



## **MODELAGEM MATEMÁTICA DO RESFRIAMENTO DE GRÃOS COM BASE NAS HORAS DE AERAÇÃO<sup>1</sup>**

### **MATHEMATICAL MODELING OF GRAIN COOLING BASED ON AERATION HOURS**

**Vanessa Regina Fernandes<sup>2</sup>, Maurício de Campos<sup>3</sup>, Marcia de Fatima Brondani Binelo<sup>4</sup>,  
Manuel Osorio Binelo<sup>5</sup>**

<sup>1</sup>Trabalho realizado na disciplina de Modelagem Matemática do Programa de Pós-Graduação em Modelagem Matemática e Computacional - Unijui

<sup>2</sup> Estudante do Programa de Pós-Graduação em Modelagem Matemática e Computacional - Unijui

<sup>3</sup> Prof. Dr. do Programa de Pós-Graduação em Modelagem Matemática e Computacional - Unijui

<sup>4</sup> Profa. Dra. do Programa de Pós-Graduação em Modelagem Matemática e Computacional - Unijui

<sup>5</sup> Prof. Dr. do Programa de Pós-Graduação em Modelagem Matemática e Computacional - Unijui

### **RESUMO**

A produção mundial de grãos tem aumentado significativamente. Dessa forma, são importantes locais de armazenagem que garantam a conservação dos grãos até sua comercialização. Para isso, técnicas como a aeração tornam-se imprescindíveis para manter os grãos em temperatura e umidade que não permitem o desenvolvimento de insetos ou alteração de suas propriedades físico-químicas. Desse modo, neste trabalho tem-se como objetivo modelar matematicamente o resfriamento de grãos com base nas horas de aeração. Para isso, foram utilizados dados observacionais do período 19/07/2021 a 26/07/2021 fornecidos através de relatórios por uma empresa de recebimento de grãos do noroeste do estado do Rio Grande do Sul. Nos relatórios constam os seguintes dados: temperatura dos grãos, temperatura ambiente e horas de aeração de cada dia. Assim, realizou-se um ajuste de curvas utilizando o Matlab, tendo como base a Função Logística, onde foi possível encontrar um modelo que mostrou  $R^2$  de 99,96%, evidenciando ótima concordância com os dados observacionais. Além disso, foi possível observar que a temperatura dos grãos se estabiliza ao chegar próximo à temperatura ambiente, visto que a aeração utiliza ar ambiente para resfriá-los.

**Palavras-chave:** Armazenagem de grãos. Aeração. Resfriamento de grãos. Modelagem matemática.

### **ABSTRACT**

World grain production has increased significantly. In this way, they are important storage places that guarantee the conservation of the grains until their commercialization. For this, techniques such as aeration become essential to keep the grains at a temperature and humidity that do not allow the development of insects or change their physical-chemical properties. Thus, this work aims to mathematically model the cooling of grains based on the aeration hours. For this, observational data from the period 07/19/2021 to 07/26/2021 were used, provided through reports by a grain receiving company in the northwest of the state of Rio



Grande do Sul. The reports contain the following data: grain temperature, ambient temperature and hours of aeration each day. Thus, a curve fit was performed using Matlab, based on the Logistic Function, where it was possible to find a model that showed an  $R^2$  of 99.96%, showing excellent agreement with the observational data. In addition, it was possible to observe that the temperature of the grains stabilizes when reaching room temperature, since the aeration uses ambient air to cool them.

**Keywords:** Grain storage. Aeration. Grain cooling. Mathematical modeling.

## INTRODUÇÃO

A produção mundial de grãos vem crescendo a cada ano, fazendo com que sejam necessários investimentos no sistema de pós-colheita, com locais de armazenagem que garantam a qualidade do grão até a sua comercialização (Ziegler, Paraginski e Ferreira, 2021). Com o aumento da população mundial, a armazenagem de grãos torna-se imprescindível para garantir a alimentação humana. Além disso, a limitação das terras disponíveis para produção, o aumento da quantidade de grãos destinados aos biocombustíveis, entre outros fatores, fazem com que haja um aumento nos preços dos grãos. Diante disso, reduzir as perdas pós-colheita e garantir sua qualidade durante o armazenamento tornou-se um desafio global (Navarro, 2012).

