



UNIVERSIDADE ESTADUAL PAULISTA
“JÚLIO DE MESQUITA FILHO”
Câmpus de São José do Rio Preto

RELATÓRIO DE PÓS-DOCTORADO

**Cinética de secagem, isotermas de sorção e propriedades termodinâmicas de
sementes de pimenta Jalapeño (*Capsicum annuum L.*)**

Aluna: Maria Julia Neves Martins

Orientador: Prof. Dr. Javier Telis Romero

Pós-Graduação em Alimentos, Nutrição e Engenharia de Alimentos (PPG ANEA)

São José do Rio Preto

Agosto de 2024

MARIA JULIA NEVES MARTINS

**CINÉTICA DE SECAGEM, ISOTERMAS DE SORÇÃO E PROPRIEDADES
TERMODINÂMICAS DE SEMENTES DE PIMENTA JALAPEÑO (*CAPSICUM
ANNUUM L.*)**

Relatório de Pós-doutorado realizado na Universidade
Estadual Paulista (UNESP) – Instituto de Biociências,
Letras e Ciências Exatas (UNESP/IBILCE)
Departamento de Engenharia e Tecnologia de
Alimentos (DETA), São José do Rio Preto.

Supervisor(a): Prof. Dr.
Javier Telis-Romero

São José do Rio Preto

2024

Resumo

A pimenta Jalapeño normalmente é processada para a elaboração de especiarias, produtos enlatados e molhos, gerando um excesso de sementes como subproduto. O teor de umidade desse subproduto é um desafio para a recuperação e aproveitamento integral. Para garantir o melhor aproveitamento desse subproduto, é essencial compreender o processo de secagem, as isotermas de sorção e as propriedades termodinâmicas. Assim, as sementes de pimenta Jalapeño foram caracterizadas através da composição centesimal, da extração e caracterização físico-química do óleo, e submetidas à secagem (40 a 80°C). Além disso, foram determinadas as isotermas de sorção em temperaturas que simulam as condições de armazenamento e secagem (5 a 72°C) e as propriedades termodinâmicas. As sementes de pimenta Jalapeño apresentaram fibras (53,398 g/100g; b.u.), lipídios (21,662 g/100; b.u.) e proteínas (15,103 g/100; b.u.) como os principais componentes, além de compostos fenólicos totais (30,911 mg GAE /g) e de flavonoides (17,467 mg de equivalentes de catequina /g). Entre os cinco modelos matemáticos testados para a cinética de secagem das sementes, o modelo de Page foi o que melhor ajuste ($R_{Adj}^2 \geq 0,9929$). Os coeficientes de difusão de água (D_{eff}) aumentaram com o aumento da temperatura. O modelo de GAB foi selecionado ($R_{Adj}^2 \geq 0,9920$; $RMSE \leq 3,80 \cdot 10^{-3}$ e $\chi^2 \leq 1,447 \cdot 10^{-5}$) para traçar as isotermas de sorção, que foram classificadas como Tipo II. O calor isostérico líquido de adsorção (4578 a 9588 J/mol) e a entropia diferencial (24,990 a 13,352 kJ/mol) apresentaram comportamento decrescente com o aumento do teor de umidade de equilíbrio, enquanto a entalpia diferencial (-4578 a -9588 J/mol) aumentou com o teor de umidade de equilíbrio. A teoria da compensação entalpia-entropia foi confirmada, e a energia de Gibbs ($\Delta G = -1189,20$ J/mol) indicou que o fenômeno de adsorção é espontâneo.

Palavras-chave: Subprodutos; Umidade de equilíbrio; Atividade de água; Modelagem matemática; Composição centesimal.

1 INTRODUÇÃO

Atualmente no setor agroindustrial, a tendência é recuperar e aproveitar todos os subprodutos industriais gerados, visando a produção sustentável de alimentos, indo de encontro com os esforços para zerar as emissões de carbono (VALDEZ-MORALES et al., 2021). A pimenta Jalapeño (*Capsicum annuum* L.) destaca-se como cultura de notável importância mundial, devido a sua versatilidade culinária e industrial (MORENO-ESCAMILLA et al., 2015). Após a colheita, aproximadamente 20% da pimenta é consumida em sua forma *in natura*, e 60% da produção é destinada a produtos processados como especiarias, produtos enlatados e molhos (NIP, 2005; SANDOVAL-CASTRO et al., 2017). Após o processamento, o subproduto da pimenta Jalapeño é uma mistura de 95% de sementes e 5% de cascas, talos e polpa não utilizada (VALDEZ-MORALES et al., 2021) que são geradas por diferentes etapas do processamento industrial.

As sementes de pimenta Jalapeño são fontes de fibras ($\approx 43\%$, db), proteínas ($\approx 20\%$, db) e lipídeos ($\approx 17\%$, db) (SANDOVAL-CASTRO et al., 2017). O óleo da semente de pimenta Jalapeño é fonte de importantes nutracêuticos lipofílicos: β -caroteno, ácidos graxos essenciais, capsaicina, α -tocoferol e dihidrocapsaicina (MA et al., 2019; VALDEZ-MORALES et al., 2021; ZHANG et al., 2019); e possui sabor agradável semelhante ao óleo de girassol (EMBABY & MOKHTAR, 2011; JARRET et al., 2013). Seu alto teor de fibras demonstra o potencial dessas sementes para serem recuperadas e incorporadas como ingredientes em alimentos processados (BIS-SOUZA et al., 2019; 2020; BOUAZIZ et al., 2020; GARCIA, MILANI e RIES, 2020). O teor de proteínas também parece ser viável para a recuperação, o que vai de encontro com as tendências globais para o uso de proteínas vegetais como fonte nutricional de alta qualidade para a dieta humana (SÁ, MORENO e CARCIOFI, 2020; SIM et al., 2021; TAN, NAWAZ e BUCKOW, 2021). Além disso, esse subproduto também possui compostos bioativos com capacidade antioxidante (SANDOVAL-CASTRO et al., 2017).

No entanto, um dos principais desafios na valorização dos subprodutos agroindustriais e na conversão em produtos de alto valor está ligado ao manejo e estabilização devido ao teor de umidade que pode ocasionar alterações físicas e químicas indesejáveis. Dessa forma, o subproduto agroindustrial precisa passar pelo processo de secagem para redução do teor de umidade que consequentemente promove a redução da massa e volume, diminuindo os custos de transporte e armazenamento, aumentando a estabilidade frente as reações oxidativas, enzimáticas e no crescimento de

microrganismos (ROSA et al., 2015). Além disso, uma vez seco o subproduto apresenta características adequadas para o armazenamento que podem garantir a sua disponibilidade e integridade para futuras aplicações.

Para tanto, algumas informações são necessárias para o correto dimensionamento de equipamentos e processos de secagem, bem como para prever a estabilidade do produto. As isotermas de sorção de água são curvas que descrevem a relação entre a atividade de água do alimento (a_w) e seu correspondente teor de umidade de equilíbrio (X_{eq}) a uma dada temperatura, fornecendo informações sobre a disponibilidade e interações entre as moléculas de água e os componentes da matriz sólida (FREITAS et al., 2016). Além da disponibilidade de moléculas de água, a força de ligação da água aos componentes da matriz também pode ser avaliada por entalpia diferencial, enquanto o número de sítios de sorção disponíveis em um nível de energia específico pode ser determinado por entropia diferencial (MOREIRA et al., 2008). Essas duas propriedades termodinâmicas ainda podem ser correlacionadas pela energia livre de Gibbs que é utilizado para verificar a espontaneidade do processo (RIZVI, 2005).

Assim, o objetivo principal deste estudo foi determinar a composição centesimal, a cinética de secagem e as propriedades termodinâmicas das sementes de pimenta Jalapeño (*Capsicum annuum* L.) em condições de armazenamento e de secagem. Posteriormente, a modelagem matemática dos dados experimentais.

2 OBJETIVO

2.1 Objetivo geral

O presente projeto de pós-doutorado teve como objetivo determinar e avaliar a cinética de secagem e as propriedades termodinâmicas das sementes de pimenta Jalapeño (*Capsicum annuum* L.).

2.2 Objetivos específicos

- Determinar a composição centesimal das sementes de pimenta Jalapeño (*Capsicum annuum* L.);
- Extração e caracterização físico-química do óleo das sementes de pimenta Jalapeño (*Capsicum annuum* L.);
- Realizar a cinética de secagem das sementes de pimenta Jalapeño (*Capsicum annuum* L.) nas temperaturas de 40, 50, 60, 70 e 80°C;
- Modelagem matemática dos dados experimentais da cinética de secagem;

- Determinar o coeficiente de difusão efetivo da água nas temperaturas de secagem;
- Avaliar a influência da temperatura na cinética de secagem e no coeficiente de difusão efetivo da água;
- Determinar as isotermas de sorção das sementes de pimenta Jalapeño (*Capsicum annuum* L.) nas temperaturas de condições de armazenamento (8 °C, 16 °C, 24 °C e 32 °C) e de secagem (40 °C, 48 °C, 56 °C, 64 °C e 72 °C).
- Determinar as propriedades termodinâmicas utilizando as isotermas de sorção.

3 MATERIAL E MÉTODOS

3.1 Matéria prima

Pimentas Jalapeño frescas (*Capsicum annuum* L.), foram adquiridas em mercado local (São José do Rio Preto - SP, Brasil) e transportadas para o Laboratório de Medidas Físicas da Unesp (Campus São José do Rio Preto). Os frutos foram lavados com água destilada, em seguida o pedúnculo foi removido e as sementes foram separadas manualmente e acondicionadas em sacos de polipropileno de baixa densidade, permanecendo acondicionadas em temperatura em torno de 4 °C até o momento da secagem.

