



**LUCIENE BASTOS PINHEIRO DE ALMEIDA**

**HISTERESE DE SORÇÃO DA FARINHA DE MAZAMORRA  
DE QUINOA COM CAL**

**LUCIENE BASTOS PINHEIRO DE ALMEIDA**

**HISTERESE DE SORÇÃO DA FARINHA DE MAZAMORRA  
DE QUINOA COM CAL**

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado ao Colegiado de Curso da Engenharia Química do Centro de Ciências Exatas e Tecnologia da Universidade Federal do Maranhão, como parte dos requisitos para obtenção do diploma de Graduação em Engenharia Química.

Orientador: Prof. Dr. Marcelo Fabio Leonardo

São Luís  
2021

## **DADOS CURRICULARES**

**Luciene Bastos Pinheiro de Almeida**

<b>NASCIMENTO</b>	04/05/1992 – PENALVA / MA
<b>FILIAÇÃO</b>	Domingos dos Santos Pereira de Almeida Ilvana de Jesus Bastos Pinheiro de Almeida
<b>2014/2021</b>	Curso de Graduação Engenharia Química - Universidade Federal do Maranhão
<b>2019/2021</b>	Curso de Especialização Ciências e Meio Ambiente - Instituto Federal do Maranhão
<b>2012/2015</b>	Curso de Graduação Tecnólogo em Gestão Ambiental - Centro Universitário Leonardo da Vinci

Almeida, Luciene Bastos Pinheiro de.

Histerese de sorção da farinha de mazamorra de quinoa com cal / Luciene Bastos Pinheiro de Almeida. - 2021.

54 p.

Orientador(a): Marcelo Fabio Leonardo.

Monografia (Graduação) - Curso de Engenharia Química, Universidade Federal do Maranhão, São Luis - Ma, 2021.

1. Histereses de Sorção. 2. Isotermas de Sorção. 3. Propriedades Termodinâmicas. 4. Quinoa. I. Leonardo, Marcelo Fabio. II. Título.

Dedico este trabalho aos meus pais Domingos e Ilvana, que sempre acreditaram no poder transformador da educação.

## **AGRADECIMENTOS**

Ao Deus Eterno, criador e mantedor de todas as coisas.

Ao Prof<sup>o</sup>. Dr. Marcelo Fabio Leonardo, pela valiosa orientação e direcionamento deste trabalho. Muito obrigado.

Aos meus pais Domingos e Ilvana pela oportunidade que me deram de até aqui poder chegar, bem como a toda minha família, em especial a minha irmã Luciana pelo apoio do início ao final desta graduação.

Ao SAAE (Serviço autônomo de água e esgoto) Viana-Ma, por ter oportunizado o estágio curricular e, com isso, propiciou valiosas discussões sobre a atuação do engenheiro químico nos processos de tratamento de água.

Aos meus amigos Carlos Moura, Michela e Ana Carolina, que estiveram presentes nos momentos alegres e tristes, sendo fonte contínua de apoio e incentivo.

Às colegas Bruna Andressa e Dandara Figueiredo pela amizade e por estarem ao meu lado em todos os momentos ao longo da graduação. Obrigada por fazerem parte desta conquista.

A todos os meus amigos do curso de graduação que compartilharam dos inúmeros desafios que enfrentamos, sempre com o espírito colaborativo, em especial Julles Mitoura por me fornecer os dados experimentais, sem eles não seria possível concluir este estudo.

Também quero agradecer à Universidade Federal do Maranhão e o seu corpo docente que demonstrou estar comprometido com a qualidade e excelência do ensino.

*“Escute os sábios e procure entender o que eles ensinam. Sim, peça sabedoria e grite pedindo entendimento. Procure essas coisas, como se procurasse prata ou um tesouro escondido.”*

*Provérbios 2;2-4*

BASTOS, Luciene Pinheiro de Almeida. **Histerese de Sorção da Farinha de Mazamorra de Quinoa com Cal**. 2021. 54 f. Trabalho de Conclusão de Curso de Engenharia Química do Centro de Ciências Exatas e Tecnologia da Universidade Federal do Maranhão, São Luís, 2021.

## RESUMO

Este trabalho aborda o estudo da atividade de água presente nos alimentos, sabe-se que a água representa o percentual que mais interfere na sua preservação ou alterações, daí a importância de estudar métodos capazes de estabelecer o equilíbrio de umidade no alimento, afim de manter sua conservação e prever sua suscetibilidade a degradação, para isso objetiva-se calcular as isotermas de sorção, histereses e as propriedades termodinâmicas de sorção da farinha de Mazamorra de quinoa. As isotermas de adsorção da farinha de mazamorra de quinoa foram estudadas através do método estático gravimétrico, utilizando-se soluções de ácido sulfúrico ( $H_2SO_4$ ) nas concentrações de 30%, 40%, 50%, 60%, 70% e 80%. Desta forma foram criados micro sistemas com atividades de água ( $a_w$ ) que variaram de 0,000 até 0,769 na faixa de temperaturas de 30 – 60 °C. As isotermas foram ajustadas pelos modelos mais usuais: BET, GAB, Halsey, Oswin, e Henderson. Desse modo, pode-se concluir que o modelo de Oswin representa bem o conjunto de dados experimentais, podendo ser utilizado para representar o comportamento higroscópico das isotermas de sorção de água da farinha de mazamorra in natura e com adições de umidade. Quanto ao comportamento das histereses associadas as isotermas de sorção da farinha de mazamorra de quinoa a 30, 45 e 60°C, respectivamente a área compreendida entre as curvas de adsorção de dessorção torna-se menor com o aumento da temperatura. Com relação as propriedades termodinâmicas das isotermas de sorção indicam que ao adicionar 30% de umidade na farinha de mazamorra de quinoa o fenômeno de transferência de massa é otimizado, de forma que a farinha passa a ceder umidade para o meio com facilidade. O contrário acontece ao adicionar 40% de umidade à farinha, onde observa-se que a transferência de massa é dificultada.

**Palavras-chave:** Quinoa, Isotermas de Sorção, Histereses de Sorção, Propriedades Termodinâmicas.

BASTOS, Luciene Pinheiro de Almeida. Sorther Hysteresis of Quinoa Mazamorra Flour with Lime. 2021. 54 f. Conclusion work of the Chemical Engineering Course of the Center of Exact Sciences and Technology of the Federal University of Maranhão, São Luís, 2021.

### **ABSTRACT**

This work approaches the study of the water activity present in food, it is known that water represents the percentage that most interferes in its preservation or alterations, hence the importance of studying methods capable of establishing moisture balance in food, in order to maintain its conservation and predict its susceptibility to degradation, for this purpose is to calculate the sorption isotherms, Hysteresis and the thermodynamic properties of sorption of quinoa Mazamorra flour. The adsorption isotherms of quinoa mazamorra flour were studied using the static gravimetric method, using sulfuric acid (H<sub>2</sub>SO<sub>4</sub>) solutions at concentrations of 30%, 40%, 50%, 60%, 70% and 80%. Thus, microsystems were created with water activities (aw) that ranged from 0.000 to 0.769 in the temperature range of 30 - 60 °C. The isotherms were adjusted by the most common models: BET, GAB, Halsey, Oswin, and Henderson. Thus, it can be concluded that the Oswin model represents well the set of experimental data, and can be used to represent the hygroscopic behavior of water sorption isotherms of mazamorra flour in natura and with moisture additions. As for the behavior of the hysteresis associated with the sorption isotherms of quinoa mazamorra flour at 30, 45 and 60°C, respectively, the area between the desorption adsorption curves becomes smaller with the increase in temperature. Regarding the thermodynamic properties of sorption isotherms indicate that by adding 30% moisture in quinoa mazamorra flour the phenomenon of dough transfer is optimized, so that the flour begins to give moisture to the medium with ease. The opposite happens when adding 40% moisture to the flour, where it is observed that the transfer of dough is hindered.

**Keywords:** Quinoa, Sorption Isotherms, Sorcin Hysteresis, Thermodynamic Properties.

## LISTA DE FIGURAS

Figura 1 – Tipos de eixos na Inflorescencia da planta quinoa. A: Amarantiforme. B: Glomerulata. ....	16
Figura 2 – Coloração do grão de quinoa. C: Cor negro, marrom e branco. D: Cor amarelo e creme. E: cor branco. F: Cor laranja.....	17
Figura 3 – Principais derivados comerciais de quinoa: A- Grão; B- Flocos; e C- Farinha.....	18
Figura 4 – Presença de água no alimento.....	20
Figura 5 – Textura dos alimentos de acordo com a atividade de água.....	21
Figura 6 – Isoterma de sorção de umidade típica de um alimento.....	22
Figura 7 – Tipos de isotérmica segundo a classificação estabelecida por Brunauer.....	23
Figura 8 – Fenômeno de Histerese.....	26
Figura 9 – Microsistema com amostra suspensa sobre solução de ácido sulfúrico.....	29
Figura 10 – Mini incubadora B.O.D. NT 73.....	30
Figura 11 – Balança de precisão modelo BL320H.....	31
Figura 12 – Isotermas de sorção da farinha de mazamorra de quinoa ajustadas utilizando o modelo de Oswin apresentada com respectivos dados experimentais (a: 30°C; b: 45°C; c: 60°C).....	36
Figura 13 – Histerese das isotermas de sorção da farinha de mazamorra de quinoa ajustadas utilizando o modelo de Oswin apresentada com respectivos dados experimentais (a: in natura; b: com 30% a mais de umidade; c: com 40% a mais de umidade) .....	38
Figura 14– Histerese das isotermas de sorção de água da farinha de Mazamorra in natura e com adições de umidade.....	39
Figura 15 – Calor isostérico de sorção da farinha de mazamorra in natura e com adições de umidade.....	40
Figura 16 – Entropia de sorção da farinha de mazamorra in natura e com adições de umidade.....	42
Figura 17 – Energia de Gibbs associado ao fenômeno de sorção da farinha de mazamorra in natura e com adições de umidade.....	42

## LISTA DE TABELAS

Tabela 1 – Composição centesimal aproximada (% base seca) de quinoa, arroz, fubá de milho e farinha de trigo.....	18
Tabela 2 – Modelos para ajustes de isotermas de sorção de umidade.....	24
Tabela 3 – Atividade de água do ácido sulfúrico.....	32
Tabela 4 – Umidades de equilíbrio em função da atividade de água do meio para temperaturas fixadas das amostras de farinha de mazamorra de quinoa com adições de umidade (a: In natura; b: + 30% de umidade; c: + 40% de umidade) .....	33
Tabela 5 – Resultados dos ajustes dos modelos com os dados experimentais.....	35
Tabela 6 – Histerese para as isotermas de sorção da farinha de Mazamorra.....	39

## LISTA DE SÍMBOLOS

$A_w$	Atividade de água
$P$	Pressão de vapor da água no alimento
$P_0$	Pressão de vapor da água pura
$X_e$	Teor de água em equilíbrio
$X_{eq}$	Conteúdo de umidade de equilíbrio
$X_m$	Conteúdo de umidade na monocamada molecular
$A$	Constante dos modelos de Halsey, Oswin, Henderson
$B$	Constante dos modelos de Halsey, Oswin, Henderson
$C$	Constante dos modelos de Halsey, Oswin, BET, GAB, Henderson
$RMSE$	Raiz quadrada do erro médio quadrático
$R^2$	Coefficiente de correlação
$R$	Constante universal dos gases
$Q_s$	Calor isostérico de sorção
$q_s$	Calor isostérico de sorção líquido, igual a variação de entalpia ( $\Delta H$ )
$T$	Temperatura absoluta
$R$	Constante universal de gases.
$\Delta S$	Variação de entropia
$\Delta G$	Variação da energia livre de Gibbs
$IHDR$	Índice de histerese em relação a dessorção

## SUMÁRIO

<b>RESUMO .....</b>	<b>19</b>
<b>ABSTRACT .....</b>	<b>20</b>
<b>LISTA DE FIGURAS .....</b>	<b>21</b>
<b>LISTA DE TABELAS .....</b>	<b>22</b>
<b>LISTA DE SÍMBOLOS .....</b>	<b>23</b>
<b>1 INTRODUÇÃO .....</b>	<b>13</b>
<b>2 OBJETIVOS .....</b>	<b>15</b>
2.1 Objetivo geral .....	15
2.2 Objetivos específicos.....	15
<b>3 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA.....</b>	<b>16</b>
3.1 Quinoa16	
3.2 Atividade de Água .....	19
3.3 Isotermas de Sorção .....	21
3.3.1 Modelos Matemáticos para ajuste das isotermas de Sorção .....	23
3.3.1. Modelo de GAB (Guggenheim, Anderson e de Boer).....	24
3.3.2 Modelo de BET (Brunauer, Emmet e Teller) .....	24
3.3.3 Modelo de Oswin .....	25
3.3.4 Modelo de Halsey.....	25
3.3.5 Modelo de Handerson.....	25
3.4 Histerese de Sorção .....	25
3.5 Propriedades termodinâmicas .....	26
3.5.1 Calor isostérico integral ( $Q_{st}$ ) .....	27
3.5.2 Entropia diferencial ( $\Delta S$ ).....	27
3.5.3. Energia livre de Gibbs ( $\Delta G$ ) .....	28
<b>4. METODOLOGIA.....</b>	<b>29</b>
4.1. Material.....	29
4.1.1. Ácido sulfúrico.....	29
4.2. Aparato experimental .....	29
4.2.1. Preparação dos microambientes .....	29
4.2.2. Incubadora B.O.D.....	30
4.2.3. Balança.....	30

4.3. Procedimento experimental .....	31
4.3.1. Preparo das amostras .....	31
4.3.2. Obtenção das isotermas de sorção .....	31
<b>5. RESULTADOS.....</b>	<b>32</b>
5.1. Isotermas de sorção .....	32
5.1.1. Modelagem das isotermas de sorção .....	34
5.2. Histerese das isotermas de sorção .....	36
5.3. Propriedades termodinâmicas .....	39
<b>6. CONCLUSÕES GERAIS .....</b>	<b>42</b>
<b>REFERÊNCIAS.....</b>	<b>44</b>

## 1 INTRODUÇÃO

A quinoa “*Chenopodium quinoa* Willd” é uma planta nativa da região da Cordilheira dos Andes, produz uma semente que é ingerida como grão de cereal na alimentação dos povos pré-colombianos. O grão de quinoa apresenta alto teor protéico (14-16%), sua digestibilidade gira em torno de 80% propriedades identificadas em maiores quantidades no leite e na carne. A quinoa também é rica em lisina, quanto aos minerais presentes se caracteriza como um alimento em abundância de cálcio, magnésio, potássio, cobre e manganês, superando até mesmo outros cereais (GOUVEIA et al., 2012).

