treatment. **Journal of Food Engineering**, v. 113, p. 434–441, 2012.
- PUROHIT, S. R.; RAO, P. S. Water absorption and gelatinization kinetics of nonissuable rice and its characterization. **Journal of Food Measurement and Characterization**, v. 11, n. 4, p. 2110–2118, 2017a.
- PUROHIT, S. R.; RAO, P. S. Optimization of paddy parboiling process for higher starch crystallinity by response surface methodology. **Internacional Journal Biological Macromolecules**, v. 104, p. 1091-1098, 2017.
- 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.
- RAMALINGAM, N.; ANTHONI RAJ, S. Studies on the soak water characteristics in various paddy parboiling methods. **Bioresource Technology**, v. 55, n. 3, p. 259–261, 1996.
- RAMOS, A. P.; GUERRERO, K. M. L.; ROMERO, J. T.; LOPES FILHO, J. F. Hydration kinetics of four quinoa (*Chenopodium quinoa Willd.*) varieties. **Revista colombiana de investigaciones agroindustriales**, v. 3, p. 23–33, 2016.
- RESENDE, O.; CORRÊA, P. C. Modelagem matemática do processo de hidratação de sementes de feijão. **Acta Scientiarum Agronomy**, v. 29, n. 3, p. 373–378, 2007.
- RESIO, A. C.; AGUERRE, R. J.; SUAREZ, C. Hydration kinetics of amaranth grain. **Journal of Food Engineering**, v. 72, p. 247–253, 2006.
- RE, R; PELEGRINI, N; PROTEGGENTE, A; PANNALA, A; YANG, MIN; RICE-EVANS, C. Antioxidant activity applying an improved ABTS radical cation decolorization assay. **Free Radical Biology and Medicine**. v. 26, 9-10, maio de 1999, p. 1231-1237. doi.org/10.1016/S0891-5849(98)00315-3.

RIBEIRO, L. F.; RIBANI, R. H.; FRANCISCO, T. M. G.; et al. Profile of bioactive compounds from grape pomace (*Vitis vinifera* and *Vitis labrusca*) by spectrophotometric, chromatographic and spectral analyses. **Journal of Chromatography B**, v. 1007, p. 72–80, 2015.

ROSELLÓ-SOTO, E; KOUBAA , M; MOUBARIK, A; LOPES ,R. P; SARAIVA , J; BOUSSETTA , N; BARBA, F. J. Emerging opportunities for the effective valorization of wastes and by-products generated during olive oil production process: Non-conventional methods for the recovery of high-added value compounds. **Trends Food Science Technologic**s. ,v .45 , p. 296 – 310, 2015.

SAMYOR, D.; DAS, AB.; DEKA, SC. Pigmented rice a potential source of bioactive compounds: a review. **International Journal of Food Science and Technology** . v. 52, p. 1073-1081, 2017. doi:10.1111/ijfs.13378.

SAYAR, S.; TURHAN, M.; GUNASEKARAN, S. Analysis of chickpea soaking by simultaneous water transfer and water.starch reaction. **Journal of Food Engineering**, v. 50, p. 91-98, 2001.

SCAGLIONI, P. T.; DE SOUZA, T. D.; SCHMIDT, C. G.; BADIALE-FURLONG, E. Availability of free and bound phenolic compounds in rice after hydrothermal treatment. **Journal of Cereal Science**, v. 60, n. 3, p. 526–532, 2014.

SHAFAEI, S.M; NOURMOHAMADI- MOGHADAMI, A; KAMGAR, S. Development of artificial intelligence based systems for prediction of hydration characteristics of wheat. **Computers and Electronics in Agriculture**, v. 128, p. 34-45, 2016.

SHAFAEI, S.M; NOURMOHAMADI- MOGHADAMI, A; KAMGAR, S. An insight into thermodynamic aspects of ultrasonication effect on hydration mechanism of wheat. **Journal of Food Processing Engineering**, v .41, n. 7, 2018.

SHAFAEI, S.M; NOURMOHAMADI- MOGHADAMI, A; KAMGAR, S. The combined effect of ultrasonication and hydration temperature on water absorption of barley: Analysis, modeling, kinetics, optimization, and thermodynamic parameters of the process. **Journal of Food Processing and Preservation**. v. 43, n. 4, 2019.

