

# Modelagem Matemática do Equilíbrio Higroscópico de Sementes de Azevém

27

*Juliana Soares Zeymer<sup>1</sup>, Paulo Cesar Corrêa<sup>1</sup>, Fernanda Machado Baptistini<sup>2</sup>, Renata Cássia Campos<sup>1</sup>, Igor Lopes de Faria<sup>1</sup>, Marcos Eduardo Viana de Araujo<sup>1</sup>*

---

## RESUMO

Com o intuito de oferecer informações sobre o equilíbrio higroscópico de sementes de azevém, objetivou-se determinar o modelo matemático mais adequado para prever o teor de água de equilíbrio das sementes, em diferentes condições de temperatura e umidade relativa. O teor de água de equilíbrio foi alcançado por meio do método estático-gravimétrico, utilizando soluções salinas saturadas com valores de umidade relativa entre 11 e  $96 \pm 2\%$ . As sementes foram colocadas no interior de dessecadores contendo as soluções salinas e armazenadas em câmaras BOD em diferentes temperaturas (10, 20, 30, 40,  $50 \pm 1^\circ\text{C}$ ). Seis modelos matemáticos (Henderson Modificado, Halsey Modificado, Oswin Modificado, Copace, Chung Pfof e Smith) foram ajustados aos dados experimentais do teor de água de equilíbrio das sementes. O modelo mais adequado foi escolhido considerando a magnitude do erro médio relativo (MRE), desvio padrão da estimativa (SDE) e análise de resíduos. O modelo de Chung Pfof foi o que melhor representou a higroscopicidade das sementes de azevém, apresentando valores de 5,67% e 0,66 de MRE e SDE, respectivamente.

Palavras-chave: Isotermas de sorção, Atividade de água, Temperatura, Umidade relativa, *Lolium multiflorum*.

## INTRODUÇÃO

A viabilidade e qualidade das sementes a serem comercializadas é primordial para a lucratividade dos agricultores e agentes atuantes no agronegócio. Assim, além da

---

<sup>1</sup>Universidade Federal de Viçosa (UFV), Centro Nacional de Treinamento em Armazenagem (CENTREINAR), Campus de Viçosa, CEP 36570-000, Viçosa, Minas Gerais, Brasil. E-mail: juliana.zeymer@ufv.br; copace@gmail.com; camposrc16@gmail.com; igorbenks@gmail.com; marcos.rav@hotmail.com.

<sup>2</sup>Universidade Federal do Espírito Santo (UFES), Departamento de Engenharia Rural, Campus de Alegre, CEP 29500-000, Alegre, Espírito Santo, Brasil. E-mail: fbaptistini@yahoo.com.br.

escolha das melhores variedades de sementes e tratos culturais no plantio e colheita, o adequado armazenamento das mesmas é imprescindível, de modo a permitir sua utilização em momento oportuno (Corrêa et al., 2016).

A armazenagem segura de sementes requer o acompanhamento da temperatura e umidade relativa no armazém, uma vez que a combinação destes dois parâmetros rege a sorção de água do produto. Dependendo das condições psicrométricas do ar, o teor de água das sementes pode aumentar ou diminuir durante o armazenamento, resultando em maior ou menor atividade de insetos e microrganismos (Lopes e Macedo, 2008), o que afeta consideravelmente a qualidade do produto final. Essas alterações ocorrem em razão da natureza higroscópica das sementes, já que estas possuem a capacidade de desorver ou adsorver água.

Tendo em vista a importância do conhecimento do comportamento higroscópico das sementes na definição de condições adequadas de armazenamento para a manutenção de suas qualidades, vários pesquisadores vêm empregando esforços no estudo da obtenção de modelos matemáticos que expressem o teor de água de equilíbrio de diferentes sementes (Goneli et al., 2010; Corrêa et al., 2015; Silva et al., 2015; Corrêa et al., 2016; Zeymer et al., 2017).