3.2 Caracterização de sementes de pimenta Jalapeño

3.2.1 Composição centesimal

A composição centesimal para a caracterização das sementes de pimenta Jalapeño foi realizada em triplicata de acordo com as metodologias descritas pelos métodos da *Association of Official Analytical Chemists* (AOAC) e *American Oil Chemists' Society* (AOCS).

3.2.1.1 Umidade

O teor de umidade foi determinado utilizando uma estufa a 105 °C via método gravimétrico (AOAC, 2007).

3.2.1.2 Cinzas

O teor de cinzas foi determinado pelo método gravimétrico com auxílio de forno tipo mufla à 550 °C até obtenção de cinzas brancas ou ligeiramente acinzentadas (AOAC, 2007).

3.2.1.3 Lipídeos

O teor de lipídeos foi determinado por método de Soxhlet utilizando éter de petróleo de acordo com o método Ai 3-75 (AOCS, 2009) que será mais detalhado na seção (3.2.3) “Extração e caracterização físico-química do óleo”.

3.2.1.4 Proteínas

Foi utilizado o método de micro-Kjeldahl para determinação do teor de nitrogênio total da amostra e 6,25 como fator de conversão de nitrogênio total para teor de proteína bruta (AOAC, 2007).

3.2.1.5 Fibras alimentares totais

O teor de fibra total foi determinado pelo método enzimático-gravimétrico conforme metodologia proposta pela AOAC (AOAC, 2007). O método baseia-se na remoção do amido e proteínas utilizando α -amilase, protease e glucoamilase termoestáveis, promovendo a separação das frações de fibras solúveis e insolúveis com o auxílio de uma centrífuga. Com isso, o teor de fibras totais foi calculado a partir da soma das frações de fibras solúveis e insolúveis.

3.2.1.6 Carboidratos

O teor de carboidratos foi calculado por diferença, subtraindo-se de 100, o somatório dos teores de umidade, cinzas, lipídeos e proteínas e fibras.

3.2.2 Compostos fenólicos totais e teor de flavonoides

Os compostos fenólicos totais foram determinados usando o método espectrofotométrico de Singleton, Orthofer e Lamuela-Raventós (1999). A absorbância foi lida a 740 nm. A curva de calibração foi elaborada com ácido gálico (Dinâmica, Brasil) e os resultados foram expressos em mg de ácido gálico equivalente por 100 g de amostra (mg GAE / 100 g).

O teor de flavonóides totais foi determinado por espectrofotometria, fundamentado no protocolo descrito por Zhishen, Mengcheng e Jianming (1999) utilizando solução metanólica de $AlCl_3$. A catequina foi usada como um flavonoide de referência. Os resultados foram expressos em mg equivalentes de catequina por g de extrato de semente.

3.2.3 Extração e caracterização físico-química do óleo

A preparação e a extração do óleo das sementes de pimenta Jalapeño foi realizada seguindo o protocolo descrito por Rosa et al. (2021). As sementes foram secas à 60 ± 2 °C, moídas em moinho rotativo (modelo MA340, Marconi, Piracicaba, SP, Brasil), peneiradas em peneira de 30 mesh, a fim de obter o pó com granulometria inferior a 595 µm para a extração. Após, dez gramas do pó foram inseridos em cartuchos de papel de filtro, sendo posicionados no extrator Soxhlet de acordo com o método Ai 3-75 (AOCS, 2009). A extração do óleo foi realizada usando éter de petróleo (40 - 60 °C por 6 h), o solvente foi removido sob pressão reduzida a 60 °C. Posteriormente o óleo foi armazenado em frasco de vidro âmbar a -18 °C.

Após a extração, o índice de iodo (g de I_2 /100 g) (método de Cd 1-25), índice de refração a 40 °C (método Cc 7-25), ácidos graxos livres (% em ácido oleico w/w) (método Ca 5a-40), índice de peróxido (mEq peróxido/kg) (método Cd 8-53), valor ácido (mg KOH/g) e a matéria de saponificação (mg de KOH/g) (método de Cd 3-25) foram determinados usando os métodos oficiais da *American Oil Chemists' Society* (AOCS, 2009). A matéria insaponificável (%) foi determinada de acordo com Lozano et al. (1993).

3.3 Secagem convectiva

Um secador convectivo de escala piloto com sistema de controle de processo baseado na tecnologia Fieldbus (SMAR Industrial Equipment Ltda., Sertãozinho, Brasil) foi usado para determinar a cinética de secagem das sementes de pimenta Jalapeño. O mesmo equipamento foi usado e descrito anteriormente em estudo de Nicoletti, Telis-Romero e Telis (2007) e Rosa et al. (2021). As cinéticas de secagem das sementes de pimenta Jalapeño foram realizadas nas temperaturas de 40, 50, 60, 70 e 80 °C com a velocidade do ar seco constante de 1,3 m/s. Após o secador atingir as condições de estado estacionário, as amostras foram distribuídas uniformemente na câmara como uma camada fina (espessura da camada: 8 mm; massa da camada: 200 g). A variação de peso, ou seja, redução do teor de umidade foi acompanhada por meio de pesagens periódicas durante o processo de secagem até atingir o peso constante. O teor de umidade foi determinado pelo método gravimétrico conforme foi supracitado.

A partir dos dados de umidade foi determinada a razão de umidade (RU) (Equação 1) e posteriormente foram ajustados os matemáticos: Henderson-Pabis (Equação 2)

(HENDERSON & PABIS, 1961), Lewis (Equação 3) (LEWIS, 1921), Page (Equação 4) (PAGE, 1949) e Wang e Singh (Equação 5) (WANG & SINGH, 1978).

$$RU = \frac{U_t - U_{eq}}{U_i - U_{eq}} \quad (1)$$

$$RU = A \cdot \exp(-K \cdot t) \quad (2)$$

$$RU = \exp(-K \cdot t) \quad (3)$$

$$RU = \exp(-K \cdot t^N) \quad (4)$$

$$RU = 1 + A \cdot t + B \cdot t^2 \quad (5)$$

em que RU é a razão de umidade (adimensional), U_t é a umidade no tempo t (% b.s), U_i é a umidade inicial (% b.s), U_{eq} é a umidade de equilíbrio (% b.s), A, B e N são parâmetros dos modelos (adimensional), t é o tempo (s) e K é a constante de secagem, (s^{-1} ou s^{-n}).

Os coeficientes de difusão da água (D_{eff}) de água das sementes de pimenta Jalapeño foram determinados a partir da segunda lei de Fick para placas planas infinitas que, integrada, é apresentada na forma expandida de acordo com a Equação (6) (CRANK, 1975).

$$RU = \frac{8}{\pi^2} \sum_{n=0}^{\infty} \frac{1}{(2n+1)^2} \exp\left(\frac{-(2n+1)^2 \pi^2 D_{eff} t}{4L^2}\right) \quad (6)$$

sendo que RU é a razão de umidade (adimensional); t é o tempo (min.); D_{eff} é o coeficiente de difusão de água (m^2/s); L é a espessura inicial da amostra (mm); e n é o número de termos da série.

3.4 Isotermas de sorção de água

As isotermas de sorção de água das sementes de pimenta Jalapeño foram determinadas através do método gravimétrico estático em nove temperaturas que simulam condições de armazenamento (8 °C, 16 °C, 24 °C e 32 °C) e de secagem (40 °C, 48 °C, 56 °C, 64 °C e 72 °C). Para isso, foram utilizadas onze soluções salinas saturadas com

diferentes sais ($\text{Mg}(\text{NO}_3)_2$, MgCl_2 , MgNO_3 , LiBr , LiCl , NaBr , NaNO_3 , NaCl , KBr , KCl , $\text{K}_2\text{C}_2\text{H}_3\text{O}_2$) que foram colocadas em dessecadores de vidro. Essas soluções salinas saturadas atingiram um intervalo de umidade relativa entre 4,8% e 92,1%.

As temperaturas de armazenamento foram simuladas em uma câmara tipo BOD (MA415, Marconi, Piracicaba, Brasil) e as temperaturas de secagem foram simuladas em estufa (MA030, Marconi, Piracicaba, Brasil). As atividades de água (a_w) das soluções salinas em diferentes temperaturas foram obtidas de acordo com correlações de dados de estudos realizados por Labuza (1963) e Martins et al. (2023) conforme apresentado na Tabela 1.

Tabela 1. Atividade de água de soluções salinas saturadas em diferentes temperaturas.

Sal	Temperatura (°C)								
	8	16	24	32	40	48	56	64	72
LiBr	0,072	0,068	0,064	0,061	0,058	0,055	0,052	0,050	0,048
LiCl	0,126	0,120	0,115	0,110	0,105	0,101	0,097	0,094	0,091
$\text{Mg}(\text{NO}_3)_2$	0,140	0,139	0,138	0,137	0,136	0,135	0,134	0,133	0,132
$\text{K}_2\text{C}_2\text{H}_3\text{O}_2$	0,282	0,259	0,239	0,222	0,206	0,193	0,180	0,169	0,160
MgCl_2	0,336	0,331	0,327	0,322	0,318	0,315	0,311	0,308	0,304
MgNO_3	0,576	0,556	0,538	0,521	0,506	0,492	0,479	0,467	0,455
NaBr	0,628	0,601	0,577	0,555	0,535	0,516	0,499	0,484	0,469
NaNO_3	0,780	0,761	0,743	0,727	0,712	0,697	0,684	0,672	0,660
NaCl	0,798	0,780	0,764	0,748	0,734	0,721	0,709	0,697	0,686
KBr	0,841	0,827	0,814	0,801	0,790	0,779	0,769	0,760	0,751
KCl	0,921	0,888	0,858	0,831	0,806	0,782	0,761	0,741	0,723

Fonte: Labuza (1963) e Martins et al. (2023)

Aproximadamente 3 gramas das sementes de pimenta Jalapeño foram colocadas em recipientes. Em seguida, foram inseridos nos dessecadores contendo as diferentes soluções salinas saturadas. A amostra foi pesada em balança analítica (AUW220D, Shimadzu, Japão) até atingir peso constante. A umidade de equilíbrio (X_{eq}) foi determinada em base seca após a amostra atingir peso constante durante três pesagens consecutivas.