SHAHEEN, S. M; ANTONIADIS, V; SHAHID, M; YANG, Y; ABDELRHAMAN, H; ZHANG, T; HASSAN, N.E. E; BIBI, I; NIAZI, N. K; YOUNIS, S. A; ALMAZROUI, M. TSANG, Y.F; SARMAH, A. K; KIM, K-H; RINKLEBE, J. Sustainable applications of rice feedstock in agro-environmental and construction sectors: A global perspective. **Renewable and Sustainable Energy Reviews**. v. 153, 2022.

SHARANAGAT, V. S; KANSAL, V; KUMAR, K. Modeling the effect of temperature on the hydration kinetic whole moong grain. **Journal of the Saudi Society of Agricultural Sciences**. v. 17, n. 3, p. 268-274, 2018.

SRICHAMNONG, W.; THIYAJAI, P.; CHAROENKIATKUL, S. Conventional steaming retains tocopherols and  $\gamma$ -oryzanol better than boiling and frying in the jasmine rice variety Khao dok mali 105. **Food Chemistry**, v. 191, p. 113–119, 2016.



SRIDHAR, B. S.; MANOHAR, B. Hydration Kinetics and Energy Analysis of parboiling Indica Paddy. **Biosystems Engineering**, v. 85, n. 2, p. 173–183, 2003.

SRISANG, N; CHUNGCHAROEN, T. Quality attributes of parboiled rice prepared with a parboiling process using a rotating sieve system. **Journal of Cereal Science**.v .85, p. 286-294, 2019.

SENGAR, A.S; THIRUNAVOOKARASU, N; CHOUDHARY, P; NAIK, M; SUREKHA, A; SUNIL, C.K; RAWSON, A. Application of power ultrasound for plant protein extraction, modification and allergen reduction – A review. **Applied Food Research** v. 2, n. 2, 2022.

SETYANINGSI, W; SAPUTRO, I. E; CEFERINO A. CARRERA, PALMA, M. Optimisation of an ultrasound-assisted extraction method for the simultaneous determination of phenolics in rice grains. **Food Chemistry**. v. 288, p. 221-227, 2019.

SILVA, M. A.; SANCHES, C.; AMANTE, E. R. Prevention of hydrolytic rancidity in rice bran. **Journal of Food Engineering**, v. 75, n. 4, p. 487-491, 2006.

SILVA, D. A.R.O; JORGE, L. M. M; JORGE, R. M. M .Kinetics study and modelling of sorghum grain hydration. **Revista Ciência Agronômica**. 2019. Disponível em: <https://dx.doi.org/10.5935/1806-6690.20190006>.

SINGLA, M; SIT, N. Application of ultrasound in combination with other technologies in food processing: A review. **Ultrasonics Sonochemistry**.v. 73, 2021.

SINGLETON, V. L.; ROSSI, J. A. Colorimetry of Total Phenolics with Phosphomolybdic-Phosphotungstic Acid Reagents. **American Journal of Enology and Viticulture**, v. 16, n. 3, p. 144–158, 1965.

SOTO-GÓMEZ, D; PÉREZ-RODRIGUEZ, P. Sustainable agriculture through perennial grains: Wheat, rice, maize, and other species. A review. **Agriculture, Ecosystems & Environment**, v.325, 2022.

STORCK, C. R.; PICOLLI, L.; COMARELLA, C. G. Influência do processamento na composição. **Alimentos e Nutrição**, v. 16, n. 3, p. 259–264, 2005.

STORCK, C. R.; SILVA, L. P. DA; FAGUNDES, C. A. A. Categorizing rice cultivars based on differences in chemical composition. **Journal of Food Composition and Analysis**, v. 18, n. 4, p. 333–341, 2005.

TAGHINEZHAD, E.; KHOSHTAGHAZA, M. H.; SUZUKI, T.; MINAEI, S.; BRENNER, T. Quantifying the Relationship between Rice Starch Gelatinization and Moisture-Electrical Conductivity of Paddy during Soaking. **Journal of Food Process Engineering**, v. 39, n. 5, p. 442–452, 2016.

TAGHINEZHAD, E. KHOSHTAGHAZA, M. H; MINAEI, S; T. SUZUKI, T. BRENNER, T. Relationship between degree of starch gelatinization and quality attributes of parboiled rice during steaming. **Rice Science**, v. 23, p. 339- 344, 2016.