Atualmente, existem diversos tipos de armazenamento que são agrupados de acordo com sua aplicação prática, alguns deles são: não herméticos, semi herméticos e herméticos. Conforme Ziegler, Paraginski e Ferreira (2021), no armazenamento não hermético, os grãos são armazenados em sacos em galpões ou armazéns. Já o sistema hermético é utilizado para pequenas quantidades de grãos, de modo que se caracteriza por não permitir trocas gasosas com o ambiente, visto que este sistema tem como intuito reduzir o oxigênio disponível no ecossistema de armazenamento e, assim, dificultar o desenvolvimento de insetos.

Ainda segundo Ziegler, Paraginski e Ferreira (2021), o armazenamento semi hermético (ou a granel) possui como exemplos os silos verticais, horizontais e armazéns. Este tipo de armazenagem é caracterizado por permitir trocas gasosas entre a massa de grãos e o ambiente, sendo um meio-termo entre o sistema não hermético e hermético. Como o sistema a granel permite a armazenagem de maiores quantidades de grãos, é amplamente utilizado.



Para obter dados como temperatura dos grãos no interior dos silos, são usados sensores termopares distribuídos equidistantes no interior do silo (Coradi *et al*, 2020). A quantidade de sensores, bem como sua distribuição dentro do silo, é calculada para que haja uma boa verificação de temperatura de toda a massa de grãos. Estes sensores direcionam as informações para sistemas informatizados utilizados pelas unidades de recebimento de grãos para o controle da temperatura do produto no silo e tomada de medidas corretivas caso seja necessário.

Para controle da temperatura e conservação dos grãos pode-se utilizar a transilação, onde há a movimentação total dos grãos de um silo para outro, ou intrasilação que consiste na movimentação parcial dos grãos dentro de um mesmo silo (Ziegler, Paraginski e Ferreira, 2021). Contudo, outra técnica muito utilizada é a aeração, que consiste no resfriamento dos grãos, em que, com o auxílio de ventiladores elétricos, há a passagem forçada do ar ambiente pela massa de grãos, com o intuito de manter a temperatura e umidade em níveis adequados (Oliveira, Khatchatourian e Bihain, 2007).

Os grãos são produtos sensíveis que podem sofrer com ataques de insetos, ácaros e fungos, e com um processo de oxidação que resulta em perda de sabor, descoloração e presença de micotoxinas perigosas (Navarro, 2012). Dessa forma, a tecnologia de aeração é utilizada para modificar o microclima a granel, reduzindo ou eliminando o desenvolvimento de organismos nocivos ou prejudiciais ao grão, mantendo a temperatura em níveis seguros abaixo dos níveis de umidade que propiciam a atividade de microrganismos (Navarro *et al*, 2012).

Visto que os grãos são seres vivos, e portanto respiram, isso provoca o aquecimento no interior do silo. Nesse sentido, a aeração torna-se importante no sentido de prevenir o aquecimento biológico do grão. Ademais, fazem parte dos objetivos da aeração, além de equalizar a temperatura do volume de grãos e impedir o desenvolvimento de insetos e pragas, também prevenção da condensação no teto do silo e da migração de umidade no grão a granel, assim como remoção de odores. (Navarro *et al*, 2012).

Dessa forma, são inúmeros os benefícios da aeração, destacando-se a importância do resfriamento dos grãos para sua qualidade e conservação de suas propriedades



físico-químicas. De acordo com Panigrahi, Singh e Fielke (2019), a temperatura ideal para grãos armazenados é em torno de 15°C, enquanto a umidade indicada está entre 12% e 13%.