A quinoa se destaca no mercado principalmente na forma de grãos, flocos e farinhas, dentre seus subprodutos há uma variedade de produtos caseiros como: bolos, pães, suplementos alimentares ou uma infinidade de outros produtos industrializados. Este trabalho faz menção a mazamorra de quinoa com cal, obtida através da seleção, vaporização, pré-cozimento e moagem do grão estudado, obtendo-se uma farinha rica em aminoácidos e proteínas. A farinha de mazamorra de quinoa com cal apresenta baixa umidade, ainda assim contém água em sua composição (MARADINI, 2014).

A farinha de mazamorra de quinoa com cal seria uma alternativa alimentar para as pessoas intolerantes ao glúten? Dentre os problemas ocasionados pela ingestão do glúten, a doença celíaca está diretamente ligada a ingestão dessa proteína, o presente trabalho traz fatores que são necessários ser apresentados para uma maior segurança na ingestão de derivados da quinoa. Portanto faz se necessário determinar a atividade de água presente no produto, visando delimitar sua suscetibilidade a degradação, para que possa ser consumido de forma segura ou substituir alguns produtos que contém glúten (CORREIA-OLIVEIRA et al., 2008).

Dessa forma, conhecendo a atividade de água nos alimentos, controlando a umidade de equilíbrio é possível evitar efeitos adversos no produto, sendo possível fazer o equilíbrio completo do alimento, evitando assim perdas por deterioração. Para tal, o presente trabalho foi dividido em cinco seções, a primeira é retratado a quinoa de forma geral, origem, clima característico, valores nutricionais e produtos derivados da quinoa. A segunda seção descreve a atividade de água presente nos alimentos, é apresentado os tipos de água encontrado nos alimentos, na forma livre e ligada, assim como o comportamento relacionado a atividade de água (SPEHAR; SANTOS, 2002).

A terceira seção descreve as isotermas de sorção, os tipos de isotermas de sorção e ainda contextualizando as três áreas ou zonas que caracterizam a isoterma de sorção. Posterior é apresentado alguns dos principais modelos matemático para ajuste das isotermas de sorção

como os modelo de: GAB, BET, Oswin, Halsey e Handerson. Na seção seguinte é caracterizado a histerese de sorção. Por fim, a quinta seção apresenta as propriedades termodinâmicas utilizadas para fornecer informações a respeito do estado em que se encontra a água no produto alimentício. Para determinar a quantidade mínima de energia necessária na desidratação, é apresentado cada uma das principais propriedades termodinâmica no estudo de sorção de água, fundamentais em processos de secagem, armazenamento, mistura de alimentos, acondicionamento como até mesmo na análise de projetos de equipamentos (FELLOWS, 2018).

Em suma, o objetivo do presente trabalho é calcular as Histereses de sorção e as propriedades termodinâmicas de sorção da farinha de Mazamorra de quinoa com cal, assim como calcular as termodinâmicas de propriedades sorção.

## **2 OBJETIVOS**

### **2.1 Objetivo geral**

Verificar o fenômeno de sorção de água da farinha de Mazamorra de quinoa com cal e através destas estudar as histereses de sorção sob efeito da adição de umidade além de do estudo das propriedades termodinâmicas de sorção deste produto.

### **2.2 Objetivos específicos**

- ❖ Estudar as isotermas de sorção de água da farinha de mazamorra de quinoa com cal;
- ❖ Verificar os efeitos da adição de umidade e da temperatura sobre o comportamento das isotermas de sorção da farinha de Mazamorra de quinoa com cal;
- ❖ Estudar a formação de histereses de sorção água da farinha de Mazamorra de quinoa com cal sob efeito da adição de umidade ao produto;
- ❖ Avaliar a aplicação de modelos teóricos e empíricos para a simulação das isotermas de sorção de água da farinha de Mazamorra de quinoa com cal;
- ❖ Calcular as propriedades termodinâmicas de sorção de água da farinha de Mazamorra de quinoa com cal.

### 3 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

#### 3.1 Quinoa

Quinoa “*Chenopodium quinoa* Willd” é uma planta nativa da região andina do Peru, Bolívia, Colômbia e Equador com registro de cultivo há mais de 7.000 anos, antes mesmo de sua domesticação. A quinoa pertence à família *Chenopodiaceae* produzindo uma semente arredondada com espessura de aproximadamente 1,5- 4 mm, essa semente seca é ingerida como grão de cereal na alimentação dos povos pré-colombianos (ALANDIA et al., 2020).

A quinoa é geneticamente adaptada a climas extremos, característica típica dos países que fazem parte da região dos Andes, retratando uma cultura alimentar das planícies largas do altiplano peruano boliviano. Segundo Gómez e Aguiar (2016), o cultivo é realizado em áreas geográficas com temperaturas muito baixas, variando de -3°C a -30° Centígrados, e com altitude que varia do nível do mar até 4.000 metros acima do nível do mar, acompanhado de precipitações de 0 a 1.000 mm em diferentes tipos de solo e pH que variam de 4 a 9 (GÓMEZ; AGUILAR, 2016).

Segundo Moraes (2013), a quinoa foi classificada pela primeira vez pelo botânico alemão Carl Ludwig Willdenow. Segundo ele, a planta cresce a uma altura média de 190cm, possui um eixo principal, do qual germina outros eixos secundários que variam em dois tipos: amarantiforme e glomerular. Dentre as características particulares da quinoa tem-se, a presença de flores hermafroditas e femininas unissexuais, estando as hermafroditas na posição distal e formam cinco lóbulos periantais, cinco anteras e um ovário superior com dois ou três estigmas, porém, existem registro de cultivares que apresentam macho esterilidade nas flores de forma parcial (BHARGAVA, 2006 apud MORAES, 2013).

**Figura 1-** Tipos de eixos na Inflorescência da planta quinoa. A: Amarantiforme. B: glomerular.



Fonte: Gómez; Aguiar (2016).

Tendo em vista as especificidades da planta quinoa, como importante fonte de alimento às populações andinas do Altiplano, seu grão tornou-se um produto milenar, alcançando

visibilidade em diferentes mercados do mundo (LAURA, 2019). O grão de quinoa é cultivado em diferentes tipos, tamanhos e envolve uma variedade de cores, além de proteínas, minerais, vitaminas, aminoácidos entre outros metabolitos secundários.

**Figura 2-** Coloração do grão de quinoa. C: Cor negro, marrom e branco. D: Cor amarelo e creme. E: cor branco. F: Cor laranja.



Fonte: Gómez; Aguiar (2016).

A fim de compreender essa variabilidade dos grãos de quinoa (JACOBSEN et al., 2003) apud (MARADINI, 2014), ressaltam-se a importância de descobrir genótipos adequados para cada um dos processos de mutação, fazendo uso de melhoramento genético ou pesquisas agroindustriais, visando entender seus diferentes componentes orgânicos.

O grão de quinoa possui alto teor protéico (14-16%), sua digestibilidade gira em torno de 80% propriedades identificadas em maiores quantidades no leite e na carne. A quinoa é rica em lisina, histidina, aminoácidos sulfurados e metionina, é também um alimento com abundância de minerais como: cálcio, magnésio, potássio, cobre e manganês, superando até mesmo outros cereais (GOUVEIA et al., 2012).

Característica de destaque da quinoa é a qualidade da sua proteína, comparável à caseína do leite. Por ser mais equilibrada, pode complementar a alimentação de humanos e de aves e suínos com vantagem sobre o milho e a soja, quando utilizados isoladamente. Apresenta demanda crescente no mundo, principalmente por naturalistas, que buscam alternativas de plantas com baixo colesterol e ausência de glúten (SPEHAR; SANTOS, 2002).

De acordo com a comparação feita Borges et al., (2010), a quinoa possui maiores quantidades de proteínas, carboidratos e fibra com relação ao arroz, fubá de milho, farinha de

trigo por exemplo, apresentados na Tabela 1 uma composição centesimal aproximada de quinoa em comparação aos produtos mencionados anteriormente.

**Tabela 1-** Composição centesimal aproximada (% base seca) de quinoa, arroz, fubá de milho e farinha de trigo.

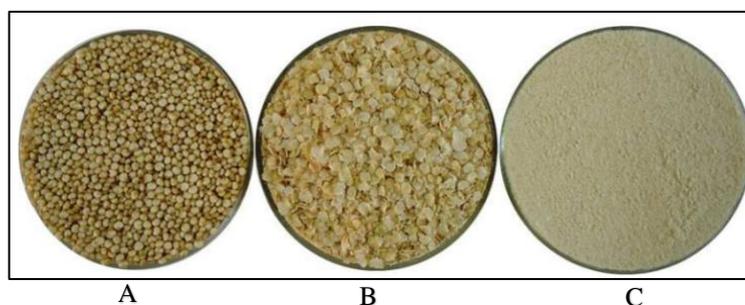
Composição	Quinoa	Arroz	Fubá de milho	Farinha de trigo
Lipídeos	5,77	0,35	2,15	1,61
Proteína	16,12	8,3	8,13	11,26
Cinzas	2,83	0,58	0,68	0,92
Carboidratos totais	75,28	90,77	89,04	86,21
Fibra alimentar	9,59	1,84	5,31	2,64

Fonte: Borges et al., (2010).

Por sua vez, inserida no cardápio dos povos pré-colombianos como importante fonte de alimento a quinoa também foi uma alternativa alimentar para as pessoas intolerantes a proteína glúten. Para Lemes (2019), a intolerância ao glúten é uma incapacidade do organismo em absorver os nutrientes do glúten, muito encontrado em cereais. Dentre os problemas ocasionados pela ingestão do glúten, a doença celíaca é responsável pela inflamação da mucosa intestinal e atrofiamento das vilosidades presente no intestino delgado.

De acordo com Farinazzi-Machado et al., (2012), a quinoa se destaca no mercado principalmente na forma de grãos, flocos e farinhas, dentre os subprodutos derivados da quinoa, há uma variedade de produtos caseiros como: bolos, pães, suplementos alimentares ou uma infinidade de outros produtos industrializados, a Figura 3 apresenta os principais derivados comerciais da quinoa.

**Figura 3** - Principais derivados comerciais de quinoa: A- Grão; B- Flocos; e C- Farinha.



Fonte: Maradini (2014), adaptada.

Diante dos produtos derivados da quinoa, este trabalho faz menção a mazamorra de quinoa com cal, obtida através da seleção, vaporização, pré-cozimento e moagem do grão estudado, obtendo-se uma farinha rica em aminoácidos e proteínas. A farinha de mazamorra de quinoa com cal apresenta baixa umidade, ainda assim contém água em sua composição. Nesse sentido, CORREIA-OLIVEIRA et al (2008), considera que para ser armazenada como alimento para consumo humano, é necessário determinar a atividade de água presente no produto, visando delimitar sua suscetibilidade a degradação.

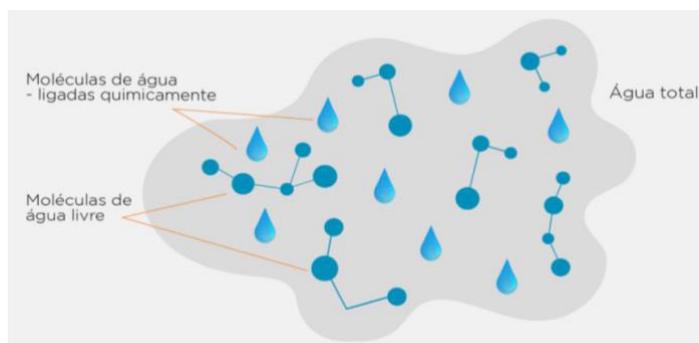
### 3.2 Atividade de Água

A água é um dos elemento primordiais para a maioria dos alimentos, quando naturais apresentam 30-95% de água, com exceção das leguminosas e cereais com 11-15%, portanto a água representa o percentual que mais interfere na preservação ou alterações dos alimentos (MELO, 2011). O conceito de atividade de água surgiu das investigações realizadas sobre a deterioração dos alimentos, tendo a água como fator determinante das reações hidrolíticas e atividade metabólica dos microrganismos (GAVA, 2009).