Foi plotado o gráfico de isotermas a partir dos dados de umidade de equilíbrio (X_{eq}) versus atividade de água (a_w). Posteriormente foi ajustado o modelo matemático de GAB (Equação 7) (LEWICKI, 2008), Peleg (Equação 8) (PELEG, 1993), Oswin

(Equação 9) (OSWIN, 1946), Henderson (Equação 10) (HENDERSON, 1952) e Halsey (Equação 11) (HALSEY, 1948) aos dados experimentais.

$$x_{eq} = \frac{X_m \cdot C \cdot k \cdot a_w}{(1 - k \cdot a_w) \cdot (1 + (C - 1) \cdot k \cdot a_w)} \quad (7)$$

$$x_{eq} = k_1 \cdot a_w^{n_1} + k_2 \cdot a_w^{n_2} \quad (8)$$

$$x_{eq} = M \cdot \left(\frac{a_w}{1 - a_w} \right)^N \quad (9)$$

$$x_{eq} = \left(-\frac{1}{H_1} \cdot \ln(1 - a_w) \right)^{\frac{1}{H_2}} \quad (10)$$

$$x_{eq} = \left(-h_1 \cdot \ln(a_w) \right)^{-\frac{1}{h_2}} \quad (11)$$

em que x_{eq} é umidade de equilíbrio (b.s), a_w é atividade de água, M , N , k , k_1 , k_2 , n_1 , n_2 , H_1 , H_2 , h_1 , h_2 , X_m , C e k são os parâmetros dos modelos.

3.5 Propriedades termodinâmicas

3.5.1 Calor isostérico líquido de sorção

De acordo com Polachini et al., (2016) o calor isostérico líquido de sorção (q_{st}) é uma propriedade invariante com a temperatura ao contrário da isoterma. É uma propriedade termodinâmica que descreve a energia de ligação entre a matriz e as moléculas de água. O calor isostérico líquido de sorção (q_{st}) foi determinado a partir da inclinação da Equação de Clausius-Clapeyron (Equação 12) em que foi utilizado o coeficiente angular da reta $\ln(a_w)$ versus o inverso da temperatura ($1/T$) com umidade de equilíbrio constante (RIZVI, 2005).

$$\frac{\partial(\ln a_w)}{\partial\left(\frac{1}{T}\right)} \Big|_{x_{eq}} = -\frac{q_{st}}{R} \quad (12)$$

em que, a_w é a atividade de água (decimal), T é a temperatura absoluta (K) e R é a constante universal dos gases (8,314 J mol K⁻¹).

3.5.2 Entropia, entalpia e energia de Gibbs

Os valores de entropia (ΔS , $\text{J}\cdot\text{mol}^{-1}\cdot\text{K}^{-1}$) e entalpia diferencial (ΔH , $\text{J}\cdot\text{mol}^{-1}$) foram obtidos através da Equação (13) utilizando o mesmo procedimento de cálculo do calor isostérico líquido de sorção (q_{st}).

$$\ln(a_w) = -\frac{\Delta H}{RT} + \frac{\Delta S}{R} \quad (13)$$

A energia livre de Gibbs (ΔG , $\text{J}\cdot\text{mol}^{-1}$), que representa a energia livre disponível para realizar o trabalho útil e avaliar a espontaneidade do processo (KOUA et al., 2014) foi calculada usando a Equação (14) (RIZVI, 2005).

$$\Delta G = RT \cdot \ln a_w \quad (14)$$

3.6 Análise estatística

Os resultados da composição centesimal, dos compostos fenólicos totais, do teor de flavonoides e da caracterização físico-química do óleo foram apresentados com média $\pm$ desvio padrão. A qualidade do ajuste dos modelos matemáticos da cinética de secagem e das isotermas de sorção foi avaliada partir do coeficiente de determinação ajustado (R_{adj}^2), qui-quadrado reduzido (χ^2) e a raiz quadrada do erro médio (RQME), calculados com o auxílio do software OriginPro 8.0 (OriginLab Corporation, Northampton, MA).

4. RESULTADOS

4.1. Composição centesimal

A composição centesimal das sementes de pimenta Jalapeño está apresentada na Tabela 2 em triplicata, com média e desvio padrão e em base úmida (b.u.) (g de componente/100g de amostra). Fibras, lipídeos e proteínas são os componentes que apresentam em maior quantidade, os quais agregam valor nutricional às sementes, apresentando potenciais aplicações para o desenvolvimento de novos produtos alimentícios e não alimentícios.

Alguns autores relataram semelhança em alguns componentes como, Onyeike e Acheru (2002) no teor de proteínas, com a semente de mamona; Rosa et al. (2021) no teor de lipídeos e cinzas com sementes de mamão; e Al-Farsi e Lee (2008) no teor de fibras totais, com semente de tâmara.

O alto valor nutricional determinado em subprodutos de vegetais e frutas se destaca devido à possibilidade de utilização nas formulações de produtos alimentícios como, produtos cárneos (BOUAZIZ et al., 2020; DE MELO et al., 2024), massas (TETERYCZ & SOBOTA, 2023) e produtos lácteos (ŠEREGEL et al., 2019). Dessa forma, a semente pimenta Jalapeño apresenta alto potencial de aplicação nas indústrias alimentícias, devido ao seu teor de fibras totais superior a 50% e compostos bioativos.

Tabela 2. Composição centesimal das sementes de pimenta Jalapeño (base úmida; b.u.)

	A1	A2	A3	Média ± dp
Umidade	2,384	2,445	2,785	2,538 ± 0,216
Cinzas	4,008	3,708	3,038	3,585 ± 0,497
Proteínas	14,098	15,213	15,997	15,103 ± 0,954
Lipídeos	21,798	22,004	21,184	21,662 ± 0,427
Fibras Insolúveis	52,140	51,041	51,688	51,623 ± 0,552
Fibras Solúveis	1,771	1,844	1,709	1,775 ± 0,068
Fibras Totais	53,911	52,885	53,397	53,398 ± 0,513
Carboidratos	3,801	3,745	3,599	3,715 ± 0,104

4.2. Compostos fenólicos totais e teor de flavonoides

O teor de compostos fenólicos totais e de flavonoides (Tabela 3) foram de 30,911 mg de equivalentes de ácido gálico /g de extrato da semente e 17,467 mg de equivalentes de catequina /g de extrato da semente, respectivamente. Valores considerados promissores ao serem determinados a partir do extrato de um subproduto. Sora et al. (2015) determinaram que o extrato das sementes de pimentas do gênero *Capsicum* apresenta atividade antioxidante superior ao extrato da polpa. O extrato das sementes de pimenta Jalapeño apresentaram teores superiores de compostos fenólicos totais comparados com o extrato das sementes de pimenta vermelha (*Capsicum frutescens* L.), em que foi de 26,15 equivalentes de ácido gálico (GAE mg/g) (GURNANI, et al., 2015).

Várias características benéficas à saúde são apresentadas a partir dos compostos supracitados, como atividade antioxidante, antimicrobiana e anticancerígeno, proveniente do extrato da semente de pimenta (GURNANI et al., 2015). Esse potencial nutracêutico possibilita a utilização desse subproduto na formulação de novos produtos em diversas áreas, como alimentícia e farmacêutica.

Tabela 3. Compostos fenólicos totais e teor de flavonoides das sementes de pimenta Jalapeño.

	A1	A 2	A3	Média±dp
Fenólicos totais*	28,979	30,742	33,011	30,911 ± 2,021
Flavonoides**	17,233	19,177	15,992	17,467 ± 1,605

* mg de equivalentes de ácido gálico /g de extrato da semente

** mg de equivalentes de catequina /g de extrato da semente

4.3. Caracterização físico-química do óleo

Na Tabela 4, são apresentados vários parâmetros que foram analisados para a caracterização físico-química do óleo obtido das sementes de pimenta Jalapeño.

Os resultados obtidos para o índice de refração, índice de iodo, índice de saponificação e índice de peróxidos foram semelhantes ao do óleo de semente de pimenta vermelha (AZABOU et al., 2017). O teor de ácidos graxos livres foi menor em comparação com a semente de mamão (1,26%) (ROSA et al. 2021) e superior ao óleo de girassol, milho e soja (0,09 a 0,13%) (JORGE et al., 2005).

Por fim, em relação ao índice de acidez, as sementes de pimenta jalapeño apresentaram valores inferiores aos das sementes de pimenta vermelha (14,1) (AZABOU et al., 2017).

Tabela 4. Caracterização físico-química do óleo das sementes de pimenta Jalapeño.