A partir disso, neste trabalho tem-se como objetivo modelar matematicamente o resfriamento de grãos com base nas horas de aeração, utilizando dados observacionais fornecidos por uma unidade de recebimento de grãos localizada no noroeste do estado do Rio Grande do Sul.

## **METODOLOGIA**

Para modelar matematicamente o resfriamento dos grãos com base nas horas de aeração foram utilizados dados observacionais de uma unidade de recebimento de grãos do noroeste do estado do Rio Grande do Sul. Em seguida, foram realizados ajustes de curvas utilizando o *software* Matlab, tendo como base a Função Logística.

A empresa parceira deste trabalho possui grãos armazenados no sistema semi hermético, em silos verticais, contendo um sistema de termometria que direciona dados do silo para um sistema informatizado. No silo, estes dados são obtidos através de sensores. Os sensores estão dispostos a cada dois metros de altura nos pêndulos, totalizando seis pêndulos no interior do silo.

Dessa forma, a empresa disponibilizou relatórios do mês de julho de 2021, onde constam a temperatura dos grãos, temperatura ambiente, além de um relatório com as horas de aeração de cada dia do mês. Foram analisados os dados do dia 19/07/2021 a 26/07/2021 e então obtido um gráfico de dispersão que apresenta o resfriamento dos grãos em relação às horas de aeração.

Para encontrar um modelo matemático que melhor descreve o processo de resfriamento dos grãos, utilizou-se o ajuste de curvas, que é o processo de construção de uma curva que tem o melhor ajuste a uma série de pontos dados (MOLUGARAM e RAO, 2017). Dessa forma, busca-se por uma função matemática em que sua curva tem o mínimo de desvio dos pontos estabelecidos no gráfico.

O ajuste de curvas foi realizado utilizando o *software* Matlab, uma plataforma utilizada por muitos engenheiros e cientistas para analisar dados, desenvolver algoritmos e



criar modelos. No Matlab, o *Curve Fitting Toolbox* fornece um aplicativo e funções para ajustar curvas e superfícies aos dados utilizados. Assim, é possível realizar análises de regressão utilizando modelos lineares e não lineares oferecidos pela biblioteca da ferramenta, ou então, utilizar as próprias equações personalizadas (MATHWORKS, 2022).

Neste trabalho, optou-se por utilizar uma função personalizada. Ela tem como base a Função Logística, criada por Pierre F. Verhulst em 1837, com o intuito de descrever o crescimento populacional. A curva logística possui o formato de S, como forma de expor que no início o crescimento populacional teria um crescimento aproximadamente exponencial. No entanto, este modelo admite que há uma população limite, de modo que atingindo este nível, a população seria estável. (ABITANTE, 2009) (LEITE, SILVA e SOUSA, 2011).

Assim como no crescimento populacional, no processo de resfriamento dos grãos por meio da aeração também há um momento em que a temperatura dos grãos se estabiliza, sendo no instante em que a temperatura dos grãos atinge a temperatura ambiente. Isso porque, como a aeração força a passagem do ar ambiente pela massa de grãos, com o auxílio de ventiladores, a temperatura mínima que os grãos irão alcançar será a temperatura ambiente.

Por isso, o modelo utilizado neste trabalho foi  $f(x) = k \cdot \left( \frac{a}{1 + e^{-bx}} + c \right)$ , adaptado da Função Logística, sendo  $k$  a diferença entre a temperatura média ambiente do período e a temperatura inicial dos grãos, e  $a$ ,  $b$ ,  $c$  os coeficientes da função. Para definir os coeficientes, realizou-se o ajuste de curvas através do *Curve Fitting Toolbox* do Matlab com base nos dados observacionais.