O teor de água presente nos alimentos se apresenta de duas formas: água ligada quimicamente e moléculas de água livre, estas juntas representam a umidade, ou seja, o indicativo da quantidade de água total no alimento. Segundo Braga (2016), a água ligada está conectada às moléculas da matriz, como: minerais, proteínas e carboidratos, indisponível para reações químicas ou crescimento microbiano, todavia há uma quantidade de água que fica retida para reações físicas implicando na deterioração do produto.

Por outro lado a água livre se conserva no interior do poro dos alimentos, tratada com pequena intensidade por forças de absorção, e possui características físico-químicas muito parecidas com a água pura. A água livre ao contrário da água ligada, suas moléculas não estão ligadas a nenhum componente do alimento, sendo utilizadas para o crescimento microbiano e reações químicas, a Figura 4 apresenta os dois tipos água presente nos alimentos (CORREIA-OLIVEIRA et al 2008).

**Figura 4** - Presença de água no alimento.



Fonte: Fernandes (2020).

A partir da análise desse dois conceitos de como a água está ligada internamente aos alimentos, por definição a atividade de água caracteriza a quantidade de energia da água do sistema (BRAGA, 2016). Em síntese, Ditchfield (2000) exemplifica que medindo a pressão de vapor da água do ambiente em equilíbrio é possível avaliar a quantidade de água livre no alimento. Dividindo esse valor pelo valor da pressão de vapor da água pura, encontra-se o valor de  $A_w$  conforme apresenta a Equação 1.

$$A_w = \frac{P}{P_o} \quad (1)$$

Deste modo, conhecendo a atividade de água nos alimentos é possível evitar efeitos adversos no produto, alimentos com baixa umidade apresenta textura seca e dura, alimentos com atividade de água intermediária são secos, firmes ou flexíveis, por outro lado alimentos com atividade de água elevada são úmidos, macios e pegajosos (BRAGA, 2016). A figura a seguir ilustra o comportamento dos alimentos quanto a atividade de água.

Também, a umidade de equilíbrio apresenta forte influência sobre o material, definida como:

A umidade de equilíbrio de um material é definida como o teor de umidade correspondente ao equilíbrio entre as pressões de vapor da água no material e no meio ambiente. Esta variável é a que determina o teor mínimo de umidade que o material pode atingir em um determinado conjunto de condições operacionais (BARCELOS, et al., 2010).

Controlando a umidade de equilíbrio e a atividade de água é possível fazer o equilíbrio completo do alimento, evitando assim perdas por deterioração. Correia-Oliveira et al (2008), apresentam uma relação de equilíbrio entre a atividade de água de um alimento e a umidade

relativa no equilíbrio (U.R.E) do ar expressa em porcentagem, em ambiente fechado equivale 100 vezes a mais que a atividade de água, a Figura 5 expressa a textura dos alimentos de acordo com sua atividade de água.

**Figura 5** - Textura dos alimentos de acordo com a atividade de água.



Fonte: Braga (2016).

Contudo, ainda pode haver interferência de fatores externos como: interação do alimento com o ambiente dificultando a estabilidade do alimento. Assim é possível representar graficamente por meio das isotermas de sorção, a relação entre a quantidade de água de um alimento com a umidade relativa, quando o equilíbrio é atingido (OLIVEIRA, 2008).

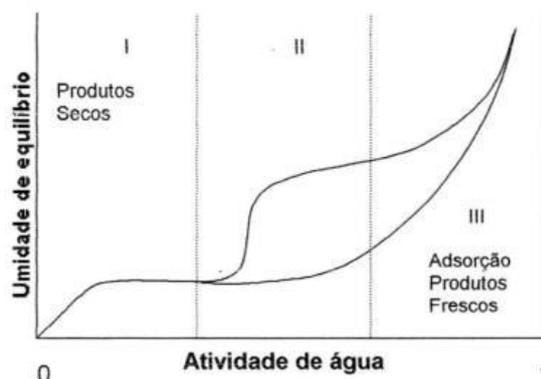
### 3.3 Isotermas de Sorção

Isotermas de sorção é uma forma de descrever por meio de curvas, a relação de equilíbrio entre o teor de umidade de um alimento e a umidade relativa, a uma determinada temperatura (FREITAS, 2019). Proporcionando um estudo mais aprofundado da atividade de água presente nos alimentos, as informações adquiridas das isotermas de sorção permitem prever a vida útil do produto, compreender a formulação de misturas de alimentos visando impedir a dispersão de água entre os ingredientes, proporciona elaborar embalagens que suporte a impermeabilidade do produto, impedindo o crescimento de microorganismos. Permitem ainda compreender processos de concentração, desidratação e a estabilidade física e química dos alimentos (OLIVEIRA, 2008).

A classificação das isotermas de sorção acontece de duas formas, respeitando a umidade do produto durante o processo de umedecimento ou secagem, podem ser identificadas como: isotermas de adsorção e isotermas de dessorção. Segundo Oliveira (2008), essa particularidade

entre as isotermas de sorção acontece devido o processo de sorção não ser completamente reversível. A região caracterizada pela diferença entre os dois caminhos, adsorção e dessorção é conhecida como histerese (SILVA, 2004). A Figura 6 apresentada a seguir representa as três áreas ou zonas que caracterizam a isoterma de sorção.

**Figura 6** - Isoterma de sorção de umidade típica de um alimento.



Fonte: Silva (2004).

Segundo Oliveira (2008), a zona I corresponde a atividade de água entre 0 e aproximadamente 0,25. Representa uma água fixa aos grupos polares, e não está disponível para agir como solvente, além de ser difícil de reagir e não ser congelável. A zona II é caracterizada pelas camadas de hidratação dos componentes solúveis como: sais, açúcares, proteínas, etc., ligada por interações dipolo-dipolo seu ponto de congelamento é bastante limitado, a atividade de água está representada na faixa de 0,25 a aproximadamente 0,8. Contemplando a zona III encontra-se a água dos tecidos frescos em maior quantidade, também caracterizada pela água mais facilmente de ser removida por ser menos ligada, porém está mais suscetível ao desenvolvimento de microrganismos.

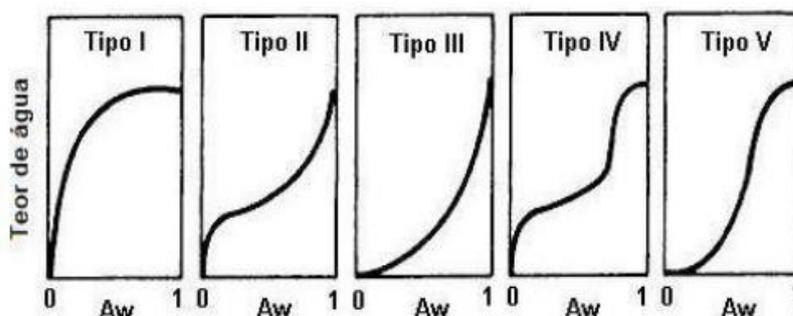
A fim de compreender como esses elementos da isoterma de sorção podem estar relacionados com diferentes interações da água, ressalta-se:

A sorção de água é um fenómeno que começa pela formação de uma monocamada sobre a superfície do produto e é seguida pela adsorção de água em multicamadas. A adsorção de água na multicamada consiste na entrada de água nos poros e espaços capilares, na dissolução de solutos e no aprisionamento mecânico de água (FERREIRA, 2011).

Segundo Aniceto (2010), o processo de adsorção acontece devido as forças de Van Der Waals, na qual as moléculas de um gás ou líquido são retidas da superfície de um sólido, devido as forças superficiais entre ambas as moléculas. Quanto as isotermas de adsorção, foi estabelecido por Brunauer uma classificação equivalente ao seu comportamento em variados

sólidos, são cinco os tipos publicados e apresentados na Figura 6. De acordo com Ferreira (2011), a maioria dos materiais biológicos correspondem as isotermas do tipo II na forma de curva não linear, e forma sigmoidal, a Figura 7 apresenta os mais diversos tipos de isotermas.

**Figura 7** - Tipos de isotérmica segundo a classificação estabelecida por Brunauer.



Fonte: Ferreira (2011).

Em seguida é apresentado os dois tipos de métodos para determinar as isotermas de sorção, o método estático e o método dinâmico. No método estático o sólido é mantido em um recipiente hermeticamente fechado atendendo condições constantes de temperatura e umidade relativa, por outro lado o método dinâmico se aplica com a presença de ar movimentado mecanicamente lixivia o sólido sob condições controladas de umidade e temperatura (PERAZZINI, et al.,2015).

Ambos os métodos possuem vantagens particulares que podem ser consideradas conforme o produto que está sendo trabalhado, o método estático permite se obter condições termodinâmicas constantes, já o método dinâmico a velocidade de equilíbrio termodinâmico é alcançada entre as fases. No entanto, devido a presença de poucos pontos experimentais dificulta uma melhor representação do comportamento da atividade de água, sendo assim, utiliza-se diversos modelos matemáticos para a construção das isotermas, até mesmo em zonas de baixa e alta atividade (OLIVEIRA; CIRILLO; BORGES, 2011).

### 3.3.1 Modelos Matemáticos para ajuste das isotermas de Sorção

A seguir são apresentado alguns modelos matemáticos para ajustes das isotermas de sorção, com o intuito de prever o comportamento das isotermas, diversos autores propuseram modelos de ajuste de isotermas de sorção. Estes modelos são úteis no conhecimento das características dos produtos. Em sua maioria são modelos empíricos e serão discutidos a seguir na Tabela 2 (SILVA; PARK; MAGALHÃES, 2007).

**Tabela 2** - Modelos para ajustes de isotermas de sorção de umidade.

<b>NOME DO MODELO</b>	<b>MODELO</b>
<b>BET</b>	$X_e = \frac{X_m CA_w}{(1 - A_w)[1 + (C - 1)A_w]}$
<b>GAB</b>	$X_e = \frac{X_m CKA_w}{(1 - KA_w)[1 + (C - 1)KA_w]}$
<b>HALSEY</b>	$X_e = \left( \frac{-a}{\ln A_w} \right)^{\frac{1}{b}}$
<b>OSWIN</b>	$X_e = a \left( \frac{A_w}{1 - A_w} \right)^b$
<b>HENDERSON</b>	$X_e = \left( \frac{-\ln(1 - A_w)}{a} \right)^{\frac{1}{b}}$

Fonte: Park; Brod (2001) adaptada.

### 3.3.1. Modelo de GAB (Guggenheim, Anderson e de Boer)

O modelo sugerido por GAB é capaz de representar a isoterma de sorção em estado termodinâmico para a água livre e para a água ligada, em um sistema alimentar, pois é considerado como um dos modelos mais versátil, atende uma ampla faixa de atividade de água até 0,9 (RIBEIRO, 2010). Porém, na visão de Freitas (2010), o modelo de GAB não atende as condições dos materiais com superfícies irregulares ou ásperas como grãos ricos em amidos.

### 3.3.2 Modelo de BET (Brunauer, Emmet e Teller)

O modelo desenvolvido por Brunauer, Emmett e Teller (BET) é amplamente empregado em diversos tipos de alimentos, possui multicamadas (fisiossorção) sendo possível indicar a quantidade de substância adsorvida na primeira camada ou zona II para uma curva do tipo II segundo a classificação estabelecida por Brunauer. Também é possível calcular a área superficial específica dos adsorventes, o que não era bem definido pela equação de Lanmguir.

### 3.3.3 Modelo de Oswin

O modelo de Oswin foi desenvolvido, baseando-se na expansão matemática para curvas de formato sigmoidal, é um modelo de fácil linearização possuindo apenas duas constantes, e apresentando vantagens sobre os modelos de GAB e BET (CORRÊA, 2011). O modelo de Oswin apresenta bons resultados para isotermas advindas de produtos vegetais, amiláceos e carnes. Segundo (ZEYMER, 2017) só foi possível exibir este modelo em função da temperatura, após ajustes até se obter o modelo de Oswin modificado.

### 3.3.4 Modelo de Halsey

O modelo de Halsey é utilizado para representar o comportamento higroscópico de uma variedade de produtos, consiste em representar a condensação a uma distância considerável da superfície (ZEYMER, 2017).

### 3.3.5 Modelo de Handerson

Handerson desenvolveu um dos modelos empíricos mais empregados para representar o comportamento de alimentos como: frutas, cereais e grãos, atendendo uma faixa de atividade de água que vai de 0,10 até 0,75 (BEZERRA, 2009).