Parâmetros	A1	A2	A3	Média ± dp
Índice de refração (40 °C)	1,464	1,465	1,477	1,469 ± 0,007
Índice de iodo (g I ₂ /100 g de óleo)	168,159	166,139	169,710	168,003 ± 1,791
Índice de saponificação (mg KOH/g óleo)	200,690	198,863	204,443	201,332 ± 2,845
Índice de acidez (mg KOH/g óleo)	0,587	0,597	0,607	0,597 ± 0,010
Ácidos graxos livres (%)	0,448	0,446	0,461	0,452 ± 0,008
Índice de peróxidos (mEq peróxido/kg)	2,297	2,276	2,340	2,304 ± 0,033
Matéria insaponificável (%)	0,890	0,879	0,952	0,907 ± 0,039

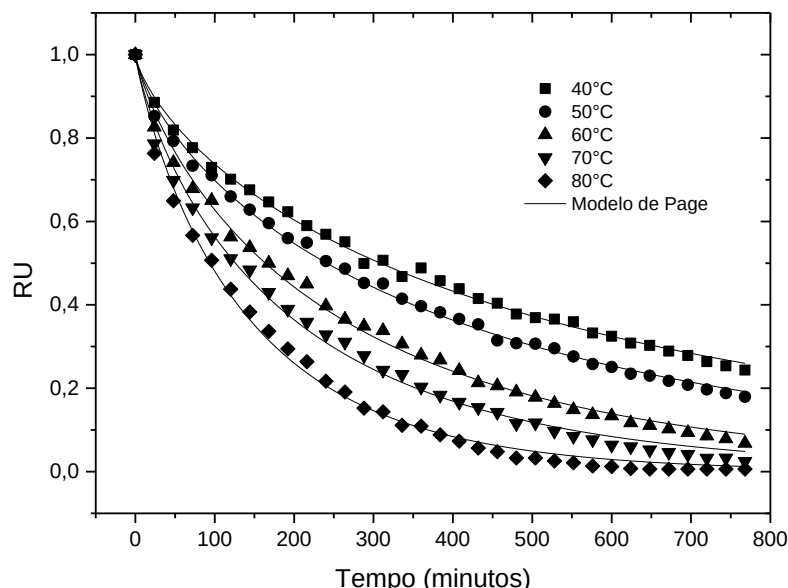
4.4. Secagem convectiva

A secagem é uma técnica tradicional que ainda é amplamente empregada para prolongar a vida útil dos alimentos, reduzir a instabilidade química e física e minimizar as perdas pós-colheita. Além disso, essa técnica tem sido aplicada a subprodutos devido ao seu alto valor nutricional, tornando as aplicações industriais promissoras. Como no caso das sementes de pimenta Jalapeño, um subproduto que apresenta alto teor de fibras e compostos bioativos, como compostos fenólicos totais e flavonoides, conforme supracitado.

A Figura 1 apresenta a razão de umidade (RU) em função do tempo de secagem das sementes de pimenta Jalapeño. Observou-se uma redução exponencial da RU ao longo do processo de secagem. Além disso, em tempos de secagem equivalentes, temperaturas mais altas resultaram em valores de RU mais baixos. Esse comportamento é esperado nos processos de secagem e foi relatado também para a secagem de sementes de abobora (MUJAFFAR & RAMSUMAIR, 2019), uva “Kyoho” (SRIDHAR &

CHARLES, 2019), camélia oleífera (YU et al., 2024) e pera espinhosa '*Ameclyae*' (HASSINI et al., 2018).

Figura 1. Razão de umidade (RU) em função do tempo de secagem das sementes de pimenta Jalapeño em diferentes temperaturas.



A umidade inicial das sementes pimenta Jalapeño foi de 10,769 g/100 g em b.s. Após 12,8h (768 min.) de secagem a diferentes temperaturas (40, 50, 60, 70 e 80°C), as umidades finais obtidas foram de 4,743, 3,933, 2,773, 2,280 e 1,843 g/100 g em b.s., respectivamente. De maneira geral, em todas as temperaturas, a maior perda de umidade prevaleceu no início da secagem, indicando uma maior transferência de massa e calor. No final do processo, observou-se uma redução na transferência de massa e calor.

A partir dos dados da razão de umidade, foram testados quatro modelos matemáticos: Page, Henderson-Pabis, Lewis e Wang & Singh. Os resultados obtidos estão apresentados na Tabela 5.

A escolha do modelo matemático para descrever a cinética de secagem das sementes de pimenta Jalapeño foi realizada com base nos coeficientes de ajuste do modelo, R_{Adj}^2 , χ^2 e RMSE. O modelo de Page foi o que apresentou melhor ajuste aos dados experimentais, com $R_{Adj}^2 \geq 0,9929$, $RMSE \leq 0,190$ e $\chi^2 \leq 4,51 \cdot 10^{-4}$. Da Silva et al. (2022) também apresentaram o modelo de Page como o melhor para descrever a cinética de secagem de sementes de melão “Neve” (*Cucumis melo sp.*). Além disso, é um modelo amplamente utilizado para a modelagem matemática de outros tipos de sementes, como

romã (DOYMAZ, 2012), camélia oleífera (YU et al., 2024) e pinhão-de-purga (KENENI, HVOSLEF-EIDE, MARCHETTI, 2019).

O modelo de Page apresenta dois parâmetros, K e N, que apresentaram uma tendência crescente com o aumento da temperatura. Essa mesma tendência nos parâmetros foi observada para sementes de uvas (ROBERTS; KIDD; PADILLA-ZAKOUR, 2008) e grão de milho (JITTANIT; SRZEDNICKI; DRISCOLL, 2010).

Tabela 5. Parâmetros de ajuste e constantes de modelos ajustados à cinética de secagem das sementes de pimenta Jalapeño em diferentes temperaturas.

Modelo	Temp. (°C)	Coeficiente de ajuste do modelo			Constante do modelo	
		R_{Adj}^2	χ^2	RMSE	Constante 1	Constante 2
Page	40	0,9968	$1,24 \cdot 10^{-4}$	0,0111	0,0106; K	0,7296; N
	50	0,9971	$1,33 \cdot 10^{-4}$	0,0116	0,0115; K	0,7480; N
	60	0,9955	$2,62 \cdot 10^{-4}$	0,0162	0,0114; K	0,8060; N
	70	0,9941	$3,61 \cdot 10^{-4}$	0,0190	0,0135; K	0,8152; N
	80	0,9929	$4,51 \cdot 10^{-4}$	0,0178	0,0135; K	0,8730; N
Henderson	40	0,9837	$6,39 \cdot 10^{-4}$	0,0253	0,8978; A	0,0018; K
	50	0,9871	$5,97 \cdot 10^{-4}$	0,0244	0,8932; A	0,0022; K
	60	0,9914	$5,05 \cdot 10^{-4}$	0,0225	0,9046; A	0,0033; K
	70	0,9911	$5,48 \cdot 10^{-4}$	0,0234	0,9030; A	0,0043; K
	80	0,9925	$4,80 \cdot 10^{-4}$	0,0188	0,9310; A	0,0064; K
Lewis	40	0,9451	$2,15 \cdot 10^{-3}$	0,0464	0,0021; K	
	50	0,9550	$2,07 \cdot 10^{-3}$	0,0455	0,0026; K	
	60	0,9756	$1,42 \cdot 10^{-3}$	0,0377	0,0037; K	
	70	0,9782	$1,34 \cdot 10^{-3}$	0,0366	0,0048; K	
	80	0,9903	$6,21 \cdot 10^{-4}$	0,0249	0,0067; K	
Wang & Singh	40	0,9528	0,0019	0,0431	-0,0021; A	$1,5087 \cdot 10^{-6}$; B
	50	0,9487	0,0024	0,0486	-0,0024; A	$1,8019 \cdot 10^{-6}$; B
	60	0,9358	0,0038	0,0612	-0,0029; A	$2,3529 \cdot 10^{-6}$; B
	70	0,9068	0,0057	0,0757	-0,0033; A	$2,8198 \cdot 10^{-6}$; B
	80	0,8744	0,0081	0,0898	-0,0039; A	$3,5845 \cdot 10^{-6}$; B

A partir da segunda lei de Fick para placas planas infinitas (Eq. 6) com doze termos, foram determinados os coeficientes de difusão de água (D_{eff}) para as temperaturas de secagem de 40, 50, 60, 70 e 80°C. O modelo matemático apresentou excelente ajuste aos dados experimentais ($R_{Adj}^2 \geq 0,9950$). Na Tabela 6, são apresentados os valores dos coeficientes de difusão de água (D_{eff}), variando de $1,648 \cdot 10^{-10}$ a $6,103 \cdot 10^{-10} \text{ m}^2/\text{s}$ com o aumento da temperatura, mantendo-se dentro do intervalo esperado para produtos biológicos (MUDAMBA; DRISCOLL; BUCKLE, 1996).

Zhao et al. (2019) justificam o aumento dos coeficientes de difusão de água (D_{eff}) com o aumento da temperatura devido ao aumento da pressão de vapor interna, o que

promove o rápido deslocamento das moléculas de água em direção à superfície do material.

Tabela 6. Coeficiente de difusão de água (Deff) das sementes de pimenta Jalapeño em diferentes temperaturas.

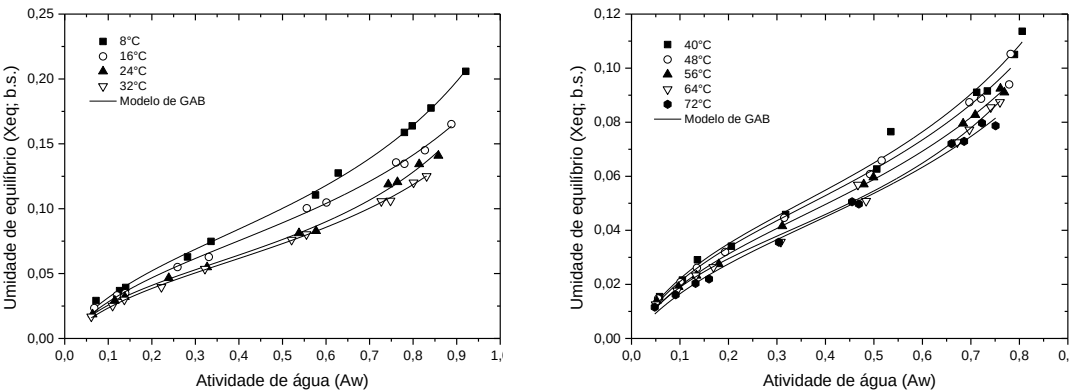
Temperatura (°C)	Deff (m ² /s)	RAdj ²
40	1,648 ·10 ⁻¹⁰	0,9971
50	2,108 ·10 ⁻¹⁰	0,9985
60	3,201 ·10 ⁻¹⁰	0,9977
70	4,173 ·10 ⁻¹⁰	0,9981
80	6,103 ·10 ⁻¹⁰	0,9950

4.5 Isotermas de sorção

As isotermas de sorção são gráficos que apresentam a atividade de água em relação à umidade de equilíbrio em temperaturas definidas. Ter esses gráficos disponíveis em temperaturas que simulam as condições de secagem e armazenamento é fundamental para compreender o comportamento de sorção da água e, conseqüentemente, avaliar a estabilidade do produto (POLACHINI et al., 2016).