## RESULTADOS E DISCUSSÕES

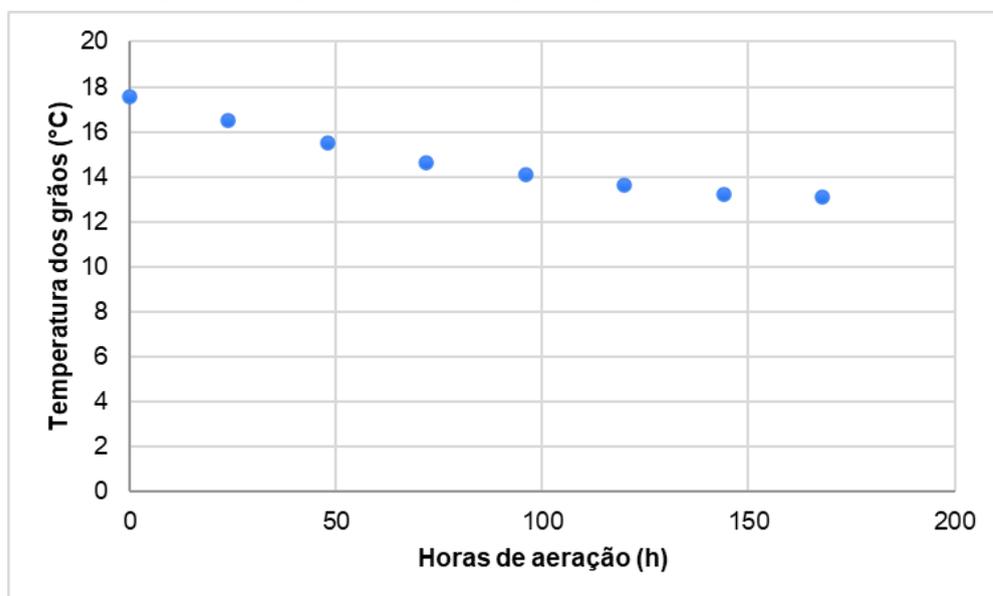
Inicialmente, a partir dos dados disponibilizados pela empresa, analisou-se a temperatura média dos grãos em relação às horas de aeração do período em análise - 19/07/2021 a 26/07/2021 (Quadro 1 e Figura 1). Dessa forma, é possível perceber que à medida que os grãos são submetidos à aeração, quanto mais horas de aeração se passam, menor é a temperatura, ocorrendo então o resfriamento dos grãos a fim de auxiliar na sua conservação.

Quadro 1 - Dados de tempo de aeração e temperatura média dos grãos

Tempo aeração (horas)	Temperatura média dos grãos (°C)
0	15,575
24	16,525
48	15,500
72	14,650
96	14,100
120	13,650
144	13,250
168	13,075

Fonte: Os autores, 2022.

Figura 1 - Temperatura média dos grãos a partir das horas de aeração



Fonte: Os autores, 2022.

Posteriormente, verificou-se qual o resfriamento dos grãos do período em estudo (Quadro 2 e Figura 2). No total, os grãos resfriaram 4,5 °C em 168 horas de aeração.

