



**NILTON SILVA COSTA MAFRA**

**ESTUDO DA SECAGEM E DAS PROPRIEDADES  
TERMODINÂMICAS DA POLPA DE COCO (*COCOS  
NUCIFERA L.*)**

São Luís  
2020

**NILTON SILVA COSTA MAFRA**

**ESTUDO DA SECAGEM E DAS PROPRIEDADES  
TERMODINÂMICAS DA POLPA DE COCO (*COCOS  
NUCIFERA L.*)**

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado ao Colegiado de Curso de 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. Harvey Alexander Villa Vélez

São Luís  
2020

Ficha gerada por meio do SIGAA/Biblioteca com dados fornecidos pelo(a) autor(a).  
Núcleo Integrado de Bibliotecas/UFMA

Mafra, Nilton Silva Costa.

Estudo da secagem e das propriedades termodinâmicas da polpa de coco Cocos nucifera L / Nilton Silva Costa Mafra. - 2020.

70 f.

Orientador(a): Harvey Alexander Villa Vélez.

Monografia (Graduação) - Curso de Engenharia Química, Universidade Federal do Maranhão, São Luís-MA, 2020.

1. Cocos nucifera L. 2. Entalpia. 3. Modelos matemáticos. 4. Secagem. I. Villa Vélez, Harvey Alexander. II. Título.

**BANCA EXAMINADORA:**

Prof. Dr. HARVEY ALEXANDER VILLA VÉLEZ  
Orientador – DEEQ/CCET/UFMA

Prof. Dr. ROMILDO MARTINS SAMPAIO  
DEEQ/CCET/UFMA

Prof. Dr. MARIA DA GLÓRIA ALMEIDA BANDEIRA  
DETQI/PPPGI/UFMA

**12 de agosto de 2020**

**DADOS CURRICULARES****Nilton Silva Costa Mafra**

<b>NASCIMENTO</b>	16/07/1996 – MATINHA/MA
<b>FILIAÇÃO</b>	Maria Nagia Silva Costa Nilton Barros Mafra
<b>2015/2020</b>	Curso de Graduação Engenharia Química - Universidade Federal do Maranhão

*Dedico este trabalho á minha família e meus amigos.*

## AGRADECIMENTOS

Acima de tudo e em primeiro lugar agradeço a Deus por ter me permitido chegar até esta etapa.

A toda a minha família por compartilharem comigo os momentos decisivos durante esta trajetória.

A minha mãe Maria Nagia e meu irmão Nailton Silva pelo apoio incondicional que me fizeram não desistir desse projeto e sonho e, acima de tudo, por serem a razão da minha existência.

Aos meus amigos que estão comigo deste o início, Everton Holanda, Aline Medeiro, Paulo Sergio, Kelle Jéssica, Fernanda Hellen, Nielson Brito e Felipe Muniz. O companheirismo de vocês me fortaleceu nessa caminhada.

Aos professores que causaram profundos impactos ao longo da minha formação, Profa. Dra. Lâmia Z. Linan, Prof. Dr. Marcelo F. Leonardo, Prof. Dr. Antônio C. D. de Freitas, Prof. Dr. Paulo H. S. L. Coelho, Prof. Dr. Jaciene J. C. R

Ao meu orientador, Prof. Dr. Harvey, por todo auxílio, orientação, atenção e apoio. Por ter sido durante a minha graduação um grande professor, amigo, conselheiro e, por vezes pai.

Ao eterno colega, Germano, pela disponibilidade em me ajudar sempre que precisava.

Ao grupo melhores da EQ, pelos momentos de descontração, vocês me ensinaram que sorrir é o melhor remédio para se viver momentos ruins.

À UFMA, pela oportunidade e por ter sido a minha segunda casa durante esses cinco anos.

**MUITO OBRIGADO!**

*“A primeira etapa para o conhecimento é saber que  
somos ignorantes”*

*Sócrates (420-399 a. C.)*

MAFRA, N.S.C. **Estudo da secagem e das propriedades termodinâmicas da polpa de coco (*Cocos nucifera* L.)**. 2020. 70f. Trabalho de Conclusão de Curso de Engenharia Química do Centro de Ciências Exatas e Tecnologia da Universidade Federal do Maranhão, São Luís, 2020.

## RESUMO

O *Cocos nucifera* (L.) ou coco verde, pertencente à família Palmae, é uma palmeira originária do Sudeste asiático, introduzida no Brasil em 1553. O aumento da produção e do consumo nos últimos anos vem acompanhado pelo crescimento de resíduos sólidos gerados a partir da sua extração. Devido a necessidade de propor alternativas para o aproveitamento destes resíduos, este trabalho teve por objetivo estudar o processo de secagem do albúmen do coco verde *in natura*, através do modelo de difusão, considerando a geometria de um placa plana infinita, e também construir e modelar a isoterma de desorção através do método gravimétrico estático para determinar entalpia de sorção para as temperaturas de 30, 45 e 60 °C. A secagem foi realizada em uma estufa convectiva e os dados foram ajustados utilizando o modelo difusivo (Segunda Lei de Fick). Para as isotermas foram utilizados os modelos matemáticos teóricos de GAB, BET e Langmuir, e os empíricos de Oswin, Henderson, Halsey, Iglesias e Chirife, Caurie e Chung-Pfost. O ajuste dos dados experimentais foi avaliado através do coeficiente de determinação ( $R^2$ ) e do erro quadrado médio (MSE). Através da modelagem da secagem por regressão não linear foi possível obter os valores dos coeficientes de difusão efetiva para cada temperatura. O aumento da temperatura favoreceu o processo de transferência de massa, e assim, a temperatura de 60 °C se mostrou a mais adequada à secagem. Os modelos de GAB e Halsey apresentaram o melhor ajuste aos dados experimentais das isotermas, sendo o modelo de Halsey escolhido, por ter apresentando  $R^2 > 0,98$  e  $MSE < 0,032$ , além de se mostrar mais apropriado para produtos agrícolas, e, dessa forma, serviu de referência para fornecer os parâmetros para a determinação da entalpia de sorção da água. Aplicou-se a equação de Clausius-Clapeyron a um teor de umidade constante para determinar a entalpia de sorção do albúmen do coco verde. Os pontos mais homogêneos, em termos de energia, foram encontrados na faixa de teor de umidade de 1,157 a 1,633 kg água/kg produto seco b.s., com valor máximo de entalpia igual a 338,92 kJ/mol.

**Palavras-chave:** Secagem; *Cocos nucifera* L; Modelos matemáticos; Entalpia.

MAFRA, N.S.C. **Study of drying and thermodynamic properties of coconut pulp (*Cocos nucifera* L.)**. 2020. 70f. Trabalho de Conclusão de Curso de Engenharia Química do Centro de Ciências Exatas e Tecnologia da Universidade Federal do Maranhão, São Luís, 2020.

### ABSTRACT

*Cocos nucifera* (L.) or green coco, which belongs to the Palmae family, is a palm tree, originally from Southeast Asia, which was introduced to Brazil in 1553. The increase in production and consumption in recent years has been accompanied by the growth of solid waste generated from its extraction. Due to the need to propose alternatives for the use of these residues, this work aimed to study the drying process of the albumen of the green coconut in *natura*, through the diffusion model, considering the geometry of an infinite flat plate, and also to build and model the desorption isotherm through the static gravimetric method to determine sorption enthalpy for temperatures of 30, 45 and 60 °C. Drying was performed in a convective oven and data were fitted using the diffusive model (Fick's Second Law). For the isotherms were used the theoretical mathematical models of GAB, BET and Langmuir, and the empirical models of Oswin, Henderson, Halsey, Iglesias and Chirife, Caurie and Chung-Pfost. The adjustment of the experimental data was evaluated by the coefficient of determination ( $R^2$ ) and the mean square error (MSE). By modeling nonlinear regression drying, it was possible to obtain the values of the effective diffusion coefficients for each temperature. The temperature increase favored the mass transfer process, and thus the temperature of 60 °C was the most adequate for drying. The GAB and Halsey models presented the best fit to the experimental data of the isotherms, and the Halsey model was chosen, because it presented  $R^2 > 0.98$  and  $MSE < 0.032$ , besides being more appropriate for agricultural products, and, thus, served as a reference to provide the parameters for the determination of water sorption enthalpy. The Clausius-Clapeyron equation was applied to a constant moisture content to determine the sorption enthalpy of the green coconut albumen. The most homogeneous points, in terms of energy, were found in the moisture content range of 1.157 to 1.633 kg water/kg dry product b.s., with maximum enthalpy value equal to 338.92 kJ/mol.

**Keywords:** Drying; *Cocos nucifera* L; Mathematical models; Enthalpy.

## LISTA DE FIGURAS

- Figura 1 - Estrutura do coco verde. ....**ERRO! INDICADOR NÃO DEFINIDO.**
- Figura 2 - Curvas de secagem.....**ERRO! INDICADOR NÃO DEFINIDO.**
- Figura 3 - Tipos de isotermas descritas por Brunauer. ....**ERRO! INDICADOR NÃO DEFINIDO.**
- Figura 4 - Isoterma de sorção de um produto alimentício típico, com histerese.....**ERRO! INDICADOR NÃO DEFINIDO.**
- Figura 5 - Secador de bandejas com circulação de ar forçado .....**ERRO! INDICADOR NÃO DEFINIDO.**
- Figura 6 - Estufa incubadora B.O.D. modelo SP-500 .....**ERRO! INDICADOR NÃO DEFINIDO.**

## LISTA DE SÍMBOLOS

$X$	Umidade de equilíbrio (kg água/kg sólido seco)
$X_m$	Umidade na monocamada (kg água/kg sólido seco)
$a_w$	Atividade de água
$n$	Número de camadas
$C$	Constante de adsorção relacionada com as interações energéticas entre as moléculas da monocamada e as subseqüentes pressão
$K$	Constante de adsorção relacionada com as interações energéticas entre as moléculas da monocamada e as subseqüentes
$c$	Fator entrópico constante
$K_g$	Fator entrópico constante
$R$	Constante universal dos gases
$\Delta H$	Entalpia de sorção da água
$K$	Constante de adsorção relacionada com as interações energéticas entre as moléculas da monocamada e as subseqüentes em comparação com a água pura
$P$	Pressão de vapor relativa de equilíbrio da água em um sistema
$P_0$	Pressão de vapor relativa de equilíbrio da água pura
$A$	Constante dos modelos de Halsey, Oswin, Henderson, Chung-Pfost e IglesiasChirife
$B$	Constante dos modelos de Halsey, Oswin, Henderson, Chung-Pfost e IglesiasChirife
$X_e$	Teor de umidade de equilíbrio em base seca (b.s)
$m_{\text{água}}$	Massa da amostra úmida
$m_{\text{seca}}$	Massa da amostra após a secagem
$D_0$	Fator pré exponencial
$E_a$	Energia de ativação (J/mol)
$D_{ef}$	Coefficiente de difusão (m <sup>2</sup> /s)
$R^2$	Coefficiente de determinação
$MSE$	Erro médio relativo
$Y_i$	Valores experimentais

$\bar{y}$	Média dos valores experimentais
$y_i^*$	Valores estimados
$N$	Quantidade de valores experimentais
$T$	Temperatura

## SUMÁRIO

FICHA CATALOGRÁFICA .....	<b>ERRO! INDICADOR NÃO DEFINIDO.</b>
FOLHA DE APROVAÇÃO.....	<b>ERRO! INDICADOR NÃO DEFINIDO.</b>
DADOS CURRICULARES .....	IV
DEDICATÒRIA.....	<b>ERRO! INDICADOR NÃO DEFINIDO.</b>
AGRADECIMENTOS .....	VI
EPÍGRAFE.....	<b>ERRO! INDICADOR NÃO DEFINIDO.</b>
RESUMO .....	VIII
ABSTRACT .....	IX
LISTA DE FIGURAS .....	<b>ERRO! INDICADOR NÃO DEFINIDO.</b>
LISTA DE SÍMBOLOS .....	XI
SUMÁRIO.....	XII
1 INTRODUÇÃO.....	1
2 OBJETIVOS.....	3
2.1 Objetivo geral .....	3
2.1 Objetivos específicos.....	3
3 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA .....	4
3.1 Coqueiro .....	4
3.1.1 Coco.....	4
3.1.2 Produção de coco verde.....	6
3.2 Secagem de frutas.....	6
3.3 Cinética de secagem .....	7
3.4 Modelagem cinética.....	9
3.5 Modelos difusivos .....	9
3.6 Fatores que afetam a difusividade .....	10
3.7 Adsorção.....	11
3.8 Teor de água .....	11

3.9 Atividade de água .....	12
3.10 Isotermas de sorção .....	13
3.11 Métodos para as isotermas de sorção .....	13
3.12 Tipos de curvas .....	14
3.13 Modelos matemáticos de isotermas de sorção.....	16
3.13.1 Modelo de langmuir.....	16
3.13.2 Modelo de BET (Brunauer, Emmet e Teller).....	17
3.13.3 Modelo de GAB (Gugghenheim, Anderson e de Boer) .....	17
3.13.4 Modelo de halsey.....	18
3.13.5 Modelo de Oswin .....	18
3.13.6 Modelo de Caurie .....	19
3.13.7 Modelo de Chung & Pfof.....	19
3.13.8 Modelo de Henderson.....	19
3.13.9 Modelo de Iglesias e Chirife.....	20
3.14 Efeito da temperatura nas isotermas de sorção.....	20
4 MATERIAL E MÉTODOS .....	<b>ERRO! INDICADOR NÃO DEFINIDO.</b>
4.1 Local da pesquisa.....	<b>ERRO! INDICADOR NÃO DEFINIDO.</b>
4.2 Preparo da matéria-prima .....	<b>ERRO! INDICADOR NÃO DEFINIDO.</b>
4.3 Secagem.....	<b>ERRO! INDICADOR NÃO DEFINIDO.</b>
4.4 Modelo de difusão .....	<b>ERRO! INDICADOR NÃO DEFINIDO.</b>
4.5 Determinação da umidade da amostra.....	<b>ERRO! INDICADOR NÃO DEFINIDO.</b>
4.6 Isotermas.....	<b>ERRO! INDICADOR NÃO DEFINIDO.</b>
4.6.1 Modelagem matemática.....	<b>ERRO! INDICADOR NÃO DEFINIDO.</b>
4.7 Determinação do calor de sorção.....	<b>ERRO! INDICADOR NÃO DEFINIDO.</b>
4.8 Análise estatística dos resultados .....	<b>ERRO! INDICADOR NÃO DEFINIDO.</b>
5. ARTIGO .....	26
6. CONCLUSÕES.....	47
REFERÊNCIAS .....	47
ANEXO A .....	56



## 1 INTRODUÇÃO

O segmento da fruticultura é um dos mais importantes setores econômicos do agronegócio. O Brasil encontra-se no terceiro lugar no ranking dos maiores produtores de frutas do mundo com uma produção anual de cerca de 40 milhões de toneladas (DOS SANTOS et al., 2018). O *Cocos nucifera* (L) ou coco verde, que pertence à família Palmae, é uma palmeira, originário do Sudeste asiático, introduzida no Brasil em 1553. Apresenta-se naturalizado em longas áreas da costa nordestina, sendo responsável pela distribuição de coco verde em todo o Brasil tanto para as agroindústrias regionais quanto para uso alimentício (GONÇALVES et al., 2019; DA SILVA, 2014). O coco (*Cocos nucifera* L.) é cultivado em mais de 93 países sendo o Brasil o terceiro maior produtor mundial, com mais de 1,5 milhão de toneladas de frutas por ano (PHAM, 2016).

Nos últimos anos a cocoicultura brasileira tem aumentado sua importância econômica, pois além de gerar emprego e renda para as pessoas envolvidas no processo, contribui também para o desenvolvimento dos setores secundários e terciários (CORREIA et al., 2014). A produção e o consumo de coco verde juntamente com o aumento do consumo da água são acompanhados pelo crescimento de resíduos sólidos gerados a partir da sua extração (MATTOS et al., 2011).

Estima-se que cerca de 6,7 milhões de toneladas de casca são descartadas ao ano. No nordeste o problema se agrava pois apenas 15% dos resíduos do coco verde são utilizados para o consumo e o restante do material é descartado no meio ambiente, ainda com a polpa, o que torna o produto foco de proliferação de micro-organismos (KANOJIA; JAIN, 2017). Desta forma, os rejeitos do coco verde geram volumes significativos e crescentes de material, que atualmente são encaminhados para os lixões, causando problemas ambientais, especialmente em grandes centros urbanos (LEITE et al., 2010).

O uso da fibra do coco verde em estudos diversos vem aumentando nos últimos anos, mas o mesmo não ocorre com a polpa do coco verde (albúmen) in natura, já que os estudos ainda são escassos, possivelmente por se tratar de resíduo agroindustrial pouco explorado na cadeia alimentar, ainda que presente em quantidades suficientes para aproveitamento, além de ser comestível e rica em nutrientes (DA SILVA et al., 2012).

Diante da necessidade de garantir estabilidade ao alimento, é importante estudar processos de conservação, como a secagem, uma vez que a quantidade de água livre contida em um alimento é um dos principais fatores para deterioração. Nesse contexto as propriedades termodinâmicas e as isotermas de sorção de água ganham notória importância para determinar

as melhores condições de processamento e armazenamento do produto (LAVOYER et al., 2003).

