



Evento: XXX Jornada de Pesquisa

MODELAGEM MATEMÁTICA DA UMIDADE DE EQUILÍBRIO HIGROSCÓPICO DA SOJA¹**Amanda Tirloni Dellay², Márcia de Fátima Brondani Binelo³, Manuel Osório Binelo⁴**¹ Projeto de pesquisa desenvolvido na Unijuí.² Estudante do curso de mestrado em Modelagem Matemática e Computacional e Bolsista Capes Código de Financiamento 001, amanda.dellay@sou.unijui.edu.br³ Professor da Unijuí, marcia.brondani@unijui.edu.br⁴ Professor da Unijuí, manuel.binelo@unijui.edu.br**INTRODUÇÃO**

A soja [*Glycine max* (L.) Merrill] é a cultivar oleaginosa mais produzida no mundo, sendo também uma das mais importantes para a economia agropecuária brasileira. Segundo a Embrapa (2024), atualmente, o país é o maior produtor mundial de soja, exportando mais da metade da sua produtividade. Com isso, a necessidade de atender aos rigorosos padrões exigidos pelos consumidores e, pelo mercado de grãos faz com que as unidades armazenadoras pensem em estratégias eficientes para manter a qualidade do produto armazenado por longos períodos (Ziegler, Paraginski e Ferreira, 2021).

A Umidade de Equilíbrio Higroscópico indica o teor de umidade que a soja atinge em equilíbrio com a umidade relativa do ar para uma determinada condição de temperatura. Sendo assim, por ser um produto higroscópico, a soja pode tanto absorver quanto perder água do ambiente, ou seja, está constantemente convergindo para manter uma relação de equilíbrio entre seu teor de água e as condições do ar que o cerca (Zeymer *et al.*, 2022).

São encontrados na literatura diversos modelos matemáticos que permitem realizar a predição da higroscopicidade de grãos de soja. No entanto, os parâmetros de ajuste dos modelos selecionados são valores específicos para determinado produto, pois fatores como a variedade do grão, estágio de maturação, condições físicas e método de secagem podem afetar em diferenças significativas nos resultados (Maciel *et al.*, 2020). Nesse contexto, o objetivo deste trabalho é realizar a modelagem matemática da Umidade de Equilíbrio Higroscópico da soja, a partir de dados obtidos experimentalmente, e assim identificar o modelo que melhor representa a relação entre o teor de umidade de equilíbrio e as variáveis temperatura e umidade do ar, da soja tipicamente cultivada na região noroeste do Rio Grande do Sul.



METODOLOGIA

Inicialmente, os experimentos foram realizados no Laboratório de Bromatologia da Universidade Regional do Noroeste do Estado do Rio Grande do Sul (UNIJUÍ), localizado na cidade de Ijuí, RS. Os grãos de soja utilizados nos experimentos foram produzidos em lavouras da região noroeste do estado do Rio Grande do Sul na safra 2024/2025, o qual nos foram fornecidos pela Cooperativa Agrícola Cotrirosa, localizada na cidade de Santa Rosa, RS.

A homogeneização das amostras foi realizada manualmente para retirar as impurezas, grãos verdes e avariados, os grãos quebrados foram mantidos, tendo em vista que estes estão presentes no processo de armazenagem. Em cada ensaio, foram utilizadas 4 amostras distribuídas uniformemente em recipientes de metal com aproximadamente 30 gramas de grãos de soja. As amostras foram acondicionadas em bandejas, de forma que permitia a livre circulação de ar ao seu redor. Para estabelecer as condições desejadas de temperatura e umidade relativa do ar foi utilizado uma câmara climática (modelo 7Lab - 40l). Para as medições de massa foi utilizada uma balança analítica de precisão medidora de umidade (Bel i-thermo G 64AM) com precisão de 0,0001g. Foram realizados 7 experimentos com uma temperatura (25°C) e diferentes combinações de umidade relativa do ar (51, 55, 62, 71, 76, 82 e 88%).

