

UNIVERSIDADE FEDERAL DE VIÇOSA

IGOR LOPES DE FARIA

**APLICABILIDADE DE MODELOS DE PREVISÃO DE TAXAS DE CRESCIMENTO
DE INSETOS-PRAGA NO ARMAZENAMENTO DE GRÃOS**

**VIÇOSA – MINAS GERAIS
2019**

IGOR LOPES DE FARIA

**APLICABILIDADE DE MODELOS DE PREVISÃO DE TAXAS DE CRESCIMENTO
DE INSETOS-PRAGA NO ARMAZENAMENTO DE GRÃOS**

Relatório final, apresentado a Universidade Federal de Viçosa, como parte das exigências da disciplina ENG 491 - Trabalho de Conclusão de Curso.

Orientador: Prof. Dr. Luís César da Silva

Coorientadora: MSc. Juliana Soares Zeymer

**VIÇOSA – MINAS GERAIS
2019**

IGOR LOPES DE FARIA

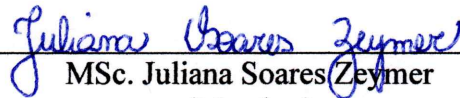
**APLICABILIDADE DE MODELOS DE PREVISÃO DE TAXAS DE CRESCIMENTO
DE INSETOS-PRAGA NO ARMAZENAMENTO DE GRÃOS**

Relatório final, apresentado a Universidade Federal
de Viçosa, como parte das exigências da disciplina
ENG 491 – Trabalho de Conclusão de Curso.

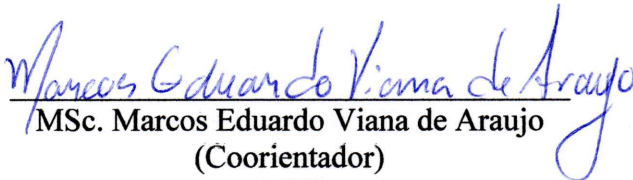
APROVADO: 05 de dezembro de 2019.



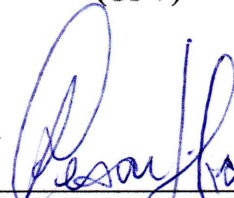
Dra. Fernanda Campos de Sousa
(Membro)
(UFV)



MSc. Juliana Soares Zeymer
(Membro)
(UFV)



MSc. Marcos Eduardo Viana de Araujo
(Coorientador)
(UFV)



Dr. Luis Cesar da Silva
(Orientador)
(UFV)

*Às pessoas mais importantes da minha vida,
minha família,*

DEDICO

AGRADECIMENTOS

Aos meus pais, Sandra e Aduino, por todos ensinamentos, esforços, proteção e apoio incondicional; e por sempre me proporcionarem a melhor educação possível.

À minha irmã, Iris, que me acompanhou de perto durante meus últimos anos de graduação, por toda a paciência, convivência e cumplicidade.

Ao professor Luís César da Silva, orientador deste trabalho, por todos ensinamentos, confiança e apoio prestado.

À Juliana Soares Zeymer, pela força, dedicação, conselhos, oportunidades concedidas e pela coorientação neste trabalho.

Aos professores Paulo Cesar Corrêa e Tetuo Hara por toda experiência pessoal e profissional transmitidas.

Ao professor Alisson Carraro Borges, tutor do Programa de Educação Tutorial em Engenharia Agrícola e Ambiental (PET.EAA), pelos valiosos conselhos e oportunidades concedidas.

À professora Renata Cássia Campos, por todos ensinamentos compartilhados, conselhos e oportunidades.

Aos amigos do Centro Nacional de Treinamento em Armazenagem (Centreinar), Fernanda Dutra e Marcos Eduardo, pela convivência e colaboração.

Aos membros do PET.EAA pela convivência constante em projetos, atividades e integrações; e pelas experiências compartilhadas.

À empresa Procer Automação e Sistemas, pela relevante contribuição neste trabalho, com o fornecimento dos dados.

À empresa Copasul, pela experiência de estágio, o qual me despertou interesse pelo tema deste trabalho, em especial aos amigos Diego, Fagner e Satinho por todo apoio e ensinamentos.

Aqueles que foram meus irmãos de república durante muitos anos em Viçosa: Flávio Santos, Olavo Bevilaqua, Luiz Henrique, Rafael Cabral, Rafael Moreti e Eduardo Souto, pela convivência, risadas e bons momentos vividos.

Aos amigos da graduação e da vida, pela companhia e pelas lembranças que levarei sempre comigo.

À Universidade Federal de Viçosa (UFV), pela oportunidade de realização do curso e ao Departamento de Engenharia Agrícola (DEA), pela oportunidade de desenvolver este trabalho.

À Secretaria de Educação Superior do Ministério da Educação (SESu/MEC) pela bolsa concedida.

E a todos demais familiares e amigos que de alguma maneira contribuíram para que fosse possível a conclusão desta importante etapa em minha vida.

WORK HARD & BE NICE TO PEOPLE

“Seja você quem for, seja qual for a posição social que você tenha na vida, a mais alta ou a mais baixa, tenha sempre como meta muita força, muita determinação e sempre faça tudo com muito amor e com muita fé, que um dia você chega lá. De alguma maneira você chega lá”.

Ayrton Senna

RESUMO

A modelagem e simulação computacionais são ferramentas eficazes em análises preditivas, pois fornecem informações realistas sob determinadas condições de tratamento. O presente trabalho foi conduzido com o objetivo de realizar a modelagem e a simulação do crescimento de populações dos insetos-praga *Rhyzopertha dominica*, *Sitophilus oryzae*, *Oryzaephilus surinamensis* e *Tribolium castaneum* no armazenamento de milho a granel, utilizando dados de sensores digitais de temperatura instalados em três unidades armazenadoras brasileiras de diferentes regiões. Os dados foram coletados através do sistema de gerenciamento CERES, desenvolvido pela empresa Procer Automação e Sistemas. Foram coletados dados de 01 de julho a 29 de setembro de 2019. Foi utilizado, em cada uma das unidades, um silo equipado com tais sensores para a coleta dos dados. O modelo adotado para a previsão da taxa de crescimento populacional foi o descrito por Driscoll; Longstaff; Beckett (2000). Foram descartados os *outliers* dos dados fornecidos pelos sensores, através do conceito de *boxplot*. Para aplicação no modelo foram utilizados dados de temperatura média semanal da massa de grãos e da umidade relativa intergranular média semanal, calculada a partir da Equação de Henderson Modificada. Foram plotados gráficos com as taxas de crescimento populacional das espécies de insetos-praga para cada unidade armazenadora, juntamente com gráficos de temperatura média semanal da massa de grãos e umidade relativa intergranular média semanal, além de gráficos associando as taxas de crescimento dessas espécies por unidade armazenadora. Além disso, foi feita uma estimativa da quantidade de insetos-praga na massa de grãos ao longo do tempo de armazenagem, a partir da suposição de uma população inicial de dois indivíduos adultos por quilograma de amostra representativa. Para todas as espécies de insetos-praga estudadas foram observadas as maiores taxas de crescimento populacional na unidade armazenadora 2; e as menores taxas na unidade armazenadora 1. A unidade armazenadora 3, apresentou taxas de crescimento intermediárias entre estas duas unidades. As unidades armazenadoras 2 e 3 apresentaram grande variação temporal nas taxas de crescimento durante o período estudado, quando comparadas com a unidade 1, que apresentou, em sua grande maioria, taxas de crescimento populacional negativas. As unidades armazenadoras que apresentaram maiores potenciais para taxas de crescimento populacional, estão sujeitas aos maiores riscos de níveis elevados de populações de insetos-praga ao longo do tempo.

Palavras-chave: Modelo matemático. Monitoramento populacional. Sensores digitais. Termometria.

ABSTRACT

Computer modeling and simulation are effective tools in predictive analytics as they provide realistic information under certain treatment conditions. The present work was conducted with objective of model and simulating population growth of the pest insects *Rhyzopertha dominica*, *Sitophilus oryzae*, *Oryzaephilus surinamensis* and *Tribolium castaneum* in the storage of bulk maize using data from digital temperature sensors installed in three Brazilian storage units in different regions. Data were collected through the CERES management system, developed by Procer Automação e Sistemas. Data were collected from July 1 to September 29, 2019. A silo equipped with such sensors was used in each unit for data collection. The model adopted to predict population growth rate was that described by Driscoll; Longstaff; Beckett (2000). Data outliers provided by the sensors were discarded through the boxplot concept. For application in the model were used data of weekly average grain mass temperature and weekly average intergranular relative moisture, calculated from the Modified Henderson Equation. Graphs were plotted with population growth rates of pest insect species for each storage unit, along with graphs of weekly average grain mass temperature and weekly average intergranular relative moisture, as well as graphs associating the growth rates of these species per unit storage. In addition, an estimate of the amount of pest insects in the grain mass over storage time was made from the assumption of an initial population of two adult individuals per kilogram of representative sample. For all pest insects species studied, the highest population growth rates were observed in storage unit 2; and the lowest rates in storage unit 1. Storage unit 3 showed intermediate growth rates between these two units. Storage units 2 and 3 showed a large temporal variation in growth rates during the study period, when compared to unit 1, which presented, in its majority, negative population growth rates. Storage units that have the highest potential for population growth rates are subject to the highest risk of high levels of pest insect populations over time.

Keywords: Mathematical model. Population monitoring. Digital sensors; Thermometry.

