

## MONITORAMENTO DA QUEBRA TÉCNICA DE GRÃOS DE TRIGO ARMAZENADOS EM SILOS VERTICAIS UTILIZANDO SENSORES E MODELOS DE APRENDIZADO DE MÁQUINA

**MARISA MENEZES LEAL<sup>1</sup>, PAULO CARTERI CORADI<sup>2</sup>, DÁGILA MELO RODRIGUES<sup>3</sup>, ROSANA SANTOS MORAES<sup>4</sup>, RONEY ELOY LIMA<sup>5</sup>, LETÍCIA DE OLIVEIRA CARNEIRO<sup>6</sup>**

<sup>1</sup>Eng<sup>a</sup>. Agrícola, Mestranda em Engenharia Agrícola, UFSM/PPGEA, etecmarisa@gmail.com

<sup>2</sup>Eng<sup>o</sup>. Agrícola, Professor Associado, UFSM-CS, Laboratório de Pós-Colheita (LAPOS), paulo.coradi@ufsm.br

<sup>3</sup>Eng<sup>a</sup>. Agrônoma, Doutoranda em Engenharia Agrícola, UFSM/PPGEA, dagila.rodrigues2012@gmail.com

<sup>4</sup>Eng<sup>a</sup>. Agrícola, Doutoranda em Engenharia Agrícola, UFSM/PPGEA, rosana-moraes95@hotmail.com

<sup>5</sup>Eng<sup>o</sup>. Agrônomo, Doutorando em Engenharia Agrícola, UFSM/PPGEA, roney.eloylima@yahoo.com.br

<sup>6</sup>Estudante de Graduação em Engenharia Agrícola, Bolsista Iniciação Científica, UFSM-CS, tecnicaleticia@gmail.com

Apresentado no  
LII Congresso Brasileiro de Engenharia Agrícola - CONBEA 2023  
18 a 21 de outubro de 2023 – Ribeirão Preto - SP, Brasil

**RESUMO:** O objetivo do estudo foi avaliar o monitoramento temporal da temperatura, umidade relativa e dióxido de carbono intergranular para predição da perda de matéria seca em grãos de trigo armazenados em silos verticais, utilizando um modelo matemático e algoritmos de aprendizado de máquina. Nessas condições, os grãos de trigo tiveram um leve aumento na atividade metabólica, causando uma perda de matéria seca de 0,035 a 0,041%. Os resultados de temperatura intergranular, umidade relativa e dióxido de carbono foram semelhantes às medidas na superfície da massa de grãos. Concluiu-se que o monitoramento da temperatura, umidade relativa e concentração de dióxido de carbono no ar intergranular determinaram de forma indireta e precoce as alterações na qualidade dos grãos de trigo durante o armazenamento. Embora a atividade metabólica dos grãos de trigo tenha sido baixa, pois os lotes permaneceram em equilíbrio higroscópico com teores de água próximos a 12% (b.u.), a detecção temporal caracterizou a perda de matéria seca e a redução do peso dos grãos armazenados. Por fim, o modelo de Redes Neurais Artificiais e Regressão Linear Múltipla previu satisfatoriamente a perda de matéria seca da massa de grãos de trigo armazenada.

**PALAVRAS-CHAVE:** Dióxido de carbono, Conservação de grãos, Perda de matéria seca.

### MONITORING THE TECHNICAL BREAKDOWN OF WHEAT GRAINS STORED IN VERTICAL SILOS USING SENSORS AND MACHINE LEARNING MODELS

**ABSTRACT:** The aimed of the study was evaluate the temporal monitoring of temperature, relative humidity and intergranular carbon dioxide for prediction of dry matter loss in wheat grains stored in vertical silos, using a mathematical model and machine learning algorithms. Under these conditions, wheat grains had a slight increase in metabolic activity, causing a dry matter loss of 0.035 to 0.041%. The intergranular temperature, relative humidity and carbon dioxide results were similar to the measurements on the surface of the grain mass. It was concluded that the monitoring of temperature, relative humidity and the concentration of carbon dioxide in the intergranular air indirectly and early determined the changes in the quality of wheat grains during storage. Although the metabolic activity of wheat grains was low, as the lots remained in hygroscopic equilibrium with water contents close to 12% (w.b.), the temporal detection characterized the loss of dry matter and the reduction of grain weight stored. Finally, the Artificial Neural Networks and Multiple Linear Regression model satisfactorily predicted the dry matter loss of stored wheat grain mass.