## **2 OBJETIVOS**

### **2.1 Objetivo geral**

O presente trabalho tem como objetivo estudar o processo de secagem e as isotermas de desorção da polpa de coco verde.

### **2.1 Objetivos específicos**

- Determinar as cinéticas de secagem para a polpa de coco verde às temperaturas de 30, 45 e 60°C;
- Modelar o processo de secagem da polpa de coco verde empregando o modelo teórico difusivo, considerando a geometria de uma placa plana infinita;
- Determinar o efeito da temperatura no coeficiente difusivo da água para polpa de coco verde,
- Ajustar as isotermas de desorção da polpa de coco verde empregando diferentes modelos teóricos e experimentais, às temperaturas de 30, 45 e 60°C, utilizando o método estático gravimétrico;
- Calcular o calor de sorção da água da polpa de coco verde.

### 3 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

#### 3.1 Coqueiro

O coqueiro é uma das plantas da família Palmae (Arecaceae) mais úteis do mundo. Trata-se da única espécie do gênero *Cocos*, de nome científico *Cocos nucifera* Linn ou *Cocos nucifera* L. É uma palmeira de tronco único, desarmada (sem espinhos) com uma coroa bastante grande que se estende de 3 a 4,5 metros de comprimento. A planta possui um troco cilíndrico com uma base espessa, de cor marrom a acinzentada, com fendas verticais com aproximadamente 30 a 45 cm de diâmetro, e dependendo da espécie, a altura pode chegar a 30 metros. É uma planta do tipo monóica, o que significa que tanto as flores masculinas quanto as femininas nascem na mesma árvore (CHAN; ELEVITCH, 2006; JODRAL; GALLARDO; ERRANO, 2000; LEDO et al., 2007).

Existem duas variedades principais do gênero *Cocos*: variedade *Typica* Nar. (coqueiro gigante) e variedade *Nana* Griff (coqueiro anão) (CHAN; ELEVITCH, 2006; SANTANA et al., 2011). Um terceiro tipo de coqueiro é o híbrido, resultante do cruzamento do coqueiro gigante com o anão. (CHAN; ELEVITCH, 2006; DEBMANDAL; MANDAL, 2011).

O coqueiro é uma planta com características de clima tropical, largamente distribuído na Ásia, África, América Latina e ilhas do Pacífico e originário das regiões do Sudeste Asiático entre os oceanos Índico e Pacífico (JUCÁ et al., 2002). No Brasil o coqueiro foi implementado pelos colonizadores portugueses em 1553, com o plantio da variedade gigante na Bahia, oriundo das ilhas de Cabo Verde. Já a variedade anã, foi introduzida posteriormente, no século XX (FONTES; FERREIRA, 2006).

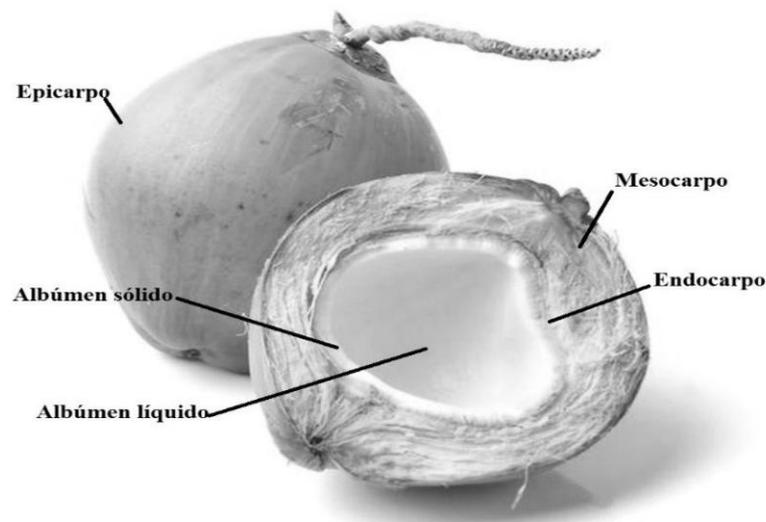
A disseminação do coqueiro no Brasil ocorreu rapidamente, devido às condições climáticas favoráveis das regiões litorâneas do Nordeste, apresentando posterior crescimento nas demais regiões. As condições favoráveis de plantio para o coqueiro envolvem a utilização de solos arenosos, incidência intensa de radiação solar e temperaturas em torno de 27°C e com mínimas superiores a 15°C e precipitação pluvial anual de 1500 mm e média mensal não inferior a 130 mm. (LIMA et al., 2015).

##### 3.1.1 COCO

Quanto às características, o fruto do coqueiro é botanicamente classificado como uma drupa fibrosa, variando sua forma de alongada para quase esférica, com 30 centímetros de

comprimento e até 2,5 kg de massa (CHAN; ELEVITCH, 2006). A Figura 1 apresenta a estrutura do coco verde detalhada. Os frutos do coqueiro são formados por uma epiderme lisa ou epicarpo, que envolve o mesocarpo espesso e fibroso, dentro do qual está localizado uma camada muito dura, conhecida por endocarpo. No interior do endocarpo se encontra o albúmen sólido (polpa) e o albúmen líquido (água de coco) (KWIATKOWSKI; OLIVEIRA; CLEMENTE, 2012).

Figura 1- Estrutura do coco verde.



Fonte: Hiperideal (2020).

A composição nutricional do coco depende do estado de maturação em que ele se encontra, além de outros fatores como a composição do solo, irrigação e condições climáticas (ARAGÃO et al., 2005; AROUCHA et al., 2014). Com a maturação do fruto, a qualidade e a quantidade de água no coco diminuem para a formação do albúmen sólido do coco maduro. Assim, a composição e o aspecto da polpa variam bastante durante o processo de maturação, passando de uma característica gelatinosa e translúcida para uma polpa mais endurecida, branca e opaca.

O estudo de Santana et al. (2011) nas polpas verde e madura, indicou a presença dos seguintes açúcares solúveis em ordem decrescente: sacarose, frutose e glicose, sendo que valores maiores foram obtidos na polpa verde e os mesmos açúcares encontrados na água.

### 3.1.2 PRODUÇÃO DE COCO VERDE

O cultivo de coco é realizado por mais de 90 países, sendo uma espécie botânica de grande importância, não só pelos aspectos econômicos e social, dada a variabilidade de produtos que podem ser obtidos dessa planta, mas também pelos serviços ambientais prestados em diversos ecossistemas fragilizados (FOALE; HARRIES, 2011). No mercado mundial, o Brasil é o quarto maior produtor de coco, com apenas 2,6% da área cultivada, superado apenas pela Indonésia, Filipinas e Índia (FAOSTAT, 2016).

A produção e comercialização brasileira de coco demonstram uma significativa evolução nos últimos anos sobretudo em relação a alguns fatores como o aumento do consumo de água de coco, a disseminação do cultivo, especialmente de coqueiros anões, o esforço de modernização da cadeia produtiva, entre outros (MARTINS; JESUS JÚNIOR, 2014; CAVALCANTE, 2016). A região que lidera tradicionalmente o cultivo de coqueiro no Brasil é o Nordeste, sendo que 70% da cocoicultura nordestina é mantida por pequenos agricultores em áreas de 5 a 50 hectares. É importante ressaltar que, nos últimos 30 anos, este cultivo tem recebido atenção especial em outras regiões do Brasil, principalmente Sudeste, Centro Oeste e Norte do país (DE JESUS JÚNIOR et al., 2013).

Em 2014, foram produzidos 1,5 bilhão de frutos destinados à extração de água de coco correspondendo a aproximadamente 23,4 milhões de toneladas (LIMA et al., 2015). Segundo Jeronimo e Silva (2012), o alúmen sólido do coco verde anão com idade de 8,5 meses corresponde a 3,32% do peso do fruto, o que significa que a quantidade de polpa de coco verde que pode vir a ser descartada pela indústria é em torno de 780.000 toneladas anuais. Este dado mostra o potencial econômico do aproveitamento deste coproduto.

O reaproveitamento do coco ou das partes constituintes do mesmo, configura-se como uma alternativa ambiental necessária, para diminuição do acúmulo desses resíduos sólidos em centros urbanos, aterros sanitários e lixões. Trata-se de um material de difícil decomposição, que pode levar mais de oito anos para se decompor (SENHORAS, 2004).

### 3.2 Secagem de frutas

De acordo com Pelegrini e Gozalla (2019), o Brasil possui um elevado consumo de produtos agrícolas, tanto na forma in natura quanto em processados, um percentual considerável da safra é desperdiçado devido ao excedente de produção. Nesta perspectiva, estudos que visem a redução destas perdas no pós-colheita são de extrema importância.

A secagem é a operação unitária mais utilizada para conservação de produtos biológicos, uma vez que ocorre a remoção total ou parcial da água livre, com consequente redução da atividade de água, o que diminui consideravelmente a atividade microbológica, sendo um método clássico para a preservação de alimentos, pois proporciona maior vida de prateleira, menor peso para o transporte e menor espaço de armazenamento (McCABE; TREVINO, 1993; GEANKOPLIS, 1998; HOFSETZ et al., 2007).

Em produtos alimentícios, a secagem ocorre quando a água presente na superfície do material transforma-se em vapor e transfere-se para a atmosfera, diminuindo a umidade da superfície. Então, é criado um gradiente de umidade no interior do alimento, onde a pressão de vapor encontra-se mais alta do que na superfície, forçando a transferência de água na direção da mesma (CELESTINO, 2010).

Além disso, quando comparado com outros procedimentos de conservação de alimentos, como refrigeração ou tratamentos químicos, a secagem apresenta-se como uma solução mais simples e de menor custo (ARAUJO, 2017). Para que o procedimento seja vantajoso, é sempre necessário avaliar o binômio tempo/temperatura de secagem, para entender se é viável utilizar temperaturas mais elevadas diminuindo o tempo de secagem e, consequentemente, o tempo de exposição do produto ao aquecimento. Todavia, é importante evidenciar que o curto tempo de exposição ao aquecimento em temperaturas mais elevadas pode também minimizar as perdas e garantir a qualidade nutricional do alimento (VASCONCELOS, 2016).

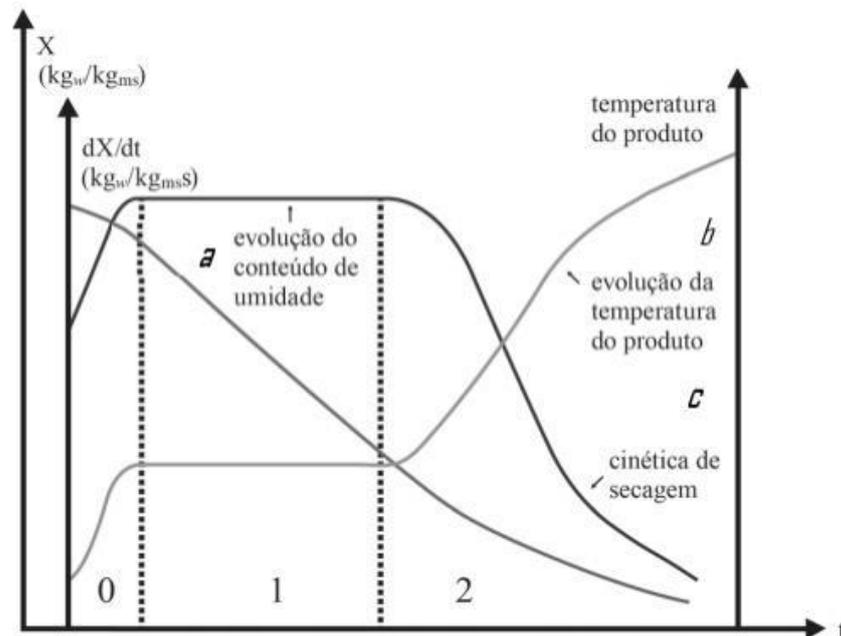
### **3.3 Cinética de secagem**

O estudo da cinética de secagem auxilia no conhecimento das curvas de secagem a partir dos dados experimentais. Através das curvas é possível determinar as melhores condições de temperatura e tempo de secagem, fundamentando a escolha e desenvolvimento de equipamentos e cálculos de custos (CANO-CHAUCA et al., 2004).

Gonçalves et al. (2018) afirmaram que para fundamentar a secagem, é necessário conhecer a umidade inicial, e ao longo do processo, a relação da água com a estrutura sólida e a forma como ocorre o transporte de água do interior do material até sua superfície.

A remoção de umidade de um produto alimentício acontece de diferentes formas e velocidades de secagem, conforme ilustrado na Figura 2, que mostra as curvas do processo de secagem (SINGH; HELDMAN, 2014).

Figura 2- Curvas de secagem



Fonte: CESPE (2019).

A curva (a) apresenta a diminuição do teor de água em base seca ( $X$ ) ao longo do processo de secagem. A curva (b) representa a taxa (ou velocidade) de secagem em relação ao tempo, obtida a partir da derivação da curva (a). Pelo comportamento do gráfico é facilmente perceptível que quanto maior o tempo de secagem mais devagar se dará a perda de umidade, uma vez que a força motriz se encontra cada vez mais reduzida. A curva (c) representa a variação da temperatura do produto em relação ao tempo durante a secagem (PARK et al., 2001).

De acordo com Park et al., (2001) o processo de secagem pode ser dividido em três períodos com características definidas:

O período zero caracteriza o início da secagem. Há uma elevação gradual da temperatura e da pressão de vapor da água. Este fenômeno prossegue até que a transferência de calor atinja uma equivalência em relação ao transporte de água. O primeiro período é caracterizado pela taxa de secagem constante, que assim permanece até que não haja mais quantidade suficiente de água na superfície do material para acompanhar a evaporação. O segundo período, apresenta taxa de secagem decrescente, quando a transferência de massa é mais acentuada devido à pouca quantidade de água na superfície. Embora a transferência de massa seja prejudicada, o transporte de calor prossegue por uma rota alternativa. Quando a umidade de equilíbrio é atingida, o processo é encerrado.

### 3.4 Modelagem cinética

O perfil distributivo da água no interior de uma amostra pode ser representado por modelos matemáticos para ajustar os dados experimentais e são de grande importância na prática, já que permitem a redução de exaustivos ensaios de laboratório na predição do comportamento de secagem de diversos materiais. Existem inúmeros modelos matemáticos teóricos, semiempíricos e empíricos na literatura para prever dados de cinética de secagem (WAUGHON; PENA, 2008). No entanto, quando se trata de explicar o processo difusivo, muitos pesquisadores optam pela aplicação de teoria da difusão líquida pois ela estabelece uma relação entre o coeficiente de concentração do meio e o coeficiente difusivo, possibilitando assim o cálculo.

### 3.5 Modelos difusivos

Os modelos que empregam a teoria da difusão podem descrever de forma aceitável o perfil da distribuição de água no interior de determinado produto agrícola desde que seja possível correlacionar sua forma à geometria de um sólido perfeito, além da exigência do estabelecimento de uma relação funcional entre o coeficiente de difusão, o teor de umidade e a temperatura (ARAYA-FARIAS; RATTI, 2009).

Um modelo teórico bastante utilizado é a Teoria Difusional, que se apoia exclusivamente na lei de Fick, que expressa um fluxo de massa proporcional ao gradiente de concentração de água no interior do produto. É um modelo utilizado para a fase de taxa de secagem decrescente e depende de condições iniciais e de contorno definidas (ARAYA-FARIAS; RATTI, 2009)

Crank (1975) apresenta uma série de soluções analíticas a partir da segunda lei de Fick (Equação 1), para determinar a difusividade efetiva para uma série de sólidos com formas geométricas regulares.

$$\frac{\partial X}{\partial t} = \nabla_z(D_{ef}\nabla_z X) \quad (1)$$

onde:  $X$ : Teor de água em base seca ( $\text{kg.kg}^{-1}$ );  $z$ : a coordenada espacial;  $D_{ef}$ : Coeficiente de difusão ( $\text{m}^2.\text{s}^{-1}$ );  $t$ : Tempo de secagem (s).

Para utilizá-lo, a difusividade de água é considerada constante- suposição feita pela maioria dos estudos sobre o assunto, além de considerar que o produto é homogêneo, de forma regular simples, simétrico (como uma placa plana), que sua superfície entra imediatamente em equilíbrio com o ar de secagem, o efeito de encolhimento do material e que o seu conteúdo de umidade tende para a umidade de equilíbrio (PARK et al., 2007). A Equação 2 apresenta a solução de Crank com as considerações feitas anteriormente:

$$Y = \frac{X - X_e}{X_0 - X_e} = \frac{8}{\pi^2} \sum_{i=0}^{\infty} \frac{1}{(2i+1)^2} \exp\left[-(2i+1)^2 \frac{\pi^2 D_{ef}}{4L^2} t\right] \quad (2)$$

em que:  $D_{ef}$  é a difusividade efetiva ( $m^2/s$ ),  $i$  é o número de termos na série,  $t$  é o tempo de secagem  $m$  (s),  $L$  é a meia espessura da amostra (m),  $X$  é a umidade em função do tempo (kg/kg, b.s.),  $X_0$  é a umidade inicial (kg/kg, b.s.) e  $X_e$  é a umidade de equilíbrio (kg/kg, b.s.).