SUMÁRIO

1.	INTRODUÇÃO.....	10
2.	MATERIAL E MÉTODOS	12
2.1	OBTENÇÃO DOS DADOS	12
2.2	CONFIGURAÇÕES DOS SISTEMAS	14
2.2.1	UNIDADE ARMAZENADORA 1	14
2.2.2	UNIDADE ARMAZENADORA 2	14
2.2.3	UNIDADE ARMAZENADORA 3	15
2.3	MODELAGEM E SIMULAÇÃO DAS TAXAS DE CRESCIMENTO DE INSETOS-PRAGA	15
2.3.1	ASPECTOS BÁSICOS DA MICROBIOLOGIA PREDITIVA.....	15
2.3.2	MODELO DE PREVISÃO DO CRESCIMENTO POPULACIONAL	17
2.3.3	APLICAÇÃO DO MODELO DE PREVISÃO DO CRESCIMENTO POPULACIONAL.....	18
3.	RESULTADOS E DISCUSSÃO.....	22
4.	CONCLUSÕES.....	36
5.	REFERÊNCIAS.....	37

1. INTRODUÇÃO

Segundo estimativa da Companhia Nacional de Abastecimento (Conab) a produção de milho (*Zea mays* L.) corresponderá por aproximadamente 41% (99,9 milhões de toneladas) da produção de grãos no Brasil da safra 2018/19, que é estimada em 242,1 milhões de toneladas (CONAB, 2019). Além de promover o aumento da produção, há de se ater também a redução das perdas, pois atualmente o setor de armazenagem de grãos no Brasil ainda padece com prejuízos ocasionados por insetos-praga (LORINI, 2015). O resultado da infestação de insetos-praga em grãos armazenados se traduz em perdas de massa, disseminação de fungos, deposição de dejetos na massa de grãos, origem de focos de calor durante o armazenamento e depreciação dos valores nutricionais e comerciais dos grãos, o que determina, conseqüentemente, a redução do valor de mercado (PEIXOTO et al., 2015; JAYAKUMAR et al., 2017).

Ao proceder o armazenamento de grãos é estabelecido um ecossistema sujeito a transformações e deteriorações devido às interações entre os fenômenos físicos, químicos e biológicos. Fatores como temperatura, umidade relativa do ar, disponibilidade de oxigênio, impurezas, microrganismos, insetos-praga, roedores e pássaros exercem influência nesse contexto. Nesta etapa, as perdas ocorrem, em grande maioria, devido aos fatores biológicos. Assim, para a manutenção da qualidade dos grãos, os processos de limpeza, secagem, armazenagem e manejo integrado de pragas devem ser conduzidos de forma eficiente, pois contribuem decisivamente para a qualidade final dos grãos (VIEBRANTZ, 2014).

A maioria dos insetos-praga em grãos armazenados é de origem subtropical e tropical, necessitando de temperaturas na faixa de 27 a 34 °C para o pleno desenvolvimento. No entanto, esse desenvolvimento pode ser retardado ou paralisado se a temperatura ficar abaixo de 16 °C. A redução da temperatura dos grãos armazenados promove a redução da velocidade das reações bioquímicas e metabólicas dos insetos (AGUIAR et al., 2012).

Os insetos-praga em grãos armazenados são classificados em primários e secundários. Os primários possuem a capacidade de infestar grãos intactos, enquanto os secundários são capazes de infestar apenas materiais que foram danificados anteriormente pelos insetos primários, ou por debulha, secagem e manuseio inadequados (SARWAR, 2015).

No Brasil, os principais insetos-praga primários em grãos de milho armazenado são: *Rhyzopertha dominica*, *Sitophilus oryzae* e *Sitophilus zeamais*, e, dentre os secundários, destacam-se as espécies: *Oryzaephilus surinamensis* e *Tribolium castaneum*. (SARWAR, 2015; SILVA et al., 2017). O controle de insetos-praga exige uma abordagem integrada, envolvendo

vários métodos de controle, como a intervenção química, saneamento, refrigeração e controles físico e biológico, que dependem dos recursos disponíveis. Diversos estudos na literatura apontam que espécies de insetos-praga em grãos armazenados desenvolveram tolerância a vários inseticidas (WALTER et al., 2016; BATA; KAVALLIERATOS, 2018; SCHLIPALIUS et al., 2018). O controle físico envolve a utilização de tecnologias como a secagem, a aeração e o resfriamento, de tal forma a estabelecer no ecossistema de grãos armazenados condições desfavoráveis à proliferação de insetos-praga e fungos (SHARMA, et al., 2015; FERREIRA; NASCIMENTO; SILVA, 2017).

A aeração constitui-se da insuflação ou sucção de ar através da massa de grãos, com o objetivo de prevenir problemas relacionados à conservação do produto, diminuir a temperatura da massa de grãos, inibir a atividade de insetos-praga e o desenvolvimento da microflora, uniformizar a temperatura da massa de grãos e remover odores (NAVARRO et al., 2012).

Para o controle da temperatura, os sistemas de aeração empregam recursos de termometria, as quais são constituídos por uma rede de sensores de temperatura, dispostos simetricamente na massa de grãos armazenada a granel (KHATCHATOURIAN et al., 2017; BINELO et al., 2019). Avanços tecnológicos quanto ao emprego de recursos de comunicação wireless e automação de processos, utilizando microprocessadores, atuadores e sensores digitais, têm proporcionado melhora nas ferramentas para monitoramento e gestão dos ecossistemas de armazenagem de grãos a granel, como os silos e armazéns graneleiros (LOPES et al., 2010).

O estudo da dinâmica do crescimento populacional de insetos-praga visa elucidar como e por que a densidade populacional altera ao longo do tempo e espaço. No ecossistema de grãos armazenados, os sistemas podem ser estudados de diferentes formas, como, intervenção direta sob as rotinas, experimentação com modelos, uso de protótipo, modelagem matemática, soluções analíticas e simulações (WIEST, 2019). A modelagem e simulação computacionais são ferramentas eficazes e flexíveis em análises preditivas, pois fornecem informações realistas sob determinadas condições de tratamento controladas. Modelos de simulação validados são muito úteis na análise de diferentes sistemas associados ao objeto de estudo (HUANG; CHEN; WANG, 2015).

Diante do exposto, objetivou-se na condução deste trabalho modelar e simular o crescimento de populações dos insetos-praga *Rhyzopertha dominica*, *Sitophilus oryzae*, *Oryzaephilus surinamensis* e *Tribolium castaneum* no armazenamento de milho a granel, utilizando dados de sensores digitais de temperatura instalados em unidades armazenadoras brasileiras.

2. MATERIAL E MÉTODOS

A modelagem matemática e a simulação do crescimento de populações dos insetos-praga *Rhyzopertha dominica*, *Sitophilus oryzae*, *Oryzaephilus surinamensis* e *Tribolium castaneum* no armazenamento de milho a granel foi feita utilizando dados de sensores digitais de temperatura, instalados em três unidades armazenadoras brasileiras.

2.1 OBTENÇÃO DOS DADOS

Os dados de temperatura foram coletados através do sistema de gerenciamento CERES, desenvolvido pela empresa Procer Automação e Sistemas¹. O sistema é composto pelos seguintes elementos (PROCER, 2019):

- pêndulos com sensores digitais de temperatura (precisão de $\pm 0,5$ °C);
- estações de monitoramento da temperatura da massa de grãos, instaladas sobre os silos ou armazéns graneleiros. A estas estações estão conectados os pêndulos de termometria, e os dados coletados são transmitidos por comunicação sem fio;
- estação de monitoramento das condições climáticas: temperatura, umidade relativa e ocorrência de precipitação;
- estação atuadora que visa o acionamento dos ventiladores, instalada junto ao quadro de comando;
- estação gestora de comunicação;
- central de processamento, a qual está embarcado o software de gerenciamento, que disponibiliza a visualização das informações em tempo real, análise histórica e configuração da aeração.

¹ Empresa brasileira, situada em Criciúma, Santa Catarina.

Utilizaram-se dados de sensores digitais de temperatura de três unidades armazenadoras de milho de diferentes regiões do Brasil. As localizações destas unidades estão apresentadas segundo a divisão do território brasileiro em regiões geográficas intermediárias e imediatas (IBGE, 2017):

1. Unidade armazenadora 1, localizada na região geográfica intermediária de Passo Fundo, Rio Grande do Sul.
2. Unidade armazenadora 2, localizada na região geográfica intermediária de Castanhal, Pará.
3. Unidade armazenadora 3, localizada na região geográfica intermediária de Juiz de Fora, Minas Gerais.

Os dados obtidos compreendem o período de 01 de julho a 29 de setembro de 2019, totalizando 91 dias (13 semanas); época em que os silos, provavelmente, receberam milho da primeira e segunda safra 2018/19.

Selecionou-se, em cada uma destas unidades armazenadoras, um silo equipado com tais sensores para a coleta dos dados. Optou-se por essas unidades, em diferentes regiões do Brasil, devido a variabilidade climática para simulação dos cenários.

Na Tabela 1, estão apresentados os períodos correspondentes as 13 semanas de análise dos dados.

Tabela 1 - Semanas e respectivos períodos de análise dos dados

Semana	Período
1	01/07/2019 - 07/07/2019
2	08/07/2019 - 14/07/2019
3	15/07/2019 - 21/07/2019
4	22/07/2019 - 28/07/2019
5	29/07/2019 - 04/08/2019
6	05/08/2019 - 11/08/2019
7	12/08/2019 - 18/08/2019
8	19/08/2019 - 25/08/2019
9	26/08/2019 - 01/09/2019
10	02/09/2019 - 08/09/2019
11	09/09/2019 - 15/09/2019
12	16/09/2019 - 22/09/2019
13	23/09/2019 - 29/09/2019

Fonte: O autor.