A Figura 2 apresenta as isotermas de sorção das sementes de pimenta Jalapeño em nove temperaturas, que simulam condições de armazenamento (8 °C, 16 °C, 24 °C e 32 °C) e de secagem (40 °C, 48 °C, 56 °C 64 °C e 72 °C). As isotermas nas condições de secagem apresentaram menor influência da temperatura, mantendo-se próximas umas das outras, em comparação com as isotermas nas condições de armazenamento.

Figura 2. Isotermas de sorção de água para sementes de pimenta Jalapeño ajustadas ao modelo de GAB.



A umidade de equilíbrio apresenta comportamento crescente com o aumento da atividade de água, este comportamento foi observado em todas as temperaturas. Em contrapartida, é apresentado a redução da umidade de equilíbrio, com o aumento da temperatura e atividade de água constante. Esta redução da umidade de equilíbrio com aumento da temperatura é devido a maior energia cinética das moléculas de água, favorecendo maior agitação e consequentemente redução nas forças de ligações existente na região de sorção (AL-MUHTASEB; MCMINN; MAGEE, 2002).

De acordo com as classificações das isotermas apresentadas por Brunauer et al. (1940), as isotermas das sementes de pimenta Jalapeño nas temperaturas que simulam as condições armazenamento e secagem apresentaram comportamento tipo II, com formato de sigmoide (Figura 2). Para esta classificação, a isoterma é dividida em três regiões: a primeira região ($a_w < 0,3$) representa a umidade da monocamada (X_m), em que as moléculas de água estão fortemente ligadas à matriz alimentar; a segunda região ($0,3 \leq a_w < 0,6$) apresenta um comportamento quase linear, representando as multicamadas de água; e a terceira região ($a_w \geq 0,6$) é onde as moléculas de água estão fracamente ligadas à matriz alimentar, apresentando condições propícias para reações químicas e microbiológicas (POLACHINI et al., 2016).

Ao analisar a Tabela 6, que apresenta os coeficientes de ajuste obtidos na modelagem matemática dos dados experimentais, observa-se que os modelos de Halsey e Oswin apresentaram os menores valores de R_{Adj}^2 e os maiores valores de χ^2 e RMSE. Por outro lado, os modelos de Gab, Peleg e Henderson apresentaram os maiores valores de R_{Adj}^2 e menores valores de χ^2 e RMSE.

De acordo com Sánchez-Torres et al. (2021), diversos fatores devem ser considerados ao escolher um modelo matemático, incluindo o número de parâmetros, a qualidade do ajuste e o significado físico dos parâmetros. Diante disso, o modelo de Gab foi selecionado para traçar as isotermas de sorção das sementes de pimenta Jalapeño nas temperaturas que simulam as condições armazenamento e secagem (Figura 2). Este modelo é amplamente reconhecido na literatura por sua versatilidade (AL-MUHTASEB; MCMINN; MAGEE, 2004) e pela importância do parâmetro matemático X_m . Esse parâmetro representa o teor de umidade da monocamada, que está diretamente relacionado à estabilidade do alimento, e indica a quantidade de água fortemente adsorvida por sítios ativos na superfície da matriz alimentar (KUROZAWA et al., 2015).

O parâmetro X_m apresenta um comportamento decrescente com o aumento da temperatura, variando de 0,083 a 0,039 kg/kg (b.s) para temperaturas de 8 a 72°C,

respectivamente. De acordo com Zhang et al. (2022), esse comportamento pode ser explicado pelo aumento do nível de energia e, consequentemente, pela maior agitação das moléculas de água com o aumento da temperatura. Isso torna as moléculas de água mais instáveis, resultando no desprendendo da matriz alimentícia.

Além do parâmetro X_m , o modelo de GAB inclui os parâmetros C e k. De acordo com Blahovec (2004), para isotermas do tipo II, os valores esperados para esses parâmetros são: $0 < K \leq 1$ e $C > 2$. A Tabela 6 apresenta que os valores dos parâmetros obtidos estavam dentro do intervalo previsto por Blahovec (2004). Observou-se que o parâmetro C apresentou uma tendência crescente com o aumento da temperatura, enquanto o parâmetro k não apresentou uma tendência clara.

Tabela 6. Coeficientes e parâmetros dos modelos matemáticos ajustados aos dados de isotermas de sorção de sementes de pimenta Jalapeño.

Modelo	Temp. (°C)	Coeficiente de ajuste do modelo			Constante do modelo			
		R_{Adj}^2	χ^2	RMSE	C1	C2	C3	C4
GAB	8	0,9981	$0,770 \cdot 10^{-5}$	$2,78 \cdot 10^{-3}$	0,083; X_m	7,439; C	0,680; k	
	16	0,9974	$0,660 \cdot 10^{-5}$	$2,57 \cdot 10^{-3}$	0,078; X_m	7,483; C	0,640; k	
	24	0,9971	$0,595 \cdot 10^{-5}$	$2,44 \cdot 10^{-3}$	0,058; X_m	8,842; C	0,725; k	
	32	0,9973	$0,428 \cdot 10^{-5}$	$1,53 \cdot 10^{-3}$	0,055; X_m	8,937; C	0,711; k	
	40	0,9883	$1,447 \cdot 10^{-5}$	$3,80 \cdot 10^{-3}$	0,050; X_m	9,010; C	0,719; k	
	48	0,9920	$0,839 \cdot 10^{-5}$	$2,90 \cdot 10^{-3}$	0,049; X_m	8,799; C	0,707; k	
	56	0,9982	$0,161 \cdot 10^{-5}$	$1,27 \cdot 10^{-3}$	0,046; X_m	8,309; C	0,706; k	
	64	0,9928	$0,161 \cdot 10^{-5}$	$2,38 \cdot 10^{-3}$	0,045; X_m	9,678; C	0,769; k	
	72	0,9947	$0,567 \cdot 10^{-5}$	$1,93 \cdot 10^{-3}$	0,039; X_m	7,129; C	0,686; k	
Halsey	8	0,9174	$32,735 \cdot 10^{-5}$	$1,81 \cdot 10^{-2}$	$2,930 \cdot 10^{-3}$; h_1	2,278; h_2		
	16	0,9319	$17,519 \cdot 10^{-5}$	$1,32 \cdot 10^{-2}$	$3,330 \cdot 10^{-3}$; h_1	2,097; h_2		
	24	0,9583	$8,416 \cdot 10^{-5}$	$9,17 \cdot 10^{-3}$	$4,860 \cdot 10^{-3}$; h_1	1,852; h_2		
	32	0,9570	$6,844 \cdot 10^{-5}$	$8,27 \cdot 10^{-3}$	$5,080 \cdot 10^{-3}$; h_1	1,791; h_2		
	40	0,9610	$4,825 \cdot 10^{-5}$	$6,95 \cdot 10^{-3}$	$5,500 \cdot 10^{-3}$; h_1	1,700; h_2		
	48	0,9624	$3,958 \cdot 10^{-5}$	$6,29 \cdot 10^{-3}$	$5,780 \cdot 10^{-3}$; h_1	1,660; h_2		
	56	0,9690	$2,790 \cdot 10^{-5}$	$5,28 \cdot 10^{-3}$	$6,280 \cdot 10^{-3}$; h_1	1,597; h_2		
	64	0,9756	$1,919 \cdot 10^{-5}$	$4,60 \cdot 10^{-3}$	$7,040 \cdot 10^{-3}$; h_1	1,531; h_2		
	72	0,9634	$2,581 \cdot 10^{-5}$	$5,08 \cdot 10^{-3}$	$7,270 \cdot 10^{-3}$; h_1	1,499; h_2		
Henderson	8	0,9975	$9,820 \cdot 10^{-6}$	$3,13 \cdot 10^{-3}$	38,199; H_1	0,037; H_2		
	16	0,9973	$6,888 \cdot 10^{-6}$	$2,62 \cdot 10^{-3}$	54,075; H_1	0,040; H_2		
	24	0,9965	$7,115 \cdot 10^{-6}$	$2,67 \cdot 10^{-3}$	51,105; H_1	0,044; H_2		
	32	0,9990	$1,589 \cdot 10^{-6}$	$1,26 \cdot 10^{-3}$	63,375; H_1	0,024; H_2		
	40	0,9898	$1,266 \cdot 10^{-5}$	$3,56 \cdot 10^{-3}$	72,633; H_1	0,076; H_2		
	48	0,9932	$7,150 \cdot 10^{-6}$	$2,67 \cdot 10^{-3}$	81,030; H_1	0,063; H_2		
	56	0,9993	$6,741 \cdot 10^{-7}$	$8,20 \cdot 10^{-4}$	84,175; H_1	0,021; H_2		
	64	0,9932	$5,368 \cdot 10^{-6}$	$2,32 \cdot 10^{-3}$	84,936; H_1	0,061; H_2		
	72	0,9967	$2,347 \cdot 10^{-6}$	$1,53 \cdot 10^{-3}$	86,547; H_1	0,043; H_2		
Oswin	8	0,9665	$13,293 \cdot 10^{-5}$	$1,15 \cdot 10^{-2}$	0,095; M	0,349; N		
	16	0,9747	$6,499 \cdot 10^{-5}$	$8,06 \cdot 10^{-3}$	0,083; M	0,364; N		
	24	0,9876	$2,509 \cdot 10^{-5}$	$5,01 \cdot 10^{-3}$	0,073; M	0,401; N		