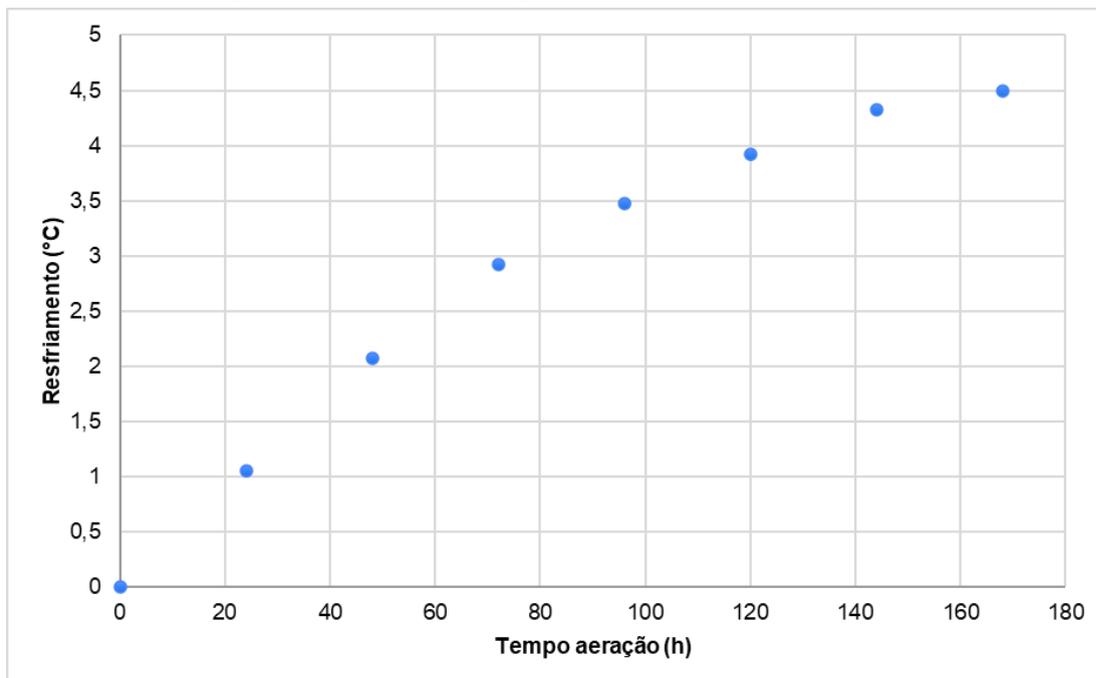


Quadro 2 - Dados de horas de aeração e temperatura de resfriamento dos grãos

Tempo de aeração (horas)	Resfriamento (°C)
0	0
24	1,050
48	2,075
72	2,925
96	3,475
120	3,925
144	4,325
168	4,500

Fonte: Os autores, 2022.

Figura 2 - Resfriamento dos grãos com base nas horas de aeração



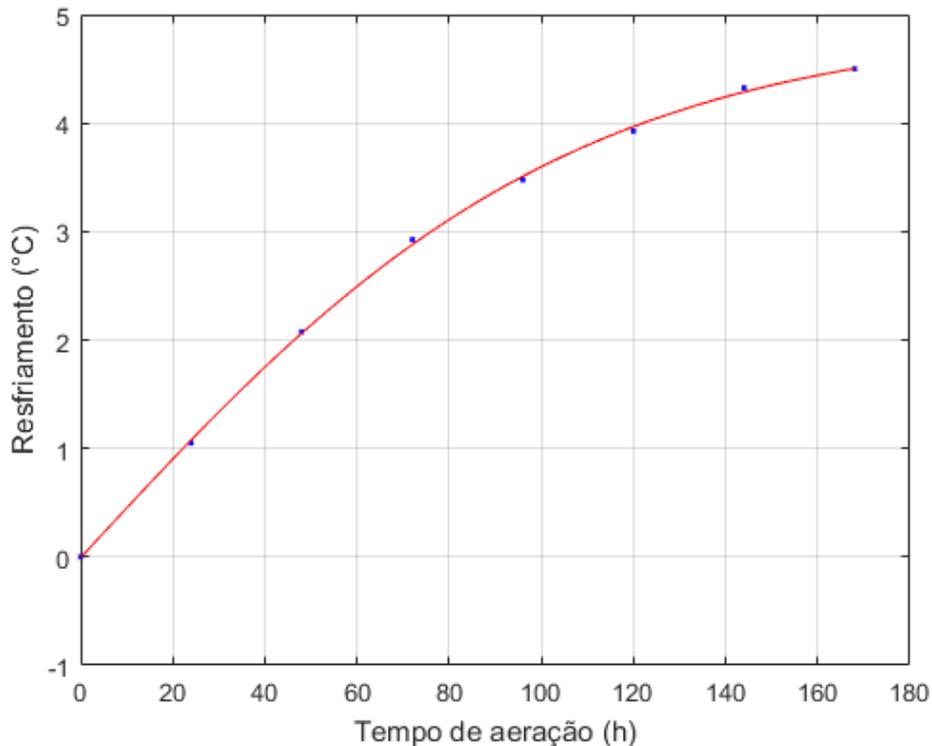
Fonte: Os autores, 2022.