2.2 CONFIGURAÇÕES DOS SISTEMAS

2.2.1 UNIDADE ARMAZENADORA 1

Na unidade armazenadora 1, localizada na região geográfica intermediária de Passo Fundo, Rio Grande do Sul, foram utilizados dados de temperatura do silo 1, o qual possui cinco pêndulos, cada um com 12 sensores digitais de temperatura. As dimensões do silo são: 6,43 m de diâmetro; 19 m de altura e 3,5 m de altura do “chapéu” do silo e a sua capacidade estática é de 2.100 t, considerando soja com massa específica de 750 kg m^{-3} . O silo dispõe de um ventilador de 40 cv. O silo manteve-se totalmente preenchido com milho durante todo o período de coleta dos dados, com regra automática para aeração definida como “resfriamento e conservação do milho”. Esta regra aciona o ventilador caso sejam atendidas as seguintes condições: não haja precipitação; a temperatura interna seja maior ou igual a $11 \text{ }^\circ\text{C}$; a temperatura externa somada $5 \text{ }^\circ\text{C}$ seja menor ou igual a temperatura interna; e se o teor de água de equilíbrio dos grãos estiver entre 13 e 16 % b.u, haverá aquecimento do ar.

2.2.2 UNIDADE ARMAZENADORA 2

Na unidade armazenadora 2, localizada na região geográfica intermediária de Castanhal, Pará, foram utilizados dados de temperatura do silo 7, o qual possui nove pêndulos, cada um com 14 sensores digitais de temperatura. As dimensões do silo são: 21,83 m de diâmetro e 25,68 m de altura total, sendo 6,3 m a altura do “chapéu” do silo e a sua capacidade estática é de 6304 t, considerando soja com massa específica de 750 kg m^{-3} . O silo dispõe de dois ventiladores de 15 cv cada. No período de coleta dos dados, a quantidade de produto no silo oscilou em sua metade superior, com regra automática para aeração definida como “resfriamento do milho”. Esta regra aciona os ventiladores caso sejam atendidas as seguintes condições: não haja precipitação e a temperatura externa somada $4 \text{ }^\circ\text{C}$ seja menor ou igual a temperatura interna.

2.2.3 UNIDADE ARMAZENADORA 3

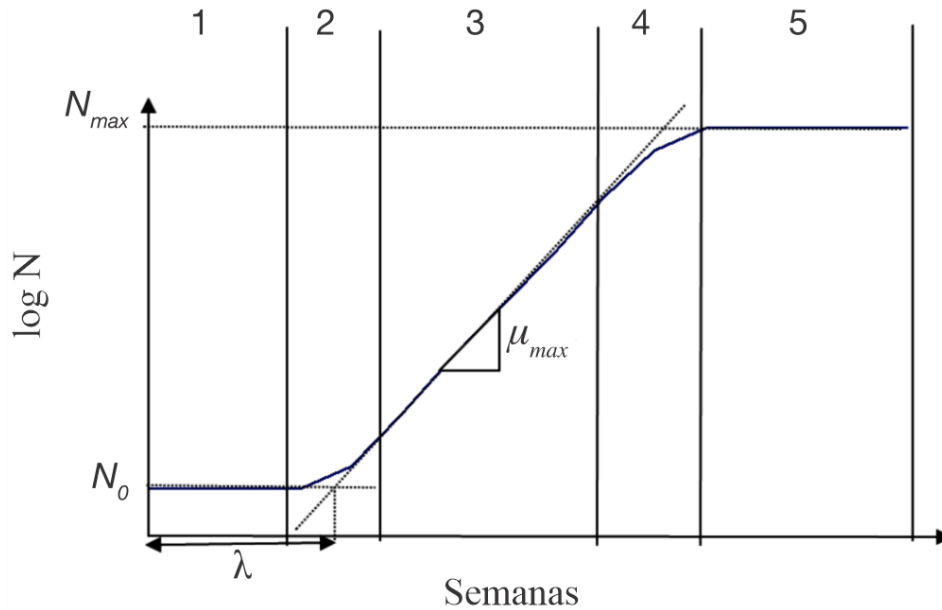
Na unidade armazenadora 3 localizada na região geográfica intermediária de Juiz de Fora, Minas Gerais, foram utilizados dados de temperatura do silo 2, o qual possui um pêndulo com 6 sensores digitais de temperatura. As dimensões do silo são: 5,48 m de diâmetro; 5,4 m de altura e 1,92 m de altura do “chapéu” do silo e a sua capacidade estática é de 93 t, considerando soja com massa específica de 750 kg m^{-3} . O silo dispõe de um ventilador de 1,5 cv. No período de coleta dos dados, a quantidade de produto no silo oscilou em sua metade inferior, sendo totalmente preenchido no último mês de análise, com regra automática para aeração definida como “resfriamento do milho sem sensor plenum - drástico”. Esta regra aciona o ventilador caso sejam atendidas as seguintes condições: não haja precipitação; a temperatura externa somada $3 \text{ }^\circ\text{C}$ seja menor ou igual a temperatura interna máxima e a umidade relativa externa seja menor que 85 %.

2.3 MODELAGEM E SIMULAÇÃO DAS TAXAS DE CRESCIMENTO DE INSETOS-PRAGA

2.3.1 ASPECTOS BÁSICOS DA MICROBIOLOGIA PREDITIVA

A microbiologia preditiva baseia-se na suposição de que as respostas das populações de insetos-praga à condições ambientais idênticas são reproduzíveis. Uma típica curva que descreve a cinética do processo de crescimento populacional de insetos-praga é composta pela fase de latência (*lag*), fase exponencial e fase estacionária. Alguns autores consideram dividir a curva de crescimento não somente nestas três fases, mas também incluem a fase de desaceleração (DELHALLE et al., 2012; HALL et al., 2014). Delhalle et al. (2012) propõem estudar curvas de crescimento em cinco fases distintas de crescimento, conforme é apresentado na Figura 1.

Figura 1 – Curva de crescimento populacional de insetos-praga: 1. Fase de latência (*lag*); 2. Fase de aceleração; 3. Fase exponencial; 4. Fase de desaceleração e 5. Fase estacionária



Fonte: DELHALLE et al. (2012) - adaptado.

1. Fase de latência (*lag*): fase de adaptação – os insetos se reproduzem lentamente;
2. Fase de aceleração: marca a saída da fase de latência. Nesse momento os insetos começam a se reproduzir gradualmente, até atingir a máxima taxa de crescimento;
3. Fase exponencial: corresponde a faixa em que a máxima taxa de crescimento é alcançada (μ_{max});
4. Fase de desaceleração: ocorre a redução da taxa de crescimento, antecedendo a entrada na fase estacionária;
5. Fase estacionária: a taxa de crescimento é zero e a população atinge densidade máxima (N_{max}). Às vezes, pode ocorrer fase subsequente de redução da população.

No estudo da cinética do processo de crescimento populacional costuma-se definir: (i) a duração da fase de latência (*lag*) como λ ; (ii) a máxima taxa de crescimento como μ_{max} , que é tangente no ponto de inflexão; e (iii) N_{max} , como sendo o limite do tamanho da população quando o tempo tende ao infinito (DELHALLE et al., 2012).

2.3.2 MODELO DE PREVISÃO DO CRESCIMENTO POPULACIONAL

O estudo em questão objetiva prever o crescimento de populações de insetos-praga na fase exponencial. O modelo adotado, descrito por Driscoll; Longstaff; Beckett (2000), foi empregado devido a simplicidade, sendo desenvolvido para condições tropicais de armazenagem, semelhante às brasileiras, e apresentou boa concordância com dados laboratoriais, segundo os autores. O modelo, após várias simplificações é apresentado na Equação 1.

$$r_m = f'(UR) \cdot \exp(k_1 \cdot T) + \ln [(k_2 \cdot (T_m - T))] \quad (1)$$

Em que $f'(UR)$ é uma função que descreve a dependência da umidade relativa do modelo (Equação 2).

$$f'(UR) = k_a + k_b \cdot UR + k_c \cdot UR^2 \quad (2)$$

em que:

- r_m - taxa de crescimento populacional (indivíduos \cdot semana⁻¹);
- UR - umidade relativa do ar intergranular (decimal);
- k_1 e k_2 - constantes de taxa positiva para cada espécie (adimensional);
- T_m - temperatura de mortalidade, que limita o crescimento populacional para cada espécie (°C);
- T - temperatura interna da massa de grãos para a taxa de crescimento (°C);
- k_a , k_b e k_c - constantes da função $f'(UR)$ para cada espécie de inseto-praga (adimensional).

Os valores das constantes k_a , k_b , k_c , k_1 , k_2 , e T_m para as espécies descritas no modelo estão disponibilizados na Tabela 2.

Tabela 2 – Constantes dos modelos

Espécie	k_a	k_b	k_c	k_1	k_2	T_m
<i>Rhyzopertha dominica</i>	0,1673	0,8477	-0,6980	0,0607	0,01541	39,50
<i>Sitophilus oryzae</i>	-0,0399	0,2308	-0,1710	0,1430	0,05425	33,03
<i>Sitophilus oryzae</i> *	0,4413	1,6090	-1,1410	0,0470	0,00753	34,55
<i>Oryzaephilus surinamensis</i>	0,2907	0,1273	-0,0326	0,07174	0,01625	36,13
<i>Tribolium castaneum</i>	0,7197	2,7010	-1,8760	0,0314	0,00242	41,29

Fonte: DRISCOLL; LONGSTAFF; BECKETT (2000).

* Modelo para UR > 40%.

As modelagens e simulações foram conduzidas no Microsoft® Office Excel, empregando especificamente a linguagem de programação *Visual Basic for Applications* (VBA).

Durante o armazenamento, condições de temperatura e umidade relativa são fatores críticos. Temperaturas (T) acima de 50 °C ou menores que 5 °C podem matar ou conduzir o inseto a um estado de hibernação ou de estivação permanente, e umidades relativas do ar intergranular (UR) maiores que 70% favorecem o crescimento de insetos-praga e fungos, porém as faixas de controle apresentam grandes variações. O teor de água dos grãos deve estar abaixo de 13% b.u., para que não sofra deterioração em razão de valores de atividade de água (a_w) que possibilitem o crescimento de espécies de insetos-praga (WERMELINGER; FERREIRA, 2013; HIMANEN et al., 2015; SHARMA, et al., 2015; FERREIRA; NASCIMENTO; SILVA, 2017; NEME; MOHAMMED, 2017).