	32	0,9881	$1,897 \cdot 10^{-5}$	$4,36 \cdot 10^{-3}$	0,069; M	0,404; N		
	40	0,9851	$1,842 \cdot 10^{-5}$	$4,29 \cdot 10^{-3}$	0,062; M	0,416; N		
	48	0,9874	$1,330 \cdot 10^{-5}$	$3,65 \cdot 10^{-3}$	0,060; M	0,420; N		
	56	0,9935	$0,586 \cdot 10^{-5}$	$2,42 \cdot 10^{-3}$	0,056; M	0,431; N		
	64	0,9947	$0,418 \cdot 10^{-5}$	$2,50 \cdot 10^{-3}$	0,053; M	0,444; N		
	72	0,9894	$0,750 \cdot 10^{-5}$	$2,74 \cdot 10^{-3}$	0,051; M	0,451; N		
Peleg	8	0,9985	$0,610 \cdot 10^{-5}$	$2,47 \cdot 10^{-3}$	0,144; k_1	0,642; n_1	0,093; k_2	3,678; n_2
	16	0,9976	$0,625 \cdot 10^{-5}$	$2,50 \cdot 10^{-3}$	0,140; k_1	0,689; n_1	0,058; k_2	4,390; n_2
	24	0,9973	$0,550 \cdot 10^{-5}$	$2,35 \cdot 10^{-3}$	0,102; k_1	0,589; n_1	0,085; k_2	3,463; n_2
	32	0,9991	$0,151 \cdot 10^{-5}$	$1,23 \cdot 10^{-3}$	0,117; k_1	0,697; n_1	0,062; k_2	5,402; n_2
	40	0,9901	$1,228 \cdot 10^{-5}$	$3,50 \cdot 10^{-3}$	0,113; k_1	0,734; n_1	1,715; k_2	21,412; n_2
	48	0,9912	$0,922 \cdot 10^{-5}$	$3,04 \cdot 10^{-3}$	0,093; k_1	0,642; n_1	0,056; k_2	4,091; n_2
	56	0,9989	$0,103 \cdot 10^{-5}$	$1,02 \cdot 10^{-3}$	0,084; k_1	0,631; n_1	0,050; k_2	3,277; n_2
	64	0,9956	$0,350 \cdot 10^{-5}$	$2,49 \cdot 10^{-3}$	0,074; k_1	0,593; n_1	0,062; k_2	3,387; n_2
	72	0,9973	$0,191 \cdot 10^{-5}$	$1,38 \cdot 10^{-3}$	0,029; k_1	0,338; n_1	0,080; k_2	1,349; n_2

4.6 Propriedades termodinâmicas

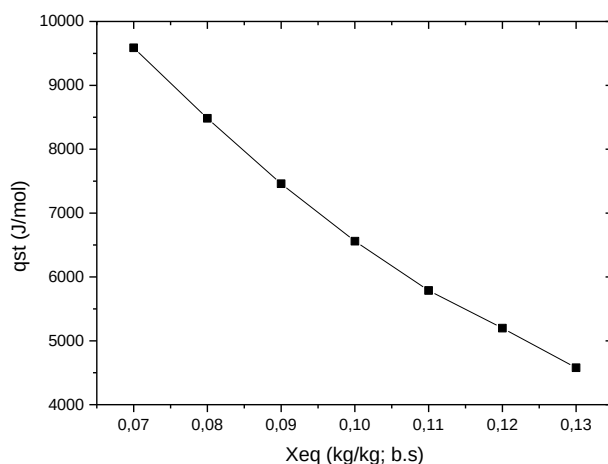
4.6.1 Calor isostérico líquido de adsorção

O calor isostérico líquido de adsorção (qst) é uma propriedade termodinâmica que apresenta o estado da água na matriz alimentar, proporcionando informações sobre a estabilidade física, química e microbiológica. Além disso, é empregado para quantificar a energia necessária em um processo de secagem (KOUA et al., 2014).

Na Figura, 3 é apresentado o calor isostérico líquido de adsorção (qst) em função da umidade de equilíbrio, variando de 4578 a 9588 J/mol em uma faixa de umidade de equilíbrio de 0,07 a 0,13 kg/kg (b.s). Os maiores valores do calor isostérico líquido de adsorção (qst) foram obtidos nos menores teores de umidade de equilíbrio, devido a presença de sítios ativos proporcionando uma maior energia de interação entre as moléculas de água e a matriz da semente de pimenta Jalapeño. Por outro lado, os menores valores calor isostérico líquido de adsorção (qst) foram obtidos nos maiores teores de umidade de equilíbrio, devido à menor disponibilidade de locais para sorção (KOUA et al., 2014). Isso indica a presença de umidade na forma livre, resultando em valores de calor isostérico líquido de adsorção (qst) próximo da água pura (MCMINN & MAGEE, 2003).

Essa mesma tendência foi observada em sementes de mamão (ROSA et al., 2021), semente de abóbora (TEXEIRA; ANDRADE; DEVILLA, 2018), sementes de chia inteiras (ARSLAN-TONTUL, 2020), sementes de uva (MALEKI MAJD et al., 2013) e sementes de melão (MALLEK-AYADI; BAHLOUL; KECHAOU, 2020).

Figura 3. Calor isostérico líquido de adsorção em função do teor de umidade de equilíbrio.



4.6.2 Entropia, entalpia e energia de Gibbs

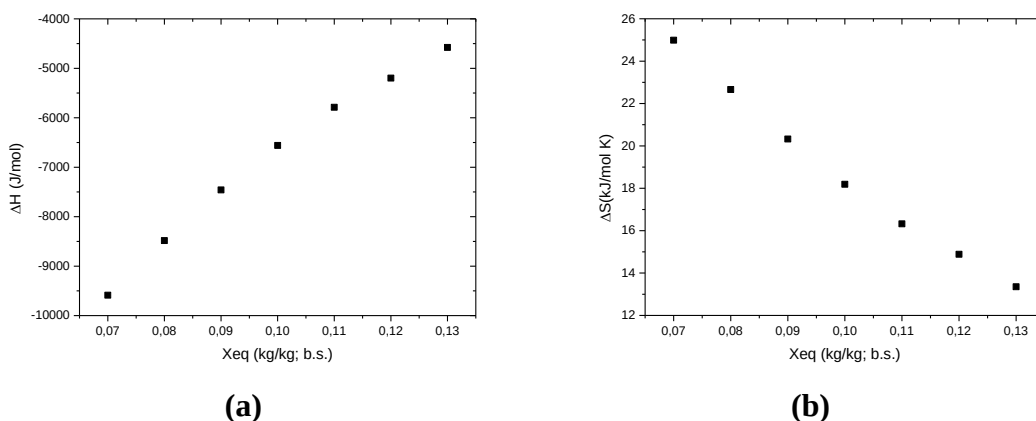
A entalpia diferencial e a entropia diferencial estão apresentadas na Figura 4, com o teor de umidade de equilíbrio variando de 0,07 a 0,13 em base seca.

Na Figura 4(a), a entalpia diferencial varia de -4578 a -9588 J/mol, apresentando comportamento crescente com o aumento do teor de umidade. Os valores negativos caracterizam um processo exotérmico e um processo de sorção envolvido por forças de ligação entre as moléculas de água e a matriz alimentar (APOSTOLOPOULOS & GILBERT, 1990).

A entropia diferencial está associada às configurações espaciais existente entre a interface água e sorvente, bem como ao grau de desordem ou aleatoriedade no sistema de sorção de água. A entropia diferencial variou de 24,990 a 13,352 kJ/mol/K (Figura 4(b)). Os maiores valores de entropia indicam maior desordem, ou seja, requer maior quantidade de energia para remover as moléculas de água (RIZVI, 2014).

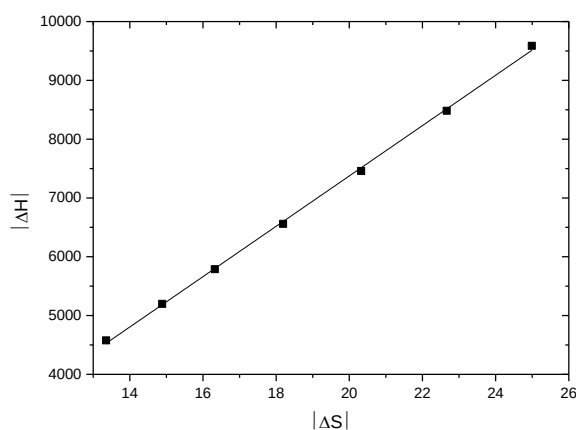
Comportamento decrescente da entropia é apresentado com o aumento da umidade de equilíbrio (Figura 4(b)) devido a redução da disponibilidade de locais de sorção e a perda do movimento rotacional das moléculas de água (KUROZAWA et al., 2015).

Figura 4. Entalpia e entropia em função do teor de umidade de equilíbrio.