**KEYWORDS:** Carbon dioxide, Grain conservation, Dry matter loss.

**INTRODUÇÃO:** O monitoramento das variáveis intergranulares, como temperatura e umidade relativa do ar intergranular, umidade de equilíbrio higroscópico e a concentração de CO<sub>2</sub> dará uma previsão da intensidade respiratória da massa de grãos, sendo uma alternativa para evitar perdas ao longo do tempo de armazenamento (LUTZ et al., 2022). Assim, o uso de algoritmos de Machine Learning (ML) pode colaborar para a análise e previsão dos dados (WU et al., 2021). A partir das informações obtidas no monitoramento, pode definir uma melhor condição de armazenamento dos grãos, ou então, ter autonomia para realizar a comercialização dos grãos no momento mais favorável, sem perder a qualidade do produto. Além disto, possibilita as unidades armazenadoras realizar um prognóstico das perdas ao final do tempo de armazenamento. Em razão disto, o presente estudo objetivou avaliar o monitoramento temporal da temperatura, umidade relativa e dióxido de carbono intergranular para previsão da perda de matéria seca em grãos de trigo armazenados em silos verticais, utilizando modelo matemático e algoritmos de aprendizado de máquina.

**MATERIAL E MÉTODOS:** Para o monitoramento da massa de grãos de trigo no armazenamento foi aplicado um equipamento portátil (JAQUES et al., 2022). Monitorou-se a temperatura, a umidade relativa e concentração de dióxido de carbono no ar intergranular na massa de grãos de trigo armazenados em silo vertical metálico, com 11,5% (b.u.) de teores de água, ao longo de 20 horas. Ao mesmo tempo, realizou-se medições de 1 em 1 hora da temperatura, umidade relativa e a concentração de dióxido de carbono do ambiente de armazenamento através de um termohigrômetro. Com os resultados da temperatura e umidade relativa do ar intergranular calculou-se a umidade de equilíbrio higroscópico da massa de grãos armazenada (Equações 1 e 2).

Equação 1: Umidade relativa do ar entre 0 < UR ≤ 55%:

$$U_e = (3,96 UR^{0,492}) / (\ln(T)) \quad (1)$$

Equação 2: Umidade relativa do ar entre 55 < UR < 100%:

$$U_e = (6,21 \exp(0,0274 UR)) / (\ln(T)) \quad (2)$$

Em que: U<sub>e</sub> - Umidade de equilíbrio higroscópico, UR - Umidade relativa (%), T - Temperatura (F)

A perda de matéria seca foi calculada pela concentração de CO<sub>2</sub> monitorada no período do armazenamento dos grãos através da Equação 3:

$$PMS = 100(C_{CO_2} - \Delta C_{CO_2}) (\varepsilon P W_g / 2P_g (1 - U)) RT \quad (3)$$

Em que: PMS - Perda de matéria seca (%), C<sub>CO<sub>2</sub></sub> - concentração de C<sub>CO<sub>2</sub></sub> (v/v) medida no interior dos silos metálicos, ΔC<sub>CO<sub>2</sub></sub> - variação da concentração de O<sub>2</sub> ao longo do armazenamento considerando a concentração inicial de 21%, ε - porosidade da massa granular (40%), P - pressão atmosférica local (96 kPa), W<sub>g</sub> - massa molar da glicose (180 kg kmol<sup>-1</sup>), P<sub>g</sub> - massa específica aparente dos grãos (kg m<sup>-3</sup>) (750 kg m<sup>-3</sup>), U - Teor de água dos grãos (decimal, b.u.), R - constante dos gases perfeitos (8,314 kJ Kmol<sup>-1</sup> K<sup>-1</sup>), T - Temperatura (K).

A determinação da perda de massa de grãos de trigo armazenada foi realizada pelas Equações 4 e 5.

$$MS = (1 - (U / 100)) P_i \quad (4)$$

Em que: MS - matéria seca (g), U - teor de água (%),  $P_i$  - massa inicial de grãos (g)

$$PMS_{calculada} = ((MS_{inicial} - MS_{final}) / MS_{inicial}) * 100 \quad (5)$$

Em que:  $PMS_{calculada}$  - perda de matéria seca (%),  $MS_{inicial}$  - matéria seca inicial (g),  $MS_{final}$  - matéria seca final (g)

A predição da perda de matéria seca de grãos de trigo foi realizada através dos modelos Regressão Linear Múltipla (RL), Redes Neurais Artificiais (RNA), Árvore de Decisão (REPTree), algoritmo M5 de Quinlan (M5P) e Floresta Aleatória (RA), analisados no software Weka versão 3.9.5.