A utilização de modelos matemáticos para estimar o teor de água de equilíbrio dos produtos agrícolas apresenta a grande vantagem de predição dos valores de atividade de água do produto, em condições ambientais de difícil determinação experimental. A relação entre o teor de água de um produto e a umidade relativa de equilíbrio, a dada temperatura, pode ser expressa por meio de curvas características, denominadas isotermas de sorção. Existem mais de 270 modelos matemáticos encontrados na literatura com capacidade de predizer tais isotermas (Barbosa-Cánovas et al., 2007).

Em razão da inexistência de trabalhos acerca da higroscopicidade de sementes de azevém e da necessidade de armazená-las de forma adequada, objetivou-se com este trabalho analisar seis modelos matemáticos citados na literatura, a fim de selecionar o mais adequado para a predição das isotermas de sorção de água de sementes de azevém, submetidas a diferentes condições de temperatura e umidade relativa do ar.

## **MATERIAL E MÉTODOS**

O trabalho foi desenvolvido no Laboratório de Propriedades Físicas e Avaliação de Qualidade de Produtos Agrícolas, pertencente ao Centro Nacional de Treinamento em Armazenagem (CENTREINAR), localizado na Universidade Federal de Viçosa, Viçosa-MG.

Com vista à obtenção do teor de água de equilíbrio das sementes de azevém pelo processo de desorção, foi empregado o método estático-gravimétrico (Brasil,

2009). Foram utilizadas diferentes condições de temperatura (10, 20, 30, 40, 50 ± 1°C) e umidade relativa (entre 11 e 96 ± 2%) até que o produto atingisse o teor de água de equilíbrio com a condição do ar especificada. As umidades relativas descritas foram fornecidas por soluções salinas saturadas. Cada amostra consistiu de 20 g de sementes de azevém, em triplicata. O teor de água de equilíbrio foi atingido quando a variação da massa das sementes, em três pesagens consecutivas, foi menor ou igual a 0,01g. O teor de água foi então determinado pelo método da estufa (Brasil, 2009).

Aos dados experimentais do teor de água de equilíbrio das sementes de azevém, obtido para cada condição psicrométrica do ar, foram ajustados os modelos matemáticos apresentados na Tabela 1.

**TABELA 1.** Modelos matemáticos utilizados para prever a higroscopicidade de produtos agrícolas

Nome do modelo	Modelo	Número da equação
Henderson Modificado	$U_e = \left[ \frac{\ln(1 - a_w)}{-a(T + b)} \right]^{\frac{1}{c}}$	(1)
Halsey Modificado	$U_e = \left[ \frac{\exp(a - bT)}{-\ln(a_w)} \right]^{\frac{1}{c}}$	(2)
Oswin Modificado	$U_e = (a + bT) \left[ \frac{a_w}{1 - a_w} \right]^{\frac{1}{c}}$	(3)
Copace	$U_e = \exp[a - (bT) + (ca_w)]$	(4)
Chung Pfof	$U_e = a - b \ln[-(T + c) \ln(a_w)]$	(5)
Smith	$U_e = a - (bT) - c \ln(1 - a_w)$	(6)

Em que:  $U_e$  – teor de água de equilíbrio, (% b.s.);  $a_w$  – atividade de água (decimal); T – temperatura (°C); a, b e c – parâmetros de ajuste dos modelos utilizados.

Para o ajuste dos modelos matemáticos, foi realizada análise de regressão não-linear pelo método Gauss-Newton. Para verificar o grau de ajuste dos modelos, foram consideradas as magnitudes do erro médio relativo (MRE) e desvio padrão da estimativa (SDE), sendo que, de modo geral, quanto menores forem as magnitudes desses índices, melhor o ajuste do modelo aos dados observados. Os valores de MRE e SDE para cada modelo foram calculados pelas Equações 7 e 8, respectivamente:

$$\text{MRE} = \frac{100}{n} \sum_{i=1}^n \frac{|Y_i - \hat{Y}_i|}{Y_i} \quad (7)$$

$$\text{SDE} = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (Y_i - \hat{Y}_i)^2}{\text{GLR}}} \quad (8)$$

Em que:  $Y_i$  – valor observado experimentalmente;  $\hat{Y}_i$  – valor estimado pelo modelo;  $n$  – número de dados observados; GLR – graus de liberdade do resíduo (número de dados observados menos o número de parâmetros do modelo).