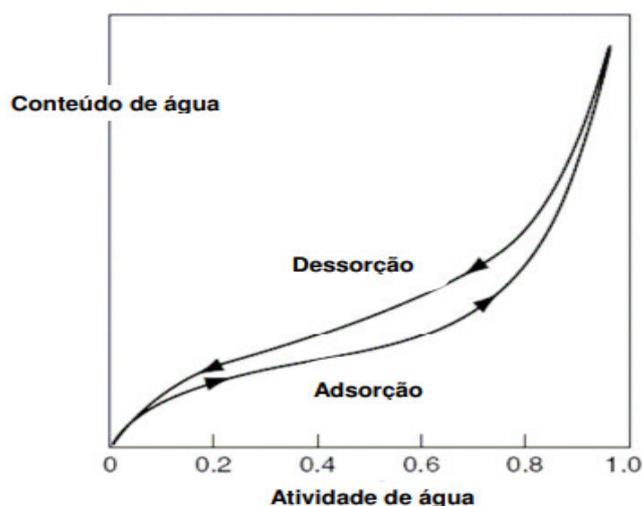
## 3.4 Histerese de Sorção

Histerese corresponde ao espaço entre as curvas de dessorção e adsorção. Se forma devido a vários fatores como: impureza na superfície, mudança de estrutura física do material, mudança de fase, assim como condensação capilar. Através do estudo da histerese é possível prever a tendência de ocorrer a deterioração por reações químicas e microrganismos (FELLOWS, 2018).

Segundo Oliveira (2008), a histerese é extremamente importante na precaução conta o ganho de umidade, assim sendo para se atingir determinada umidade faz-se uso de uma pressão parcial de água menor para processo de dessorção, ao invés de uma pressão parcial elevada nos casos de adsorção. Outra maneira de descrever o fenômeno da histerese foi anunciado por

labuza (1968), onde descreve as curvas de adsorção e dessorção possuir pescoços estreitos e corpos largos, capilar não será preenchido por completo até que a atividade de água seja atingida, caracterizando a adsorção, por outro o esvaziamento caracteriza a dessorção apresentando valores menores. Figura 8 representada a seguir ilustra tal fenômeno.

**Figura 8** – Fenômeno de Histerese.



Fonte: Oliveira (2008)

Portanto, a histerese é de fundamental na compreensão das curvas de adsorção e dessorção, levando diversos autores ao estudo mais aprofundado de sua utilidade. A seguir é apresentado as contribuições das propriedades termodinâmica que auxiliaram na construção deste trabalho.

### 3.5 Propriedades termodinâmicas

As propriedades termodinâmica da água são utilizadas para fornecer informações a respeito do estado em que se encontra a água no produto alimentício, para determinar a quantidade mínima de energia necessária na desidratação. Também se aplica quando ocorre um processo simultâneo de transferência de calor e massa, quando se pretende caracterizar parâmetros cinéticos de sorção, assim como realizar deduções na microestrutura da superfície do produto (ZEYMER, 2017).

Segundo Park et al., (2008), há três maneiras para classificar as funções termodinâmicas quanto a desidratação dos alimentos, entre elas podemos citar: Termodinâmica de solução, que implica na formação de fases simples e independentes, formadas pelos adsorvidos e

adsorventes. Porém é limitada por apresentar erros nas informações individualizadas emitidas quanto água/matriz sólida. Já o método termodinâmico de adsorção, permite o equilíbrio entre o vapor de água, adsorvente e o adsorvido (água). Por último, o terceiro método é caracterizado por medidas diretas de propriedades termodinâmicas, relacionada a entalpia gerada pela calorimetria como função do teor água na matriz.

A seguir é caracterizada cada uma das principais propriedades termodinâmica no estudo de sorção de água, fundamentais em processos de secagem, armazenamento, mistura de alimentos, acondicionamento como até mesmo na análise de projetos de equipamentos (CORRÊA, 2011).

### 3.5.1 Calor isostérico integral ( $Q_{st}$ )

O calor Isostérico de sorção é uma das propriedades termodinâmica de sorção de água muito importante nos processos que envolve transferência de calor e massa, é empregado para determinar a quantidade mínima de energia para a secagem do alimento. Ele é obtido por dados de equilíbrio higroscópico e determinado termodinamicamente pela diferença existente entre a entalpia da água líquida adsorvida no sólido e a entalpia da água na fase de vapor, logo a diferença entre a entalpia fornece a quantidade de energia necessária para evaporar a água adsorvida na fase sólida do produto (LIMA; SILVA; QUEIROZ, 2008).

Segundo Silva e Araujo (2017), conhecendo o calor isostérico é possível também conhecer algumas alterações sofrida na microestrutura do alimento. A equação de Clausius-Clapeyron é amplamente utilizada para calcular o calor Isostérico de vários alimentos, através dela é possível relacionar o calor de sorção e o teor de umidade, logo teor de umidade diminui, uma vez que o calor de sorção da água no alimento aumenta (SILVA; GOUVEIA; ALMEIDA, 2002).

A Equação 2 a seguir é conhecida como equação de Clausius-Clapeyron.

$$\frac{\partial(\ln a_w)}{\partial(1/T)} = -\frac{q_s}{R} \quad (2)$$

### 3.5.2 Entropia diferencial ( $\Delta S$ )

A entropia diferencial de sorção está relacionada ao número de sítios de sorção, em um nível de energia considerável, e inerente ao material biológico. Os cálculos de entropia são

bastante empregados para obter informações de processamento, cristalização e dissolução de um produto (ASCHERI et al., 2009).

Da mesma forma é afirmado por Zeymer (2017), a entropia é proporcional ao número de sítios quando há desordem no sistema, o processo é considerado espontâneo e entropia negativa. A Equação 3 será utilizada para calcular a entropia diferencial de sorção.

$$\Delta S = \frac{Q_s - \Delta G}{T} \quad (3)$$

### 3.5.3. Energia livre de Gibbs ( $\Delta G$ )

A energia livre de Gibbs é uma propriedade termodinâmica muito utilizada nos processos de desidratação e secagem, uma vez que avalia a finidade presente entre a água e o alimento, pode ser apresentada de forma espontânea ou não (OLIVEIRA, 2013).

A equação a seguir é utilizada para calcular a energia livre de Gibbs. Para Oliveira et al., (2014), a energia livre de Gibbs é o balanço entre a entalpia e a entropia, processo emprega a temperatura e pressão constantes.

$$\Delta G = RT \ln a_w \quad (4)$$

## 4. METODOLOGIA

### 4.1. Material

A matéria-prima utilizada neste experimento foi a farinha de mazamorra de quinoa com cal. O produto utilizado foi obtido em comércio local na cidade de Juliaca, Peru. Envasada por PLANTA PROCESADORA DE CULTIVOS ANDINOS Y ALTOANDINOS S.A.C, com data de validade sendo 21 de agosto de 2018. O produto foi armazenado em uma estufa e os experimentos foram conduzidos em novembro de 2017.

#### 4.1.1. Ácido sulfúrico

Para determinação da atividade de água dos microambientes, utilizou-se ácido sulfúrico 95% PA, fabricado pela Quimex com data de validade sendo 1 de dezembro de 2018. O ácido sulfúrico foi diluído em concentrações pré-determinadas com condições de atividade de água apresentadas por Labuza et al., (1985).

### 4.2. Aparato experimental

#### 4.2.1. Preparação dos microambientes

Utilizou-se recipientes herméticos para simular os microambientes. Estão são chamados de microambientes pois cada um irá conter uma solução de ácido sulfúrico a uma dada concentração, que a uma dada temperatura apresentará uma determinada atividade de água, assim, tem-se controle da temperatura e atividade de água do meio.

Por conta do alto potencial corrosivo do ácido sulfúrico, as amostras ficaram suspensas em três pedaços de PVC, não havendo contato com a solução diluída de ácido. As amostras foram depositadas em copos descartáveis de 50 mL. A Figura 9 apresenta os microssistemas contendo as amostras da farinha de mazamorra de quinoa.

**Figura 9** – Microssistema com amostra suspensa sobre solução de ácido sulfúrico.



Fonte: Autor deste trabalho (2021)

#### 4.2.2. Incubadora B.O.D

Com o objetivo de manter as temperaturas dos microssistemas constantes, utilizou-se a mini incubadora B.O.D. NT 73. Esta mantém a sua temperatura interna constante entre 5 e 60°C. A Figura 10 apresenta a mini incubadora utilizada na condição do experimento.

**Figura 10** – Mini incubadora B.O.D. NT 73.



Fonte: Autor deste trabalho (2021)

#### 4.2.3. Balança

Para medidas de peso das amostras ao longo dos experimentos, utilizou-se uma balança de precisão modelo BL320H da marca SHIMADZU DO BRASIL COMÉRCIO LTDA em 2015.

**Figura 11** – Balança de precisão modelo BL320H.



Fonte: Imagem ilustrativa da plataforma de vendas SynthLab.

### 4.3. Procedimento experimental

#### 4.3.1. Preparo das amostras

Este trabalho tem como objetivo verificar a influência da adição de umidade e temperatura sobre o comportamento das isotermas de sorção da farinha de mazamorra de quinoa com cal. Inicialmente foram verificadas as isotermas de sorção da farinha in natura, no seu estado de comercialização. Para verificação da influência da adição de umidade sobre as isotermas de sorção, foram adicionadas quantidade de água sobre as amostras de forma a aumentar o percentual de umidade das mesmas. Tendo conhecimento das quantidades de umidade da farinha in natura, foram calculadas as quantidades de água necessárias para aumentar o percentual de água em cada amostra em 30 e 40%. Assim, as isotermas de sorção foram verificadas para a farinha de mazamorra de quinoa com cal in natura e com adições de 30 e 40% de umidade.

#### 4.3.2. Obtenção das isotermas de sorção

Em cada recipiente hermético foram depositados três pedaços de cano de PVC, mantendo as amostras suspensas sobre as soluções de ácido. Cada recipiente continha 100 mL de ácido posteriormente preparadas. Para o desenvolvimento dos demais resultados faz-se necessário a obtenção da umidade da matéria-prima utilizada. O conteúdo de umidade inicial do material foi determinado em estufa a 105 °C por 24 horas segundo o método AOAC 934.06 (Aoac, 2007). Após 24 horas as amostras foram retiradas e foi verificado a quantidade de massa restante em cada amostra. Foram utilizadas três amostras de aproximadamente 1 g. Após o processo de secagem na estufa, espera-se que toda a quantidade de água deixe a farinha e assim é possível determinar a quantidade de massa seca da amostra. A média das amostras medidas indicam que para 1 g de farinha de mazamorra de quinoa, cerca de 0.950 g corresponde a massa seca. Tendo conhecimento deste resultado, faz-se possível a determinação das umidades de equilíbrio da farinha de mazamorra de quinoa em temperaturas constantes em função da atividade de água do meio. A Tabela 3 apresenta valores obtidos de atividade de água para as soluções de ácido sulfúrico em função da concentração e temperatura.

**Tabela 3** – Atividade de água do ácido sulfúrico.

[H <sub>2</sub> SO <sub>4</sub> ]	Temperatura (°C)		
	30	45	60
30%	0,7604	0,7648	0,7691
40%	0,5816	0,5885	0,5985
50%	0,3702	0,3834	0,3955
60%	0,1781	0,1884	0,1985
70%	0,0521	0,0569	0,0621
80%	0,0059	0,0077	0,0103

Fonte: Labuza et al., (1985)

As isotermas de adsorção da farinha de mazamorra de quinoa foram estudadas através do método estático gravimétrico, utilizando-se soluções de ácido sulfúrico ( $H_2SO_4$ ) nas concentrações de 30%, 40%, 50%, 60%, 70% e 80%. Desta forma foram criados microssistemas com atividades de água ( $a_w$ ) que variaram de 0,000 até 0,769 na faixa de temperaturas de 30 – 60 °C (Labuza *et al.*, 1985; Rizvi, 2005). Aproximadamente 1,0 g de amostra foi pesado em um copo de plástico previamente tarado e posicionado sobre um suporte no interior do frasco de vidro hermético, contendo em seu fundo uma das soluções de  $H_2SO_4$ . O mesmo processo foi repetido para todas as soluções de ácido sulfúrico, onde em cada frasco foi colocado um total de três amostras. Após os frascos contendo as amostras foram armazenados em uma incubadora B.O.D. (modelo SP-500, SPLabor, Brasil) às temperaturas de 30, 45 e 60 °C. As amostras foram pesadas em intervalos de tempo de 2 dias em balança semi-analítica (modelo BL-320, SHIMADZU, Japão) até obter o peso constante. Os resultados da umidade equilíbrio da farinha de mazamorra de quinoa foram apresentados em base seca (kg água/kg sólido seco).

## 5. RESULTADOS

### 5.1. Isotermas de sorção

A Tabela 4, a seguir, apresenta os valores encontrados de umidade de equilíbrio com a atividade de água das soluções diluídas de ácido sulfúrico para construção das isotermas de sorção da farinha de mazamorra de quinoa.