Na determinação do teor de umidade, foram empregados dois aparelhos: (a) uma balança medidora de umidade com sistema de secagem, que operara a 130 °C por 2 horas (método conforme AOAC (2005)), e (b) uma estufa de secagem, mantida a 105 °C $\pm$ 2 °C, para o método padrão gravimétrico adotado no Brasil (BRASIL, 2009). O delineamento estatístico utilizado foi inteiramente casualizado, sendo sete tratamentos e quatro repetições, onde a análise estatística foi realizada através da Análise de Variância (ANOVA).

A Umidade de Equilíbrio Higroscópico foi ajustada aos dados experimentais por meio de três modelos matemáticos selecionados da literatura para a soja, cujas equações estão mostradas na Tabela 1. Esses modelos foram parametrizados utilizando o método de regressão de mínimos quadrados não-linear usando a linguagem de programação *Python* no ambiente colaborativo do *Google Colaboratory*. Quando os grãos estão em equilíbrio higroscópico, a umidade relativa do ar é igual a atividade da água na forma decimal. A análise da qualidade dos ajustes foram determinadas a partir de métricas estatísticas como a Raiz do Erro Quadrático Médio (RMSE), Coeficiente de Determinação (R^2) e o Erro Absoluto Médio (MAE).



Tabela 1. Modelos matemáticos utilizados para prever a higroscopicidade de grãos de soja.

Modelo	Equação
Chung-Pfost	$U_e = a - b \ln[-(T + c) \ln(a_w)]$
Halsey Modificado	$U_e = \left[\frac{\exp(a - bT)}{-\ln(a_w)} \right]^{\frac{1}{c}}$
GAB Modificado	$U_e = \frac{ab \left(\frac{c}{T} \right) a_w}{[1 - ba_w][1 - ba_w + b \left(\frac{c}{T} \right) a_w]}$

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

Fonte: Zeymer *et al.* (2022).

RESULTADOS E DISCUSSÃO

A análise estatística dos dados experimentais foi realizada inicialmente, através da ANOVA, a qual foi realizada utilizando o aplicativo *Excel*, conforme mostrado na Tabela 1.

Tabela 2. Análise de Variância da influência de diferentes níveis de umidades do ar sobre a Umidade de Equilíbrio Higroscópico da Soja.

FV	GL	SQ	QM	F
Tratamento	6	271.6010	45.2668*	28.2952
Erro	23	36.7955	1.5998	
Total	29	308.3965		
Média Geral		11.9278		
CV (%)		13.4124		

FV: fonte de variação, GL: graus de liberdade, SQ: soma de quadrados, QM: quadrado médio, F: probabilidade de Fisher, CV: coeficiente de variação. *: significativo a nível de 5% de probabilidade de erro pelo teste F.

Fonte: Os autores (2025).

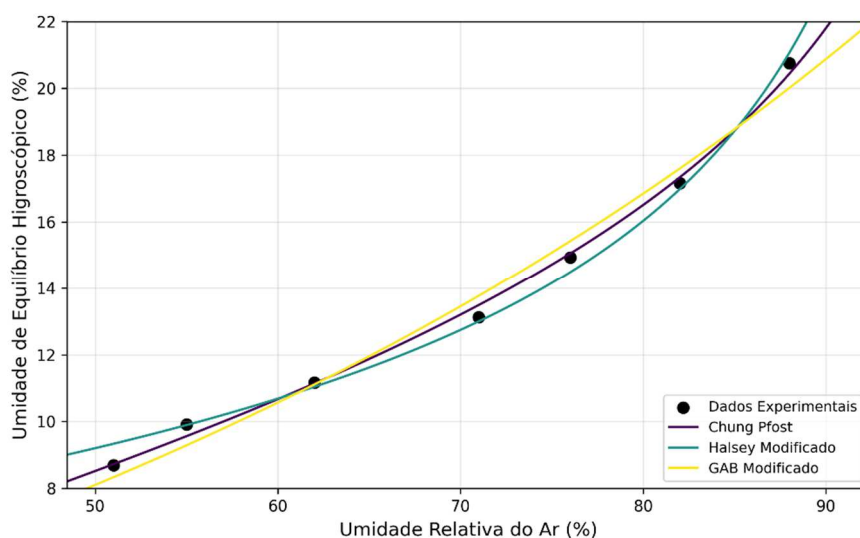
A ANOVA mostrou que há diferenças estatisticamente significativa entre os tratamentos que estão sendo comparados a nível de 5% de probabilidade de erro, com o coeficiente de variação de 13.41%, demonstrando uma boa precisão experimental. A Figura 1 apresenta as curvas de ajuste realizado pelos modelos matemáticos, onde os pontos preto no gráfico representam a média de cada experimento realizado.