## RESULTADOS E DISCUSSÃO

Na Tabela 2 encontra-se o resumo dos modelos ajustados, por meio de regressão não linear, aos dados experimentais do equilíbrio higroscópico de sementes de azevém.

**TABELA 2.** Coeficientes de ajuste e estimativas dos parâmetros dos modelos de equilíbrio higroscópico das sementes de azevém, obtidos por dessorção

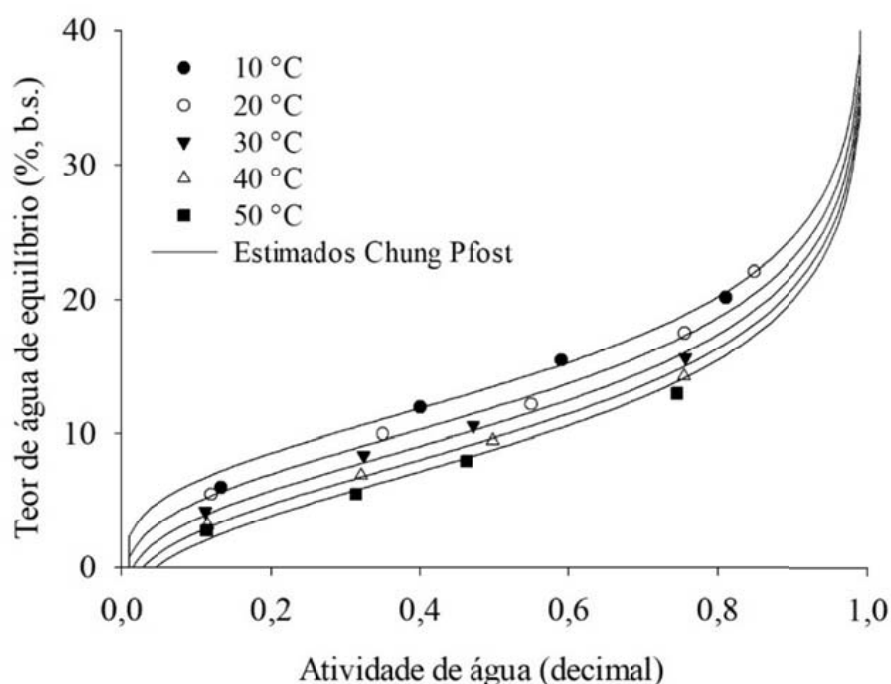
Modelo	Parâmetros	R <sup>2</sup> (%)	SDE (decimal)	MRE (%)	Distribuição dos resíduos
Henderson Modificado	a = 0,00016 b = 27,30824 c = 1,83349	99,16	0,75	6,80	Aleatório
Halsey Modificado	a = 4,843509 b = 0,020076 c = 2,007359	98,09	1,13	13,69	Tendencioso
Oswin Modificado	a = 13,77001 b = -0,10935 c = 2,71318	99,17	0,74	8,18	Tendencioso
Copace	a = 1,771080 b = 0,010648 c = 1,753426	98,68	0,94	10,67	Tendencioso
Chung Pfof	a = 31,98376 b = 5,90103 c = 22,81437	99,34	0,66	5,67	Aleatório
Smith	a = 7,666143 b = 0,116596 c = 8,671001	98,34	0,99	11,45	Tendencioso

De modo a se determinar o melhor modelo matemático durante a modelagem, busca-se o que apresenta os melhores ajustes aos dados experimentais. Para averiguação do erro associado à estimativa do modelo, Costa et al. (2015) relata que, para se obter um ajuste satisfatório, o valor de MRE deve ser menor do que 10%. Observa-se que os modelos de Henderson Modificado, Oswin Modificado e Chung Pfof obtiveram valores adequados, sendo que o valor de Chung Pfof foi consideravelmente menor.

De acordo com Draper e Smith (1998), a habilidade de um modelo para descrever adequadamente um processo físico é inversamente proporcional aos valores de SDE. O modelo de Chung Pfof foi o que obteve o menor valor de SDE, dentre os outros modelos testados.