### 3.6 Fatores que afetam a difusividade

A dependência da difusividade do conteúdo de umidade pode ser introduzida na equação de Arrhenius considerando um fator empírico na energia de ativação, sendo função da umidade (SRIKIATDEN; ROBERTS, 2006).

A difusividade tem uma forte dependência da temperatura e do conteúdo de umidade. Em materiais porosos, a fração porosa afeta significativamente a difusividade, e depende da sua estrutura e distribuição. A variação do coeficiente de difusão ( $D_{ef}$ ,  $m^2/s$ ) com a temperatura de secagem é descrito através da relação de Arrhenius, podendo essa relação ser expressa por meio da Equação 3:

$$D_{ef} = D_0 \exp\left(-\frac{E_a}{RT}\right) \quad (3)$$

onde:  $D_0$  é o fator pré exponencial ( $m^2/s$ ),  $E_a$  é a energia de ativação (J/mol),  $R$  é a constante universal dos gases (8,314 J/mol/K) e  $T$  é a temperatura absoluta (K) (SINGH; GUPTA, 2007).

### 3.7 Adsorção

Adsorção é uma operação unitária que consiste em considerar o contato entre um sólido e um fluido pelo qual ocorre a transferência de massa da fase fluida para a superfície do sólido. De acordo com Nascimento (2014), a adsorção se caracteriza por ser um fenômeno de superfície que consiste no acúmulo de uma substância em uma interface, a qual ocorre a separação de uma fase, conhecida como adsorvato, para a superfície de outra fase, o adsorvente.

De acordo com Ruthven (1984), o mecanismo de adsorção pode ser físico ou químico (fisissorção e quimissorção), sendo a maior parcela dos processos adsorptivos de caráter físico, descrito pela presença de forças intermoleculares de natureza fraca, as quais incluem as forças de Van der Waals e as interações eletrostáticas. Este fenômeno é reversível o que faz com que o adsorvente possa ser reutilizado (THOMAS; CRITTENDEN, 1998).

Já a adsorção química ou quimissorção, conta com a formação de ligações químicas entre a superfície do adsorvente com o adsorbato (RUTHVEN, 1984). Neste tipo de adsorção, só são adsorvidas moléculas capazes de se ligar ao sítio ativo do adsorvato, além de apresentar uma alta liberação de calor. Em muito dos casos, esse processo é altamente seletivo e irreversível (FOGLER, 2002).

O processo de adsorção tem demonstrado ser eficaz e econômico no tratamento de efluentes com poluentes orgânicos, sendo necessário pesquisar materiais de baixo custo para serem utilizados no tratamento (MOREIRA; JOSÉ; SOARES, 2000).

### 3.8 Teor de água

O teor de umidade dos materiais biológicos tem uma influência variada sobre suas propriedades mecânicas e seu comportamento nos processos de secagem. O conhecimento da estrutura física, fisiologia e composição química é essencial para entender as mudanças que elas apresentam nas diferentes fases do manejo pós-colheita e nos processos industriais (FELLOWS, 2018).

O teor de água presente nos alimentos se apresenta de duas formas diferentes: água ligada e água livre. O somatório dos valores destas duas grandezas constitui o teor total de umidade de um produto alimentício. A classificação pode ser utilizada:

Água ligada: É a água que se encontra interagindo quimicamente com os componentes não aquosos do produto, não estando disponível, portanto, para dissolução de solutos ou desenvolvimento microbiológico. Desta forma, sua remoção torna-se bastante difícil por

processos de secagem convencionais. Dependendo da natureza da amostra, necessita de altas temperaturas para a sua remoção, e, até mesmo naqueles processos que carbonizam o produto a sua remoção é parcial.

Água livre: É semelhante a água pura, e está presente na superfície externa dos alimentos em estado gasoso ou na forma de vapor de água. Assim, a água livre é aquela disponível para reações, sendo a principal responsável pela degradação microbiológica e enzimática nos alimentos (FELLOWS, 2018)

O teor de umidade de um alimento pode ser expresso tanto em base úmida (b.u.) como em base seca (b.s). De modo geral, é possível afirmar que o teor de água dos alimentos, sejam eles frescos ou processados, é um dos fatores que determinam sua classificação em perecível ou estável (PATANO et al., 2017).

### 3.9 Atividade de água

A atividade de água está diretamente relacionada com a capacidade de desenvolvimento e proliferação de microrganismos, possuindo então, como principal utilidade, o cálculo da vida de prateleira de alimentos (SANTOS et al., 2010).

O grau de disponibilidade da água na amostra pode ser expresso como o valor de atividade de água ( $a_w$ ), variado de 0 (ausência de água livre) até 1,0 (água pura). É comumente definida como a razão entre a pressão do vapor da água no alimento e a pressão de vapor da água pura à mesma temperatura, como apresentado na Equação 4 (WIEDERHOLD, 1997; KAREL; MAKAWY; EL-SAYD, 2010; CASTOLDI, 2012; SANDULACHI, 2012).

$$a_w = \frac{P}{P_o} \quad (4)$$

onde  $a_w$  é atividade de água;  $P$  é a pressão de vapor da água no alimento;  $P_o$  é a pressão de vapor da água pura.

De acordo com Jangam e Mujumdar (2010), a atividade de água é um dos pontos críticos para definição da qualidade e segurança alimentar, uma vez que pode afetar a vida de prateleira e as características organolépticas dos produtos.

### 3.10 Isotermas de sorção

As isotermas de sorção são definidas como representações gráficas que descrevem, em uma unidade específica, a relação de equilíbrio de uma quantidade de água sorvida, por componentes dos alimentos, e a pressão de vapor ou umidade relativa, a uma dada temperatura (MORAIS, 2010; PARK et al., 2007).

O vapor de sorção de alimentos depende de muitos fatores, como composição química, estado físico-químico dos ingredientes e estrutura física. Esta relação de equilíbrio está sujeita a composição química dos alimentos, como sua quantidade de gordura, amido, açúcar e proteínas, se aplicando ao estudo de alimentos *in natura* ou processados (PARK, 2001). Para se obter uma isoterma de sorção é necessário que o produto atinja o equilíbrio cedendo água ao ambiente (desorção), ou ganhando água do ambiente (adsorção). Assim, as isotermas de sorção podem ser classificadas em:

Isotermas de adsorção – quando se submete o produto em diversas atmosferas, verificando o aumento de peso do alimento, gerado pelo ganho de água durante o processo de hidratação. A partir da obtenção dos valores de atividade de água e suas respectivas umidades no tempo, é possível obter as curvas correspondentes ao processo (PARK et al., 2001).

Isoterma de dessorção – quando se submete o produto úmido sob as mesmas condições atmosféricas designadas para a adsorção, levando a uma diminuição de peso devido à perda de água durante o processo de desidratação. Para representação do processo, são gerados dados de atividade de água e correspondentes umidades (CORRÊA, 2014).

A partir da isoterma de dessorção, é possível prever o efeito da alteração do teor de umidade sobre a atividade de água do produto, o que influencia diretamente a estabilidade durante o armazenamento.

### 3.11 Métodos para as isotermas de sorção

Segundo Al-Muhtaseb et al. (2002), há muitos métodos para determinação de isotermas de sorção de água, e dentre eles, o mais aplicável para alimentos *in natura* é o método gravimétrico, que mede a variação de massa da amostra, em equilíbrio com diferentes pressões de vapor de água. A medida das variações pode ser feita de forma contínua ou descontínua. A partir deste estágio, por maior que seja o tempo de exposição do produto na atmosfera modificada pelos sais e/ou ácidos, não ocorrerá mais nenhuma modificação no seu teor de umidade. Logo a pressão de vapor do meio na mesma temperatura denomina-se pressão de

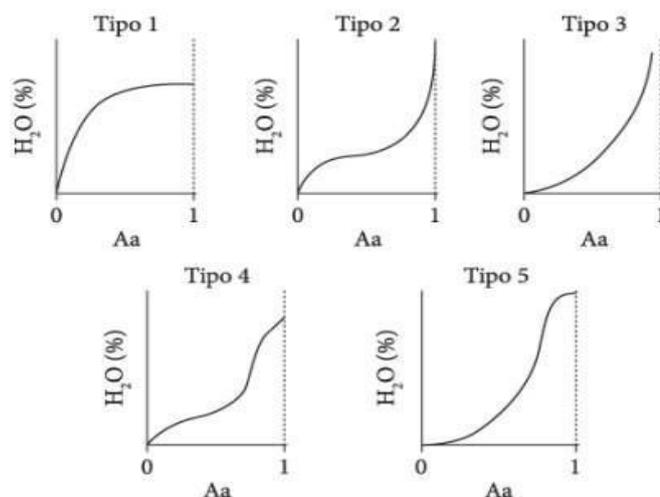
vapor de equilíbrio, e a razão entre a pressão de vapor de equilíbrio e a pressão de vapor de saturação é conhecida como umidade relativa de equilíbrio ou atividade de água ( $a_w$ ) (RESENDE et al., 2006; VIEIRA, DE FIGUEIRIÊDO; DE MELO QUEIROZ, 2007)

A relação entre o teor de umidade de equilíbrio e a umidade relativa do ar, em uma temperatura constante, pode ser expressa por meio de isotermas; dessa maneira, o conhecimento das isotermas de sorção dos alimentos é de extrema importância para os processos de conservação, uma vez que o princípio por trás dela é o de eliminar a água livre presente nos alimentos, tornando-a indisponível para agentes deteriorantes (CASTILLO et al., 2003).

### 3.12 Tipos de curvas

O entendimento dos tipos das curvas de isotermas é de fundamental importância em alimentos, pois as mesmas retratam as características destes produtos. As isotermas de sorção são representadas por diversas curvas, cada uma com sua particularidade. De acordo com Brunauer et al. (1938), a maioria destas pode ser agrupada em cinco classes. O formato dessas curvas indica o tipo de forças existentes na ligação de água com a superfície do material higroscópico, permitindo assim analisar a estrutura do material. Na Figura 3 é apresentado um esboço destes tipos de isotermas.

Figura 3 – Tipos de isotermas descritas por Brunauer.



Fonte: Mathlouthi; Rogé, 2003.

Isoterma tipo I – Conhecida como isoterma de Langmuir, é determinada a partir da adsorção de um gás em um sólido poroso.

Isoterma tipo II – Obtida, geralmente, em produtos de alta solubilidade.

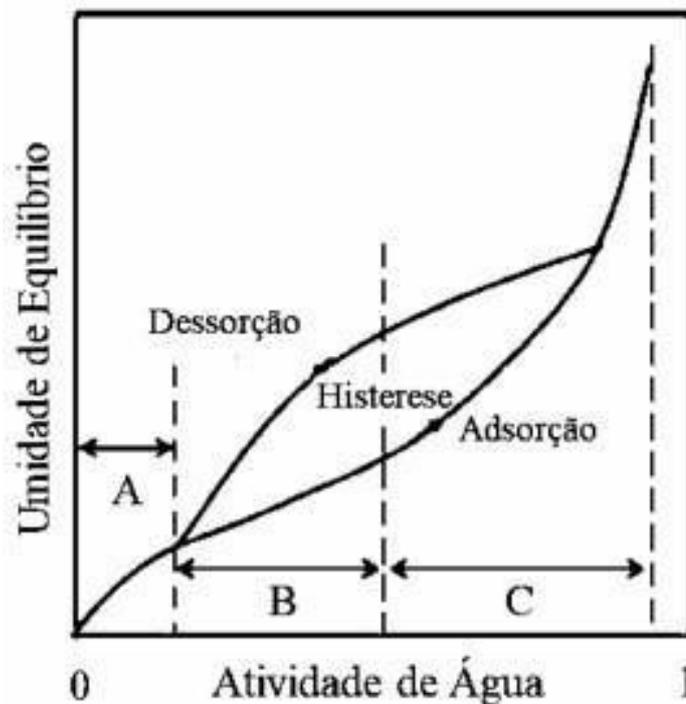
Isoterma tipo III – Conhecida como isoterma de Flory- Huggins, ocorre em alimentos com grande concentração de sais, açúcares e moléculas hidrofílicas.

Isoterma tipo IV – Determinada através da hidratação máxima dos sítios de adsorção de um sólido hidrofílico.

Isoterma tipo V – Isoterma gerada a partir da adsorção do vapor de água.

As isotermas que ocorrem com maior frequência em alimentos são do tipo II e IV sendo que a grande parte das isotermas nos alimentos apresenta forma de “S – sigmóide”, tipo II, como mostra a Figura 4 (BASU et al., 2006; BLAHOVEC; YANNIOTIS, 2009).

Figura 4 – Isoterma de sorção de um produto alimentício típico, com histerese.



Fonte: Lemus (2011).

Conforme observado na Figura 4, uma isoterma é tipicamente dividida em três zonas:

Zona A- representa a água mais fortemente ligada ao produto e menos móvel e hidrofílica do material. É denominada como a água da monocamada, a qual é fixa aos grupos polares de certos compostos como o amido, fibras, etc. Esta água não pode ser congelada, não está disponível para reações químicas e apresenta calor de vaporização muito superior ao da água pura.

Zona B - corresponde a umidade das camadas de hidratação dos constituintes solúveis de um alimento a ligação entre as moléculas de água e o material é mais fraca do que na região

A, e o calor de vaporização da água é levemente superior ao da água pura. A água dessa região é considerada de transição entre a água livre e a água ligada aos compostos orgânicos. A atividade de água nesta zona da isoterma está entre 0,25/0,3 e 0,8.

Zona C- compreende a umidade ligada aos alimentos mais fracamente e mais móvel, sendo denominada de água livre. Possui a mesma entalpia de vaporização da água pura. Encontram-se retida fisicamente em capilares estando assim, disponível para permitir o desenvolvimento de microrganismos, reações enzimáticas e químicas. Equivale à atividade de água de 0,8 a 0,9. (ANDRADE; LEMUS; PEREZ, 2011).

### **3.13 Modelos matemáticos de isotermas de sorção**

Estudos sobre as isotermas de sorção e sua otimização podem ser feitos por modelagem matemática. Na modelagem utiliza-se um modelo matemático que representa satisfatoriamente a perda de umidade do produto durante o período (AFONSO JÚNIOR; CORRÊA, 1999; FERREIRA; PENA 2010).

O comportamento higroscópico dos alimentos tem sido estudado por vários pesquisadores, que apresentaram diversos modelos matemáticos para expressar o teor de umidade de equilíbrio em função da temperatura e umidade relativa do ar ou atividade de água ( $a_w$ ). A vantagem adquirida com estes modelos está no fato de que com poucos pontos experimentais, é possível construir a curva de sorção cuja extrapolação resulta nos valores de atividade de água das zonas de difícil determinação (BAHLOUL; BOUDHRIQUA; KECHAOU, 2008; GUOLA et. al., 2008; IGLESIAS; CHIRIFE, 1976; PAGANO; MASCHERONI, 2005).

Difícilmente um mesmo modelo é adequado para diferentes tipos de alimentos, por esse motivo, há uma variedade deles. Os modelos mais comuns usados para prever isotermas de sorção de produtos alimentícios são os teóricos e os empíricos que serão apresentados a seguir (WELTI-CHANES; VERGARA, 1997).

#### **3.13.1 MODELO DE LANGMUIR**

De maneira termodinâmica, o modelo é muito simplista, uma vez que considera a condição de equilíbrio aplicada a água livre, fornecendo assim a taxa de evaporação idêntica à taxa de condensação. Assumindo essa premissa Langmuir (1918) propõe a equação 5:

$$\frac{X}{X_m} = \frac{C \cdot a_w}{1 + C \cdot a_w} \quad (5)$$

onde  $X$  é a umidade de equilíbrio (Kg água/Kg sólido seco);  $X_m$  é a umidade na monocamada (Kg água/Kg sólido seco);  $a_w$  é a atividade de água;  $C$  é uma constante.

Essa equação, no entanto, não apresenta resultados satisfatórios para produtos alimentícios, uma vez que o calor de adsorção não é constante em toda a superfície. Nos alimentos, além de ocorrer uma alta interação entre as moléculas adsorvidas, a máxima quantidade de água adsorvida na superfície é maior que o valor de monocamada (BARBOSA-CÁNOVAS; VEJA-MERCATO, 1996).

### 3.13.2 MODELO DE BET (BRUNAUER, EMMET E TELLER)

O modelo da isoterma de Brunauer, Emmet e Teller (BET) é um dos modelos mais empregados para determinar o conteúdo de umidade de alimentos. Neste modelo, os pesquisadores ampliaram o conceito de Langmuir, levando em consideração a natureza química da umidade. O modelo opera em uma gama limitada de  $a_w$ , no entanto, o conceito de monocamada BET é um ponto positivo para a estabilidade da umidade de alimentos secos (LABUZA, 1968).