Na Figura 5, é apresentada a correlação linear entre entropia (ΔS) e a entalpia (ΔH) utilizando as Eq. 13 e 14. O ajuste foi excelente, com um R^2 ajustado superior a 0,999, confirmando a teoria da compensação entalpia-entropia. Além, disso a energia de Gibbs foi determinada a partir dessa correlação, resultando em um valor de -1189,20 J/mol, o que indica que o fenômeno de adsorção é espontâneo ($-\Delta G$). Essa correlação linear entre entalpia e entropia também foi observada para sementes de mamão (ROSA et al., 2021), sementes de girassol (CAMPOS et al., 2019), sementes de pera espinhosa (HASSINI et al., 2015) e semente de beterraba (De Oliveira et al., 2015).

Figura 5. Regressão linear entre entropia diferencial e entalpia diferencial.



5 CONCLUSÃO

As sementes de pimenta Jalapeño demonstraram um alto potencial de reaproveitamento devido ao seu elevado teor de fibras e ao potencial nutracêutico conferido pelos fenólicos totais e flavonoides. O óleo extraído apresentou características

aceitáveis em comparação com outros óleos comestíveis. A cinética de secagem apresentou a redução da razão de umidade ao longo do tempo. O modelo matemático de Page proporcionou o melhor ajuste aos dados experimentais da cinética de secagem. Observou-se que o coeficiente de difusividade aumentou com a temperatura. As isotermas de sorção foram classificadas como tipo II, com um formato sigmoide. O modelo de GAB foi escolhido para traçar as isotermas de sorção devido à qualidade do ajuste e ao significado físico do parâmetro X_m (umidade de monocamada). O calor isostérico líquido de adsorção (qst) aumentou com a redução dos teores de umidade de equilíbrio, comportamento semelhante foi observado para a entropia diferencial, enquanto a entalpia diferencial aumentou com o teor de umidade. A teoria da compensação entalpia-entropia foi confirmada, demonstrando que o fenômeno de adsorção é espontâneo, como indicado pelo valor negativo da energia de Gibbs.

6 REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

AL-FARSI, M. A.; LEE, C. Y. Optimization of phenolics and dietary fibre extraction from date seeds. **Food chemistry**, v. 108, n. 3, p. 977-985, 2008.

AL-MUHTASEB, A. H.; MCMINN, W. A. M.; MAGEE, T. R. A. Moisture sorption isotherm characteristics of food products: a review. **Food and bioproducts processing**, v. 80, n. 2, p. 118-128, 2002.

AL-MUHTASEB, A. H.; MCMINN, W. A. M.; MAGEE, T. R. A. Water sorption isotherms of starch powders: Part 1: Mathematical description of experimental data. **Journal of food Engineering**, v. 61, n. 3, p. 297-307, 2004.

AOAC. **Official methods of analysis to AOAC International**. 18 ed. Association of official analytical chemistry, 2007.

AOCS. **Official methods and recommended practices of the American oil chemists' society**. 6 ed. American oil chemists' society, 2009.

APOSTOLOPOULOS, D.; GILBERT, S. G. Water sorption of coffee solubles by frontal inverse gas chromatography: thermodynamic considerations. **Journal of Food Science**, v. 55, n. 2, p. 475-487, 1990.

ARSLAN-TONTUL, S. Moisture sorption isotherm, isosteric heat and adsorption surface area of whole chia seeds. **Lwt**, v. 119, p. 108859, 2020.

AZABOU, S. et al. Discarded seeds from red pepper (*Capsicum annum*) processing industry as a sustainable source of high added-value compounds and edible oil. **Environmental Science and Pollution Research**, v. 24, p. 22196-22203, 2017.

BIS-SOUZA, C. V.; BARBA, F. J.; LORENZO, J. M.; PENNA, A. L. B.; BARRETTO, A. C. S. New strategies for the development of innovative fermented meat products: a review regarding the incorporation of probiotics and dietary fibers. **Food Reviews International**, v. 35, n. 5, p. 467-484, 2019.

BLAHOVEC, J. Sorption isotherms in materials of biological origin mathematical and physical approach. **Journal of Food Engineering**, v. 65, n. 4, p. 489-495, 2004.

BOUAZIZ, M. A. et al. Use of endemic date palm (*Phoenix dactylifera L.*) seeds as an insoluble dietary fiber: Effect on turkey meat quality. **Journal of Food Quality**, v. 2020, n. 1, p. 8889272, 2020.

BRUNAUER, S. et al. On a theory of the van der Waals adsorption of gases. **Journal of the American Chemical society**, v. 62, n. 7, p. 1723-1732, 1940.

CAMPOS, R. C. et al. Moisture sorption isotherms of sunflower seeds: Thermodynamic analysis. **Ciência e Agrotecnologia**, v. 43, p. e011619, 2019.

CRANK, J. **The Mathematics of Diffusion**. 2 ed. Oxford, UK: Clarendon Press, 1975.

DA SILVA, R. C. et al. A new empirical model for predicting intermittent and continuous drying of “neve” melon (*Cucumis melo sp.*) seeds. **Agriculture**, v. 12, n. 3, p. 328, 2022.

DE MELO, F. A. B. R. et al. Development and Evaluation of Nutritional and Quality Standard of Beef Burger Supplemented with Pumpkin (*Cucurbita moschata*) Seed Flour. **Foods**, v. 13, n. 11, p. 1702, 2024.

DE OLIVEIRA, G. H. H. et al. Application of GAB model for water desorption isotherms and thermodynamic analysis of sugar beet seeds. **Journal of Food Process Engineering**, v. 40, n. 1, p. e12278, 2017.

DOYMAZ, İ. Drying of pomegranate seeds using infrared radiation. **Food Science and Biotechnology**, v. 21, p. 1269-1275, 2012.

EMBABY, H. E. S.; MOKHTAR, S. M. Chemical Composition and Nutritive Value of Lantana and Sweet Pepper Seeds and Nabak Seed Kernels. **Journal of Food Science**, v. 76, n. 5, p. C736-C741, 2011.

FREITAS, M. L. F.; POLACHINI, T. C.; DE SOUZA, A. C.; TELIS-ROMERO, J. Sorption isotherms and thermodynamic properties of grated Parmesan cheese. **International Journal of Food Science & Technology**, v. 51, n. 1, p. 250-259, 2016.

GARCIA, M. V.; MILANI, M. S.; RIES, E. F. Production optimization of passion fruit peel flour and its incorporation into dietary food. **Food Science and Technology International**, v. 26, n. 2, p. 132–139, 2020.

GURNANI, N.; GUPTA, M.; MEHTA, D.; MEHTA, B. K. Chemical composition, total phenolic and flavonoid contents, and in vitro antimicrobial and antioxidant activities of crude extracts from red chilli seeds (*Capsicum frutescens* L.). **Journal of Taibah University for Science**, v. 10, n. 4, p. 462-470, 2016.

HALSEY, G. Physical adsorption on non-uniform surfaces. **Journal of Chemistry Physics**, v. 16, p. 931–937, 1948.

HASSINI, L. et al. Desorption isotherms and thermodynamic properties of prickly pear seeds. **Industrial Crops and Products**, v. 67, p. 457-465, 2015.

HASSINI, L. et al. Studies on convective drying of ‘Ameclyae’ *Opuntia ficus-indica* seeds and its effect on the quality of extracted oil based on its α -tocopherol content. **Heat and Mass Transfer**, v. 54, p. 393-402, 2018.

HENDERSON, S. M. A basic concept of equilibrium moisture. **Agricultural Engineering**, v. 33, p. 29–33, 1952.

HENDERSON, S. M., PABIS, S. Grain drying theory I. Temperature effect on drying coefficient. **Journal of Agriculture Engineering Research**, v.6, n.3, p.169-174, 1961.

JARRET, R. L.; LEVY, I. J.; POTTER, T. L.; CERMAK, S. C. Seed oil and fatty acid composition in *Capsicum* spp. **Journal of Food Composition and Analysis**, v. 30, n. 2, p. 102–108, 2013.

JITTANIT, W.; SRZEDNICKI, G.; DRISCOLL, R. Seed drying in fluidized and spouted bed dryers. **Drying Technology**, v. 28, n. 10, p. 1213-1219, 2010.

JORGE, N.; SOARES, B. B. P.; LUNARDI, V. M.; MALACRIDA, C. R. Physico-chemical alterations of sunflower, corn and soybean oils in deep fat frying. **Química Nova**, v. 28, p. 947-951, 2005.

KENENI, Y. G.; HVOSLEF-EIDE, A. T.; MARCHETTI, J. M. Mathematical modelling of the drying kinetics of *Jatropha curcas* L. seeds. **Industrial crops and products**, v. 132, p. 12-20, 2019.

KOUA, B. K. et al., Thermodynamic analysis of sorption isotherms of cassava (*Manihot esculenta*), **Journal of Food Science and Technology**, v. 51, p. 1711–1723, 2014.

KUROZAWA, L. E. et al. Thermodynamic properties of water desorption of papaya. **Journal of food processing and preservation**, v. 39, n. 6, p. 2412-2420, 2015.

LABUZA, T. Creation of moisture sorption isotherms for hygroscopic materials. Sorption isotherm methods. In: **International Symposium on Humidity and Moisture**. Washington: American Society of Heating, Refrigerating and Air Conditioning Engineers, 1963.

LEWICKI, P. P. Data and Models of Water Activity. II: Solid Foods. **Food Properties Handbook**. 2. ed. Boca Raton: Taylor & Francis Group, 2008.

LEWIS, W. K. The rate of drying of solids materials. **Journal of Industrial and Engineering Chemistry**, v.13, n.5, p.427-432, 1921.

LOZANO, Y. F.; MAYER, C. D.; BANNON, C.; GAYDOU, E. M. Unsaponifiable matter, total sterol and tocopherol contents of avocado oil varieties. **Journal of the American Oil Chemists' Society**, v. 70, n. 6, p. 561–565, 1993.