**Tabela 4** – Umidades de equilíbrio em função da atividade de água do meio para temperaturas fixadas das amostras de farinha de mazamorra de quinoa com adições de umidade (a: In natura; b: + 30% de umidade; c: + 40% de umidade).

a)

$a_w$	In natura	+ 30% umidade	+ 40% umidade
	$X_e$ (kg/kg, b.s)		
0	0	0	0
0,047	0,009	0,014	0,002
0,168	0,022	0,029	0,007
0,357	0,038	0,047	0,019
0,571	0,061	0,075	0,037
0,755	0,091	0,109	0,072

b)

$a_w$	In natura	+ 30% umidade	+ 40% umidade
	$X_e$ (kg/kg, b.s)		
0	0	0	0
0,054	0,005	0,01	0,003
0,183	0,01	0,02	0,006
0,377	0,023	0,029	0,014
0,585	0,053	0,059	0,032
0,762	0,088	0,09	0,07

c)

$a_w$	In natura	+ 30% umidade	+ 40% umidade
	$X_e$ (kg/kg, b.s)		
0	0	0	0
0,062	0,003	0,005	0,004
0,199	0,005	0,009	0,006
0,396	0,018	0,021	0,022
0,599	0,038	0,044	0,042
0,769	0,068	0,073	0,073

Fonte: Autor deste trabalho (2021)

As reduções da quantidade de massa com acréscimos de temperatura são justificadas pela elevação no nível de desordem das moléculas de água adsorvidas ou dessorvidas. Aumentos de temperatura facilitam a quebra de suas ligações com sítios ativos na superfície do alimento, assim, a quantidade de sítios ativos tende a aumentar ao passo que a umidade diminui (Ascheri *et al.*, 2009).

A Tabela 4a reporta os resultados referentes ao equilíbrio higroscópico da farinha de mazamorra de quinoa em estado natural de comercialização, com 0.05% de umidade em sua composição. As Figuras 4b e 4c apresentam os resultados obtidos utilizando a farinha com

adições de umidade de 30 e 40 %, respectivamente. Nota-se que a adição de umidade na farinha provoca o comportamento inverso ao obtido com a farinha in natura, uma vez que a matéria prima deixa de ceder umidade e passa a ganhar conteúdo de umidade do ambiente que contém a mesma. Dessa forma é possível verificar o fenômeno de histerese forçado pela adição de umidade ao material.

#### 5.1.1. Modelagem das isotermas de sorção

Os dados experimentais apresentados na Tabela 4 foram verificados utilizando os modelos empíricos de Oswin, Handerson e Halsey além dos modelos teóricos de GAB e BET. Estes foram apresentados com mais detalhes no Capítulo 3 deste trabalho. Os modelos descritos foram ajustados às isotermas experimentais da farinha de mazamorra de quinoa. Utilizou-se o *software Excel*® aliado ao otimizador *solver* para minimizar os desvios obtidos entre resultados calculados e experimentais variando os respectivos parâmetros de cada modelo. Para cada modelo foram determinados os coeficientes de correlação ( $R^2$ ) e as raízes dos quadrados médios dos erros (*RMSE*).

A Tabela 5 apresenta os resultados obtidos para o modelo de Oswin apresentando os parâmetros do modelo junto dos coeficientes de correlação e as raízes dos quadrados médios dos erros. A Tabela 5 apresenta somente os ajustes obtidos do modelo de Oswin, uma vez que este apresentou melhor ajuste com os dados experimentais com valores para os coeficientes de correlação acima de 0,999. Os ajustes obtidos para os demais modelos são apresentados no Anexo A deste trabalho. Ambos apresentam ótimo ajuste com coeficientes de correlação acima de 0,9.

Dos resultados verificados na Tabela 5 pode-se concluir que o modelo de Oswin representa bem o conjunto de dados experimentais. Assim, este pode ser utilizado para representar o comportamento higroscópico das isotermas de sorção de água da farinha de mazamorra in natura e com adições de umidade. O modelo de Oswin é amplamente aplicado a sementes e grãos, alimentos de baixo teor de umidade, por isso, as isotermas da farinha de mazamorra apresentam umidades de equilíbrio sempre abaixo de 0.1 kg/kg in natura (Rosa *et al.*, 2013).

**Tabela 5** – Resultados dos ajustes dos modelos com os dados experimentais.

Parâmetros	T= 30°C		
	In Natura	30% umidade	40% umidade
<i>a</i>	0,051	0,064	0,029
<i>b</i>	0,519	0,486	0,803
<i>R</i> <sup>2</sup>	0,999	0,999	1,000
<i>RMSE</i>	0,002	0,001	0,001
T = 45°C			
<i>a</i>	0,037	0,045	0,023
<i>b</i>	0,747	0,593	0,947
<i>R</i> <sup>2</sup>	0,999	0,999	1,000
<i>RMSE</i>	0,001	0,002	0,001
T = 60°C			
<i>a</i>	0,026	0,031	0,029
<i>b</i>	0,822	0,734	0,770
<i>R</i> <sup>2</sup>	0,999	0,999	0,999
<i>RMSE</i>	0,000	0,001	0,000

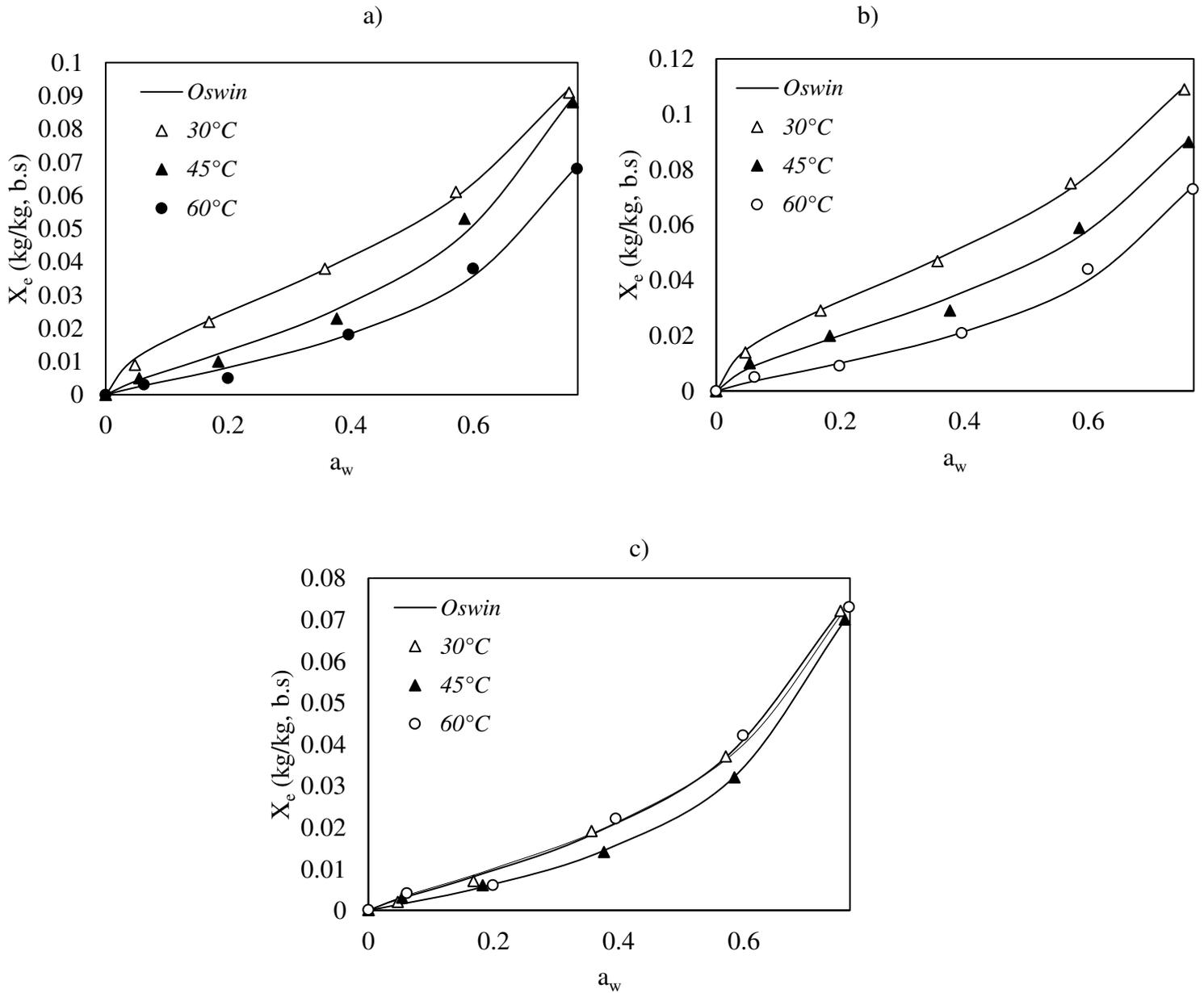
Fonte: Autor deste trabalho (2021)

A Figura 12 apresenta as isotermas de sorção da farinha de mazamorra de quinoa. A Figura 12a apresenta as isotermas a 30 °C para a farinha de mazamorra de quinoa in natura e com adições de umidade. A Figura 12b e 12c apresentam as isotermas a 45 e 60 °C para a farinha de mazamorra de quinoa com adições de 30 e 40 % de umidade, respectivamente.

Os dados das isotermas de adsorção da farinha de mazamorra indicam características de produtos com baixo conteúdo de água, em altos níveis de atividade de água (curvas tipo V) (Brunauer *et al.*, 1940; Barbosa-Cánovas *et al.*, 2007). Além disso, foi observado um incremento do conteúdo de umidade de equilíbrio quando a atividade de água aumenta e, para cada nível de atividade de água foi observado uma diminuição do conteúdo de umidade de equilíbrio quando a temperatura aumenta. Este material está composto em sua maioria por carboidratos e, a baixas temperaturas, quando a pressão de saturação é pequena no sistema, favorece que os produtos tenham melhor capacidade de absorção de água (Prachayawarakorn *et al.*, 2002; Al-Muhtaseb *et al.*, 2004).

Um resultado não esperado foi observado para as isotermas da farinha de mazamorra de quinoa com adição de 40% de umidade, onde as isotermas de 30 e 60°C coincidem e a isoterma de 45°C apresenta menores índices de equilíbrio higroscópico. Espera-se que estes resultados possam ser melhor verificados no tratamento das propriedades termodinâmicas das isotermas de sorção.

**Figura 12** – Isotermas de sorção da farinha de mazamorra de quinoa ajustadas utilizando o modelo de Oswin apresentada com respectivos dados experimentais (a: 30°C; b: 45°C; c: 60°C).



Fonte: Autor deste trabalho (2021)

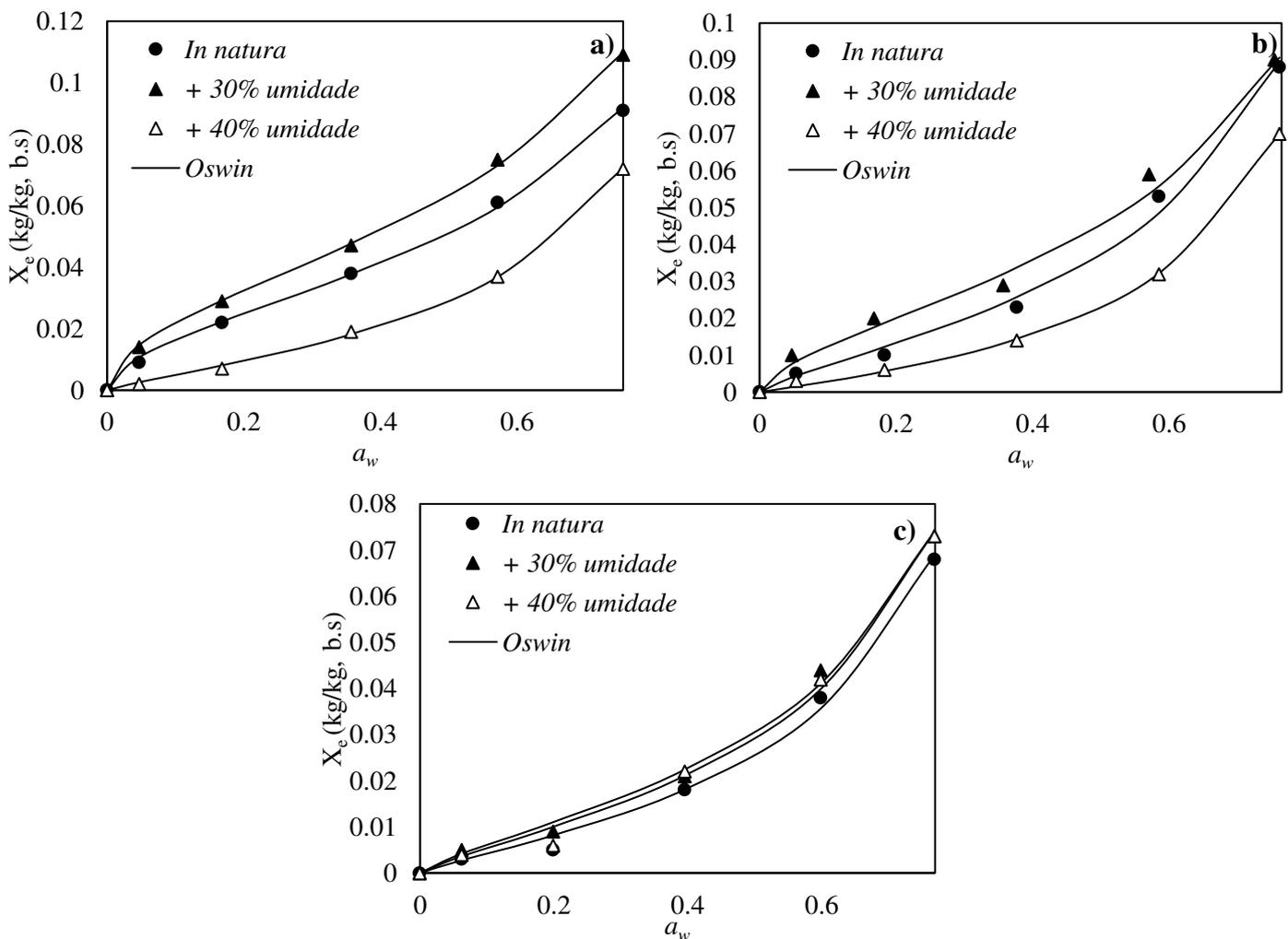
## 5.2. Histerese das isotermas de sorção

Este tópico tem por objetivo apresentar o comportamento do fenômeno de histerese associado às isotermas de sorção in natura e com adições de umidade na farinha de mazamorra de quinoa. No estado natural, a farinha de mazamorra de quinoa possui alto potencial de receber umidade do ambiente, uma vez que esta possui baixo teor de umidade, assim, as isotermas características desta são de adsorção. No entanto, ao adicionar umidade nesta matéria-prima o comportamento das

isotermas passa a ser de dessorção, assim, a área que compreende as isotermas de sorção e dessorção podem ser verificadas do ponto de vista do fenômeno de histerese (Ordoñez *et al.*, 2005).