Assim, Brunauer, Emmet e Teller propõem um modelo de camadas polimoleculares ( $n$ ), conforme observado na Equação 6 (PARK; NOGUEIRA, 1992):

$$X = \left( \frac{(X_m \cdot C \cdot a_w) \cdot [1 - (n + 1) \cdot a_w^n + n \cdot a_w^{n+1}]}{(1 - a_w) \cdot [1 + (C - 1) \cdot a_w - C \cdot a_w^{n+1}]} \right) \quad (6)$$

Essa equação pode apresentar duas simplificações:

- quando  $n = 1$ , ela se reduz à equação de Langmuir;
- quando  $n$  tende a infinito, ela se reduz à equação de BET linearizada.

### 3.13.3 MODELO DE GAB (GUGGHENHEIM, ANDERSON E DE BOER)

Guggenheim, Anderson e de Boer estenderam as teorias de adsorção física de BET, resultando numa equação tripamétrica, que permite um melhor ajuste dos dados de sorção dos

alimentos até a atividade de água de 0,9 (VAN DEN BERG, 1984). A equação de GAB é escrita conforme a Equação 7:

$$X = \left( \frac{(X_m \cdot C \cdot K \cdot a_w)}{(1 - K \cdot a_w) \cdot (1 - K \cdot a_w + C \cdot K \cdot a_w)} \right) \quad (7)$$

Onde  $C$  e  $K$  são constantes de adsorção relacionadas com as interações energéticas entre as moléculas da monocamada e as subsequentes, num dado sítio de sorção, representadas pelas Equações 8 e 9.

$$C = c \cdot \exp\left(\frac{H_m - H_n}{R_g \cdot T}\right) \quad (8)$$

$$K = K_g \cdot \exp\left(\frac{H_p - H_n}{R_g \cdot T}\right) \quad (9)$$

onde  $c$  e  $kg$  são fatores entrópicos (constantes),  $H_m$  é a entalpia molar de sorção da monocamada,  $H_n$  é a entalpia molar de sorção da multicamada,  $H_p$  é a entalpia molar de evaporação da água líquida (BARBOSA; VEGA, 1996).

Heldman e Hartel (2000) afirmaram que este modelo pode ser considerado como o que melhor se ajusta às isotermas de sorção dos produtos alimentícios, sendo um dos mais utilizados para tal fim.

#### 3.13.4 MODELO DE HALSEY

Halsey (1948) desenvolveu um modelo para a condensação das camadas a uma distância relativamente grande da superfície, representado pela Equação 10:

$$a_w = \exp\left(\frac{-A}{X^n}\right) \quad (10)$$

#### 3.13.5 MODELO DE OSWIN

O modelo de Oswin (1946) é baseado em dois parâmetros empíricos aplicando em expansão matemática para curvas de formato sigmoidal. Este modelo apresenta algumas

vantagens sobre os modelos cinéticos de BET e GAB, pois inclui apenas duas constantes que são fáceis de serem linearizadas (PAPPAS; RAO, 1987). O modelo empírico é definido pela Equação 11:

$$a_w = A \cdot \left( \frac{a_w}{1 - a_w} \right)^R \quad (11)$$

### 3.13.6 MODELO DE CAURIE

Criado em 1970, o modelo é capaz de expressar o estado da água em alimentos e estabelecer o valor da monocamada. Descrito na Equação 12, é principalmente aplicável a alimentos contendo açúcar e/ou gordura.

$$X = \exp[A + B \cdot a_w] \quad (12)$$

### 3.13.7 MODELO DE CHUNG & PFOST

O modelo é baseado na premissa que a variação na energia livre para a adsorção está relacionada com o conteúdo de umidade do material (CHUNG; PFOST, 1967). Pode ser apresentado de duas formas, conforme observado nas Equações 13 e 14:

$$\ln(a_w) = -\frac{A}{RT} \exp(-B \cdot X) \quad (13)$$

$$X = A - B \cdot \ln[(-T + C) \cdot \ln(a_w)] \quad (14)$$

### 3.13.8 MODELO DE HENDERSON

O modelo de Henderson (1952) é um dos mais empregados para predição de isotermas de alimentos com uma ampla faixa de atividade de água (0,10 a 0,75), como grãos, cereais e frutas. Ele pode ser apresentada de duas formas: a forma tradicional (Equação 15) e a forma modificada (Equação 16):

$$1 - a_w = \exp[-(K.X^n)] \quad (15)$$

$$1 - a_w = \exp[-(K.T.X^n)] \quad (16)$$

### 3.13.9 MODELO DE IGLESIAS E CHIRIFE

O modelo de Iglesias e Chirife (1976) foi desenvolvido através do estudo da sorção de água em alimentos com alto conteúdo de açúcares. Este tipo de modelo foi baseado em isotermas tipo III, catalogadas por Brunauer et. al. (1940):

$$\ln \left[ M + (M^2 + M_{0,5})^{1/2} \right] = C_1 a_w + C_2 \quad (17)$$

onde  $M_{0,5}$  é a umidade de equilíbrio na  $a_w = 0,5$ ,  $C_1$  e  $C_2$  são as constantes do modelo.

### 3.14 Efeito da temperatura nas isotermas de sorção

O efeito da temperatura na isoterma de sorção é de grande importância dado que os alimentos são expostos a variações de temperatura durante o armazenamento e processamento, mudando constantemente a atividade de água. Quando se obtém uma umidade em uma isoterma de sorção, a temperatura deve ser especificada e mantida constante, por afetar a mobilidade das moléculas da água e a dinâmica de equilíbrio entre o vapor e as fases adsorvidas. Portanto, quando se determinam as umidades de equilíbrio em uma isoterma de sorção, a temperatura deve se manter constante (AVIARA; AJIBOLA; ONI, 2004).

Conforme Kaya et al. (2006), as propriedades de sorção são calculadas através das isotermas de sorção e as principais funções são aquelas que quantificam as entalpias e entropias diferenciais e integrais fundamentais na análise da exigência energética e predição dos parâmetros cinéticos nos processos de sorção.

Outros autores como Labuza (1968) e Iglesias et. al. (1976) mostraram que a equação de Clausius-Clapeyron pode ser aplicada para prever a isoterma em qualquer temperatura, se o correspondente excesso de calor de sorção é conhecido, para um teor de umidade constante.

## 4 MATERIAL E MÉTODOS

### 4.1 Local da pesquisa

O presente trabalho foi desenvolvido no Laboratório de Petróleo, localizado na Universidade Federal do Maranhão (UFMA), na cidade de São Luís-MA.

### 4.2 Preparo da matéria-prima

A polpa *in natura* foi obtida a partir do coco verde (*Cocos nucifera L.*) adquirido no comércio local, no município de São Luís-MA. Foram aproveitadas apenas o albúmen, sendo removido o material líquido (água de coco). Os cocos foram divididos ao meio, posteriormente as polpas foram fragmentadas em um processador de alimentos (Modelo Chrome 4655, Oster,USA).

Para as soluções dos sistemas aquosos das isotermas de sorção foi utilizado ácido sulfúrico 95% PA (Quimex, São Paulo, Brasil).

### 4.3 Secagem

Para realização da secagem da polpa *in natura* utilizou-se um secador convectivo de bandejas (modelo PE14, Pardal, Brasil), conforme mostrado na Figura 5, às temperaturas de 30, 45, e 60 °C. As temperaturas foram escolhidas pela importância nos processos industriais de secagem no Brasil.

Figura 5- Secador de bandejas com circulação de ar forçado modelo PE14



Fonte: [www.pardal.com.br/desidratador-pe-14analogico](http://www.pardal.com.br/desidratador-pe-14analogico) (acesso em 21/06/2020).

As amostras foram pesadas utilizando uma balança semi-analítica de precisão  $10^{-3}$  g (modelo BL320H, Shimadzu, Japão) em quatro placas cilíndricas revestidas de alumínio, de tamanho de 9,2 cm de diâmetro por 2,5 cm de altura. Em seguida, realizou-se a determinação da altura das camadas em seis pontos distintos de cada amostra, utilizando um paquímetro de precisão de 0,005 mm. As placas foram dispostas no interior da estufa, e tiveram suas massas medidas em intervalos de tempo previamente definidos, até que o produto atingisse peso constante. Durante os intervalos de secagem, a temperatura e umidade relativa foram monitoradas com auxílio de um termo-higrômetro digital (modelo 7664, INCOTERM, Brasil).

Para construção das curvas de secagem da polpa de coco verde, foram gerados dados de taxa de secagem versus a umidade em base seca, para cada tempo de secagem, nas temperaturas propostas.

#### 4.4 Modelo de Difusão

Para prever a taxa de evaporação de água na polpa de coco verde empregando a modelagem matemática das cinéticas de secagem, utilizou-se o modelo difusivo (Equação 2) proposto por Crank (1975) e baseado na Segunda Lei de Fick, que considera a distribuição de umidade inicial uniforme, ausência de qualquer resistência térmica e o encolhimento do material para uma placa plana infinita.

Partindo do pressuposto de que a maior difusão de água na polpa de coco verde ocorre no interior e não na superfície externa, a espessura total ou inicial das amostras foi considerada para o cálculo da difusividade. Para isso aplicou-se o comando *fminsearch* do software interativo MATLAB versão R2013a, utilizando os dados de tempo (s), umidade X (Kg/Kg, b.s.) e espessura média, obtidos experimentalmente para cada temperatura.

A variação do coeficiente de difusão ( $D_{ef}$ ,  $m^2/s$ ) com a temperatura de secagem foi analisada utilizando-se a relação de Arrhenius (Equação 3). É usual considerar-se o valor do coeficiente de difusão constante ou linearmente dependente da temperatura, podendo essa relação ser expressa por meio deste modelo.

A qualidade do ajuste dos modelos empregados foi mensurada através do coeficiente de determinação ( $R^2$ ) e erro médio quadrado (MSE, %) (VILLA-VÉLEZ et al., 2012).

#### 4.5 Determinação da umidade da amostra

O conteúdo de umidade inicial do material foi determinado em estufa a 105 °C por 5 horas, segundo o método AOAC 934.06 (AOAC, 2007). O teor de umidade de equilíbrio em base seca (b.s.) foi obtido com base nas diferenças de massa da amostra no equilíbrio e seca (Equação 18).

$$X_e = \frac{m_{agua}}{m_{seca}} \quad (18)$$

onde:  $X_e$  - Teor de umidade de equilíbrio em base seca (b.s.);  $m_{agua}$  - Massa de água adsorvida pela amostra(g);  $m_{seca}$  - Massa seca da amostra (g).

#### 4.6 Isotermas

A partir dos dados obtidos durante a secagem foram realizadas as análises de equilíbrio higroscópico (Isotermas). Para obter as isotermas, realizou-se a secagem em estufa convectiva à temperatura de 60 °C e velocidade do ar de 3,0 m/s, durante 24 horas, por apresentar melhores resultados de retirada de água livre do material, conforme estudos realizados previamente.

As isotermas do albúmen do coco verde foram construídas empregando-se o método estático gravimétrico, utilizando-se soluções de ácido sulfúrico ( $H_2SO_4$ ) nas concentrações de 30%, 40%, 50%, 60%, 70% e 80%. Assim, foram criados microssistemas em equilíbrio, com atividades de água ( $a_w$ ) variáveis (0,0059 a 0,8882), para cada concentração da solução ácida nas temperaturas de 30, 45 e 60 °C (LABUZA, et al. 1985, RIZVI 2014).

Para tanto, foi pesado aproximadamente 1,000 g de amostra, utilizando uma balança semi-analítica de precisão  $10^{-3}$  g (modelo BL320H, Shimadzu, Japão), em um copo de plástico previamente tarado e posicionado sobre um suporte composto por um conjunto de três pedaços de tubo PVC e um pedaço de uma tela de malha para que as amostras permanecessem suspensas no interior do frasco de vidro hermético, contendo em seu fundo 200 ml de uma das soluções de  $H_2SO_4$ .

O mesmo processo foi repetido para todas as soluções de ácido sulfúrico, sendo que cada frasco recebeu um total de três amostras. Os recipientes contendo as amostras foram armazenados em uma incubadora B.O.D. (modelo SP-500, SPLabor, Brasil), conforme

observado na Figura 6, nas temperaturas de 30, 45 e 60 °C. As amostras foram pesadas após atingirem peso constante, o que significou até 2 dias de intervalo. Os resultados da umidade equilíbrio do albúmen foram apresentados em base seca (b.s.) (kg água/kg produto seco).

Figura 6 – Estufa incubadora B.O.D. modelo SP-500



Fonte: splabor (acesso em 21/06/2020).

#### 4.6.1 MODELAGEM MATEMÁTICA

Os dados experimentais foram ajustados pelos modelos teóricos de Langmuir (Eq. 5), BET (Eq. 6) e GAB (Eq. 7), e os modelos empíricos de Halsey (Eq. 10), Oswin (Eq. 11), Caurie (Eq. 12), Chung e Pfof (Eq. 14), Henderson (Eq. 16) e Iglesias e Chirife (Eq. 17) (Rizvi 2014, Timmermann, et al. 2001).

A modelagem e simulação foi realizada por meio do software Matlab® 7.1 (The MathWorks Inc., Natick, MA, EUA), tendo como objetivo a determinação das constantes dos modelos por regressão não linear usando a função “nlinfit” considerando a alternativa “roubust” de análise.

#### 4.7 Determinação do calor de sorção

Juntamente com as isotermas de sorção, as propriedades termodinâmicas da água formam um meio útil para o estudo das interações das moléculas de água com o material (VILLA-VÉLEZ et al., 2012).

As propriedades termodinâmicas de sorção da água do albúmen do coco verde foram determinadas com base na equação de Clausius-Clapeyron, a um teor de umidade constante, conforme a Equação 19.

$$\frac{\partial(\ln a_w)}{\partial(1/T)} = -\frac{\Delta H}{R} \quad (19)$$

onde:  $\Delta H$  - Entalpia de sorção da água (kJ/kmol),  $R$  - Constante universal dos gases (8,314 J/mol.K),  $T$  - Temperatura absoluta (K)

Assim, a Equação 19 possibilita a obtenção da entalpia  $\Delta H$  por meio de uma linearização dos dados através do melhor modelo de ajuste (CANO-HIGUITA et al., 2015).

#### 4.8 Análise estatística dos resultados

Para a validação estatística da modelagem foi empregado o coeficiente de determinação ( $R^2$ ) (Equação 20) e o erro médio relativo (MSE) (Equação 21). O  $R^2$  determina a eficiência dos modelos propostos frente à variação dos dados. Já o parâmetro estatístico MSE é um critério que avalia a precisão das estimativas (VILLA-VÉLEZ, et al. 2012). Os parâmetros dos modelos de ajuste das cinéticas de secagem foram estimados através das funções do programa Matlab R2013b© (The Mathworks Inc., Natick, MA, USA).

$$R^2 = \frac{\sum_{k=1}^{\beta} (\gamma_k^* - \bar{\gamma})^2}{\sum_{k=1}^{\beta} (\gamma_k - \bar{\gamma})^2} \quad (20)$$

$$MSE = \sqrt{\frac{1}{n} \sum_{k=1}^{\beta} (\gamma_k^* - \bar{\gamma})^2} \quad (21)$$

em que  $MSE$  - Erro médio relativo;  $R^2$  - Coeficiente de determinação;  $y$  - Representa os valores experimentais;  $y^*$  - Representa os valores calculados;  $\bar{y}$  - Média dos valores experimentais;  $\beta$  - Quantidade de valores experimentais.

## **5 ARTIGO**

As próximas páginas contêm um artigo publicado na revista *Research, Society and Development*, formatado de acordo com as normas de publicação da revista.

**Estudos de secagem, propriedades termodinâmicas de sorção de água da polpa de *Cocos nucifera* (L.)**

**Drying studies, thermodynamic properties of water sorption of *Cocos nucifera* (L.) pulp**

**Estudios de secado, propiedades termodinámicas de la sorción de agua de la pulpa de *Cocos nucifera* (L.)**

Recebido: 00/06/2020 | Revisado: 00/06/2020 | Aceito: 00/06/2020 | Publicado: 30/06/2020

**Nilton Silva Costa Mafra**

ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-5353-0596>

Universidade Federal do Maranhão, Brazil

E-mail: [nilton.mafra@hotmail.com](mailto:nilton.mafra@hotmail.com)

**Harvey Alexander Villa Velez**

ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-2394-4939>

Universidade Federal do Maranhão, Brazil

E-mail: [harveyvilla@gmail.com](mailto:harveyvilla@gmail.com)

**Everton Holanda Sales**

ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-9497-9103>

Universidade Federal do Maranhão, Brazil

E-mail: [everhs16@gmail.com](mailto:everhs16@gmail.com)

**Aline Medeiro Ferreira**

ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-6227-4566>

Universidade Federal do Maranhão, Brazil

E-mail: [alliny\\_ferreira@hotmail.com](mailto:alliny_ferreira@hotmail.com)

**Nielson Brito Sirotheau**

ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-0329-7199>

Universidade Federal do Maranhão, Brazil

E-mail: [brito\\_yael@outlook.com](mailto:brito_yael@outlook.com)

## **Resumo**

O *Cocos nucifera* (L.) ou coco verde, que pertence à família Palmae, é uma palmeira, originária do Sudeste asiático, que foi introduzida no Brasil em 1553. Este estudo analisou o processo de secagem do albúmen do coco verde, através do modelo de difusão e determinou a entalpia de

sorção de água do albúmen do coco verde in natura. Para a modelagem dos dados experimentais foram utilizados, o modelo difusivo (Segunda Lei de Fick) adaptado a geometria de placa plana para cinética de secagem e dois modelos matemáticos para as isotermas os teóricos e empíricos. Através da modelagem da secagem por regressão não linear foi possível obter os valores dos coeficientes de difusão efetiva para cada temperatura. O aumento da temperatura favoreceu o processo de transferência de massa, assim a temperatura de 60 °C se mostrou mais adequada na secagem. Os modelos GAB e Halsey apresentaram a melhor simulação dos dados experimentais das isotermas, sendo escolhido o modelo de Halsey por ser um modelo mais apropriado para produtos agrícolas, apresentando  $R^2 > 0,98$  e  $MSE < 0,032$  e, dessa forma, utilizaram-se os parâmetros do mesmo para a determinação da entalpia de sorção da água. Aplicou-se a equação de Clausius-Clapeyron a um teor de umidade constante para determinar a entalpia de sorção do albúmen do coco verde. Os pontos mais homogêneos, em termos de energia, foram encontrados na faixa de teor de umidade de 1,157 a 1,633 kg/kg b.s., onde foi obtido o valor máximo de entalpia igual a 338,92 kJ/mol.