**RESULTADOS E DISCUSSÃO:** A temperatura do ar intergranular (°C) manteve-se próxima da temperatura média ambiente (Figura 1A). Durante o monitoramento a temperatura do ar intergranular variou entre 26,5 a 26,7 °C, porém quando se aproximou das vinte horas de monitoramento teve redução para 26,4 °C. Enquanto que, a umidade relativa permaneceu entre 61,3 a 62,5% ao longo do tempo (Figura 1B). Nessas condições, os grãos de trigos armazenados permaneceram com uma de umidade de equilíbrio higroscópico entre 11,65 a 11,82% (Figura 1C). A concentração de dióxido de carbono ao longo do tempo de armazenamento variou de 300 a 550 ppm na massa de grãos (Figura 1D). Nessas condições, os grãos de trigo tiveram um leve aumento na atividade metabólica, fazendo com que houvesse perda de matéria seca em 0,035 a 0,041% (Figura 1E). Os resultados obtidos de temperatura, umidade relativa e dióxido de carbono intergranulares foram similares às medições dessas variáveis realizadas no ar, sobre a superfície da massa de grãos de trigo armazenada.

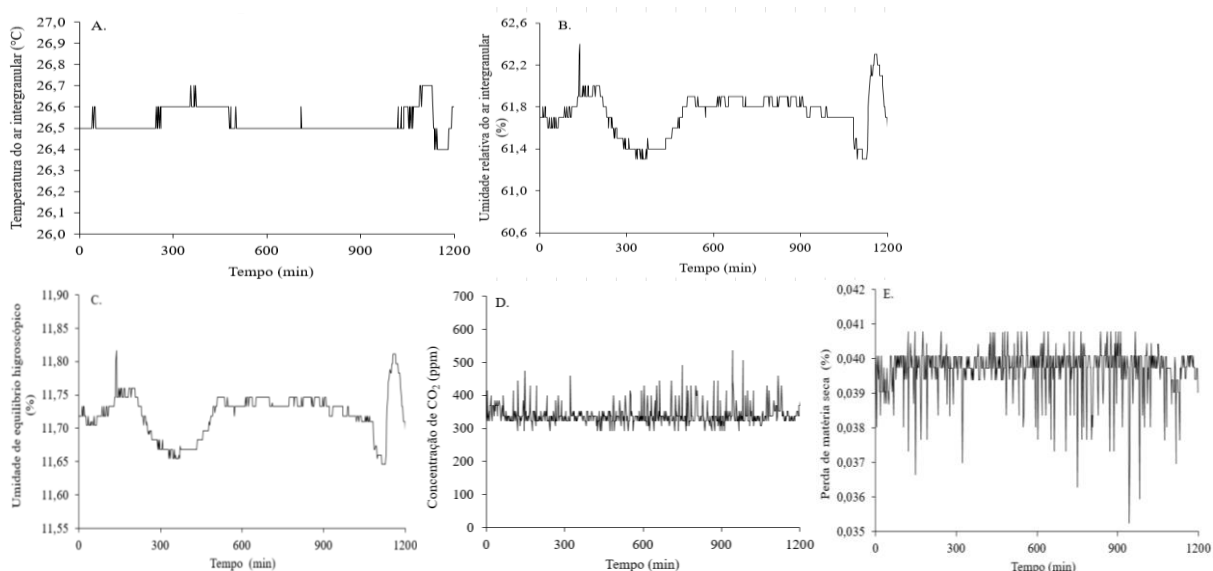


FIGURA 1. Monitoramento da temperatura do ar intergranular (A), umidade relativa do ar intergranular (B), umidade de equilíbrio higroscópico (C), concentração de CO<sub>2</sub> no ar intergranular (D), perda de matéria seca (E) da massa de grãos de trigo armazenada.