Com relação à aeração, duas frentes de trabalho são apresentadas: (i) regulação das condições de temperatura e umidade anteriormente relatadas e (ii) condição de saturação do ar por gases que podem ser maléficis aos insetos, como é o caso do CO₂, que, em ambientes fechados, pode ocasionar a mortalidade dos insetos-praga presentes nos grãos (RIUDAVENTS et al., 2010; FERREIRA; NASCIMENTO; SILVA, 2017).

2.3.3 APLICAÇÃO DO MODELO DE PREVISÃO DO CRESCIMENTO POPULACIONAL

O sistema CERES fornece séries históricas de dados de termometria dos sensores digitais de todos os pêndulos, apresentando leituras de temperatura (interna mínima, interna média e interna máxima) e teor de água de equilíbrio do grão, inferido através da tabela de

equilíbrio higroscópico, considerando aquecimento do ar ambiente ao passar pelo ventilador, neste caso, de 2 °C. Além destes, o relatório de termometria fornece a temperatura e a umidade relativa externa (ambiente), através da estação de monitoramento das condições climáticas. Por padrão, essas leituras são realizadas automaticamente a cada 2 horas.

De acordo com as Equações 1 e 2, para a simulação dos cenários, são necessários dados da temperatura interna da massa de grãos e da umidade relativa intergranular, sendo este último dado não disponível nos relatórios do sistema CERES (PROCER, 2019), sendo possível somente a leitura pontual, quando existem tais sensores específicos.

Na Equação 1, a taxa de crescimento populacional apresenta unidade (indivíduos · semana⁻¹), logo, para aplicação do modelo, foi utilizada a temperatura interna média semanal, calculada a partir das leituras das temperaturas internas médias a cada 2 horas, fornecidas nos relatórios do sistema de termometria CERES.

Para aplicação do modelo também foi utilizado o teor de água de equilíbrio médio semanal do grão, transformando-o em base seca (b.s.), para a determinação umidade relativa intergranular média semanal, a partir da Equação de Henderson Modificada (THOMPSON; PEART; FOSTER, 1968) (Equação 3), isolando o termo a se determinar, conforme pode ser visto na Equação 4.

$$U_e = \left[\frac{\ln(1 - UR)}{-a(T + b)} \right]^{\frac{1}{c}} \quad (3)$$

$$UR = 1 - \exp \{U_e^c [-a(T + b)]\} \quad (4)$$

em que: UR - umidade relativa intergranular (decimal);

U_e - teor de água de equilíbrio (% , b.s.);

T - temperatura interna da massa de grãos (°C);

a, b e c - constates do modelo (adimensional).

Os valores das constantes a, b e c para milho estão apresentados na Tabela 3.

Tabela 3 – Constantes do modelo do teor de água de equilíbrio

Produto	a	b	c
Milho	$8,6541 \times 10^{-5}$	49,810	1,8634

Fonte: THOMPSON; PEART; FOSTER (1968).

Para o cálculo da temperatura média semanal e do teor de água de equilíbrio médio semanal do grão, foram descartados os *outliers*, através do conceito de *boxplot*, que é uma maneira simples, comumente empregada para identificar esses discrepantes e envolve o uso de limites estatísticos da amostra. O procedimento de limites usa o método baseado na amplitude interquartil (IQR), que é a diferença entre o terceiro quartil e o primeiro quartil da amostra (Equação 5). Usa-se esta estimativa de variabilidade para calcular os limites de especificação superior e inferior da amostra para identificação dos *outliers* (Equação 6). Os dados amostrais fora destes limites são considerados *outliers* (SCHWERTMAN; OWENS; ADNAN, 2004). A identificação e o descarte dos outliers foram feitos no Microsoft® Office Excel, por meio de sua função gráfica específica.

$$\text{IQR} = Q_3 - Q_1 \quad (5)$$

em que: IQR - amplitude interquartil;
 Q_3 - terceiro quartil da amostra;
 Q_1 - primeiro quartil da amostra.

$$\begin{aligned} L_{\text{sup}} &= \bar{X} + 1,5 \text{ IQR} \\ L_{\text{inf}} &= \bar{X} - 1,5 \text{ IQR} \end{aligned} \quad (6)$$

em que: L_{sup} - limite de especificação superior;
 L_{inf} - limite de especificação inferior;
 \bar{X} - média da amostra.

Através das taxas de crescimento populacional calculadas na Equação 1 pode-se estimar, a partir de uma suposta população amostral inicial, a população final de insetos na massa de grãos ao longo do tempo, neste caso, semanas, na fase exponencial, conforme a Equação 7.

$$N_{\text{insetos}} = N_{\text{insetos inicial}} \cdot \exp (N_{\text{semanas}} \cdot r_m) \quad (7)$$

em que:

- N_{insetos} - população final de insetos;
- $N_{\text{insetos inicial}}$ - população inicial de insetos;
- N_{semanas} - número de semanas;
- r_m - taxa de crescimento populacional (indivíduos \cdot semana⁻¹).

3. RESULTADOS E DISCUSSÃO

Nas Tabelas 4, 5 e 6 estão apresentados os valores de temperatura média semanal da massa de grãos (T_{med}), umidade relativa intergranular média semanal (UR_{med}) e as taxas de crescimento populacional (r_m) calculadas na fase exponencial para as espécies de insetos-praga estudadas, nas unidades armazenadoras 1, 2 e 3, respectivamente.

Tabela 4 - Temperatura média semanal da massa de grãos (T_{med}), umidade relativa intergranular média semanal (UR_{med}) e taxas de crescimento populacional (r_m) calculadas na fase exponencial para as espécies de insetos-praga estudadas para o silo 1 da unidade armazenadora 1

Semana	T_{med} (° C)	UR_{med} (%)	<i>Rhyzopertha</i>	<i>Sitophilus</i>	<i>Oryzaephilus</i>	<i>Tribolium</i>
			<i>dominica</i>	<i>oryzae</i>	<i>surinamensis</i>	<i>castaneum</i>
r_m (indivíduos · semana ⁻¹)						
1	14,6	70,1	0,057	0,107	-0,0135	-0,0656
2	10,1	53,2	-0,016	-0,127	-0,1402	-0,3528
3	9,6	68,3	-0,022	-0,090	-0,1200	-0,2850
4	10,0	65,2	-0,011	-0,078	-0,1186	-0,2747
5	10,0	68,9	-0,018	-0,076	-0,1131	-0,2679
6	10,5	60,3	-0,002	-0,075	-0,1201	-0,2786
7	10,8	61,8	0,002	-0,060	-0,1130	-0,2588
8	10,9	64,6	0,002	-0,047	-0,1055	-0,2401
9	11,3	63,4	0,008	-0,038	-0,1021	-0,2315
10	11,2	65,3	0,005	-0,038	-0,1004	-0,2284
11	11,3	60,9	0,010	-0,045	-0,1065	-0,2435
12	11,7	79,1	-0,032	-0,027	-0,0652	-0,2079
13	12,2	52,0	0,014	-0,062	-0,1093	-0,2815
Média	11,1	64,1				

Fonte: O autor.

Tabela 5 - Temperatura média semanal da massa de grãos (T_{med}), umidade relativa intergranular média semanal (UR_{med}) e taxas de crescimento populacional (r_m) calculadas na fase exponencial para as espécies de insetos-praga estudadas para o silo 7 da unidade armazenadora 2

Semana	T_{med} (° C)	UR_{med} (%)	<i>Rhyzopertha</i>	<i>Sitophilus</i>	<i>Oryzaephilus</i>	<i>Tribolium</i>
			<i>dominica</i>	<i>oryzae</i>	<i>surinamensis</i>	<i>castaneum</i>
			r_m (indivíduos · semana ⁻¹)			
1	27,8	62,5	0,580	0,718	0,626	0,587
2	29,2	73,4	0,593	0,763	0,795	0,700
3	28,1	75,3	0,518	0,744	0,728	0,640
4	26,9	72,3	0,486	0,715	0,621	0,579
5	27,0	73,3	0,483	0,717	0,634	0,584
6	27,4	72,0	0,513	0,733	0,656	0,606
7	27,6	71,4	0,530	0,740	0,668	0,618
8	27,3	73,1	0,498	0,727	0,653	0,599
9	28,3	70,7	0,568	0,757	0,711	0,652
10	29,2	67,3	0,641	0,762	0,754	0,690
11	31,7	68,4	0,764	0,627	0,893	0,809
12	30,6	67,9	0,709	0,733	0,841	0,758
13	30,8	67,3	0,723	0,720	0,847	0,764
Média	28,6	70,4				

Fonte: O autor.

Tabela 6 - Temperatura média semanal da massa de grãos (T_{med}), umidade relativa intergranular média semanal (UR_{med}) e taxas de crescimento populacional (r_m) calculadas na fase exponencial para as espécies de insetos-praga estudadas para o silo 2 da unidade armazenadora 3

Semana	T_{med} (° C)	UR_{med} (%)	<i>Rhyzopertha</i>	<i>Sitophilus</i>	<i>Oryzaephilus</i>	<i>Tribolium</i>
			<i>dominica</i>	<i>oryzae</i>	<i>surinamensis</i>	<i>castaneum</i>
			r_m (indivíduos · semana ⁻¹)			
1	28,9	74,5	0,564	0,758	0,777	0,680
2	17,3	73,4	0,108	0,229	0,082	0,063
3	21,4	68,0	0,266	0,443	0,251	0,273
4	24,0	73,5	0,342	0,580	0,428	0,420
5	25,2	74,0	0,392	0,639	0,511	0,486
6	20,2	72,6	0,202	0,381	0,208	0,216
7	18,5	71,0	0,154	0,292	0,124	0,125
8	20,3	76,6	0,177	0,374	0,224	0,211
9	21,1	69,0	0,252	0,429	0,241	0,261
10	21,8	71,6	0,265	0,466	0,287	0,301
11	22,6	65,0	0,325	0,501	0,307	0,327
12	24,2	64,0	0,397	0,578	0,396	0,406
13	21,9	76,8	0,231	0,459	0,313	0,298
Média	22,1	71,5				

Fonte: O autor.