**Palavras-chave:** Secagem; *Cocos nucifera* L; Modelos matemáticos; Entalpia.

### **Abstract**

*Cocos nucifera* (L) or green coco, which belongs to the Palmae family, is a palm tree, originating in Southeast Asia, which was introduced to Brazil in 1553. This study analyzed the drying process of green coconut albumen, using the diffusion model and determined the enthalpy of water sorption of fresh green coconut albumen. For the modeling of the experimental data, the diffusive model (Fick's Second Law) adapted the flat plate geometry for drying kinetics and two mathematical models for the theoretical and empirical isotherms. By modeling nonlinear regression drying, it was possible to obtain the values of the effective diffusion coefficients for each temperature. The temperature increase favored the mass transfer process, so the temperature of 60 °C was more adequate in drying. The GAB and Halsey models presented the best simulation of the experimental data of the isotherms, but because the Halsey model was a more appropriate model for agricultural products, it was chosen, presenting  $R^2 > 0.98$  and  $MSE < 0.032$  and, thus, the parameters of it were used to determine the enthalpy of water sorption. The Clausius-Clapeyron equation was applied to a constant moisture content to determine the sorption enthalpy of the green coconut albumen. The most homogeneous points, in terms of energy, were found in the moisture content range of 1.157 to 1.633 kg/kg b.s., where the maximum enthalpy value equal to 338.92 kJ/mol was obtained.

**Keywords:** Drying; *Cocos nucifera* L; Mathematical models; Enthalpy.

## Resumen

*Cocos nucifera* (L) o coco verde, que pertenece a la familia Palmae, es una palmera, originaria del sudeste asiático, que fue introducida en Brasil en 1553. Este estudio analizó el proceso de secado de la albúmina de coco verde, utilizando el modelo de difusión y determinó la entalpía de sorción de agua de la albúmina de coco verde fresco. Para el modelado de los datos experimentales, el modelo difuso (Segunda Ley de Fick) adaptado a la geometría de la placa plana para la cinética del secado y dos modelos matemáticos para las isotérmicas los teóricos y empíricos. Al modelar el secado de regresión no lineal, fue posible obtener los valores de los coeficientes de difusión efectivos para cada temperatura. El aumento de la temperatura favoreció el proceso de transferencia de masa, por lo que la temperatura de 60 °C fue más adecuada en el secado. Los modelos GAB y Halsey presentaron la mejor simulación de los datos experimentales de las isotérmicas, pero debido a que el modelo Halsey era un modelo más apropiado para los productos agrícolas, se lo eligió, presentando  $R^2 > 0.98$  y  $MSE < 0.032$  y, por lo tanto, los parámetros del que se utilizaron para determinar la entalpía de la sorción de agua. La ecuación Clausius-Clapeyron se aplicó a un contenido de humedad constante para determinar la entalpía de sorción del albúmina de coco verde. Los puntos más homogéneos, en términos de energía, se encontraron en el rango de contenido de humedad de 1.157 a 1.633 kg/kg p.s., donde se obtuvo el valor máximo de entalpía igual a 338,92 kJ/mol.

**Palabras clave:** Secado; *Cocos nucifera* L; Modelos matemáticos; Entalpía

## 1. Introdução

O *Cocos nucifera* (L) ou coco verde, que pertence à família Palmae, é uma palmeira, originária do Sudeste asiático, que foi introduzida no Brasil em 1553, onde se apresenta naturalizada em longas áreas da costa nordestina, sendo responsável pela distribuição de coco verde em todo o Brasil tanto para as agroindústrias regionais quanto para uso alimentício (da Silva, 2014; Gonçalves, de Brito Bonamone, Lima, & Barbosa, 2019). O coco é cultivado em mais de 93 países sendo o Brasil o terceiro maior produtor do mundo com mais de 1,5 milhão de toneladas de frutas por ano (Pham, 2016).

Nos últimos anos a cocoicultura brasileira tem ganhado grande importância para a economia, pois além de gerar emprego e renda para as pessoas envolvidas no processo, contribui também para o desenvolvimento dos setores secundários e terciários (Correia, Araújo, Paulo, & Sousa, 2014). Apesar das vantagens desse cultivo, aumento do consumo da água de

coco são acompanhados pelo crescimento de resíduos sólidos gerados a partir da sua extração (Mattos et al., 2011).

Estima-se que cerca de 6,7 milhões de toneladas de casca são descartadas ao ano. No Nordeste o problema se agrava por apenas 15% dos resíduos do coco verde serem utilizados para o consumo e o restante do material ser descartado no meio ambiente, ainda com a polpa, que se tornam foco de proliferação de micro-organismos (Kanojia & Jain, 2017). Desta forma, os rejeitos do coco verde geram volumes significativos e crescentes de material, que atualmente são encaminhados para os lixões, causando problemas ambientais, especialmente em grandes centros urbanos (Leite et al., 2010).

O uso da fibra do coco verde em estudos diversos vem aumentando nos últimos anos, mas o mesmo não ocorre com a polpa do coco verde (albúmen) *in natura*, cujos estudos ainda são escassos, possivelmente por se tratar de resíduo agroindustrial pouco explorado na cadeia alimentar, apesar de muitas vezes estar presente em quantidade suficiente para aproveitamento e de ser comestível e rica em nutrientes (Santana, 2012).

Diante da necessidade de garantir estabilidade ao alimento, é importante estudar processos de conservação, como a secagem, uma vez que a quantidade de água livre contida em um alimento é um dos principais fatores para sua deterioração. Nesse contexto as propriedades termodinâmicas e as isotermas de sorção de água ganham notória importância para determinar as melhores condições de processamento e armazenamento do produto (Senhoras, 2003).

A tendência de um material biológico exposto a um ambiente é de perder (dessorção) ou ganhar (adsorção) água para adequar sua atividade de água à condição de equilíbrio. O equilíbrio é obtido quando a pressão parcial de água do material se iguala à pressão de vapor do ar no qual está inserido (de Souza Ferreira, da Silva, & Rodovalho, 2011).

As isotermas de sorção são ferramentas termodinâmicas úteis no planejamento e otimização de operações unitárias, tais como secagem, armazenamento e empacotamento. Estas fornecem informações sobre o mecanismo de sorção e a interação entre os componentes do alimento e a água, além de estabelecer o conteúdo final de umidade e permitir a estimativa de energia requerida no processo de secagem (Bitencourt et al., 2020).

Além disso, permitem a caracterização estrutural dos alimentos por meio da determinação de propriedades como área de superfície específica, distribuição de tamanho de poro e cristalinidade (Basu, Shivhare, & Mujumdar, 2006; Cano-Higueta, et al., 2015).

Já as propriedades termodinâmicas podem estabelecer o teor final de umidade e estimar os requisitos de energia para o processamento. Propriedades como a entalpia, entropia e energia

livre de Gibbs são essenciais para descrever as reações e fenômenos que ocorrem no nível intermolecular nos materiais. Essas propriedades representam a quantidade de energia, o estado excitado e o equilíbrio químico, respectivamente, das moléculas de água no interior do material (Brovchenko & Oleinikova, 2008). Alterações em algumas das propriedades podem fornecer uma boa descrição dos mecanismos de absorção de umidade e podem ser usadas para estimar pontos de transição entre eles (Goneli, et al., 2010; Simal, Femenia, Castell-Palou, & Rosselló, 2007).

Diante do exposto, o presente trabalho tem como objetivo analisar o processo de secagem do albúmen do coco verde, através do modelo de difusão considerando a geometria de um placa plana infinita e determinar a entalpia de sorção de água do albúmen do coco verde *in natura* em função do conteúdo de umidade de equilíbrio experimental.

## **2. Metodologia**

### **2.1. Preparo da matéria-prima**

A polpa *in natura* foi obtida a partir do coco verde (*Cocos nucifera L.*) adquirido no comércio local, no município de São Luís-MA. Foi aproveitado apenas o albúmen, sendo removido o material líquido (água de coco). Os cocos foram divididos ao meio, posteriormente as polpas foram fragmentadas em um processador de alimentos (Modelo Chrome 4655, Oster, USA).

Para as soluções dos sistemas aquosos das isotermas de sorção foi utilizado ácido sulfúrico 95% PA, (Quimex, São Paulo, Brasil).

### **2.2. Secagem**

Para realização da secagem da polpa *in natura* utilizou-se um em secador convectivo de bandejas (modelo PE14, Pardal, Brasil) nas temperaturas de 30, 45, e 60°C. As temperaturas foram escolhidas utilizando o critério de que as temperaturas ambientes no Brasil, se mantêm dentro dessa faixa sendo. Portanto, as temperaturas de maior interesse de produção comercial.

As amostras foram pesadas utilizando uma balança semi-analítica de precisão  $10^{-3}$  g (modelo BL320H, Shimadzu, Japão) em quatro placas cilíndricas revestidas de alumínio, de tamanho de 9,2 cm de diâmetro por 2,5 cm de altura. As placas foram organizadas no interior da estufa, onde foram medidos os pesos, em intervalos de tempo previamente definidos até o

produto atingir peso constante. Durante os intervalos de secagem, foi monitorada a temperatura e a umidade relativa por um termo-higrômetro digital (modelo 7664, INCOTERM, Brasil). O conteúdo de umidade inicial do material foi determinado em estufa a 105 °C por 5 horas segundo o método AOAC 934.06 (Int, 2007). O teor de umidade de equilíbrio em base seca (b.s.) foi obtido com base nas diferenças de massa da amostra no equilíbrio e seca Equação 1.

$$X_e = \frac{m_{\text{água}}}{m_{\text{seca}}} \quad (1)$$

Onde:  $X_e$  - Teor de umidade de equilíbrio em base seca (b.s.);  $m_{\text{água}}$  - Massa de água adsorvida pela amostra(g);  $m_{\text{seca}}$  - Massa seca da amostra (g).

### 2.3. Modelo de difusão

Na modelagem matemática das cinéticas de secagem foi usado o modelo difusivo segundo a Equação (2) proposto por (Crank, 1975) baseado na Segunda Lei de Fick, considerando a distribuição de umidade inicial uniforme e ausência de qualquer resistência térmica para uma placa plana infinita.

$$Y = \frac{X - X_e}{X_0 - X_e} = \frac{8}{\pi^2} \sum_{i=0}^{\infty} \frac{1}{(2i+1)^2} \exp\left[-(2i+1)^2 \frac{\pi^2 D_{ef}}{4L^2} t\right] \quad (2)$$

Em que:  $D_{ef}$  é a difusividade efetiva ( $m^2/s$ ),  $i$  é o número de termos na série,  $t$  é o tempo de secagem (s),  $L$  é a meia espessura da amostra (m),  $X$  é a umidade em função do tempo (kg/kg, b.s.),  $X_0$  é a umidade inicial (kg/kg, b.s.) e  $X_e$  é a umidade de equilíbrio (kg/kg, b.s.).

A variação do coeficiente de difusão ( $D_{ef}$ ,  $m^2/s$ ) com a temperatura de secagem foi analisada utilizando-se a relação de Arrhenius Equação 3. É usual considerar-se o valor do coeficiente de difusão constante ou linearmente dependente da temperatura, podendo essa relação ser expressa por meio deste modelo, onde:

$$D_{ef} = D_0 \exp\left(-\frac{E_a}{RT}\right) \quad (3)$$

Onde:  $D_0$  é o fator pré exponencial ( $m^2/s$ ),  $Ea$  é a energia de ativação (J/mol),  $R$  é a constante universal dos gases (8,314 J/mol/K) e  $T$  é a temperatura absoluta (K) (Singh & Gupta, 2007). A eficiência da modelagem foi mensurada através do coeficiente de correlação quadrático ( $R^2$ ) (Villa-Vélez et al., 2015).

## 2.4. Isotermas

A partir dos dados obtidos durante a secagem foram realizadas as análises de equilíbrio higroscópico (Isotermas). Para obter as isotermas, realizou-se a secagem em estufa convectiva a temperatura de 60 °C e velocidade do ar de 3,0 m/s, durante 24 horas, devido apresentar melhores resultados de retirada de água livre do material, através dos parâmetros estudados previamente.

As isotermas do albúmen do coco verde foram avaliadas através da utilização do método estático gravimétrico, utilizando-se soluções de ácido sulfúrico ( $H_2SO_4$ ) nas concentrações de 30%, 40%, 50%, 60%, 70% e 80%. Através desta forma foram criados microssistemas com atividades de água ( $a_w$ ) que variaram de 0,0059 até 0,8882, para cada concentração da solução ácida na faixa de temperaturas estabelecida entre 30 – 60 °C (Labuza, Kaanane, & Chen, 1985; Rizvi, 2014).

Assim, foi pesado aproximadamente 1,0 g de amostra utilizando uma balança semi-analítica de precisão  $10^{-3}$  g (modelo BL320H, Shimadzu, Japão) em um copo de plástico previamente tarado e posicionado sobre um suporte composto por um conjunto de três pedaços de tubo PVC e um pedaço de uma tela de malha para que as amostras ficassem suspensas 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 serem armazenados em uma incubadora B.O.D. (modelo SP-500, SPLabor, Brasil) nas temperaturas de 30, 45 e 60 °C. As amostras foram pesadas em intervalos de tempo de 2 dias até atingirem peso constante. Os resultados da umidade equilíbrio do albúmen foram apresentados em base seca “b.s” (kg água/kg sólido seco).

## 2.5. Modelagem matemática das isotermas

Foram utilizados os modelos teóricos: GAB Eq. (4), BET Eq. (5) e Langmuir Eq. (6), e os modelos empíricos de Henderson Eq. (7), Halsey Eq. (8), Iglesias e Chirife Eq. (9), Caurie

Eq. (10), Oswin Eq. (11) e Chung e Pfof EQ. (12) (Rizvi, 2014; Timmermann, Chirife, & Iglesias, 2001).

A modelagem e simulação foi realizada por meio do software interativo do Matlab® 7.1 (The MathWorks Inc., Natick, MA, EUA), tendo como objetivo a determinação das constantes dos modelos por regressão não linear usando a função “nlinfit”.

**Tabela 1:** Modelos matemáticos utilizados para prever as isotermas.

<b>Equações</b>	
$X_s = \frac{X_m C_g K_g a_w}{(1 - K_g a_w)(1 + (C_g - 1)(K_g a_w))}$	(4)
$X_s = \frac{X_m C_b a_w}{(1 - a_w)(1 + (C_b - 1)a_w)}$	(5)
$X_s = (X_m C a_w) / (1 + (C a_w))$	(6)
$X_s = [-\log(1 - a_w) / (b)]^{1/a}$	(7)
$X_s = (-a / \log(a_w))^{1/b}$	(8)
$X_s = a + b(a_w / 1 - a_w)$	(9)
$X_s = \exp(a_w \log(a)) - (1/4,5b)$	(10)
$X_s = a(a_w / 1 - a_w)^b$	(11)
$X_s = a + (\log(a_w)b)$	(12)

Onde:  $a_w$  - é a atividade de água;  $C$  e  $K$  - Parâmetros dos modelos de GAB e BET (adimensionais);  $a$  e  $b$  - Parâmetros. Fonte: (Autores, 2020)

Para a validação estatística da modelagem e simulação foi empregado o coeficiente de determinação ( $R^2$ ) Eq. (13) e o erro médio relativo ( $MSE$ ) Eq. (14). O  $R^2$  determina a eficiência dos modelos propostos frente à variação dos dados. Já o parâmetro estatístico  $MSE$  é um critério que avalia a precisão das estimativas (Villa-Vélez, Váquiro, Bon, & Telis-Romero, 2012). Justamente com as isotermas de sorção, as propriedades termodinâmicas da água formam um

meio útil para o estudo das interações das moléculas de água com o material (Villa-Vélez et al., 2012).

$$R^2 = \frac{\sum_{k=1}^{\beta} (y_k^* - \bar{y})^2}{\sum_{k=1}^{\beta} (y_k - \bar{y})^2} \quad (13)$$

$$MSE = \sqrt{\frac{1}{n} \sum_{k=1}^{\beta} (y_k^* - \bar{y})^2} \quad (14)$$

Onde: *MSE* - Erro médio relativo;  $R^2$  - Coeficiente de determinação;  $y$  - Representa os valores experimentais;  $y^*$  - Representa os valores calculados;  $\bar{y}$  - Média dos valores experimentais;  $\beta$  - Quantidade de valores experimentais.