Os modelos de RNA (Redes Neurais Artificiais), M5P (algoritmo M5 de Quinlan), Floresta Aleatória (FA) e o modelo de Regressão Linear Múltipla (RL) alcançaram os melhores resultados da predição da perda de matéria seca. Porém, quando os modelos foram avaliados a 5% de probabilidade pelo teste de Scott-Knott (SK), os modelos de RNA, M5P e FA, juntamente com o modelo padrão de RL, foram, os que apresentaram as maiores médias, não diferindo entre si, apenas do modelo REPTree (Figura 2).

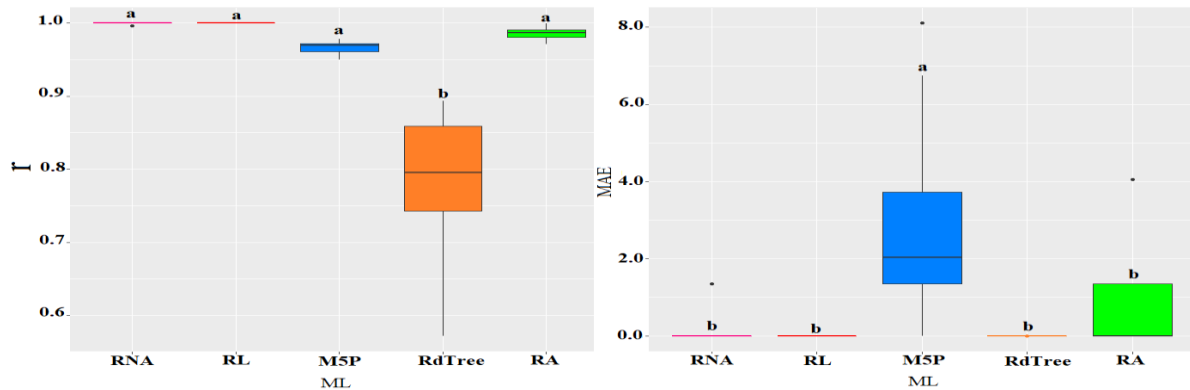


FIGURA 2. Boxplot dos valores preditos de perda de matéria seca em grãos de trigo armazenados pelos modelos de Machine Learning. RNA (Redes Neurais Artificiais), M5P (algoritmo M5 de Quinlan), Floresta Aleatória (RA), Árvore de Decisão (REPTree) e o modelo de Regressão Linear Múltipla (RL). Coeficiente de correlação (r) e o Erro Médio Absoluto (MAE).

**CONCLUSÕES:** A detecção amostral e temporal caracterizou as perdas de matéria seca e a redução do peso dos grãos armazenados. O modelo de Redes Neurais Artificiais e Regressão Linear Múltipla previu satisfatoriamente a perda de matéria seca da massa de grãos de trigo armazenados.

**AGRADECIMENTOS:** Os autores agradecem a Universidade Federal de Santa Maria, Programa de Pós-Graduação em Engenharia Agrícola, ao Research Group at Postharvest Innovation: Technology, Quality & Sustainability (UFSM), Laboratório de Pós-Colheita (LAPOS-UFSM), Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior (CAPES), Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico (CNPq), Fundação de Amparo à Pesquisa do Estado do Rio Grande do Sul (FAPERGS) pela concessão de bolsas de estudos, recursos financeiros e espaços físicos para desenvolvimento dos experimentos.

## REFERÊNCIAS

- LUTZ, É., CORADI, P. C., JAQUES, L. B. A., CARNEIRO, L. O., TEODORO, L. P. R., TEODORO, P. E., MENEGHETTI, V. L., & SOUZA, G. A. C. Real-time equilibrium moisture content monitoring to predict grain quality of corn stored in silo and raffia bags. **Journal of Food Process Engineering**, e14076, 2022.
- JAQUES, L. B. A., CORADI, P. C., MÜLLER, A., RODRIGUES, H. E., TEODORO, L. P. R., TEODORO, P. E., TEIXEIRA, A. L., & STEINHAUS, J. I. Portable-Mechanical-Sampler System for Real-Time Monitoring and Predicting Soybean Quality in the Bulk Transport. **IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement**, v. 1, p. 1-13, 2022.
- WU, W., CUI, H., HAN, F., LIU, Z., WU, X., WU, Z., ZHANG, Q. Digital monitoring of grain conditions in large-scale bulk storage facilities based on spatiotemporal distributions of grain temperature. **Biosystems Engineering**, v. 210, p. 247-260, 2021.