MA, Y.; WU, X.; ZHAO, L.; WANG, Y.; LIAO, X. Comparison of the compounds and characteristics of pepper seed oil by pressure-assisted, ultrasound-assisted and conventional solvent extraction. **Innovative Food Science & Emerging Technologies**, v. 54, p. 78–86, 2019.

MALEKI MAJD, K. et al. Thermodynamic of water sorption of grape seed: temperature effect of sorption isotherms and thermodynamic characteristics. **Food Biophysics**, v. 8, p. 1-11, 2013.

MALLEK-AYADI, S.; BAHLOUL, N.; KECHAOU, N. Mathematical modelling of water sorption isotherms and thermodynamic properties of *Cucumis melo* L. seeds. **Lwt**, v. 131, p. 109727, 2020.

MARTINS, M. J. N. et al. Solubility of different salts used in the control of the water activity of foods. **Ciência e Agrotecnologia**, v. 47, p. e018722, 2023.

MCMINN, W. A. M.; MAGEE, T. R. A. Thermodynamic properties of moisture sorption of potato. **Journal of food engineering**, v. 60, n. 2, p. 157-165, 2003.

MOREIRA, R.; CHENLO, F.; TORRES, M. D.; VALLEJO, N. Thermodynamic analysis of experimental sorption isotherms of loquat and quince fruits. **Journal of Food Engineering**, v. 88, n. 4, p. 514-521, 2008.

MORENO-ESCAMILLA, J. O.; DE LA ROSA, L. A.; LÓPEZ-DÍAZ, J. A.; RODRIGO-GARCÍA, J.; NÚÑEZ-GASTÉLUM, J. A.; ALVAREZ-PARRILLA, E. Effect of the smoking process and firewood type in the phytochemical content and antioxidant capacity of red Jalapeño pepper during its transformation to chipotle pepper. **Food Research International**, v. 76, p. 654–660, 2015.

MUDAMBA, P.S.; DRISCOLL, R.H.; BUCKLE, K.A. Thin layer drying characteristics of garlic slices. **Journal of Food Engineering**, v. 29, n. 1, p. 75-97, 1996.

MUJAFFAR, S.; RAMSUMAIR, S. Fluidized bed drying of pumpkin (*Cucurbita sp.*) seeds. **Foods**, v. 8, n. 5, p. 147, 2019.

MUJAFFAR, S.; RAMSUMAIR, S. Fluidized bed drying of pumpkin (*Cucurbita sp.*) seeds. **Foods**, v. 8, n. 5, p. 147, 2019.

NICOLETI, J. F.; TELIS-ROMERO, J.; TELIS, V. R. N. Air-drying of fresh and osmotically pre-treated pineapple slices: fixed air temperature versus fixed slice temperature drying kinetics. **Drying technology**, v. 19, n. 9, p. 2175-2191, 2007.

NIP, W. K. Manufacture of fermented product. **Food Science, Technology, and Engineering**, v. 4, p. 3131–3154, 2005.

ONYEIKE, E. N.; ACHERU, G. N. Chemical composition of selected Nigerian oil seeds and physicochemical properties of the oil extracts. **Food chemistry**, v. 77, n. 4, p. 431-437, 2002.

OSWIN, C. R. The kinetics of package life III. The isotherm. **Journal of Chemistry Industry**, v. 65, p. 419–421, 1946.

PAGE, G. E. **Factors influencing the maximum rates of air drying shelled corn in thin layers**. 1949. M. Sc. Tese. Indiana: Purdue University.

PELEG, M. Assessment of a semi-empirical four parameter general model for sigmoid moisture sorption isotherms. **Journal of Food Process Engineering**, v. 16, n. 1, p. 21–37, 1993.

POLACHINI, T. C.; BETIOL, L. F. L.; LOPES-FILHO, J. F.; TELIS-ROMERO, J. Water adsorption isotherms and thermodynamic properties of cassava bagasse. **Thermochimica Acta**, v. 632, p. 79–85, 2016.

RIZVI, S. S. H. Thermodynamic properties of foods in dehydration. In: RAO, M. A.; RIZVI, S. S. H.; DATTA, A. K. (orgs.). **Engineering properties of foods**. 3rd ed. Taylor & Francis Group, 2005.

RIZVI, S. S. H. Thermodynamic properties of foods in dehydration. In: **Engineering properties of foods**. CRC Press, p. 261-348, 2014.

ROBERTS, J. S.; KIDD, D. R.; PADILLA-ZAKOUR, O. Drying kinetics of grape seeds. **Journal of Food Engineering**, v. 89, n. 4, p. 460-465, 2008.

ROSA, D. P.; CANTÚ-LOZANO, D.; LUNA-SOLANO, G.; POLACHINI, T. C.; TELIS-ROMERO, J. Mathematical modeling of orange seed drying kinetics. **Ciência e Agrotecnologia**, v. 39, n. 3, p. 291–300, 2015.

ROSA, D. P.; EVANGELISTA, R. R.; BORGES MACHADO, A. L.; SANCHES, M. A. R.; TELIS-ROMERO, J. Water sorption properties of papaya seeds (*Carica papaya L.*) formosa variety: An assessment under storage and drying conditions. **LWT**, v. 138, p. 110458, 2021.

SÁ, A. G. A.; MORENO, Y. M. F.; CARCIOFI, B. A. M. Plant proteins as high-quality nutritional source for human diet. **Trends in Food Science & Technology**, v. 97, p. 170–184, 2020.

SÁNCHEZ-TORRES, E. A. et al. Water desorption isotherms of pork liver and thermodynamic properties. **Lwt**, v. 149, p. 111857, 2021.

SANDOVAL-CASTRO, C. J.; VALDEZ-MORALES, M.; OOMAH, B. D.; GUTIÉRREZ-DORADO, R.; MEDINA-GODOY, S.; ESPINOSA-ALONSO, L. G. Bioactive compounds and antioxidant activity in scalded Jalapeño pepper industrial byproduct (*Capsicum annuum*). **Journal of Food Science and Technology**, v. 54, n. 7, p. 1999–2010, 2017.

- ŠEREGELJ, V. et al. Application of encapsulated natural bioactive compounds from red pepper waste in yogurt. **Journal of microencapsulation**, v. 36, n. 8, p. 704-714, 2019.
- SIM, S. Y. J.; SRV, A.; CHIANG, J. H.; HENRY, C. J. Plant proteins for future foods: A roadmap. **Foods**, v. 10, n. 8, p. 1967, 2021.
- SINGLETON, V. L.; ORTHOFER, R.; LAMUELA-RAVENTÓS, R. M. Analysis of total phenols and other oxidation substrates and antioxidants by means of folin-ciocalteu reagent. **Methods in Enzymology**, v. 299, p. 152–178, 1999.
- SORA, G. T. S. et al. A comparative study of the capsaicinoid and phenolic contents and in vitro antioxidant activities of the peppers of the genus *Capsicum*: An application of chemometrics. **Journal of food science and technology**, v. 52, p. 8086-8094, 2015.
- SRIDHAR, K.; CHARLES, A. L. Mathematical modeling and effect of drying temperature on physicochemical properties of new commercial grape “Kyoho” seeds. **Journal of Food Process Engineering**, v. 43, n. 3, p. e13203, 2020.
- TAN, M.; NAWAZ, M. A.; BUCKOW, R. Functional and food application of plant proteins—a review. **Food Reviews International**, p. 1-29, 2021.
- TEIXEIRA, L. P.; ANDRADE, E. T.; DEVILLA, I. A. Isosteric heat, entropy, and gibbs free energy of pumpkin seeds (*Cucurbita moschata*). **Engenharia Agrícola**, v. 38, n. 1, p. 97-102, 2018.
- TETERYCZ, D.; SOBOTA, A. Use of High-Protein and High-Dietary-Fibre Vegetable Processing Waste from Bell Pepper and Tomato for Pasta Fortification. **Foods**, v. 12, n. 13, p. 2567, 2023.
- VALDEZ-MORALES, M.; SANDOVAL-CASTRO, C. J.; GUTIÉRREZ-DORADO, R.; MENDOZA-ESPINOZA, J. A.; MEDINA-GODOY, S.; ESPINOSA-ALONSO, L. G. Oil Recovery from Jalapeño Pepper By-Products and Analysis of the Industrial Scalding Process on Its Nutraceutical Potential. **Waste and Biomass Valorization**, v. 12, n. 8, p. 4475–4487, 2021.
- WANG, C.Y.; SINGH, R.P. **A single layer drying equation for rough rice**. ASAE Paper No: 78-3001, ASAE, St. Joseph, MI, 1978.
- YU, J. et al. Drying kinetics of camellia oleifera seeds under hot air drying with ultrasonic pretreatment. **Industrial Crops and Products**, v. 222, p. 119467, 2024.

ZHANG, R. Y.; LIU, H. M.; MA, Y. X.; WANG, X. DE. Characterization of fragrant oil extracted from pepper seed during subcritical propane extraction. **LWT**, v. 110, p. 110–116, 2019.

ZHANG, Z. et al. Moisture sorption isotherms and thermodynamic properties of tiger nuts: An oil-rich tuber. **Lwt**, v. 167, p. 113866, 2022.

ZHAO, D. et al. Effect of sodium carbonate solution pretreatment on drying kinetics, antioxidant capacity changes, and final quality of wolfberry (*Lycium barbarum*) during drying. **Lwt**, v. 99, p. 254-261, 2019.

ZHISHEN, J.; MENGCHENG, T.; JIANMING, W. The determination of flavonoid contents in mulberry and their scavenging effects on superoxide radicals. **Food Chemistry**, v. 64, n. 4, p. 555–559, 1999.