As propriedades termodinâmicas de sorção da água do albúmen do coco verde foram determinadas com base na equação de Clausius-Clapeyron Eq. (15), a um teor de umidade constante:

$$\frac{\partial(\ln a_w)}{\partial(1/T)} = -\frac{\Delta H}{R} \quad (15)$$

Onde:  $\Delta H$  - Entalpia de sorção da água (kJ/kmol);  $R$  - Constante universal dos gases (8,314 J/mol.K);  $T$  - Temperatura absoluta (K).

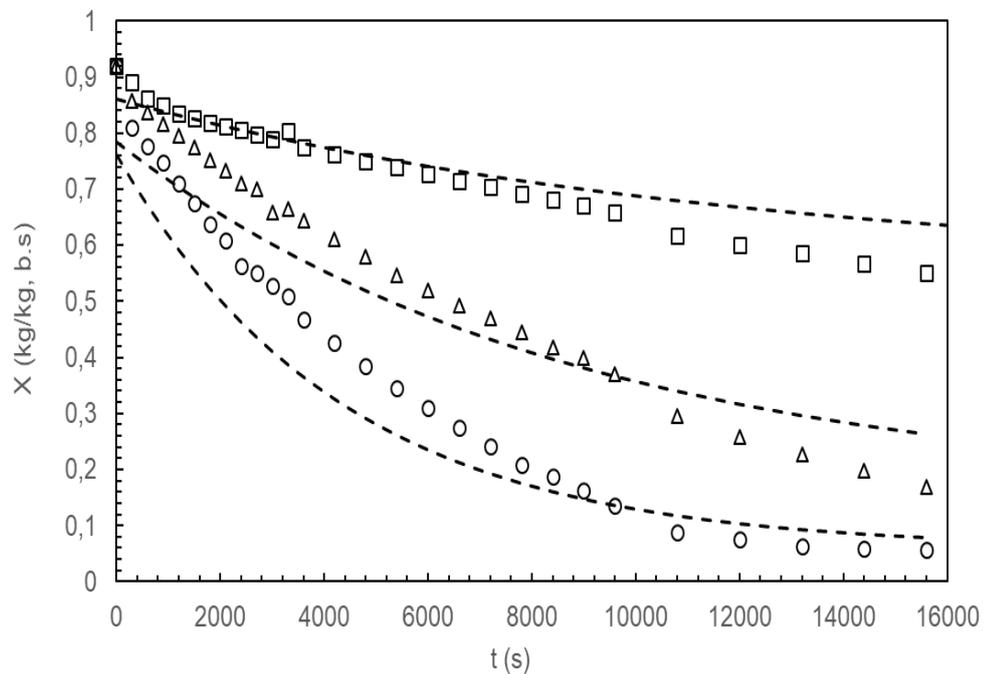
Assim, na Eq. (15) pode-se obter a entalpia  $\Delta H$  por meio de uma linearização dos dados através do melhor modelo de ajuste (Cano-Higueta et al., 2015).

### 3. Resultados e Discussão

#### 3.1. Secagem

A Figura 1 mostra os resultados experimentais da cinética de secagem do coco verde in natura nas temperaturas de 30, 45 e 60 °C. Observa-se por meio da Figura 1 que o período de secagem decresce com o aumento da temperatura do ar de secagem.

**Figura 1** - Curvas de secagem do albúmen de coco verde nas temperaturas de 30 °C (●), 45 (■) e 60 (▲) simuladas pelo modelo Difusivo para geometria de placa plana infinita (---).



Fonte: (Autores, 2020).

Por meio da Figura 1, é possível observar que a umidade diminui continuamente com o tempo de secagem e com o aumento da temperatura, concordando assim com os fundamentos teóricos da teoria de secagem, que afirmam que com o aumento da temperatura, ocorrem maiores taxas de remoção de água do produto (Meneghetti et al., 2019). Segundo Almeida et al. (2020) a elevação da temperatura do ar de secagem desenvolve maior gradiente de umidade entre o produto e o ar, acarretando maior taxa de remoção de água, independentemente do tipo do material utilizado. Assim, a temperatura de 60 °C se mostrou mais adequada para a secagem, acarretando um menor tempo de secagem.

A determinação do coeficiente de difusão (*Def*) (Equação 2) foi realizado ajustando o parâmetro por meio de regressão não linear na ferramenta SOLVER do Excel (Microsoft, Redmond, USA). Os resultados obtidos nesta etapa encontram-se dispostos na Tabela 1, sendo que esses valores foram usados para cálculo da energia de ativação do sistema através da linearização Equação 3.

**Tabela 1:** Coeficientes de difusão efetiva da água ( $D_{ef}$ ) em função da temperatura e energia de ativação para o processo de secagem do albúmen de coco.

$T$ (°C)	$D_{ef}$ (m <sup>2</sup> /s)	$R^2$	$D_0$	$E_a$ (KJ/mol)
30	$1,703 \times 10^{-10}$	0,991		
45	$2,334 \times 10^{-10}$	0,993	6,342	71,44
60	$3,781 \times 10^{-09}$	0,995		

Fonte:(Autores, 2020)

Na Tabela 1 é possível observar que o aumento da temperatura favoreceu o processo de transferência de massa interna e conseqüentemente o aumento do coeficiente de difusão entre  $1,073 \times 10^{-10}$  a  $3,78 \times 10^{-09}$  m<sup>2</sup>/s, apresentando um coeficiente de correlação ( $R^2$ ) próximo de 1 para ambos os valores, comportamento também observado por Botelho et al. (2015) para os grão de sorgo, e Gomes et al. (2017) para folhas de capim cidreira.

Segundo Alves et al. (2019), os valores do coeficiente de difusividade para materiais alimentícios encontram-se dentro de uma faixa de  $10^{-11}$  a  $10^{-9}$  m<sup>2</sup>/s, facilitando a difusão das moléculas. Para Araujo et al. (2017) normalmente o coeficiente de difusividade é utilizado, devido à complexidade, além de limitadas informações a respeito do movimento da água no interior dos alimentos durante a secagem.

Segundo Kashaninejad, Mortazavi, Safekordi, & Tabil (2007), a energia de ativação do processo difusivo é a energia mínima necessária para iniciar uma reação. A energia de ativação para o processo de secagem na faixa de temperatura estudada foi de 71,44 kJ/mol, este valor encontra-se em conformidade com os resultados relatados na literatura para secagem de produtos agrícolas, que pode variar de 12,7 a 110 kJ mol/l (Zogzas, Maroulis, & Marinou-Kouris, 1996).

### 3.2. Isotermas de sorção

Os dados experimentais de umidade de equilíbrio ( $X_e$ ) em função da atividade da água ( $a_w$ ) e temperaturas de 30, 45 e 60 °C para o albúmen de coco verde são mostrados na Tabela 2. Nesta, o valor de umidade de equilíbrio ( $X_e$ ) representa a média das experiências realizadas em triplicata. Pode-se observar que, à medida que a temperatura aumenta, a umidade do equilíbrio diminui (Iglesias & Chirife, 1995). Resultados semelhantes foram obtidos para abacaxi (Simal et al., 2007) e grãos de milho (Samapundo et al., 2007).

**Tabela 2:** Umidade de equilíbrio de sorção e atividade de água do albúmen do Coco verde nas temperaturas de 30, 45 e 60 °C.

Temperatura °C					
30		45		60	
$a_w$	$X_e$	$a_w$	$X_e$	$a_w$	$X_e$
0,005	3,578	0,008	2,856	0,009	1,156
0,047	3,749	0,054	2,956	0,062	1,269
0,168	3,945	0,183	3,125	0,198	1,524
0,357	4,215	0,377	3,383	0,395	1,812
0,571	4,586	0,584	3,489	0,598	2,105
0,755	4,995	0,762	3,758	0,769	2,599

Fonte: (Autores, 2020)

De acordo com (Rizvi, 2014), a composição dos alimentos pode causar a diminuição da umidade do equilíbrio, aumentando a temperatura em um determinado valor da atividade da água. A alta concentração de açúcar na polpa de coco pode ter sido responsável por uma inversão no comportamento das isotermas em altos níveis de atividade da água (Araujo et al., 2019).

### 3.3. Modelagem

Os modelos descritos na Tabela 1, foram ajustados aos dados experimentais de isotermas do albúmen do coco verde para as três temperaturas de estudo. Cada modelo, teve como parâmetros de validação estatístico os coeficientes de determinação ( $R^2$ ) e o erro médio relativo (MSE). Na Tabela 3, estão apresentados os parâmetros dos modelos, obtidos para as isotermas de sorção.

**Tabela 3:** Parâmetros estimados para os modelos nas temperaturas de 30, 45 e 60 °C.

Modelos	Parâmetro	Temperatura °C		
		30	45	60
GAB	$c$	3,711	1,331	2,957
	$k$	1425,0	1225,0	9535,0
	$x_m$	0,339	0,642	2,750
	$R^2$	0,999	0,987	0,890

**Tabela 3 (Continuação):** Parâmetros estimados para os modelos nas temperaturas de 30, 45 e 60 °C.

	<i>MSE</i>	0,008	0,034	0,028
<b>BET</b>	<i>a</i>	1,779	0,784	1,289
	<i>b</i>	$4,9 \times 10^{13}$	$1,4 \times 10^8$	$4,7 \times 10^2$
	<i>R</i> <sup>2</sup>	0,867	0,886	0,801
	<i>MSE</i>	1,605	0,474	1,334
<b>Langmuir</b>	<i>a</i>	4,353	2,002	3,395
	<i>b</i>	759,98	105,41	469,87
	<i>R</i> <sup>2</sup>	0,233	0,317	0,327
	<i>MSE</i>	0,327	0,330	0,874
<b>Henderson</b>	<i>a</i>	16,508	5,589	17,947
	<i>b</i>	$1,0 \times 10^{-11}$	0,011	$1,4 \times 10^{-10}$
	<i>R</i> <sup>2</sup>	0,812	0,876	0,872
	<i>MSE</i>	0,167	0,143	0,088
<b>Halsey</b>	<i>a</i>	$2,3 \times 10^5$	7,361	$2,0 \times 10^5$
	<i>b</i>	8,507	3,468	10,26
	<i>R</i> <sup>2</sup>	0,992	0,997	0,987
	<i>MSE</i>	0,032	0,021	0,027
<b>Iglesias e Chirife</b>	<i>a</i>	3,807	1,358	3,024
	<i>b</i>	0,426	0,420	0,245
	<i>R</i> <sup>2</sup>	0,867	0,886	0,801
	<i>MSE</i>	0,145	0,142	0,113
<b>Caurie</b>	<i>a</i>	10,217	3,489	1,403
	<i>b</i>	$2,0 \times 10^{13}$	$6,6 \times 10^9$	-0,209
	<i>R</i> <sup>2</sup>	0,949	0,984	0,975
	<i>MSE</i>	1,865	0,143	0,035
<b>Oswin</b>	<i>a</i>	4,507	2,052	3,454
	<i>b</i>	0,055	0,154	0,049
	<i>R</i> <sup>2</sup>	0,878	0,933	0,925
	<i>MSE</i>	0,135	0,105	0,066
<b>Chung Pfof</b>	<i>a</i>	4,673	2,252	3,596
	<i>b</i>	0,248	0,269	0,186
	<i>R</i> <sup>2</sup>	0,696	0,689	0,775
	<i>MSE</i>	0,217	0,214	0,113

Fonte: (Autores, 2020)

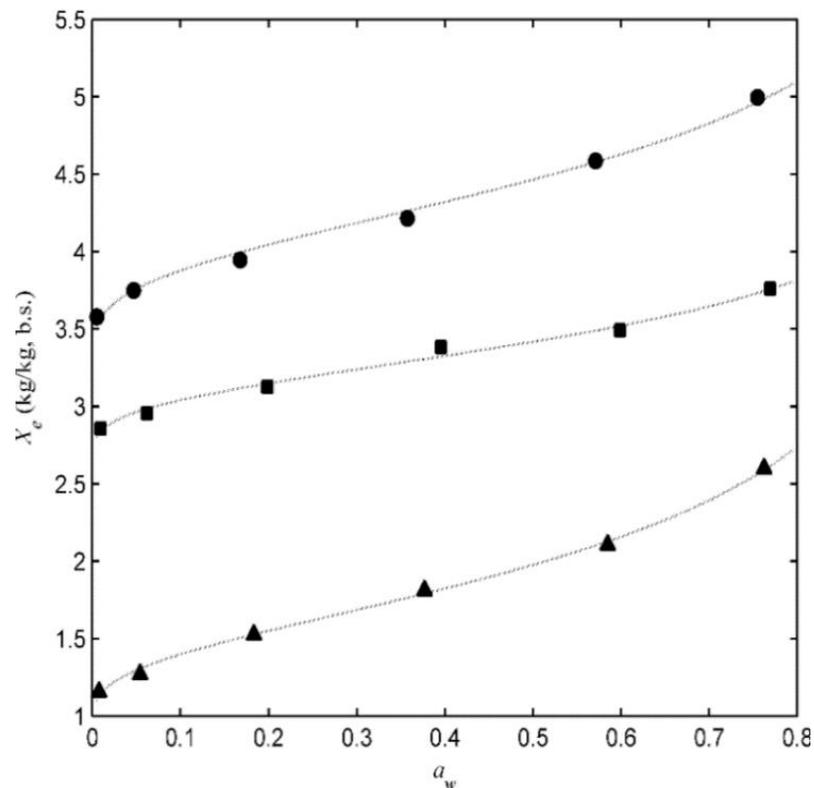
Observando os ajustes dos modelos na Tabela 3, pode-se observar que os valores obtidos nos modelos de GAB e Halsey apresentaram os melhores resultados dos ajustes estatísticos. Estes valores são importantes para saber as condições estáveis de conservação do material, pois indicam a quantidade de água que está fortemente adsorvida no sítio do mesmo.

Assim, qualquer um dos dois modelos pode ser empregado para o cálculo das propriedades termodinâmicas sendo que, neste caso, o modelo de Halsey foi escolhido em

função de ter apresentado alto coeficiente de determinação  $R^2$  ( $>0,99$ ) e baixo valor de MSE ( $<10\%$ ), e devido ser um modelo de ampla aplicação em produtos agrícolas. Conforme proposto (Corrêa, Resende, & Ribeiro, 2005), utilizou o modelo de Halsey na modelagem das isotermas de sorção das espigas de milho.

A representação gráfica do modelo de Halsey em comparação aos pontos experimentais das isotermas de sorção pode ser visto na Figura 2.

**Figura 2:** Valores experimentais da umidade de equilíbrio do albúmen do coco verde em função da atividade de água às temperaturas de 30 °C (●), 45 (■) e 60 (▲) calculados pelo modelo de Halsey (-).



Fonte: (Autores, 2020)

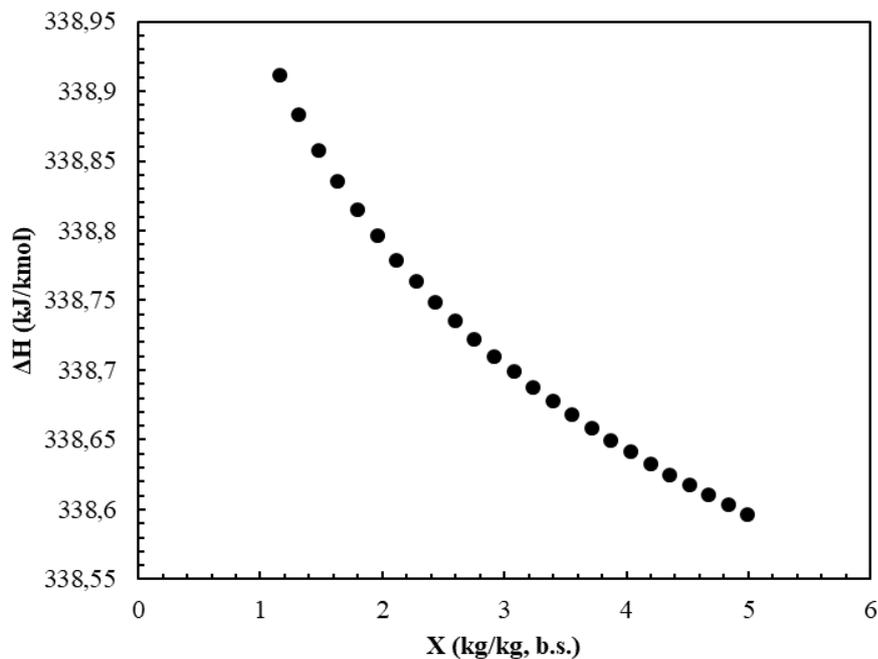
Na Figura 2, observam-se curvas isotérmicas, típicas de alimentos ricos em compostos solúveis, similares às mostradas para produtos como café, maçã, banana, abacaxi e alimentos ricos em açúcar, de acordo com a classificação de (Brunauer, Deming, Deming, & Teller, 1940).