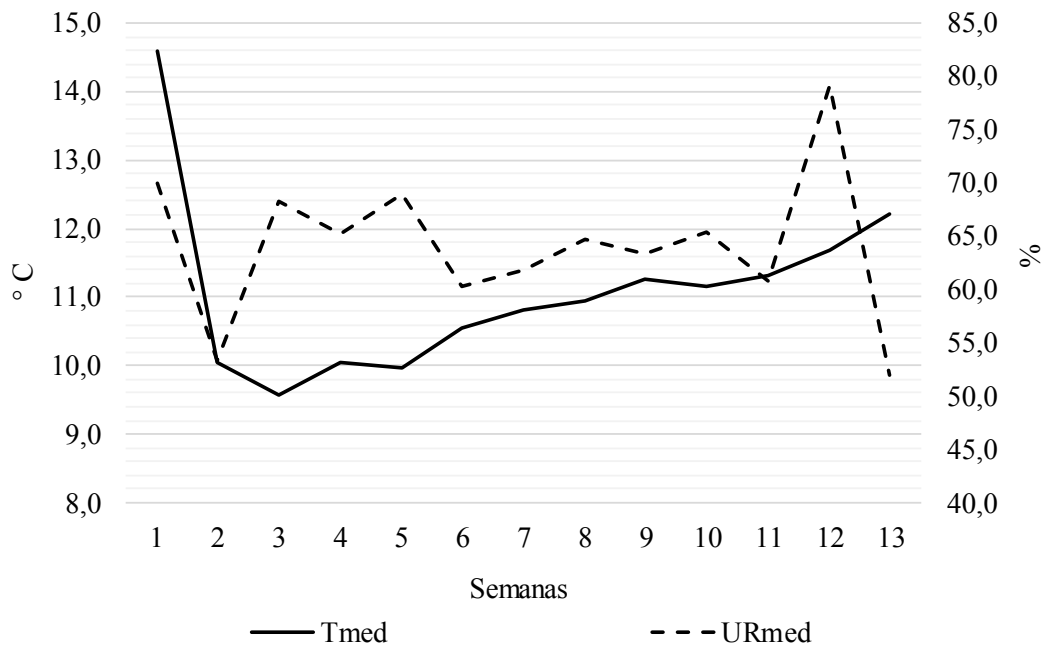
As taxas de crescimento populacional para a unidade armazenadora 1 apresentaram, em sua grande maioria, valores negativos, o que representa que, durante o período de análise, as condições de sobrevivência e reprodução dos insetos-praga estudados estavam abaixo das mínimas necessárias para seu desenvolvimento. Segundo Silva et al. (2006), quando um modelo não prediz valores de populações absolutamente iguais a zero mas, sim, valores infinitamente pequenos ou negativos, pode-se concluir, de forma prática, que isto equivale ao extermínio das populações. Essas condições são corroboradas pela média das temperaturas da massa de grãos, abaixo de 16 °C, e pela média das umidades relativas do ar intergranular, abaixo de 70 %, o que retarda ou paralisa o desenvolvimento dos insetos-praga (AGUIAR et al., 2012). As baixas temperaturas internas são resultado das condições ambientais externas, com baixas temperaturas durante todo o período de estudo, abaixo dos 15 °C, aferidas através da estação de monitoramento das condições climáticas do sistema CERES.

Dentre as unidades estudadas, a unidade armazenadora 2, foi a que apresentou o maior potencial para as taxas de crescimento populacional de insetos-praga. No período analisado, pode-se notar altas temperaturas da massa de grãos (média de 28,6 °C), associadas a valores elevados de umidade relativa intergranular (média de 70,4 %). Nestas condições os insetos têm condições propícias ao rápido desenvolvimento, tornando-se um enorme risco para a qualidade do produto armazenado (SILVA et al, 2006). Em razão dessas condições, deve-se adotar o Manejo Integrado de Pragas (MIP) para o controle imediato desses insetos na massa de grãos. Deve-se, também, empregar um constante programa de monitoramento das condições do ecossistema da massa de grãos, pois a região onde está localizada a unidade armazenadora 2 possui clima quente e úmido, tipicamente favorável a proliferação destes insetos-praga (AGUIAR et al, 2012).

A unidade armazenadora 3 apresentou taxas de crescimento populacional de insetos-praga intermediárias entre as duas unidades supracitadas. Por se tratar de um silo com menor capacidade, o controle dos insetos-praga é menos moroso, pois a rotatividade de produto é maior, comprovada pelo nível de produto no silo que oscilou bastante entre o período de análise dos dados. Portanto, cabe aos gestores da unidade, assim como das demais, constante monitoramento e controle destes insetos-praga, ao promover, principalmente, os processos de secagem e limpeza de forma eficiente.

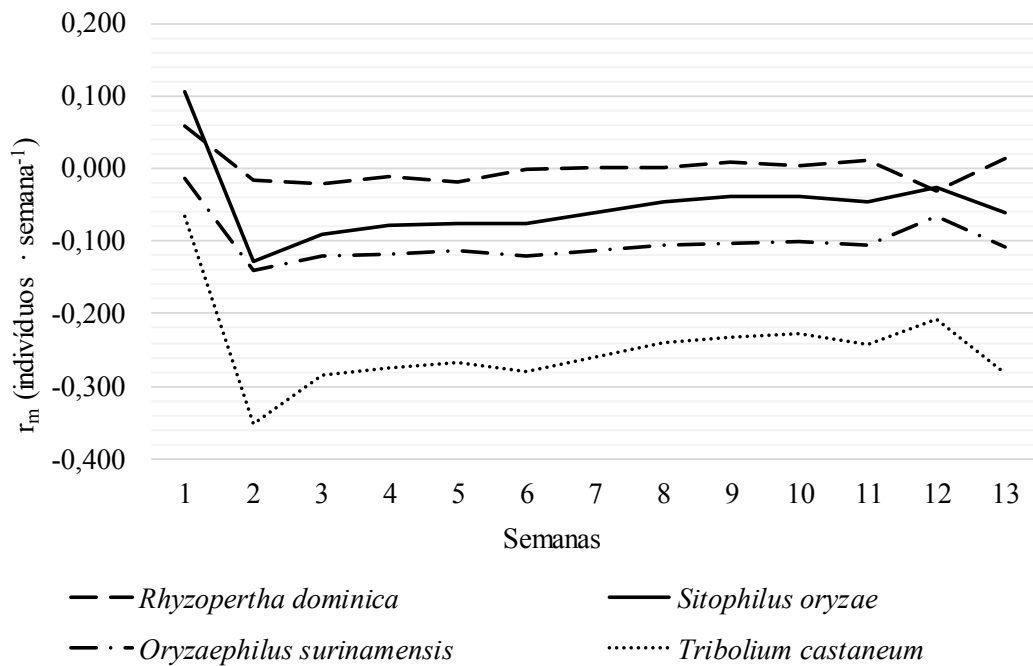
Os valores de temperatura média semanal da massa de grãos (T_{med}), umidade relativa intergranular média semanal (UR_{med}) e as taxas de crescimento populacional (r_m) calculadas na fase exponencial para as espécies de insetos-praga estudadas podem ser melhores visualizadas nas Figuras 2 e 3; 4 e 5; 6 e 7 para as unidades armazenadoras 1, 2 e 3, respectivamente.

Figura 2 - Temperatura média semanal da massa de grãos (T_{med}) e umidade relativa intergranular média semanal (UR_{med}) na unidade armazenadora 1



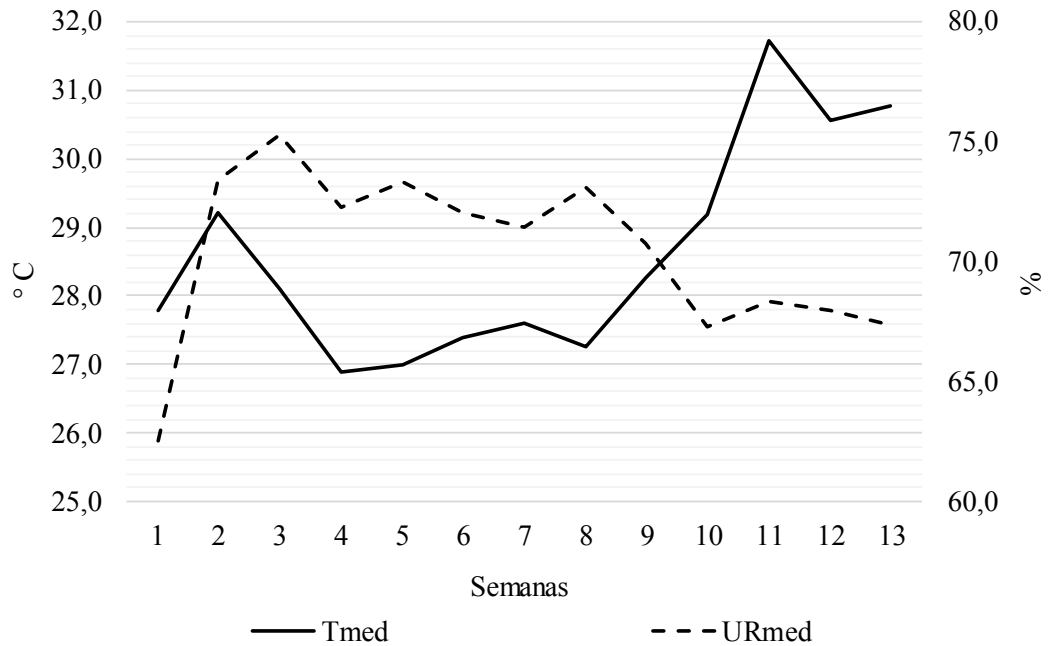
Fonte: O autor.