Durante os dias 19/07/2021 a 26/07/2021, a temperatura média ambiente estava em torno de 11,7 °C. Desse modo, utilizou-se  $k = 5,86$  °C, sendo a diferença entre a temperatura média ambiente e a temperatura inicial dos grãos.

Na Figura 3 é possível visualizar o ajuste de curvas realizado no Matlab a partir da Função Logística. Foram determinados os coeficientes para o modelo  $f(x) = k \cdot \left( \frac{a}{1+e^{-bx}} + c \right)$  sendo  $a = 1,679$ ,  $b = -0,01869$  e  $c = -0,8406$ .

Figura 3 - Ajuste de curva no Matlab utilizando Função Logística



Fonte: Os autores, 2022.

O modelo encontrado foi avaliado com base no coeficiente de determinação ( $R^2$ ), que é uma medida de qualidade do ajuste de dados. Este modelo atingiu um  $R^2$  de 99,96%, mostrando ótima concordância com os dados observacionais.

Outras estimativas foram analisadas para avaliar o modelo. Um deles é o SSE (*Sum of Squares Due to Error*), onde o modelo obteve 0,007496, o outro é o RMSE (*Root Mean*

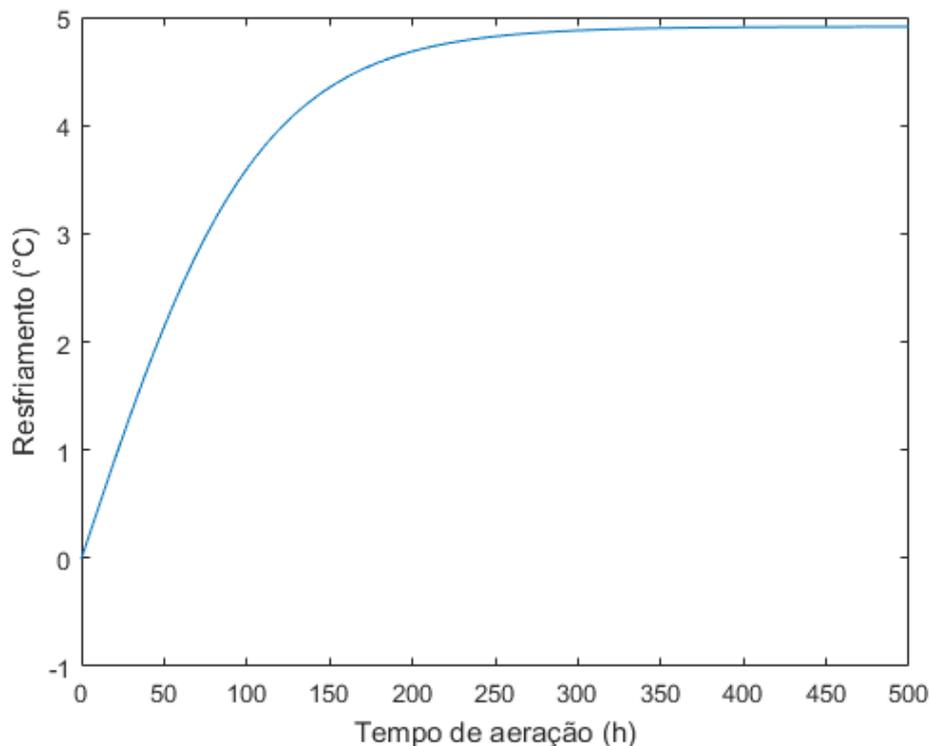


*Squared Error*), de modo que o modelo obteve 0,03872. Tanto o SSE como o RMSE, quanto mais próximo de zero o valor, melhor é o ajuste da curva, reforçando, assim, a eficiência do modelo.