Segundo Medeiros, Ayrosa, de Moraes Pitombo, & da Silva Lannes (2006), esta é a forma de isoterma mais comum em alimentos. Este comportamento também foi observado no estudo da polpa e casca da uva (Gabas, Telis-Romero, & Menegalli, 1999).

### 3.4. Determinação da entalpia de sorção da água

A Figura 3 mostra a localização da água ligada e o grau em que a interação água-sólido é maior do que a interação das moléculas de água, sendo que um valor máximo foi encontrado nas curvas, referente à entalpia diferencial ( $\Delta H$ ) de 338,92 kJ/mol corresponde à  $X_e = 1,157$ . Os valores máximos de  $\Delta H$  foram encontrados na faixa de teor de umidade de equilíbrio de 1,157 a 1,633 kg/kg, b.s., constituindo estes locais os mais homogêneos em termos de energia e, portanto, mais estável para mudanças de aw no material em um processo de desidratação. Estes valores estão coerentes com os encontrados para o feijão-caupi, variando de 361 a 472 kJ/mol (Ayranci & Duman, 2005).

**Figura 3:** Entalpia de sorção do albúmen em função da umidade de equilíbrio.



Fonte: (Autores, 2020)

Pode-se observar que a entalpia sorção aumenta à medida que o teor de umidade da polpa de coco diminui, uma vez que a entalpia representa a energia necessária para remover a água dos alimentos, conforme observado para banana (Villa-Vélez et al., 2012) e sementes de girassol (Campos et al., 2019).

#### 4. Considerações Finais

De acordo com os dados obtidos o aumento da temperatura de secagem influenciou significativamente na redução da umidade do albúmen do coco *in natura*, o que viabiliza o aumento da conservação do produto, para aplicações industriais. O modelo de difusividade efetiva para placa plana baseado na Segunda Lei de Fick mostrou-se adequado para determinar a difusividade efetiva durante o processo de secagem, por apresentar um coeficiente de correlação quadrática ( $R^2$ ) próximo de 1. Os valores da difusividade apresentaram um aumento de acordo com a elevação da temperatura, com valores variando entre  $1,703 \times 10^{-10}$  a  $3,781 \times 10^{-09}$  m<sup>2</sup>/s. Com o valor de energia de ativação obtido a partir dos coeficientes difusivos verificou-se que a mesma se encontra dentro do esperado para produtos agrícolas.

As isotermas de sorção obtidas pelo método gravimétrico estático para polpa de coco verde *in natura* apresentaram comportamento característico das isotermas obtidas para produtos alimentícios, típicas de alimentos que são ricos em compostos solúveis. O modelo Halsey apresentou um bom ajuste aos dados de isotermas de sorção da polpa de coco, com um coeficiente de determinação de aproximadamente 0,99 e baixo valor de MSE (<10%). A entalpia sorção aumentou à medida que o teor de umidade da polpa de coco diminuiu, mostrando fortes interações entre a água e os compostos da polpa, a entalpia diferencial ( $\Delta H$ ) para dessorção foi de 338,92 kJ/mol corresponde à  $X_e = 1,157$ . Portanto, este artigo pode ser útil em trabalhos futuros relacionados à secagem e armazenamento de polpa de coco verde.

#### Referências

- Almeida, R. L. J., Santos, N. C., dos Santos Pereira, T., de Alcântara Silva, V. M., de Alcântara Ribeiro, V. H., da Silva, L. R. I., & da Silva Eduardo, R. (2020). Melon seed drying kinetics described by a diffusion model. *Research, Society and Development*, 9(5), 32953146.
- Alves, R. A., Queiroz, A. J. d. M., de Figueirêdo, R. M., Silva, W. P. d., & Gomes, J. P. (2019). Secagem solar de feijão-caupi combinada com secagem em secador acumulador de calor. *Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental*, 23(9), 709-715.
- Araújo, T. M. R. (2019). Influência da maltodextrina nas propriedades e na microestrutura da polpa de coco verde em pó. Dissertação de mestrado. Universidade Federal do Ceará, Ciência e Tecnologia de Alimentos, Fortaleza.

- Araujo, W. D., Goneli, A. L. D., Corrêa, P. C., Hartmann Filho, C. P., & Martins, E. A. S. (2017). Modelagem matemática da secagem dos frutos de amendoim em camada delgada. *Revista Ciência Agronômica*, 48(3), 448-457.
- Ayranci, E., & Duman, O. (2005). Moisture sorption isotherms of cowpea (*Vigna unguiculata* L. Walp) and its protein isolate at 10, 20 and 30 C. *Journal of food engineering*, 70(1), 83-91.
- Basu, S., Shivhare, U., & Mujumdar, A. (2006). Models for sorption isotherms for foods: a review. *Drying technology*, 24(8), 917-930.
- Bitencourt, M. A. F. (2020). Isotermas de dessorção, secagem e caracterização nutricional das amêndoas das castanha-do-Brasil da região amazônica. Dissertação de mestrado. Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia Goiano.
- Botelho, F. M., Garcia, T. R. B., Viana, J. L., Botelho, S. D. C. C., & De Sousa, A. M. B. (2015). Cinética de secagem e determinação do coeficiente de difusão efetivo de grãos de sorgo. *Revista Brasileira de Milho e Sorgo*, 14(2), 260-272.
- Brovchenko, I., & Oleinikova, A. (2008). Interfacial and confined water. *Elsevier*, 1(1), 25-29.
- Brunauer, S., Deming, L. S., Deming, W. E., & Teller, E. (1940). On a theory of the van der Waals adsorption of gases. *Journal of the American Chemical society*, 62(7), 1723-1732.
- Campos, R. C., Correa, P. C., Zaidan, I. R., Zaidan, Ú. R., & Leite, R. A. (2019). Isotermas de sorção de água de sementes de girassol: Análise termodinâmica. *Ciência e Agrotecnologia*, 43.
- Cano-Higueta, D. M., Villa-Vélez, H. A., Telis-Romero, J., Váquiro, H. A., & Telis, V. R. N. (2015). Influence of alternative drying aids on water sorption of spray dried mango mix powders: A thermodynamic approach. *Food and Bioproducts Processing*, 93, 19-28.
- Corrêa, P. C., Resende, O., & Ribeiro, D. M. (2005). Isotermas de sorção das espigas de milho: obtenção e Modelagem. *Revista Brasileira de Milho e Sorgo*, 4(01).

Correia, I. M. S., Araújo, G., Paulo, J. B. A., & Sousa, E. M. B. D. (2014). Avaliação das potencialidades e características físico-químicas do óleo de Girassol (*Helianthus annuus* L.) e Coco (*Cocos nucifera* L.) produzidos no Nordeste brasileiro. *Scientia Plena*, 10(3).

Crank, J. (1975). Diffusion in a sphere. *The mathematics of diffusion*, 89-103.

da Silva, A. C. (2014). Reaproveitamento da casca de coco verde. *Revista Monografias Ambientais*, 13(5), 4077-4086.

de Souza Ferreira, S. C., da Silva, H. W., & Rodovalho, R. S. (2011). Isoterma de dessorção e calor latente de vaporização da semente de pimenta Cumari Amarela (*Capsicum chinense* L.). *Revista Liberato*, 12(18).

Gabas, A., Telis-Romero, J., & Menegalli, F. (1999). Thermodynamic models for water sorption by grape skin and pulp. *Drying technology*, 17(4-5), 962-974.

Gomes, N. H. F., Neto, H. C. D. S., Alves, J. J. L., Rodovalho, R. S., & Sousa, C. M. (2017). Cinética de secagem de folhas de *Cymbopogon citratus*. *Engevista*, 19(2), 328-338.

Gonçalves, M. F. S., de Brito Bonamone, M., Lima, C. V. H., & Barbosa, F. B. M. H. (2019). Logística reversa do resíduo de coco verde. *Revista LOGS: Logística e Operações Globais Sustentáveis*, 1(1).

Goneli, A. L. D., Corrêa, P. C., De Oliveira, G. H. H., Gomes, C. F., & Botelho, F. M. (2010). Water sorption isotherms and thermodynamic properties of pearl millet grain. *International journal of food science & technology*, 45(4), 828-838.

Iglesias, H., & Chirife, J. (1995). An alternative to the Guggenheim, Anderson and De Boer model for the mathematical description of moisture sorption isotherms of foods. *Food Research International*, 28(3), 317-321.

Int, A. (2007). Official methods of analysis of AOAC International: AOAC international Gaithersburg, MD. *Journal of AOAC International*, 90(4), 1073-1083.

Kanojia, A., & Jain, S. K. (2017). Performance of coconut shell as coarse aggregate in concrete. *Construction and Building Materials*, 140, 150-156.

Kashaninejad, M., Mortazavi, A., Safekordi, A., & Tabil, L. (2007). Thin-layer drying characteristics and modeling of pistachio nuts. *Journal of food engineering*, 78(1), 98-108.

Labuza, T. P., Kaanane, A., & Chen, J. (1985). Effect of temperature on the moisture sorption isotherms and water activity shift of two dehydrated foods. *Journal of Food science*, 50(2), 385-392.

Leite, M., Furtado, C. R., Couto, L. O., Oliveira, F., & Correia, T. R. (2010). "Avaliação da biodegradação de compósitos de poli ( $\epsilon$ caprolactona)/fibra de coco verde". *Polímeros*, 20(5), 339-344.

Mattos, A., Rosa, M., Crisóstomo, L., Figueiredo, M., & Veras, L. (2011). Processamento da casca de coco verde para a produção de pó e fibra. *Journal of the InterAmerican Society for Tropical Horticulture*, 53, 85-88.

Medeiros, M. L., Ayrosa, A. M. I. B., de Moraes Pitombo, R. N., & da Silva Lannes, S. C. (2006). Sorption isotherms of cocoa and cupuassu products. *Journal of food engineering*, 73(4), 402-406.

Meneghetti, V. L., Aosani, E., da Rocha, J. C., de Oliveira, M., Elias, M. C., & Pohndorf, R. S. (2019). Mathematical models for intermittent drying of rice/Modelos matematicos para a secagem intermitente de arroz em casca. *Revista Brasileira de Engenharia Agricola e Ambiental*, 16(10), 1115-1121.

Pham, L. J. (2016). Coconut (cocos nucifera). *Industrial Oil Crops*, 1(1), 231-242

Rizvi, S. S. (2014). Thermodynamic properties of foods in dehydration. *Engineering properties of foods*, 1(4), 261-348.

Samapundo, S., Devlieghere, F., De Meulenaer, B., Atukwase, A., Lamboni, Y., & Debevere, J. M. (2007). Sorption isotherms and isosteric heats of sorption of whole yellow dent corn. *Journal of food engineering*, 79(1), 168-175.

Santana, I. A. (2012). Avaliação química e funcional da polpa de coco verde e aplicação em gelado comestível. Dissertação de mestrado. Instituto Mauá de Tecnologia, São Caetano do Sul.

Senhoras, E. M. (2003). Estratégias de uma agenda para a cadeia agroindustrial do coco: transformando a ameaça dos resíduos em oportunidades eco-eficientes. Monografia, Universidade Estadual de Campinas, Instituto de Economia, Campinas.

Simal, S., Femenia, A., Castell-Palou, Á., & Rosselló, C. (2007). Water desorption thermodynamic properties of pineapple. *Journal of food engineering*, 80(4), 1293-1301.

Singh, B., & Gupta, A. (2007). Mass transfer kinetics and determination of effective diffusivity during convective dehydration of pre-osmosed carrot cubes. *Journal of Food Engineering*, 79(2), 459-470.

Timmermann, E. O., Chirife, J., & Iglesias, H. (2001). Water sorption isotherms of foods and foodstuffs: BET or GAB parameters? *Journal of food engineering*, 48(1), 19-31.

Villa-Vélez, H. A., Váquiro, H. A., Bon, J., & Telis-Romero, J. (2012). Modelling thermodynamic properties of banana waste by analytical derivation of desorption isotherms. *International Journal of Food Engineering*, 8(9), 1-21.

Zogzas, N., Maroulis, Z., & Marinos-Kouris, D. (1996). Moisture diffusivity data compilation in foodstuffs. *Drying technology*, 14(10), 2225-2253.

#### **Porcentagem de contribuição de cada autor no manuscrito**

Nilton Silva Costa Mafra – 40,0%

Harvey Alexander Villa Velez – 30,0%

Everton Holanda Sales – 10,0%

Aline Medeiro Ferreira – 10,0%

Nielson Brito Sirotheau – 10,0%

## 6 CONCLUSÕES

De acordo com os dados obtidos o aumento da temperatura de secagem influenciou significativamente na redução da umidade do albúmen do coco *in natura*, o que permitiu maiores taxas de secagem e redução no tempo de secagem. O modelo de difusividade efetiva para placa plana baseado na Segunda Lei de Fick mostrou-se adequado para determinar a difusividade efetiva durante o processo de secagem, por apresentar um coeficiente de determinação ( $R^2$ ) próximo de 1. Os valores da difusividade aumentaram com o aumento da temperatura, com valores variando entre  $1,703 \times 10^{-10}$  e  $3,781 \times 10^{-09}$  m<sup>2</sup>/s. A energia de ativação, obtida a partir dos coeficientes difusivos, apresentou valores dentro do esperado para produtos agrícolas.

As isotermas de sorção para polpa de coco verde *in natura*, obtidas pelo método gravimétrico estático, apresentaram comportamento característico das isotermas de produtos alimentícios, típicas de alimentos que são ricos em compostos solúveis. O modelo Halsey apresentou o melhor ajuste aos dados experimentais, com um coeficiente de determinação de aproximadamente 0,99 e baixo valor de MSE (<10%). A entalpia de sorção aumentou à medida que o teor de umidade da polpa de coco diminuiu, mostrando fortes interações entre a água e os compostos da polpa. A entalpia diferencial ( $\Delta H$ ) para dessorção foi de 338,92 kJ/mol, correspondendo a uma  $X_e = 1,157$  kg/kg. Os resultados obtidos neste trabalho podem ser úteis em trabalhos futuros relacionados à secagem e armazenamento de polpa de coco verde.

## REFERÊNCIAS

AFONSO JÚNIOR, P. C.; CORRÊA, P.C. Comparação de modelos matemáticos para descrição da cinética de secagem em camada fina de sementes de feijão. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, v. 3, n. 3, p. 349-353, 1999.

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.

ALMEIDA, R. L. J.; SANTOS, N. C.; DOS SANTOS PEREIRA, T.; DE QUEIROGA, A. P. R.; DE ALCÂNTARA SILVA, V. M.; DE ALCÂNTARA RIBEIRO, V. H.; BORGES, E. M. E. S. Cinética de secagem do feijão azuki: modelagem matemática e propriedades termodinâmicas. **Research, Society and Development**, v. 9, n. 3, p. 3, 2020.

ANDRADE, R. D.; LEMUS, R.; PEREZ, C.E. Models of sorption isotherms for food: uses and limitations. **Vitae**, v. 18, n. 3, p. 325-334, 2011.

AOAC, Official Methods of Analysis. Appendix F: Guidelines for standard method performance requirements. 2012.

ARAGÃO, F. B.; LOIOLA, C. M.; CAMBUI, E.; ARAGÃO, W. M. Produção de água de coco de cultivares de coqueiro verde. *Comunicado Técnico*, v. 42, 2005.

ARAÚJO, C. D. S.; MACEDO, L. L.; VIMERCATI, W. C.; SARAIVA, S. H.; OLIVEIRA, A. D. N.; TEIXEIRA, L. J. Q. Cinética de secagem de acerola em leito de espuma e ajuste de modelos matemáticos. *Brazilian Journal of Food Technology*, v. 20, 2017.

ARAYA-FARIAS, M.; RATTI, C. Dehydration of Foods: General Concepts, Capítulo de livro: *Advances in Food Dehydration*, New York. Ed. 2009.

AROUCHA, E. M. M.; SOUZA, M. S.; SOARES, K. M. P.; AROUCHA FILHO, J. C.; PAIVA, C. A. Análise físico-química e sensorial de água-de-coco em função de estágio de maturação das cultivares de coco anão verde e vermelho. *AGROPECUÁRIA CIENTÍFICA NO SEMIÁRIDO*, v. 10, n. 1, p. 33-38, 2014.

AVIARA, N. A.; AJIBOLA, O. O.; ONI, S. A. Sorption equilibrium and thermodynamic characteristics of soya bean. **Biosystems Engineering**, v. 87, n. 2, p. 179-190, 2004.

BAHLOUL, N.; BOUDHRIOUA, N.; KECHAOU, N. Moisture desorption–adsorption isotherms and isosteric heats of sorption of Tunisian olive leaves (*Olea europaea* L.). **Industrial crops and products**, v. 28, n. 2, p. 162-176, 2008.

BARBOSA-CÁNOVAS, G. V.; FONTANA, J. A.; SCHMIDT, S. J.; LABUZA, T. P. *Water activity in foods: fundamentals and applications*. Ames: Blackwell Publishing Profesional, p. 438, 2007.

BARBOSA-CÁNOVAS, Gustavo V.; VEGA-MERCADO, Humberto. **Dehydration of foods**. Springer Science & Business Media, 1996.

BASU, S. K. **Auditing: Principles and techniques**. Pearson Education, 2006.