Figura 3 - Taxas de crescimento populacional calculadas na fase exponencial para as espécies de insetos-praga estudadas na unidade armazenadora 1



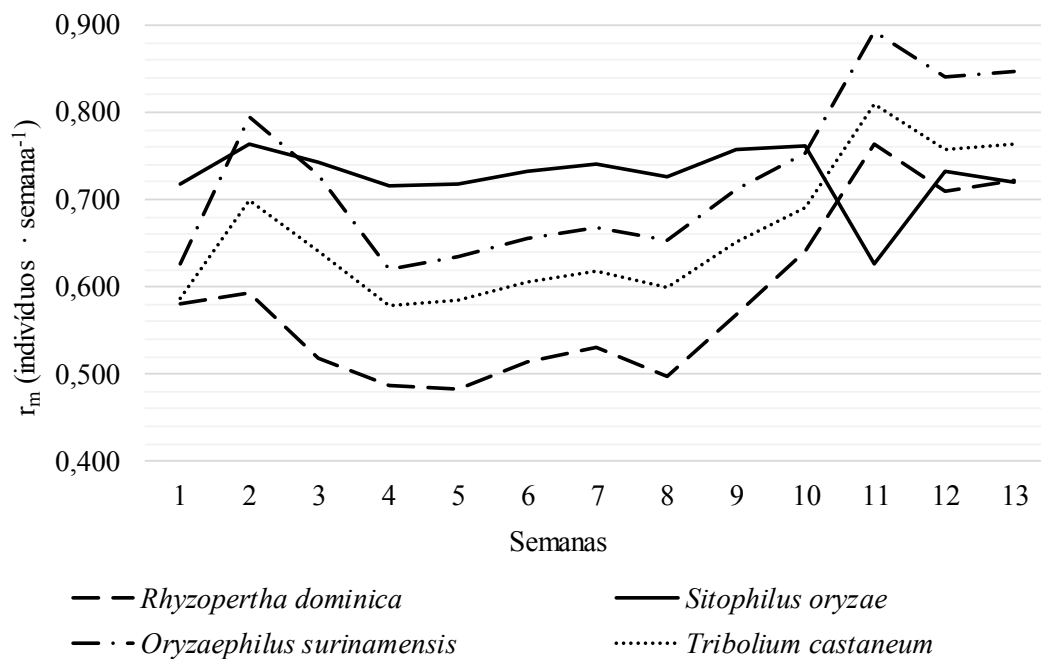
Fonte: O autor.

Figura 4 - Temperatura média semanal da massa de grãos (T_{med}) e umidade relativa intergranular média semanal (UR_{med}) na unidade armazenadora 2



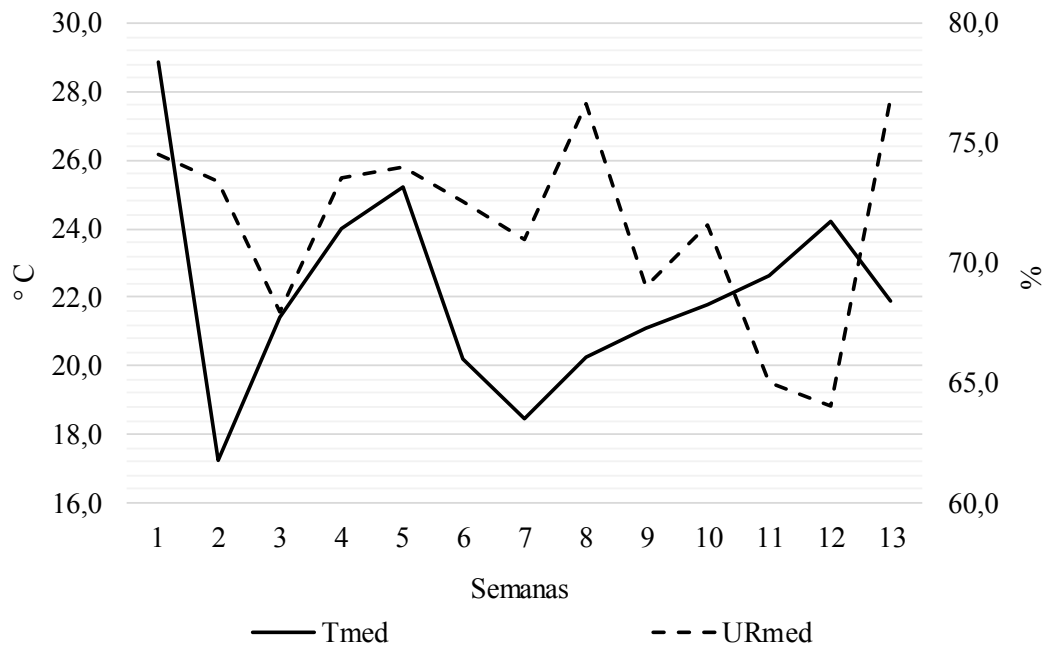
Fonte: O autor.

Figura 5 - Taxas de crescimento populacional calculadas na fase exponencial para as espécies de insetos-praga estudadas na unidade armazenadora 2



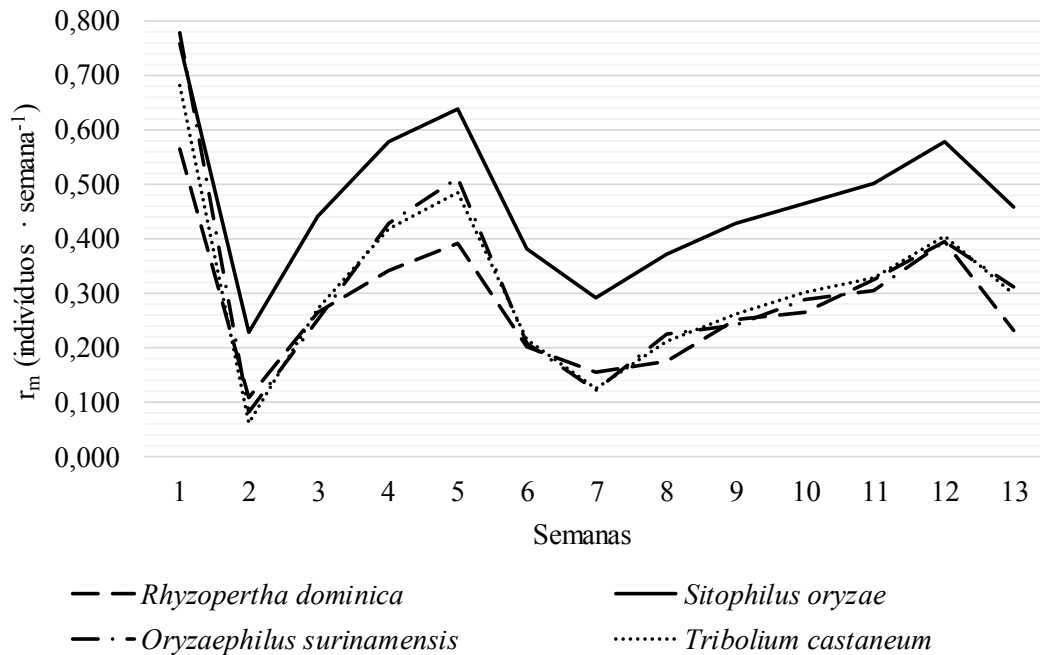
Fonte: O autor.

Figura 6 - Temperatura média semanal da massa de grãos (T_{med}) e umidade relativa intergranular média semanal (UR_{med}) na unidade armazenadora 3



Fonte: O autor.

Figura 7 - Taxas de crescimento populacional calculadas na fase exponencial para as espécies de insetos-praga estudadas na unidade armazenadora 3

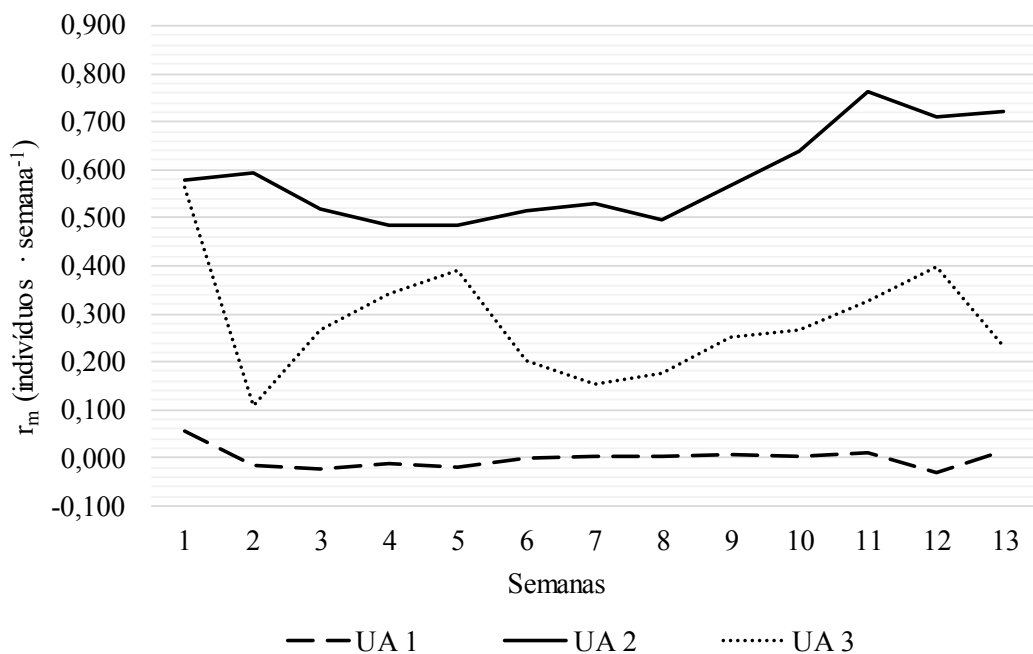


Fonte: O autor.