TAGHINEZHAD, E.; BRENNER, T. Mathematical modeling of starch gelatinization and some quality properties of parboiled rice based on parboiling indicators using RSM. **Journal of Food Process Engineering**, v. 40, n. 3, p. e12483, 2017.

THAMMAPAT, P.; MEESO, N.; SIRIAMORNUN, S. Effects of the traditional method and an alternative parboiling process on the fatty acids, vitamin E,  $\gamma$ -oryzanol and phenolic acids of glutinous rice. **Food Chemistry**, v. 194, p. 230–236, 2016.

THAKUR, A.; GUPTA, A. K. Water absorption characteristics of paddy, brown rice and husk during soaking. **Journal of Food Engineering**, v. 75, p. 252–257, 2006.

TRALAMAZZA, S. M; PIACENTINI, K.C; SAVI, G.D; CARNIELI-QUEIROZ, L; FONTES, DE CARVALHO, L; MARTINS, C.S; CORREA, B; ROCHA, L.O. Wild rice (*O. latifolia*) from natural ecosystems in the Pantanal region of Brazil: Host to *Fusarium incarnatum-equiseti* species complex and highly contaminated by zearalenone. **International Journal of Food Microbiology**, v. 345, 2 May 2021, 109127.

TI, H; ZHANG, R; LI, Q; ZHANG, M. Effects of cooking and in vitro digestion of rice on phenolic profiles and antioxidant activity. **Food Research International**. v 76, Part 3, October 2015, p. 813-820.

ULLOA, J. A.; ENRÍQUEZ LÓPEZ, K. V.; CONTRERAS MORALES, Y.B.; ROSAS ULLOA, P.; RAMÍREZ RAMÍREZ, J. C.; ULLOA RANGEL, B. E. Effect of ultrasound treatment on the hydration kinetics and cooking times of dry beans (*Phaseolus vulgaris*). **CyTA - Journal of Food**, v. 13, n. 4, p. 588 – 596, 2015.

TAGAWA, A.; MURAMATSU, Y.; NAGASUNA, T.; YANO, A.; IIMOTO, M.; MURATA, S. Water absorption characteristics of wheat and barley during soaking. **Transactions of ASAE**, v. 46, n. 2, p. 361–366, 2003.

VARGA, M; JOJÁRT. R; PALLÁGYI, A; Phenolic composition and antioxidant activity of colored oats. **Food Chemistry**, v. 268, 1 December 2018, Pages 153-161.

VÁSQUEZ, U; SICHE, R; MIANO, A.C. Ultrasound-assisted hydration with sodium bicarbonate solution enhances hydration-cooking of pigeon pea. **LWT**, v. 144, June 2021, 111191. Acesso em: <https://doi.org/10.1016/j.lwt.2021.111191>.

VAUGHAN, D. A.; GE, S.; KAGA, A.; TOMOOKA, N. Phylogeny and Biogeography of the Genus *Oryza*. In: HIRANO, H. Y.; SANO, Y.; HIRAI, A.; SASAKI, T. (Ed.). Rice Biology in the Genomics Era. Berlin: Springer Berlin Heidelberg: **Biotechnology in Agriculture and Forestry**, p. 219–234, 2018.

VILLANOVA, F. A; VANIER, N. L; MADRUGA, N. A; PESEK, J; PESEK-MATYSKA, M; ELIAS, M.C; OLIVEIRA, M. Improvement of the quality of parboiled rice by using anti-browning agents during parboiling process. **Food Chemistry**. v. 235, p. 51-57, 2017.

VERRUCK, S; PRUDENCIO, E.S. **Ultrassom na indústria de alimentos: aplicações no processamento e conservação** / Silvani Verruck, Elane Schwinden Prudencio. Ponta Grossa (PR): Atena Editora, 2018.

VUE, R.; WARING, S. Functionality of resistant starch in food applications. **Cereal Food World**, v.43, n. 9, p. 690-695, 1998.

VILLAMIEL, M., GARCIA-PEREZ, J.V., MONTILLA, A., CARCEL, J.A., & BENEDITO, J. **Ultrasound in Food Processing: Recent Advances**. John Wiley & Sons. p. 544, 2018.

WALTER, M.; MARCHESAN, E.; MASSONI, P. F. S.; SILVA, L. P.; SARTORI, G. M. S.; FERREIRA, R. B. Antioxidant properties of rice grains with light brown, red and black pericarp colors and the effect of processing. **Food Research International**, v. 50, p. 698–703, 2013.