Os parâmetros das equações estimados para cada modelo matemático ajustado estão apresentados na Tabela 2, onde estão indicados pelas letras a , b e c . A capacidade do ajuste foi



avaliado por métricas estatísticas como o R^2 que mede a qualidade do ajuste de um modelo de regressão, variando de 0 a 1, onde quanto mais próximo de 1 for o valor significa que o modelo se ajusta bem aos dados. O RMSE indica a diferença entre os valores previsto pelo modelo e os valores reais observados, portanto, quanto menor o valor, melhor o modelo. O MAE mede a diferença média entre os valores previsto pelo modelo e os valores reais observados, quanto menor esta métrica, melhor é o desempenho do modelo.

Figura 1. Ajuste dos modelos matemáticos aos dados experimentais da Umidade de Equilíbrio Higroscópico da soja



Fonte: Os autores (2025).

Tabela 3. Valores estimados de indicadores estatísticos e parâmetros dos modelos ajustados

Modelos	<i>a</i>	<i>b</i>	<i>c</i>	R^2	RMSE	MAE(pp)
Chung-Pfof	0.3325	0.0705	23.1529	0.9963	0.0024	0.1966
Halsey Modificado	-6402.5890	-255.8941	2.0415	0.9931	0.0033	0.2619
GAB Modificado	0.6727	0.4172	10.0000	0.9824	0.0052	0.4797

Fonte: Os autores (2025).

Os resultados apresentados na Tabela 2 mostraram que o modelo Chung-Pfof se destaca aos demais modelos por ser o que melhor se ajustou aos dados experimentais, e que pode ser usado com mais precisão para a estimar a Umidade de Equilíbrio Higroscópico da soja, concordando com o estudo de Dubal *et al.* (2024) e Alencar *et al.* (2009).



CONSIDERAÇÕES FINAIS

Com base nos resultados, o modelo de Chung-Pfost apresentou o melhor ajuste aos dados experimentais, podendo assim ser utilizado para a predição da Umidade de Equilíbrio Higroscópico da soja, podendo contribuir na otimização das condições armazenamento, garantindo a qualidade dos grãos, reduzindo perdas pós-colheita e aumentando a rentabilidade. Para trabalhos futuros pretendemos dar continuidade aos experimentos utilizando outras temperaturas e, também, comparar os resultados obtidos da modelagem matemática com uma abordagem baseada em Redes Neurais Artificiais.

Palavras-chave: Higroscopicidade. Modelagem Matemática. Soja.

AGRADECIMENTOS

O presente trabalho é realizado com apoio da Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior – Brasil (CAPES) – Código de Financiamento 001 e também com apoio da Cooperativa Agrícola Cotrirosa.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ALENCAR, E. R. d. *et al.* Qualidade dos grãos de soja armazenados em diferentes condições. *Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental*, v. 13, n. 5, p. 606–613, 2009.

DUBAL, T. P. *et al.* Monitoring of carbon dioxide and equilibrium moisture content for early detection of physicochemical and morphological changes in soybeans stored in vertical silos. *Food Chemistry*, v. 436, p. 137721, 2024.

EMBRAPA, *Soja em números*, <https://www.embrapa.br/web/portal/soja/cultivos/soja1/dados-economicos>, Acesso em: 10 fev. 2025, 2024.

MACIEL, G. *et al.* Determination of safe storage moisture content of soybean expeller by means of sorption isotherms and product respiration. *Journal of Stored Products Research*, v. 86, p. 101567, 2020.

ZEYMER, J. S. *et al.* Moisture sorption isotherms and hysteresis of soybean grains. *Acta Scientiarum. Agronomy*, v. 45, p. e56615, 2022.

ZIEGLER, V.; PARAGINSKI, R. T.; FERREIRA, C. D. Grain storage systems and effects of moisture, temperature and time on grain quality-a review. *Journal of Stored Products Research*, v. 91, p. 101770, 2021.