Observa-se que além de possuírem taxas de crescimento populacional consideravelmente maiores que as da unidade armazenadora 1, as unidades 2 e 3 apresentaram grande variação temporal nestas taxas durante o período estudado, corroboradas pelas grandes variações nas temperaturas médias da massa de grãos e das umidades relativas médias do ar intergranular. Isto pode estar associado às diferenças climáticas destas duas unidades quando comparadas ao clima subtropical da unidade 1, em que há menor amplitude térmica dos fatores ambientais externos. A região em que se localiza a unidade armazenadora 3 apresenta clima tropical de altitude, com variações climáticas irregulares em determinadas épocas do ano, já a região da unidade armazenadora 2 apresenta clima predominantemente equatorial.

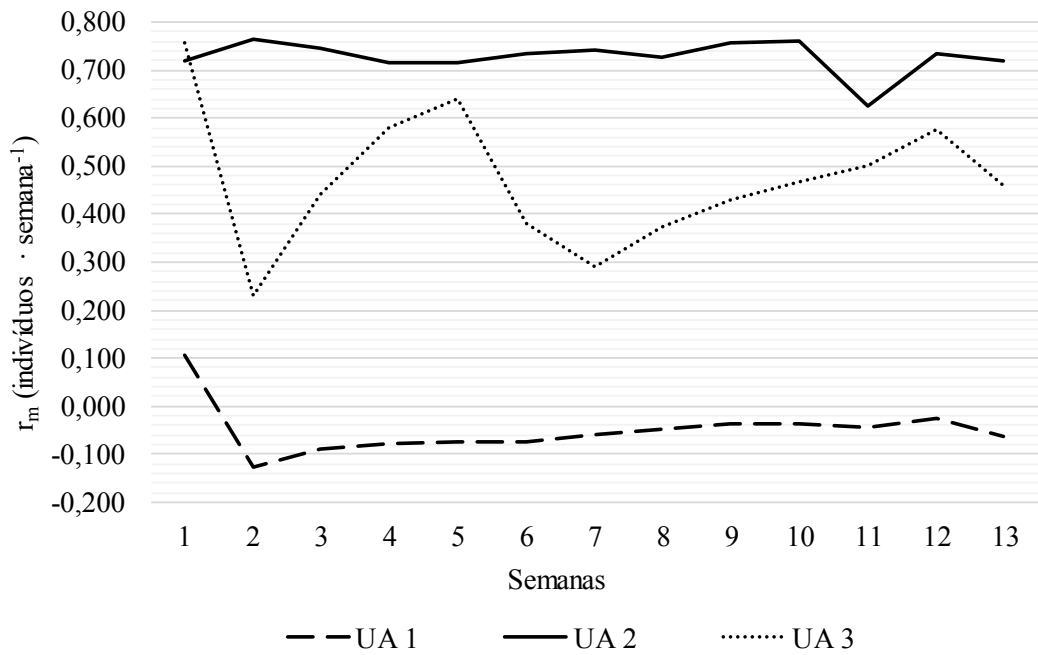
Nas Figuras 8, 9, 10 e 11 foram plotadas as taxas de crescimento (r_m) das populações para cada espécie de inseto-praga: *Rhyzopertha dominica*, *Sitophilus oryzae*, *Oryzaephilus surinamensis* e *Tribolium castaneum*, respectivamente, em cada unidade armazenadora (UA 1, UA 2 e UA 3).

Figura 8 - Taxas de crescimento populacional de *Rhyzopertha dominica* em cada unidade armazenadora



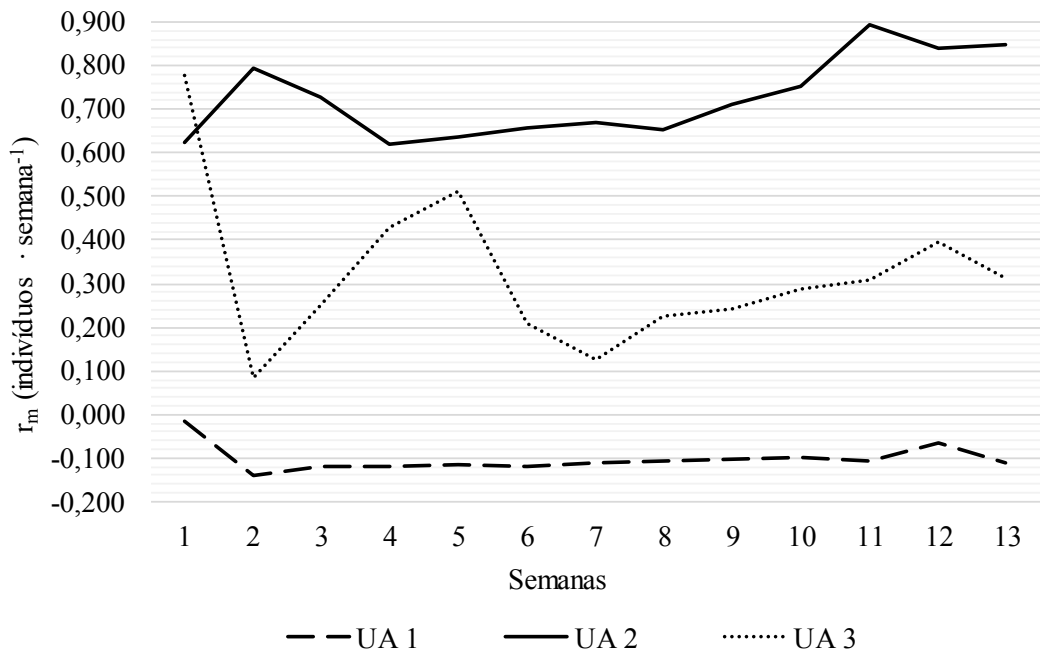
Fonte: O autor.

Figura 9 - Taxas de crescimento populacional de *Sitophilus oryzae* em cada unidade armazenadora



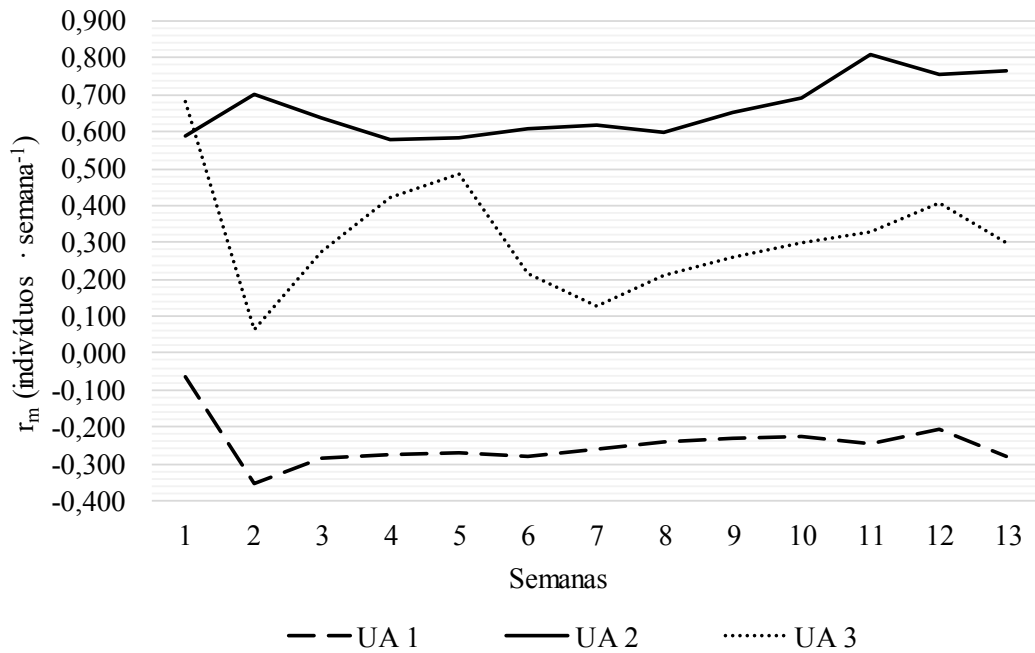
Fonte: O autor.

Figura 10 - Taxas de crescimento populacional de *Oryzaephilus surinamensis* em cada unidade armazenadora



Fonte: O autor.

Figura 11 - Taxas de crescimento populacional de *Tribolium castaneum* em cada unidade armazenadora



Fonte: O autor.

Para todas as espécies, observam-se maiores taxas de crescimento para a unidade armazenadora 2 e as menores taxas para a unidade armazenadora 1. As taxas de crescimento oscilaram entre valores próximos para as três unidades de estudo, em uma mesma espécie. Segundo Sarwar (2015), dentre os insetos primários, fêmeas de *Rhyzoperta dominica* depositam até 500 ovos espalhados livremente pelos grãos, enquanto adultos de *Sitophilus oryzae* colocam, individualmente, até 450 ovos em buracos mastigados em grãos de cereais. Dentre os secundários, adultos de *Oryzaephilus surinamensis* também depositam até 500 ovos espalhados pela massa de grãos infestada, enquanto fêmeas de *Tribolium castaneum* depositam até 1000 ovos. Em ambas as espécies secundárias, os ovos eclodem para produzir larvas que se alimentam externamente de pó e grãos danificados.