Por fim, de modo a selecionar adequadamente o modelo para representar o fenômeno, deve-se levar em consideração a distribuição dos resíduos. Um modelo é considerado aceitável se os valores residuais se encontram em uma zona horizontal perto do zero, formando distribuições aleatórias (Corrêa et al., 2014). Nota-se, pela Tabela 2, que apenas os modelos de Henderson Modificado e Chung Pfof apresentaram comportamento aleatório dos resíduos.

Desta forma, analisando os instrumentos estatísticos utilizados neste estudo, observa-se que o modelo de Chung Pfof foi o que, em geral, melhor se ajustou aos dados experimentais de sementes de azevém. Na Figura 1 é apresentado os resultados experimentais do teor de água de equilíbrio das sementes de azevém, obtidos por dessorção, bem como suas isotermas determinadas pelo modelo de Chung Pfof.



**FIGURA 1.** Valores experimentais e estimados pelo modelo de Chung Pfof, do teor de água de equilíbrio de sementes de azevém, obtidos por dessorção.

Observando a Figura 1, verifica-se adequada correspondência entre os dados estimados pelo modelo escolhido e os observados experimentalmente, para todas as temperaturas estudadas. De um modo geral, a utilização das isotermas de sorção geram informações referentes ao armazenamento adequado e à tomada de decisão sobre medidas preventivas para a manutenção da qualidade do produto, pois permitem a previsão do teor de água das sementes para cada condição específica de temperatura e umidade relativa do ar.

## REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

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

BRASIL, Ministério da Agricultura e Reforma Agrária. Secretaria Nacional de Defesa Agropecuária. **Regras para análises de sementes**. Brasília: MAPA, 2009. 399p.

CORRÊA, P.C.; BOTELHO, F.M.; BOTELHO, S.C.C.; GONELI, A.L.D. Isotermas de sorção de água de frutos de *Coffea canephora*. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, v.18, n.10, p.1047-1052. 2014.

CORRÊA, P.C.; OLIVEIRA, G.H.H.; OLIVEIRA, A.P.L.R.; GONELI, A.L.D.; BOTELHO, F.M. Isotermas de dessorção de sementes de beterraba. **Engenharia na Agricultura**, v.24, n.1, p.15-21, 2016.

CORRÊA, P.C.; REIS, M.F.T.; OLIVEIRA, G.H.H.; OLIVEIRA, A.P.L.R.; BOTELHO, F.M. Moisture sorption isotherms of cucumber seeds: modeling and thermodynamic properties. **Journal of Seed Science**, 2015.

COSTA, J.M.G.; SILVA, E.K.; HIJO, A.A.C.T.; AZEVEDO, V.M.; BORGES, S.V. Physical and Thermal Stability of Spray-Dried Swiss Cheese Bioaroma Powder. **Drying Technology**, v.33, p.346-354, 2015.

DRAPER, N.R.; SMITH, H. **Applied regression analysis**. New York: John Wiley & Sons, 1998. 736p.

GONELI, A.L.D.; CORRÊA, P.C.; OLIVEIRA, G.H.H.; BOTELHO, F.M. Water desorption and thermodynamic properties of okra seeds. **Transactions of the ASABE**, v.53, n.1, p.191-197. 2010.

LOPES, J.C.; MACEDO, C.M.P. Germinação de sementes de couve chinesa sob

influência do teor de água, substrato e estresse salino. **Revista Brasileira de Sementes**, v.30, n.3, p.79-85. 2008.

SILVA, H.W.; COSTA, L.M.; RESENDE, O.; OLIVEIRA, D.E.C.; SOARES, R.S.; VALE, L.S.R. Higroscopicidade das sementes de pimenta (*Capsicum chinense* L.). **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, v.19, n.8, p.780-784, 2015.

ZEYMER, J.S.; CORRÊA, P.C.; OLIVEIRA, G.H.H.; BAPTESTINI, F.M.; FREITAS, R.C.P. Desorption isotherms of *Lactuca sativa* seeds. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, v.21, n.8, p.568-572, 2017.