BLAHOVEC, J.; YANNIOTIS, S. Modified classification of sorption isotherms. **Journal of Food Engineering**, v. 91, n. 1, p. 72-77, 2009.

BRUNAUER, S.; EMMETT, P. H.; TELLER, E. Adsorption of gases in multimolecular layers. **Journal of the American chemical society**, v. 60, n. 2, p. 309-319, 1938.

CANO-HIGUITA, D. M.; VILLA-VÉLEZ, H. A.; TELIS-ROMERO, J.; VÁQUIRO, H. A.; TELIS, V. R. N. Influence of alternative drying aids on water sorption of spray dried mango mix powders: A thermodynamic approach. **Food and Bioproducts Processing**, v. 93, p. 19-28, 2015.

CANO-CHAUCA, M.; RAMOS, A. M.; STRINGHETA, P. C.; PEREIRA, J. A. Drying curves and water activity evaluation of dried banana. In *Drying 2004—Proceedings of the 14th International Drying Symposium (IDS 2004)*, São Paulo, Brazil (pp. 22-25), 2004.

CASTILLO, M. D.; MARTINEZ, E. J.; GONZÁLEZ, H. H. L.; PACIN, A. M.; RESNIK, S. L. Study of mathematical models applied to sorption isotherms of Argentinean black bean varieties. **Journal of Food Engineering**, v. 60, n. 4, p. 343-348, 2003.

CAVALCANTE, L. V. Os circuitos espaciais da produção de coco no Litoral Oeste do Ceará. **Caminhos de Geografia**, v. 17, n. 57, p. 41-58, 2016.

CELESTINO, S. M. C. *Princípios de secagem de alimentos*. **Embrapa Cerrados-Documentos (INFOTECA-E)**, 2010.

CHAN, E.; ELEVITCH, C. R. Cocos nucifera (coconut). **Species profiles for Pacific Island agroforestry**, v. 2, p. 1-27, 2006.

CHUNG, D. S.; PFOST, H. B. Adsorption and desorption of water vapor by cereal grains and their products Part I: Heat and free energy changes of adsorption and desorption. **Transactions of the ASAE**, v. 10, n. 4, p. 549-0551, 1967.

CORRÊA, P. C.; RESENDE, O.; MARTINAZZO, A. P.; GONELI, A. L.; BOTELHO, F. M. Modelagem matemática para a descrição do processo de secagem do feijão (*Phaseolus vulgaris* L.) em camadas delgadas. *Engenharia Agrícola*, v.27, n.2, p.501-510, 2007.

CORREIA, I. M. S.; ARAÚJO, G.; PAULO, J. B. A.; SOUSA, E. M. B. D. Avaliação das potencialidades e características físico-químicas do óleo de Girassol (*Helianthus annuus* L.) e Coco (*Cocos nucifera* L.) produzidos no Nordeste brasileiro. **Scientia Plena**, v. 10, n. 3, 2014.

CRANK, John. The mathematics of diffusion. **2nd end**, 1975.

DE JESUS JÚNIOR, Luciano Alves et al. Análise da produção de coco no Estado de Sergipe frente ao crescimento da cultura no Nordeste e no Brasil. **Revista GEINTEC-Gestão, Inovação e Tecnologias**, v. 3, n. 5, p. 400-408, 2013.

DEBMANDAL, M.; MANDAL, S. Coconut (*Cocos nucifera* L.: Arecaceae): in health promotion and disease prevention. **Asian Pacific journal of tropical medicine**, v. 4, n. 3, p. 241-247, 2011.

DOS SANTOS, K. F. T.; DOS SANTOS, M. L. G. T.; CELLA, D.; SPADA, R. K. Fruticultura, *Revista Interface Tecnológica*, v. 15, n. 2, p. 323-335, 2018.

EL-SAYD, N. I.; MAKAWY, M. M. Comparison of methods for determination of moisture in food. *Research Journal of Agriculture and Biological Sciences*, v.6, n.6, p. 906-911, 2010.

FAOSTAT, F. Agriculture Organization of the United Nations Statistics Division. **Economic and Social Development Department, Rome, Italy**. <http://faostat3.fao.org/home/E>. Accessed, v. 12, 2016.

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

FERREIRA, M. P.; PENA, R. S. Estudo da secagem da casca do maracujá amarelo. **Revista Brasileira de Produtos Agroindustriais**, v. 12, n. 1, p. 15-28, 2010.

FOALE, M.; HARRIES, H. Coconut. **Specialty crops for Pacific islands. Permanent Agricultural Resources, Holualoa, Hawaii**, 2011.

FOGLER, H. Scott. **Elementos de engenharia das reações químicas**. LTC, 2009.

FONTES, H. R.; FERREIRA, J. M. S. A cultura do coco. **Área de Informação da Sede-Col Criar Plantar ABC 500P/500R Saber (INFOTECA-E)**, 2006.

GEANKOPLIS, Christie J. **Procesos de transporte y operaciones unitarias**. Compañía Editorial Continental, 1998.

GONÇALVES, Otília et al. Um estudo comparativo da desidratação de framboesa por liofilização ou secagem convencional. **Revista Internacional de Pesquisa e Engenharia Avançada**, v. 2, n. 3, p. 267-272, 2018.

GOULA, A. M.; KARAPANTSIOS, T. D.; ACHILIAS, D. S.; ADAMOPOULOS, K. G. Water sorption isotherms and glass transition temperature of spray dried tomato pulp. *Journal of Food Engineering*, v. 85, n.1, p. 73-83, 2008.

HALSEY, George. Physical adsorption on non-uniform surfaces. **The Journal of chemical physics**, v. 16, n. 10, p. 931-937, 1948.

HELDMAN, D. R.; HARTEL, R. W. Food extrusion. In: **Principles of food processing**. Springer, Boston, MA, 1999. p. 253-283.

HENDERSON, S. M. A basic concept of equilibrium moisture. **Agricultural engineering**, v. 33, p. 29-32, 1952.

HOFSETZ, K.; LOPES, C. C.; HUBINGER, M. D.; MAYOR, L.; SERENO, A. M. Changes in the physical properties of bananas on applying HTST pulse during air-drying. *Journal of Food Engineering*, v. 83, n. 4, p. 531-540, 2007.

IGLESIAS, H. A.; CHIRIFE, J. Prediction of the effect of temperature on water sorption isotherms of food material. **International Journal of Food Science & Technology**, v. 11, n. 2, p. 109-116, 1976.

JANGAM, S. V.; LAW, C. L.; MUJUMDAR, A. S. Drying of foods, vegetables and fruits. Published in Singapore, 2010.

JERONIMO, C. E.; SILVA, G. Estudo de alternativas para o aproveitamento de resíduos sólidos da industrialização do coco. **Revista Monografias Ambientais**, v. 10, n. 10, p. 2193-2208, 2012.

JODRAL, M.; GALLARDO, M. C.; SERRANO, Salud. El coco y sus aplicaciones. **Alimentaria: Revista de tecnología e higiene de los alimentos**, n. 313, p. 45-50, 2000.

JUCÁ, M. P.; GAÍVA, H. N.; PEREIRA, W. E.; MILESKI, A. Comportamento vegetativo de seis cultivares de coqueiro-anão (*Cocos nucifera* L.), em Santo Antônio de Leverger-MT. **Revista Brasileira de Fruticultura**, v. 24, n. 2, p. 463-467, 2002.

KANOJIA, A.; JAIN, S. K. Performance of coconut shell as coarse aggregate in concrete. **Construction and Building Materials**, v. 140, p. 150-156, 2017.

KAYA, S.; KAHYAOGLU, T. Influence of dehulling and roasting process on the thermodynamics of moisture adsorption in sesame seed. **Journal of Food Engineering**, v. 76, n. 2, p. 139-147, 2006.

KWIATKOWSKI, A.; OLIVEIRA, D. M.; CLEMENTE, E. Atividade enzimática e parâmetros físico-químicos de água de cocos colhidos em diferentes estádios de desenvolvimento e estação climática. **Revista Brasileira de Fruticultura**, v. 34, n. 2, p. 551-559, 2012.

LABUZA, To P. Sorption phenomena in foods. **Food Technol.**, v. 22, p. 15-19, 1968.

LANGMUIR, Irving. The adsorption of gases on plane surfaces of glass, mica and platinum. **Journal of the American Chemical society**, v. 40, n. 9, p. 1361-1403, 1918.

LEDO, A. da S. et al. Efeito da sacarose e do manitol na conservação in vitro por crescimento lento de coqueiro anão. **Embrapa Tabuleiros Costeiros-Artigo em periódico indexado (ALICE)**, 2007.

LEITE, M. C.; FURTADO, C. R.; COUTO, L. O.; OLIVEIRA, F. L.; CORREIA, T. R. Avaliação da biodegradação de compósitos de poli ( $\epsilon$ -caprolactona)/fibra de coco verde. **Polímeros**, v. 20, n.5, p. 339-344, 2010.

LIMA, S. A. J.; MACHADO, A. V.; CAVALCANTI, M. T.; DE ARAÚJO, D. R. Caracterização físico-química de qualidade da água de coco anão verde industrializada. **Revista Verde de Agroecologia e Desenvolvimento Sustentável**, v. 10, n. 1, p. 35-42, 2015.

MARTINS, C. R.; JESUS JUNIOR, L. A. Produção e comercialização de coco no Brasil frente ao comércio internacional: panorama 2014. **Embrapa Tabuleiros Costeiros, Aracaju, 53p**, 2014.

MATHLOUTHI, M.; ROGÉ, B. Water vapour sorption isotherms and the caking of food powders. **Food chemistry**, v. 82, n. 1, p. 61-71, 2003.

MATTOS, A. L. A.; ROSA, M. F.; CRISÓSTOMO, L. A.; FIGUEIREDO, M. C. B.; VERAS, L. G. C. Processamento da casca de coco verde para a produção de pó e fibra. **Journal of the InterAmerican Society for Tropical Horticulture**, v. 53, p. 8588, 2011.

MCCABE, D. L.; TREVINO, L. K. Academic dishonesty: Honor codes and other contextual influences. **The journal of higher education**, v. 64, n. 5, p. 522-538, 1993.

MORAIS, SJ da S. **Cinética de secagem de grãos de feijão-caupi (Vigna unguiculata (L.) Walp.)**. 2010. Tese de Doutorado. Dissertação de Mestrado, Universidade Estadual de Goiás.

MOREIRA, R. F. P. M.; JOSÉ, Humberto J.; SOARES, José L. Isotermas de adsorção de corantes reativos sobre carvão ativado. **2º Encontro Brasileiro Sobre Adsorção, Florianópolis, SC, Brasil**, p. 85-91, 2000.

NASCIMENTO, Ronaldo Ferreira do et al. Adsorção: aspectos teóricos e aplicações ambientais. 2014.

OSWIN, C. R. The kinetics of package life. III. The isotherm. **Journal of the Society of Chemical Industry**, v. 65, n. 12, p. 419-421, 1946.

PAPPAS, G.; RAO, V. N. M. Sorption Isotherms of Cowpeas from 25°C to 70°C. **Transactions of the ASAE**, v. 30, n. 5, p. 1478-1483, 1987.

PARK, KIL JIN; YADO, M. K. M.; BROD, F. P. R. Estudo de secagem de pêra bartlett (Pyrus sp.) em fatias. **Food Science and Technology**, v. 21, n. 3, p. 288-292, 2001.

PARK, KIL JIN et al. Conceitos de processo e equipamentos de secagem. **Campinas: Unicamp**, 2007.

PARK, K. J.; NOGUEIRA, R. I. Modelos de ajuste de isotermas de sorção de alimentos. **Engenharia Rural**, v. 3, n. 1, 1992.

PAGANO, A. M.; MASCHERONI, Rodolfo Horacio. Sorption isotherms for amaranth grains. **Journal of Food Engineering**, v. 67, n. 4, p. 441-450, 2005.

PANATO, Karoline et al. Efeito da secagem convectiva e por leito de espuma sobre as propriedades físico-químicas e tecnológicas de purê de abóbora (Cucurbita maxima Duch. x Cucurbita moschata Duch. var.'Tetsukabuto'). 2017.

PELEGRINI, G.; GAZOLLA, M. A agroindustrialização como estratégia de reprodução social da agricultura familiar. **Estudos Sociedade e Agricultura**, 2009.

PÉREZ-ALONSO, C.; BERISTAIN, C. I.; LOBATO-CALLEROS, C.; RODRÍGUEZHUEZO, M. E.; VEMON-CARTER, E. J. Thermodynamic analysis of the sorption isotherms of pure and blended carbohydrate polymers. *Journal of Food Engineering*, Davis, v. 77, p. 753-760, 2006.

PHAM, Laura J. Coconut (cocos nucifera). In: **Industrial oil crops**. AOCS Press, v. 1, p. 231-242, 2016

RESENDE, O.; CORRÊA, P. C.; GONELI, A. L. D.; RIBEIRO, D. M. Isotermas e calor isostérico de sorção do feijão. *Food Science and Technology*, v. 26, n. 3, p. 626-631, 2006.

RIZVI, S. S. Thermodynamic properties of foods in dehydration Engineering properties of foods (pp. 261-348): CRC Press, 2014.

RUTHVEN, D. M. **Principles of adsorption and adsorption processes**. John Wiley & Sons, 1984.

SANTANA, I. A.; RIBEIRO, E. P.; IGUTI, A. M. Evaluation of green coconut (Cocos nucifera L.) pulp for use as milk, fat and emulsifier replacer in ice cream. **Procedia Food Science**, v. 1, p. 1447-1453, 2011.

SANTOS, C. T.; BONOMO, R. F.; CHAVES, M. A.; FONTAN, R. D. C. I.; BONOMO, P. Cinética e modelagem da secagem de carambola (Averrhoa carambola L.) em secador de bandeja. *Acta Scientiarum. Technology*, v. 32, n. 3, p. 209-313, 2010.

SENHORAS, E. M. Oportunidades da cadeia agroindustrial do coco verde: do coco verde nada se perde, tudo se desfruta. **Revista Urutágua, Maringá**, n. 5, p. 08-11, 2004.

SINGH, R. P.; HELDMAN, D. R. Dehydration. **Introduction to food engineering**, p. 675-710, 2014.

SRIKIATDEN, J.; ROBERTS, J. S. Measuring moisture diffusivity of potato and carrot (core and cortex) during convective hot air and isothermal drying. **Journal of Food Engineering**, v. 74, n. 1, p. 143-152, 2006.

W JOHN THOMAS, FEng; CRITTENDEN, Barry. **Adsorption technology and design**. Butterworth-Heinemann, 1998.

WAUGHON, T. G. M.; PENA, R. da S. Modelagem da secagem em camada delgada da fibra residual do abacaxi. **Boletim do Centro de Pesquisa de Processamento de Alimentos**, v. 26, n. 2, p. 297-306, 2008.

WELTI-CHANES, J.; VERGARA, B. F. Actividad de agua. Concepto y aplicación en alimentos con alto contenido de humedad. **Temas de Tecnología de Alimentos**, v. 1, 1997.

WIEDERHOLD, P. R. **Water vapor measurement: methods and instrumentation**. CRC Press, 1997.

VAN DEN BERG, C. Description of water activity of foods for engineering purposes by means of the GAB model of sorption. **Engineering science in the food industry**, p. 311-321, 1984.

VASCONCELOS, Margarida Angélica da Silva; MELO, Filho Artur Bibiano de. **Conservação de alimentos**. 2016

VIEIRA, A. H.; DE FIGUEIRÊDO, R. M. F.; DE MELO QUEIROZ, A. J. Isotermas de adsorção de umidade da pitanga em pó. **Revista de Biologia e ciências da terra**, v. 7, n. 1, p. 11-20, 2007.

VILLA-VÉLEZ, H. A.; VÁQUIRO, H. A.; BON, J.; TELIS-ROMERO, J. Modelling thermodynamic properties of banana waste by analytical derivation of desorption isotherms. **International Journal of Food Engineering**, v.8, p. 1-21, 2012.

## **ANEXO A – NORMAS DA REVISTA RESEARCH, SOCIETY AND DEVELOPMENT**

### **Estrutura do texto:**

Título em português, inglês e espanhol.

Resumo e Palavras-chave em português, inglês e espanhol. Deve ter entre 150 a 250 palavras);

Corpo do texto (deve conter: introdução, objetivo, a metodologia, resultados, discussão e considerações finais ou conclusão);

Referências: Tanto a citação no texto, quanto no item de Referências, o estilo de formatação da APA - American Psychological Association. Em ordem alfabética crescente, pelo sobrenome do primeiro autor da referência. Não devem ser numeradas. Devem ser colocadas em tamanho 12 e espaçamento 1,5, separadas uma das outras por um espaço em branco).

### **Layout:**

Escrito em espaço 1,5 cm, utilizando Times New Roman fonte 12, em formato A4 e as margens do texto deverão ser inferior, superior, direita e esquerda de 2,5 cm.;

Recuos são feitos na régua do editor de texto (não pela tecla TAB);

Os artigos científicos devem ter mais de 5 páginas.

### **Figuras:**

Os títulos das tabelas, figuras ou quadros devem ser colocados na parte superior e as fontes na parte inferior.