Além disso, os valores estimados em relação aos valores observados apresentaram um erro absoluto médio de 0,0265 °C e um erro percentual médio de 1,13%.

Outro fator importante a ser observado é que, de acordo com a Figura 4, quando a temperatura dos grãos está próxima à temperatura ambiente, a mesma se estabiliza, conforme já esperado.

Figura 4 - Resfriamento dos grãos



Fonte: Os autores, 2022.

Assim, percebe-se que além da boa concordância com os dados observados, o modelo ainda consegue descrever satisfatoriamente o comportamento de resfriamento dos grãos, estabilizando a temperatura de resfriamento ao se aproximar da temperatura ambiente.



## CONSIDERAÇÕES FINAIS

Tendo em vista o objetivo estabelecido para este trabalho, foi possível modelar matematicamente o resfriamento com base nas horas de aeração. Com o ajuste de curvas realizado com o auxílio do *software* Matlab, com base na Função Logística, foi possível encontrar os coeficientes do modelo matemático, estabelecendo um  $R^2$  de 99,96%.

A investigação e proposição de modelos que descrevem o resfriamento dos grãos dentro de um silo é importante uma vez que é fundamental manter os grãos em temperatura e umidade adequadas para evitar que os mesmos sofram com ataques de insetos e perda de suas propriedades físico-químicas. Além disso, a aeração mostra-se como uma técnica imprescindível para manter os grãos em segurança até sua comercialização.

Como continuidade deste trabalho, pretende-se desenvolver modelos mais complexos os quais serão utilizados para realizar um estudo mais detalhado sobre o resfriamento dos grãos e sua relação com o tempo de aeração.

## REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ABITANTE, L. Modelagem Matemática da produção de etanol utilizando ajuste de curvas e o modelo de crescimento logístico Verhulst. In: X ENCONTRO GAÚCHO DE EDUCAÇÃO MATEMÁTICA. *Trabalhos X Egem*. Ijuí, 2009.

CORADI *et al.* Technological and sustainable strategies for reducing losses and maintaining the quality of soybean grains in real production scale storage units. *Journal of Stored Products Research*, v. 87, 2020.

LEITE, M.; SILVA, G; SOUSA, L. Modelos matemáticos para o crescimento da população do estado de São Paulo e a exploração de diferentes taxas de crescimento. *Ciência & Educação*, v. 17, 2011, p. 927-940.

MATHWORKS. Matlab. Disponível em:

<<https://www.mathworks.com/products/matlab.html>> Acesso em: 18 jul. 2022.

MOLUGARAM, K.; RAO, G. Curve fitting. In: \_\_\_\_ (org.). *Statistical Techniques for Transportation Engineering*. Butterworth-Heinemann, 2017. p. 281-292.



NAVARRO, S. Advanced grain storage methods for quality preservation and insect control based on aerated or hermetic storage and ipm. *Journal of Agricultural Engineering*, v. 49, 2012.

NAVARRO *et al.* Grain aeration. *Stored Product Protection*, p. 121-13, 2012.

OLIVEIRA, F.; KHATCHATOURIAN, O. A.; BIHAIN, A. Estado térmico de produtos armazenados em silos com sistema de aeração: estudo teórico e experimental. *Engenharia Agrícola*, v. 27, 2007.

PANIGRAHI, S. S.; SINGH, C. B.; FIELKE, J. M. Effect of mediterranean climatic condition during aeration and silo wall coating in on-farm grain storage in south australia. In: *2019 ASABE Annual International Meeting*. Boston, Massachusetts: American Society of Agricultural and Biological Engineers, 2019.

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. 1-9, 2021.