A Figura 13 apresenta o comportamento das histereses associadas as isotermas de sorção da farinha de mazamorra de quinoa. A Figura 13a, 13b e 13c apresentam o fenômeno de histerese a 30, 45 e 60°C, respectivamente. Os resultados estão de acordo com o esperado, uma vez que o aumento de temperatura diminui as áreas entre as curvas pelo mesmo motivo apresentado para o comportamento das isotermas. Verifica-se que a área compreendida entres as curvas de adsorção de dessorção torna-se menor com o aumento da temperatura. Resultados semelhantes foram observados por Goneli *et al.*(2016) ao verificar a histerese das isotermas de sorção dos grãos de mamona.

**Figura 13** – Histerese das isotermas de sorção da farinha de mazamorra de quinoa ajustadas utilizando o modelo de Oswin apresentada com respectivos dados experimentais (a: in natura; b: com 30% a mais de umidade; c: com 40% a mais de umidade).



Fonte: Autor deste trabalho (2021)

Nota-se que o aumento da adição de umidade à farinha de mazamorra de quinoa com cal, provoca o aumento do fenômeno de histerese, esse resultado é justificado pelo fato de que o aumento da umidade de ao material, aumenta a tendência do mesmo a doar conteúdo de umidade para o meio, dessa forma, a massa úmida na amostra ao fim do experimento será menor, conseqüentemente, a umidade de equilíbrio em base seca será menor. A adição de umidade implica no aumento de sítios ativos para troca de umidade, pois a água se encontra livre, não estrutural, e se tratando do fenômeno de dessorção, há uma facilidade a doar água para o sistema.

A Tabela 6 apresenta os resultados obtidos para área de histerese e índice de histerese em relação a dessorção para as curvas apresentadas na Figura 13.

Os resultados apresentados na Tabela 6 validam a discussão feita previamente acerca do fenômeno de histerese. Para todos os casos em análise, a histerese se comportou de forma inversa à variação de temperatura e umidade, ou seja, quanto maior a temperatura e umidade acionada à matéria-prima, menor foi a área de histerese. Verifica-se também que o aumento da temperatura e umidade adicionada à matéria-prima provocam a redução do IHDR (*Índice de histerese em relação a dessorção*). A efeito do aumento temperatura para a redução do IHDR da farinha de mazamorra, assemelham-se aos resultados apresentados por Paglarini *et al.* (2013) ao verificar o fenômeno de histerese das isotermas de sorção da polpa de manga.

**Tabela 6** - Histerese para as isotermas de sorção da farinha de Mazamorra.

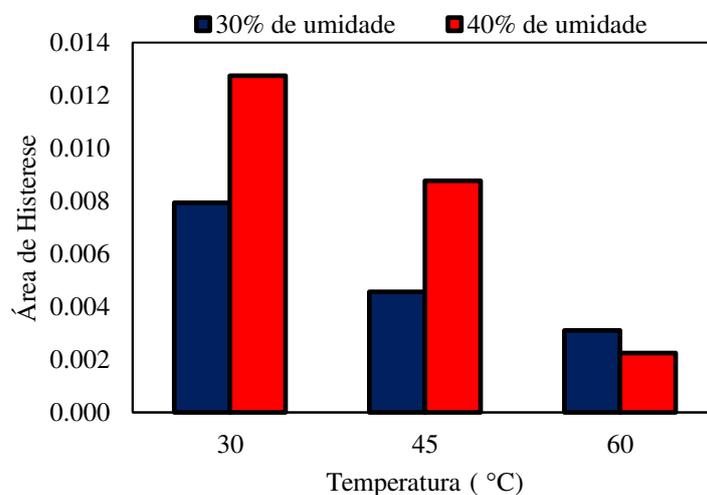
	T = 30°C	
Umidade	30%	40%
IHDR (%)	0,186	0,578
Área de Histerese	0,008	0,013
	T = 45°C	
Umidade	30%	40%
IHDR (%)	0,149	0,475
Área de Histerese	0,005	0,009
	T = 60°C	
Umidade	30%	40%
IHDR (%)	0,140	0,105
Área de Histerese	0,003	0,002

Fonte: Autor deste trabalho (2021)

Calculando a diferença entre a área de dessorção e adsorção das isotermas de equilíbrio higroscópico da farinha de mazamorra, nota-se que a redução da histerese foi de 60% para a farinha com 30% de umidade e 81% para a farinha com 40% de umidade variando a temperatura do sistema de 30 a 60°C. O IHDR sofre aumento de 24% para a farinha com 30% de umidade e 81% para a farinha com 40% de umidade quando comparas as temperaturas de 30°C e 60°C.

A Figura 14 apresenta a área de histerese em função da temperatura para as condições de umidade da farinha de Mazamorra.

**Figura 14** - Histerese das isotermas de sorção de água da farinha de Mazamorra in natura e com adições de umidade.



Fonte: Autor deste trabalho (2021)

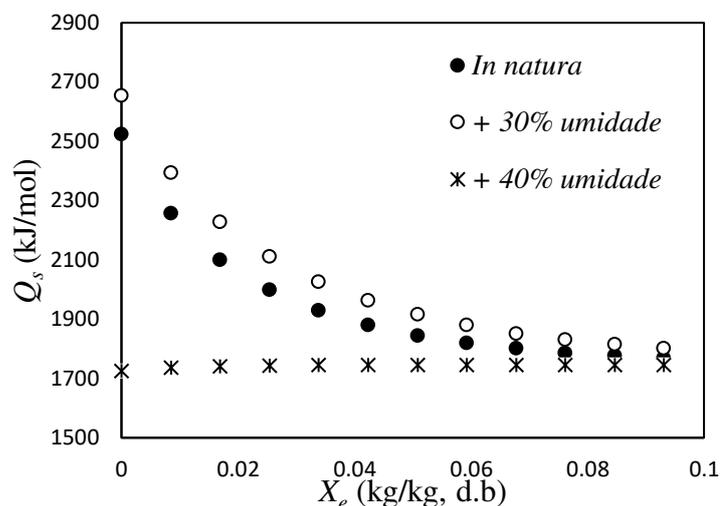
Os comportamentos estão de acordo com trabalhos anteriores reportados na literatura. Yan et al. (2008) também encontraram, ao trabalhar com banana, redução da área da histerese com o aumento da temperatura.

### 5.3. Propriedades termodinâmicas

Uma vez que já foi verificado que o modelo de Oswin ajusta bem o conjunto de dados experimentais das isotermas de sorção da farinha de mazamorra de quinoa para ambas as condições verificadas neste texto, este será utilizado para o cálculo das propriedades termodinâmica de sorção. Tendo conhecimento dos parâmetros do modelo, é possível recalculer a atividade de água em função de uma ampla faixa de umidades de equilíbrio, assim será possível aplicar o equacionamento apresentado no Capítulo 3 deste texto. Serão verificados o calor isostérico de sorção ( $Q_s$ ), entropia de sorção ( $\Delta S$ ) e a energia livre de Gibbs ( $\Delta G$ ) referente ao processo.

A Figura 15 apresenta o calor isotérico de sorção em função da umidade de equilíbrio das isotermas de sorção da farinha de mazamorra de quinoa.

**Figura 15** - Calor isostérico de sorção da farinha de mazamorra in natura e com adições de umidade.



Fonte: Autor deste trabalho (2021)

Nota-se que o calor isostérico de sorção da farinha de mazamorra de quinoa tende a diminuir com o aumento da umidade de equilíbrio, o que é esperado uma vez que o aumento da umidade de equilíbrio implica em menores sítios ativos disponíveis para a troca de massa (Al-Muhtaseb *et al.*, 2004). Verifica-se que os valores para o calor isostérico de sorção de água da farinha de mazamorra para ambas as condições verificados estão compreendidos no intervalo entre 2392,67 e 2465,25 kJ/kg, valores semelhantes foram obtidos por Teixeira *et al.* ao verificar o calor isostérico de sorção de água dos grãos de abóbora (2427,39 a 2446,19 kJ/kg) para condições próximas de umidade de equilíbrio da matéria-prima (0,0653 a 0,1652 kg/kg b.s). Nota-se que a curva para o calor isostérico de sorção para a farinha de mazamorra in natura, encontra-se entre as curvas para as condições de umidade analisadas neste trabalho. O calor isostérico de sorção para a farinha de mazamorra com 30% de umidade apresenta valores superiores para as demais condições analisadas para toda a faixa de umidade de equilíbrio, o que indica que nesta condição de umidade, a farinha tende a doar umidade para o meio com maior facilidade. Temos como comportamento oposto a curva do calor isostérico para a farinha de mazamorra com 40% de umidade, pois esta apresenta comportamento crescente com a umidade de equilíbrio.

O fato do calor isostérico de sorção da farinha de mazamorra de quinoa apresentar acréscimos com o aumento de umidade estão totalmente fora do esperado. Assim como nas

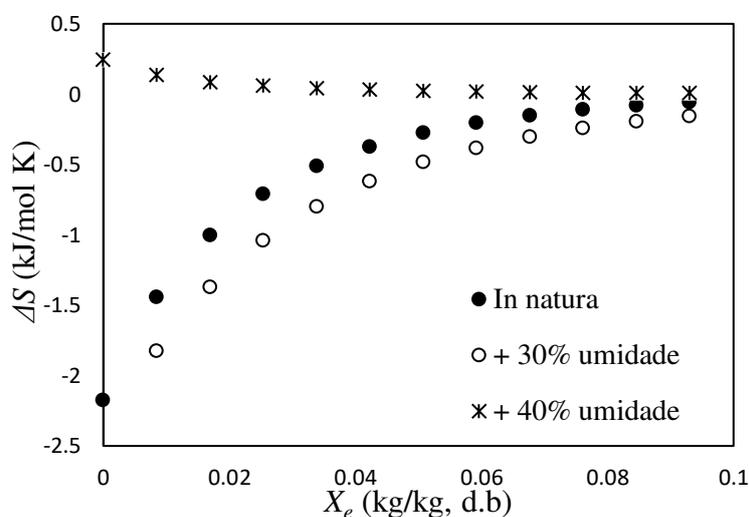
isotermas de sorção, percebe-se que os resultados do calor isostérico apresentam comportamento inverso com respeito às demais situações. Este resultado pode ser justificado pelo fato de que a adição em excesso na farinha de mazamorra de quinoa pode dificultar a transferência de massa da farinha com o ambiente, impossibilitando o contato do meio com os sítios ativos.

A Figura 16 apresenta os resultados para a entropia de sorção da farinha de mazamorra de quinoa. Nota-se que mais uma vez a curva da entropia para a farinha com adição de 40% de umidade apresenta um comportamento inesperado, diminuindo com o aumento da umidade de equilíbrio.

Valores negativos da entropia de sorção indicam que há boa interação sólido-líquido, o que implica em boa transferência de massa. Este valor tende a aumentar com acréscimos de umidade de equilíbrio pois o processo passa a ser menos espontâneo (Al-Muhtaseb *et al.*, 2002). Este resultado é reforçado ao verificarmos a Figura 17, esta apresenta o comportamento da energia de Gibbs referente ao processo de transferência de massa.