WITEK, M.; WEGLARZ, W. P.; JONG, L. de; DALEN, G. van; BLONK, J. C. G.; HEUSSEN, P.; VELZEN, E. Van; VAN AS, H.; DUYNHOVEN, J. VAN. The structural and hydration properties of heat-treated rice studied at multiple length scales. **Food Chemistry**, v. 120, p. 1031–1040, 2010.

WU, Y.; CHEN, Z.; LI, X.; WANG, Z. Retrogradation properties of high amylose rice flour and rice starch by physical modification. **Food Science and Technology**, v. 43, p. 492–497, 2010.

YADAV, B. K.; JINDAL, V. K. Modeling changes in milled rice (*Oryza sativa* L.) kernel dimensions during soaking by image analysis. **Journal of Food Engineering**, v. 80, p. 359–369, 2007.

YADAV, N.; KAUR, D.; MALAVIYA, R.; SINGH, M.; FATIMA, M.; SINGH, L. Effect of thermal and non-thermal processing on antioxidant potential of cowpea seeds. **International Journal of Food Properties**, v. 21, n. 1, p. 437-451, 2018.

YADAV, S; MISHRA, S; PRADHAN, R.C. Ultrasound-assisted hydration of finger millet (*Eleusine Coracana*) and its effects on starch isolates and antinutrients. **Ultrasonics Sonochemistry**, v. 73, maio de 2021 , 105542.

YANG, Z., LIU, S., LIN, X., WANG, L., LI, C. Effects of ultrasonic treatment on the cooking and fermentation properties of Shanlan rice. **Journal of Cereal Science**, v. 95, 2020.

YILDIRIM, A.; ÖNER, M. D.; BAYRAM, M. Modeling of water absorption of ultrasound applied chickpeas (*Cicer arietinum* L.) using peleg's equation. **Journal of Agricultural Science**, v. 16, n. 4, p. 278–286, 2010.

YILDIRIM, A; ONER, M.D; BAYRAM, M. Fitting Fick's model to analyze water diffusion into chickpeas during soaking with ultrasound treatment. **Journal of Food Engineering**. v. 104, n. 1, p. 134-142, 2011.

YILDIRIM, A. Influence of temperature, ultrasound and variety on moisture diffusivity and thermodynamic properties of some durum wheat varieties during hydration. **Journal of Food Process and Preservation**. 2022. Disponível em: <https://doi.org/10.1111/jfpp.16463>.

ZHANG, X; WANG,L; CHENG,M; WANG,R; LUO, X; LI,Y; CHEN,Z. Influence of ultrasonic enzyme treatment on the cooking and eating quality of brown rice. **Journal of Cereal Science**. v. 63, p 140-146, 2015.

ZHOU, Z.; ROBARDS, K.; HELLIWELL, S.; BLANCHARD, C. Composition and functional properties of rice. **International Journal of Food Science and Technology**, v. 37, p. 849-868, 2002.

ZHOU, Z. K.; ROBARDS, K.; HELLIWELL, S.; BLANCHARD, C. Effect of storage temperature on cooking behaviour of rice. **Food Chemistry**, v. 105, n. 2, p. 491–497, 2007.

ZHOU, Z.; CHEN, X.; ZHANG, M.; BLANCHARD, C. Phenolics, flavonoids, proanthocyanidin and antioxidant activity of brown rice with different pericarp colors following storage. **Journal of Stored Products Research**, v. 59, p.120–125, 2014.

ZHU, F. Impact of ultrasound on structure, physicochemical properties, modifications, and applications of starch. **Trends in Food Science & Technology**. v. 43, p. 1-17. 2015.

ZAVVAR SABEGH, M.H., MIRZAZADEH A., MAASS, E., OZTURKOGLU Y., MOHAMMADI M., MOSLEMI S. A mathematical model and optimization of total production cost and quality for a deteriorating production process. **Cogent Math**. v. 3. 2016.

ZINOVIADOU, G; GALANAKIS, C. M; BRNČIĆ ,M; GRIMI, N ; BOUSSETTA, N; MOTA, M.J; SARAIVA J.A; PATRAS, A; TIWARI, B; BARBA, F.J. Fruit juice sonication: Implications on food safety and physicochemical and nutritional properties. **Food Research Internacional**., v. 77, p. 743-752, 2015.