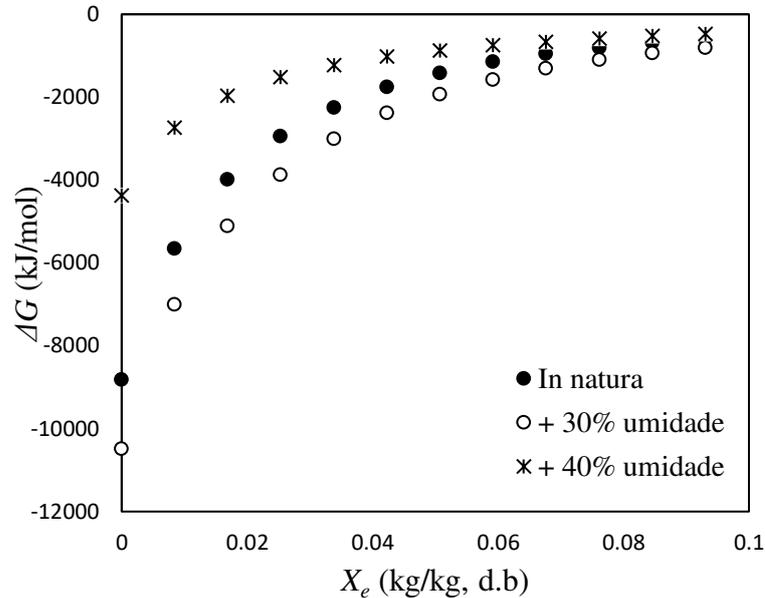
Tendo em vista que resultados negativos para a energia de Gibbs implicam em espontaneidade do processo de transferência de massa da farinha para o meio, nota-se que com adição de 30% de umidade a farinha de mazamorra de quinoa apresenta maior potencial para trocar umidade com o meio para as condições de temperaturas verificadas. Acréscimos de umidade próximos a 40% implicam em menor espontaneidade do processo de transferência de massa, uma vez que nesta condição o processo apresenta energia de Gibbs superior aos demais casos.

**Figura 16** - Entropia de sorção da farinha de mazamorra in natura e com adições de umidade.



Fonte: Autor deste trabalho (2021)

**Figura 17** – Energia de Gibbs associado ao fenômeno de sorção da farinha de mazamorra in natura e com adições de umidade.



Fonte: Autor deste trabalho (2021)

## 6. CONCLUSÕES GERAIS

Utilizando o modelo de Oswin foi possível prever o comportamento das isotermas de sorção da farinha de mazamorra de quinoa. Como esperado, a farinha in natura apresenta ótimo potencial para absorver água do meio ambiente, uma vez que possui baixa conteúdo de umidade, porém as adições de umidade mudam este comportamento, fazendo com que a farinha passe a ceder umidade ao ambiente. Assim, é possível verificar o processo de adsorção e dessorção de água, permitindo verificar o fenômeno de histerese. Como esperado, acréscimos de temperatura reduzem a área compreendida entre as curvas de adsorção e dessorção de água. A área de histerese utilizando a farinha com adição de 30% de umidade sofre redução de 0,008 para 0,003 variando a temperatura de 30 para 60°C. Para a farinha com adição de 40% de umidade, a área de histerese sofre redução de 0,013 para 0,002 com a mesma variação de temperatura. Além disto, nota-se que o aumento de umidade tende a diminuir a área de histerese.

Os resultados das propriedades termodinâmicas das isotermas de sorção indicam que ao adicionar 30% de umidade na farinha de mazamorra de quinoa o fenômeno de transferência de massa é otimizado, de forma que a farinha passa a ceder umidade para o meio com facilidade. O contrário acontece ao adicionar 40% de umidade à farinha, onde observa-se que a transferência de massa é dificultada. Analisando o calor isotérico de sorção é possível verificar este resultado, uma vez que a curva para quando a farinha contém adição de 30% de umidade apresenta valores de calor isotérico de sorção superiores aos obtidos para a farinha in natura,

indicando que nesta condição a transferência de massa é mais eficiente pela maior disponibilidade de sítios ativos. Ao adicionar 40% de umidade, os valores de calor isostérico passam a ser inferiores aos obtidos para a farinha in natura, indicando uma redução na quantidade de sítios ativos que pode ter sido ocasionado pela possível interação da água com a quantidade de amido presente da farinha, dificultando a troca de matéria com o meio. Os resultados para a entropia favorecem o que foi discutido.

Analisando a energia de Gibbs total do processo, nota-se que a adição de 30% de umidade à farinha favorece o processo de transferência de massa, fazendo deste mais espontâneo apresentando valores de energia de Gibbs “mais negativos”. A adição de 40% de umidade aumenta os valores de energia de Gibbs, indicando menor potencial de transferência de massa com o meio.

## REFERÊNCIAS

AOAC. **Official methods of analysis** Gaithersburg: AOAC International 2007.

ALANDIA, Gabriela et al. Global expansion of quinoa and challenges for the Andean region. **Global Food Security**, v. 26, p. 100429, 2020.

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, 2002/06/01/ 2002. ISSN 0960-3085. Available at: < <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0960308502703052> >.

ANICETO, José Pedro Salgado Castro et al. Otimização de unidades de secagem de ar por adsorção recorrendo a técnicas de planeamento de experiências. 2010.

ASCHERI, D. P. R. et al. Propriedades termodinâmicas de adsorção de água do amido de rizomas do lírio-do-brejo (*Hedychium coronarium*). v. 29, p. 454-462, 2009. ISSN 0101-2061.

BARBOSA-CÁNOVAS, G. V.; FONTANA JÚNIOR, A. J.; SCHMIDT, S. J.; LABUZA, T. P. Water activity in foods – **Fundamentals and Applications**. 1st ed. New York: John Wiley & Sons, 2007.

BARCELOS, K. M. et al. Discriminação de equações para isoterma de umidade de equilíbrio da casca de macadâmia. **Blucher Chemical Engineering Proceedings**, v. 1, n. 1, p. 356-360, 2014.  
BORGES, João et al. Características físico-químicas, nutricionais e formas de consumo da quinoa (*Chenopodium quinoa* Willd.). **Temas agrários**, v. 15, n. 1, p. 9-23, 2010.

BEZERRA, TÂNIA SULAMYTHA. COMPORTAMENTO HIGROSCÓPICO DE PÓS DE DIFERENTES VARIEDADES DE MANGA (*Mangifera indica* L.).

BRAGA, Ana Valéria Ulhano et al. Caracterização de atividade de água e cinética de dessorção de água em alimentos. 2016.

BRUNAUER, S. et al. On the theory of van der waals adsorption of gases. **Journal of the American Chemical Society**, v. 62, p. 1723-1732, 1940 1940.

CORREIA-OLIVEIRA, Maria Emilene et al. Atividade de água (aw) em amostras de pólen apícola desidratado e mel do estado de Sergipe. **Revista da Fapese**, v. 4, n. 2, p. 27-36, 2008.

DA SILVA, RENATO COSTA; ARAÚJO, KAROLINE THAYS ANDRADE. CALOR ISOSTÉRICO DE SORÇÃO DA SEMENTE DE GERGELIM BRS SEDA.

DITCHFIELD, Cynthia. **Estudo dos métodos para a medida da atividade de água**. 2000. Tese de Doutorado. Universidade de São Paulo.

FARINAZZI-MACHADO, F. M. V.; BARBALHO, S. M.; OSHIWA, M.; GOULART, R.; PESSAN JUNIOR, O. Use of cereal bars with quinoa (*Chenopodium quinoa* W.) to reduce risk factors related to cardiovascular diseases. *Ciência e Tecnologia dos Alimentos*, v. 32, n. 2, p. 239-244, 2012.

FELLOWS, Peter J. **Tecnologia do Processamento de Alimentos-: Princípios e Prática**. Artmed Editora, 2018.

FRANCISCO, Fabiana Gonçalves; USBERTI, Roberto; TONELI, Juliana Tofano de Campos Leite. Ajuste de isotermas de sorção de sementes de cultivares de feijoeiro. **Revista Brasileira de Sementes**, v. 29, p. 35-39, 2007.

GAVA, Altanir Jaime. **Tecnologia de alimentos**. NBL Editora, 2009. ISBN 8521313829.

GOUVEIA et al., L.A.G. Gouveia, V.S. Frangella, M.O.A. Exel. **Quinoa: nutricionais Propriedades e aplicações** Nutrição Brasil, 11 (1), pp. 56-61, 2012.

GÓMEZ, Luz Pando; AGUILAR, Enrique Castellanos. **GUÍA DE CULTIVO DE LA QUINUA**. FAO e Universidad Nacional Agraria La Molina Lima, 2016.

GONELI, A. L. et al. Moisture sorption isotherms of castor beans. Part 1: Mathematical modeling and hysteresis. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, v. 20, n. 8, p. 751-756, 2016. ISSN 1415-4366.

HOFFMANN, Fernando Leite. Fatores limitantes à proliferação de microorganismos em alimentos. **Brasil alimentos**, v. 9, n. 1, p. 23-30, 2001.

LAURA, Brigida Choquehuanca et al. Identidade, cultura e segurança alimentar: contradições na produção da quinoa real em comunidades tradicionais de Salinas de Garci de Mendoza, no Altiplano boliviano. 2019.

LABUZA, T. P.; KAAANANE, A.; CHEN, J. Y. Effect of Temperature on the Moisture Sorption Isotherms and Water Activity Shift of Two Dehydrated Foods. **Journal of Food Science**, v. 50, n. 2, p. 385-392, 1985. ISSN 1750-3841. Available at: < <http://dx.doi.org/10.1111/j.1365-2621.1985.tb13409.x> >.

LEMES, Erick de Oliveira et al. Pesquisa sobre a Intolerância, Diagnóstico e Alternativas para os Pacientes com Intolerância ao Glúten. **Ensaio e Ciência C Biológicas Agrárias e da Saúde**, v. 23, n. 1, p. 40-46, 2019.

LIMA, E. E. de; SILVA, A. S. A.; FIGUEIREDO, R. M. F. de; QUEIROZ, A. J. de M. Estudo das isotermas e calor isostérico de adsorção da farinha da coroa de frade. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, Campina Grande, v.10, n.2, p. 163-170, 2008.

LOPES, Cristiane de Oliveira et al. Aproveitamento, composição nutricional e antinutricional da farinha de quinoa (*Chenopodium quinoa*). **Alimentos e nutrição**, v. 20, n. 4, p. 669-675, 2009.

MARADINI FILHO, Antônio Manoel. Caracterização físico-química, nutricional e fatores antinutricionais de quinoa da variedade brasileira BRS PIABIRU. 2014.

MELO FILHO, Artur Bibiano de. Química de alimentos. - Recife: UFRPE, 2011.

MILHOMEM, Mateus Pereira de Sousa. Estudos de isotermas no processo de adsorção–revisão. 2021.

MORAES FILHO, Luiz Felipe Cardoso de. Quinoa (*Chenopodium quinoa* Willd.): uma revisão bibliográfica. 2013.

MOSCON, E. S.; MARTIN, S.; SPEHAR, C. R.; DEVILLA, I. A.; JUNIOR, F. R. CINÉTICA DE SECAGEM DE GRÃOS DE QUINOA (*Chenopodium quinoa* W.). **Revista Engenharia na**

**Agricultura - Reveng**, [S. l.], v. 25, n. 4, p. 318-325, 2017. DOI: 10.13083/reveng.v25i4.773. Disponível em: <https://periodicos.ufv.br/reveng/article/view/695>. Acesso em: 10 out. 2021.

OLIVEIRA, F. C. **Estudos tecnológicos e de engenharia para o armazenamento e processamento do pinhão**. 2008.

OLIVEIRA, Isabela Aguiar; CIRILLO, Marcelo Angelo; BORGES, Soraia Vilela. Estudo da não linearidade dos modelos de Oswin e Halsey aplicados na construção de isotermas. **Revista Ceres**, v. 58, n. 6, p. 735-739, 2011.

OLIVEIRA, Daniel Emanuel Cabral de et al. Propriedades termodinâmicas de grãos de milho para diferentes teores de água de equilíbrio. **Pesquisa Agropecuária Tropical**, v. 43, p. 50-56, 2013.

OLIVEIRA, Daniel Emanuel Cabral et al. Propriedades termodinâmicas das sementes de pinhão-mansão. **Bioscience Journal**, v. 30, 2014.

ORDOÑEZ, J. A. et al. Tecnologia de alimentos: componentes dos alimentos e processos. **Porto Alegre: Artmed**, v. 1, p. 203204, 2005.

PAGLARINI, Camila de S. et al. Histerese das isotermas de sorção da polpa de manga (*Mangifera indica* L.) variedade manteiga. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, v. 17, p. 299-305, 2013.

PARK, Kil Jin; BIN, Adriana; BROD, Fernando Pedro Reis. Obtenção das isotermas de sorção e modelagem matemática para a pêra bartlett (*Pyrus* sp.) com e sem desidratação osmótica. **Food Science and Technology**, v. 21, p. 73-77, 2001.

PRACHAYAWARAKORN, S. et al. Desorption isotherms and drying characteristics of shrimp in superheated steam and hot air. **Drying Technology**, v. 20, n. 3, p. 669-684, 2002/03/25 2002. ISSN 0737-3937. Available at: < <https://doi.org/10.1081/DRT-120002823> >.

PANDO, L.; AGUILAR, Guia de Cultivo de Quinoa. **Organização das Nações Unidas para a Alimentação e a Agricultura, Universidad Nacional Agraria La Molina**, v. 2, p. 17-18, 2016.

PERAZZINI, H. et al. ISOTERMAS DE ADSORÇÃO E DESSORÇÃO DE MATERIAIS GRANULARES POROSOS. **Blucher Chemical Engineering Proceedings**, v. 1, n. 2, p. 6090-6097, 2015.

PERRONE, Ítalo Tuler et al. Isotermas de sorção e caracterização físico-química de lácteos desidratados. **Revista do Instituto de Laticínios Cândido Tostes**, v. 68, n. 395, p. 33-38, 2013.

PONTES, Maria Luiza Morais; DOS SANTOS JUNIOR, Jules Mitoura. Isotermas e propriedades termodinâmicas de sorção de água da farinha de mazamorra de quina com cal. **Brazilian Journal of Development**, v. 6, n. 11, p. 87270-87284, 2020.

RIZVI, S. S. H. Thermodynamic properties of foods in dehydration. In: RAO, M. A. e RIZVI, S. S. H. (Ed.). **Engineering Properties of Foods**. 3. Boca Raton: Taylor & Francis, 2005. chap. 7, p.259-346.

ROSA, D. P. et al. Study of the enthalpy-entropy mechanism from water sorption of orange seeds (*C. sinensis* cv. Brazilian) for the use of agro-industrial residues as a possible source of vegetable oil production. v. 33, p. 95-101, 2013. ISSN 0101-2061.

SILVA, F.; PARK, K. J.; MAGALHÃES, P. M. Isotermas de dessorção de *Calendula officinalis* L.: determinação experimental e modelagem matemática. **Revista Brasileira de Plantas Mediciniais**, v. 9, n. 1, p. 21-28, 2007.

SILVA, Veruscka Araújo. Secagem osmo-convectiva da acerola. 2004. 199f. (Tese de Doutorado em Engenharia de Processos), Programa de Pós-graduação em Engenharia de Processos, Centro de Ciências e Tecnologia, Universidade Federal de Campina Grande - Paraíba - Brasil, 2004.

SILVA, Manassés M. da; DE GOUVEIA, Josivanda PG; ALMEIDA, Francisco de AC. Dessorção e calor isostérico em polpa de manga. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, v. 6, p. 123-127, 2002.

SPEHAR, Carlos Roberto. Quinoa: alternativa para a diversificação agrícola e alimentar. **Planaltina: Embrapa Cerrados**, v. 1, 2007.

SPEHAR, C. R.; SANTOS, R. L. B. Quinoa BRS Piabiru: alternativa para diversificar os sistemas de produção de grãos. *Pesquisa Agropecuária Brasileira*, Brasília, v. 37, n. 6, p. 889-893, Jun. 2002.

TADINI C.C; TELIS V. R.N; MEIRELLES A. J. A; FILHO P. A. P; Operações unitárias na indústria de alimentos Vol 2, p. 100-102, 2016.

\_\_\_\_\_. Water sorption isotherms of starch powders: Part 1: mathematical description of experimental data. **Journal of Food Engineering**, v. 61, n. 3, p. 297-307, 2004/02/01/ 2004. ISSN 0260-8774. Available at: < <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S026087740300133X> >.

YAN, Z.; SOUSA-GALLAGHER, M. J.; OLIVEIRA, F. A. J. J. O. F. E. Sorption isotherms and moisture sorption hysteresis of intermediate moisture content banana. v. 86, n. 3, p. 342-348, 2008. ISSN 0260-8774.

ZEYMER, Juliana Soares. Equilíbrio higroscópico e análise termodinâmica da sorção de água em grãos de arroz em casca. 2017.

**Apêndice A** – Resultados dos ajustes para os demais modelos.

Tabela A1: Resultado dos ajustes utilizando o modelo de GAB.

Parâmetros	T= 30°C		
	In Natura	30% umidade	40% umidade
$X_m$	0.719	0.043	0.281
$K$	0.851	9.311	0.177
$C$	0.166	0.840	0.620
$R^2$	0.996	0.999	0.999
$RMSE$	0.003	0.001	0.001
	T = 45°C		
$X_m$	0.426	0.029	0.181
$K$	0.183	6.200	0.139
$C$	0.557	0.919	0.761
$R^2$	0.999	0.996	0.999
$RMSE$	0.001	0.003	0.001
	T = 60°C		
$X_m$	0.051	0.045	0.293
$K$	0.691	1.108	0.186
$C$	0.795	0.790	0.593
$R^2$	0.999	0.999	0.999
$RMSE$	0.001	0.001	0.001

Fonte: Autor deste trabalho (2021)

Tabela A2: Resultado dos ajustes utilizando o modelo de BET.

Parâmetros	T= 30°C		
	In Natura	30% umidade	40% umidade
$X_m$	0.024	0.029	0.020
$C$	17.835	25.976	2.635
$R^2$	0.988	0.985	0.999
$RMSE$	0.003	0.003	0.000
T = 45°C			
$X_m$	0.023	0.023	0.021
$C$	3.393	12.460	1.272
$R^2$	0.992	0.988	1.000
$RMSE$	0.001	0.000	0.002
T = 60°C			
$X_m$	0.018	0.019	0.019
$C$	2.266	3.815	2.988
$R^2$	0.996	0.994	0.994
$RMSE$	0.000	0.001	0.001

Fonte: Autor deste trabalho (2021)

Tabela A3: Resultado dos ajustes utilizando o modelo de Henderson.

Parâmetros	T= 30°C		
	In Natura	30% umidade	40% umidade
$a$	39.236	38.922	12.771
$b$	1.383	1.489	0.836
$R^2$	0.999	0.998	0.999
$RMSE$	0.001	0.003	0.001
T = 45°C			
$a$	12.500	23.983	8.762
$b$	0.892	1.165	0.678
$R^2$	0.999	0.993	0.999
$RMSE$	0.003	0.005	0.002
T = 60°C			
$a$	12.427	15.529	13.817
$b$	0.796	0.902	0.857
$R^2$	1.000	1.000	0.999
$RMSE$	0.002	0.003	0.002

Fonte: Autor deste trabalho (2021)

Tabela A4: Resultado dos ajustes utilizando o modelo de Halsey.

Parâmetros	T= 30°C		
	In Natura	30% umidade	40% umidade
<i>a</i>	0.012	0.013	0.025
<i>b</i>	1.338	1.418	0.917
$R^2$	0.993	0.994	0.996
<i>RMSE</i>	0.007	0.007	0.003
T = 45°C			
<i>a</i>	0.025	0.015	0.032
<i>b</i>	0.991	1.212	0.808
$R^2$	0.989	0.991	0.999
<i>RMSE</i>	0.003	0.003	0.001
T = 60°C			
<i>a</i>	0.023	0.019	0.021
<i>b</i>	0.918	1.016	0.971
$R^2$	0.991	0.991	0.989
<i>RMSE</i>	0.002	0.002	0.003

Fonte: Autor deste trabalho (2021)

**Apêndice B** – Resultados termodinâmicos obtidos o modelo de *Owsin*.

Tabela B1: Dados termodinâmicos calculados utilizando o modelo de *Oswin* para a farinha de mazamorra de quinoa *in natura*.

$X_e$	T(°C)			$\ln a_w$	$\ln a_w$	$\ln a_w$	Coef. A	Coef. B	Qs	$\Delta S$	$\Delta G$
	30	45	60								
0.000	0.000	0.000	0.000								
0.008	0.030	0.120	0.206	-3.499	-2.120	-1.579	-6495.901	18.058	2523.501	-2.172	-8818.95
0.017	0.106	0.256	0.376	-2.245	-1.361	-0.977	-4287.656	11.976	2257.895	-1.440	-5658.42
0.025	0.206	0.372	0.497	-1.582	-0.988	-0.699	-2984.553	8.310	2101.159	-0.999	-3987.55
0.034	0.310	0.466	0.584	-1.170	-0.764	-0.538	-2132.045	5.891	1998.620	-0.709	-2947.88
0.042	0.409	0.540	0.648	-0.894	-0.615	-0.434	-1551.531	4.239	1928.797	-0.510	-2253.16
0.051	0.496	0.600	0.697	-0.702	-0.511	-0.361	-1146.042	3.085	1880.025	-0.371	-1768.22
0.059	0.570	0.649	0.735	-0.563	-0.433	-0.308	-856.831	2.264	1845.239	-0.272	-1418.57
0.068	0.631	0.688	0.765	-0.460	-0.374	-0.267	-646.651	1.669	1819.959	-0.201	-1159.67
0.076	0.682	0.721	0.790	-0.382	-0.327	-0.236	-491.264	1.232	1801.269	-0.148	-963.554
0.085	0.725	0.748	0.811	-0.322	-0.290	-0.210	-374.571	0.906	1787.233	-0.109	-811.994
0.093	0.760	0.772	0.828	-0.275	-0.259	-0.189	-285.684	0.659	1776.542	-0.079	-692.782
0.102	0.789	0.792	0.842	-0.237	-0.234	-0.172	-217.108	0.470	1768.294	-0.056	-597.528
0.110	0.813	0.809	0.855	-0.206	-0.212	-0.157	-163.595	0.323	1761.857	-0.039	-520.343

Fonte: Autor deste trabalho (2021)

Tabela B2: Dados termodinâmicos calculados utilizando o modelo de *Oswin* para a farinha de mazamorra de quinoa com adição de 30% de umidade.

$X_e$	T(°C)			$\ln a_w$	$\ln a_w$	$\ln a_w$	Coef. A	Coef. B	Qs	$\Delta S$	$\Delta G$
	30	45	60								
0.000	0.000	0.000	0.000								
0.008	0.016	0.055	0.148	-4.164	-2.894	-1.912	-7584.594	20.897	2654.448	-2.513	-10489.2
0.017	0.062	0.159	0.309	-2.786	-1.841	-1.176	-5425.619	15.153	2394.768	-1.823	-7017.91
0.025	0.131	0.272	0.437	-2.029	-1.301	-0.828	-4048.517	11.364	2229.132	-1.367	-5111.31
0.034	0.215	0.378	0.534	-1.538	-0.973	-0.627	-3074.559	8.637	2111.985	-1.039	-3874.52
0.042	0.302	0.470	0.609	-1.197	-0.756	-0.496	-2363.688	6.628	2026.482	-0.797	-3015.12
0.051	0.386	0.546	0.666	-0.951	-0.605	-0.406	-1836.893	5.131	1963.120	-0.617	-2394.8
0.059	0.464	0.610	0.711	-0.768	-0.495	-0.341	-1442.104	4.007	1915.635	-0.482	-1935.33
0.068	0.532	0.662	0.747	-0.630	-0.413	-0.292	-1143.114	3.155	1879.673	-0.379	-1588.01
0.076	0.592	0.705	0.776	-0.524	-0.350	-0.254	-914.266	2.503	1852.147	-0.301	-1320.85
0.085	0.643	0.740	0.800	-0.441	-0.301	-0.223	-737.231	2.000	1830.853	-0.241	-1112.12
0.093	0.687	0.770	0.820	-0.376	-0.261	-0.198	-598.834	1.607	1814.207	-0.193	-946.727
0.102	0.724	0.795	0.837	-0.323	-0.229	-0.178	-489.536	1.298	1801.061	-0.156	-813.947
0.110	0.756	0.816	0.851	-0.280	-0.203	-0.161	-402.378	1.052	1790.578	-0.127	-706.071

Fonte: Autor deste trabalho (2021)

Tabela B3: Dados termodinâmicos calculados utilizando o modelo de *Oswin* para a farinha de mazamorra de quinoa com adição de 40% de umidade.

$X_e$	T(°C)			$\ln a_w$	$\ln a_w$	$\ln a_w$	Coef. A	Coef. B	Qs	$\Delta S$	$\Delta G$
	30	45	60								
0.000	0.000	0.000	0.000								
0.008	0.176	0.256	0.167	-1.738	-1.362	-1.792	139.745	-2.071	1725.372	0.249	-4378.54
0.017	0.336	0.417	0.330	-1.091	-0.874	-1.110	41.645	-1.156	1737.171	0.139	-2747.52
0.025	0.456	0.523	0.454	-0.785	-0.647	-0.789	-0.069	-0.740	1742.188	0.089	-1977.66
0.034	0.545	0.598	0.547	-0.606	-0.514	-0.603	-20.247	-0.511	1744.615	0.061	-1526.95
0.042	0.613	0.653	0.618	-0.489	-0.426	-0.482	-30.455	-0.370	1745.843	0.044	-1232.49
0.051	0.665	0.695	0.672	-0.407	-0.363	-0.398	-35.586	-0.277	1746.460	0.033	-1026.23
0.059	0.707	0.729	0.714	-0.347	-0.316	-0.337	-37.976	-0.214	1746.748	0.026	-874.468
0.068	0.740	0.756	0.748	-0.301	-0.280	-0.290	-38.827	-0.168	1746.850	0.020	-758.618
0.076	0.767	0.778	0.776	-0.265	-0.251	-0.254	-38.795	-0.134	1746.846	0.016	-667.596
0.085	0.790	0.797	0.799	-0.236	-0.227	-0.225	-38.254	-0.109	1746.781	0.013	-594.405
0.093	0.809	0.812	0.818	-0.212	-0.208	-0.201	-37.423	-0.089	1746.681	0.011	-534.416
0.102	0.825	0.826	0.834	-0.192	-0.191	-0.181	-36.434	-0.073	1746.562	0.009	-484.457
0.110	0.839	0.838	0.848	-0.176	-0.177	-0.165	-35.366	-0.061	1746.434	0.007	-442.279

Fonte: Autor deste trabalho (2021)