Nas Tabelas 7, 8 e 9 estão apresentadas as estimativas de populações para cada espécie de inseto-praga estudada nas unidades armazenadoras 1, 2 e 3, respectivamente. A estimativa foi feita considerando uma população inicial de 2 indivíduos adultos por quilograma de amostra representativa do silo no início de cada semana. As estimativas foram feitas para o final de cada semana separadamente, ou seja, a população final estimada ao final das 13 semanas não é cumulativa.

Tabela 7 - Estimativa das populações das espécies de insetos-praga estudadas na massa de grãos no decorrer das semanas para a unidade armazenadora 1

Semana	<i>Rhyzopertha</i>	<i>Sitophilus</i>	<i>Oryzaephilus</i>	<i>Tribolium</i>
	<i>dominica</i>	<i>oryzae</i>	<i>surinamensis</i>	<i>castaneum</i>
População (indivíduos · kg ⁻¹)				
1	2	2	2	2
2	2	2	2	1
3	2	2	1	1
4	2	1	1	1
5	2	1	1	1
6	2	1	1	0
7	2	1	1	0
8	2	1	1	0
9	2	1	1	0
10	2	1	1	0
11	2	1	1	0
12	1	1	1	0
13	2	1	0	0

Fonte: O autor.

Tabela 8 - Estimativa das populações das espécies de insetos-praga estudadas na massa de grãos no decorrer das semanas para a unidade armazenadora 2

Semana	<i>Rhyzopertha</i>	<i>Sitophilus</i>	<i>Oryzaephilus</i>	<i>Tribolium</i>
	<i>dominica</i>	<i>oryzae</i>	<i>surinamensis</i>	<i>castaneum</i>
População (indivíduos · kg ⁻¹)				
1	4	4	4	4
2	7	9	10	8
3	9	19	18	14
4	14	35	24	20
5	22	72	48	37
6	44	162	102	76
7	82	356	215	151
8	107	670	371	241
9	333	1813	1201	705
10	1211	4083	3749	1987
11	8881	1981	36800	14637
12	9868	13250	48121	17736
13	24126	23168	121163	41348

Fonte: O autor.

Tabela 9 - Estimativa das populações das espécies de insetos-praga estudadas na massa de grãos no decorrer das semanas para a unidade armazenadora 3

Semana	<i>Rhyzopertha</i>	<i>Sitophilus</i>	<i>Oryzaephilus</i>	<i>Tribolium</i>
	<i>dominica</i>	<i>oryzae</i>	<i>surinamensis</i>	<i>castaneum</i>
População (indivíduos · kg ⁻¹)				
1	4	4	4	4
2	2	3	2	2
3	4	8	4	5
4	8	20	11	11
5	14	49	26	23
6	7	20	7	7
7	6	15	5	5
8	8	40	12	11
9	19	95	18	21
10	28	211	35	40
11	71	495	59	73
12	234	2063	231	261
13	41	783	117	96

Fonte: O autor.

Unidades armazenadoras que apresentaram as maiores taxas de crescimento populacional calculadas, apresentaram, conseqüentemente, as maiores populações de insetos-praga ao longo do tempo, como é o caso das unidades armazenadoras 2 e 3. Na unidade armazenadora 1 devido as condições psicométricas do ar intergranular, a população de insetos manteve-se praticamente constante, com decréscimos da população em condições menos favoráveis ao desenvolvimento desses insetos-praga.

Segundo Silva et al. (2006), as populações de insetos-praga em uma amostra representativa da massa de grãos são limitadas pela quantidade de alimento disponível. Os mesmos autores, analisando o crescimento populacional de *Sitophilus zeamais* em trigo armazenado, constataram, a 28 °C, uma população final de 2430,8 insetos ao final de 90 dias de armazenagem, com população inicial de 1,3 inseto adulto por quilograma de trigo. Esta população final aumentou com o nível de infestação inicial, atingindo 9603,4 insetos por quilograma de trigo a partir de 9,3 insetos iniciais, quase quatro vezes mais que para a população

inicial de 1,3 insetos por quilograma, sendo que a quantidade de alimento não foi um fator limitante nos níveis de infestação estudados.

No presente estudo, em condições favoráveis de crescimento, a população torna-se extremamente grande para a quantidade de produto considerada na amostra (1 quilograma), entretanto, tal população elevada deve-se ao modelo matemático exponencial para estimativa da taxa de crescimento destas populações, que não prevê a disponibilidade de alimento como fator limitante. O modelo adotado foi validado pelos autores com ajuste satisfatório aos dados reais analisados (DRISCOLL; LONGSTAFF; BECKETT, 2000).

Longstaff (1981) estudou o crescimento populacional de *Sitophilus oryzae* em trigo com 14% de umidade, infestado com 109,1 insetos por quilograma. Para 27 °C, seu modelo predisse uma população equivalente a 87903,8 insetos por quilograma de trigo em 90 dias de armazenagem (SILVA et al, 2006).

Modelos preditivos diferentes de um mesmo sistema, inevitavelmente, não fornecem valores idênticos, mas razoavelmente aproximados; entretanto, os resultados encontrados por outros autores se baseiam em sistemas diferentes entre si e diferentes do sistema adotado neste estudo. As diferenças estão nas espécies estudadas, no tipo e umidade do grão e no modelo de previsão adotado. Portanto, o modelo apresentado descreve perfeitamente a essência do crescimento populacional em relação ao efeito da temperatura e da umidade relativa intergranular.

Sugere-se utilizar dados de sensores digitais de umidade relativa intergranular, quando presentes nas unidades armazenadoras, para a geração de gráficos sinóticos com condições favoráveis ou não ao desenvolvimento de insetos-praga, para a tomada de decisão no emprego da aeração na massa de grãos. O presente estudo pode servir de base para outras pesquisas sobre modelagem e simulação da taxa de crescimento de fungos em grãos armazenados, por exemplo, que pode complementar a adoção das boas práticas de gestão em sistemas de aeração.

4. CONCLUSÕES

Para todas as espécies de insetos-praga estudadas, foram observados maiores potenciais de taxas de crescimento populacional na unidade armazenadora 2; e as menores taxas para a unidade armazenadora 1. A unidade armazenadora 3, apresentou taxas de crescimento intermediárias entre estas duas unidades.

As unidades armazenadoras 2 e 3 apresentaram grande variação temporal nas taxas de crescimento durante o período analisado, quando comparadas com a unidade armazenadora 1.

As taxas de crescimento para a unidade armazenadora 1 apresentaram, em sua grande maioria, valores negativos, ou seja, as condições de sobrevivência e reprodução dos insetos-praga estudados estavam abaixo das mínimas necessárias para seu desenvolvimento.

Unidades armazenadoras que apresentaram maiores potenciais para taxas de crescimento populacional, estão sujeitas aos maiores riscos de níveis elevados de populações de insetos-praga ao longo do tempo.

Paras as condições adotadas, o modelo apresentado descreve perfeitamente a essência do crescimento populacional em relação ao efeito da temperatura e da umidade relativa do ar intergranular. O estudo conduzido é indicativo do potencial do emprego da previsão da taxa de crescimento populacional de insetos-praga visando a adoção de práticas de gestão em sistemas de aeração.

5. REFERÊNCIAS

- AGUIAR, R. W. S.; BRITO, D. R.; OOTANI, M. A.; FIDELIS, R. R.; PELUZIO, J. N. Efeito do dióxido de carbono, temperatura e armazenamento sobre sementes de soja e microflora associada. **Revista Ciência Agronômica**, v. 43, p. 554-560, 2012.
- BATTA, Y. A.; KAVALLIERATOS, N. G. The use of entomopathogenic fungi for the control of stored-grain insects. **International Journal of Pest Management** v. 64, n. 1, p. 77–87, 2018.
- BINELO, M. O.; FAORO, V.; KATHATOURIAN, O. A.; ZIGANSHIN, B. Airflow simulation and inlet pressure profile optimization of a grain storage bin aeration system. **Computers and Electronics in Agriculture**, v. 164, p. 104-923, 2019.
- CONAB – Companhia Nacional de Abastecimento. 12º levantamento da safra 2018/19 **Acompanhamento da safra brasileira de grãos**. Brasília, v. 6, n. 12, 2019, 47 p.
- DELHALLE, L.; DAUBE, G.; ADOLPHE, Y.; CREVECOEUR, S.; CLINQUART, A. Les modèles de croissance en microbiologie prévisionnelle pour la maîtrise de la sécurité des aliments (synthèse bibliographique). **Biotechnologie, Agronomie Société et Environnement**, v. 16, n. 3, p. 369-381, 2012.
- DRISCOLL, R.; LONGSTAFF, B. C.; BECKETT, S. Prediction of insect populations in grain storage. **Journal of Stored Products Research** v. 36, n. 2, p. 131-151, 2000.
- FERREIRA, T. C.; NASCIMENTO, D. M.; SILVA, E. O. Métodos alternativos para controle de insetos-praga em sementes. **Amazon Journal of Agricultural and Environmental Sciences** v. 60, n. 1, p. 112-119, 2017.
- HALL, B. G.; ACAR, H.; NANDIPATI, A.; BARLOW, M. Growth rates made easy. **Molecular Biology and Evolution**, v. 31, n. 1, p. 232-238, 2014.
- HIMANEN, S. H.; BUI, N. T. T.; MAJA, M. M.; HOLOPAINEN, H. J. Utilizing associational resistance for biocontrol: impacted by temperature, supported by indirect defence BMC. **Ecology**, v. 15, n. 16, p. 16, 2015.
- HUANG, Z.; CHEN, L.; WANG, S. Computer simulation of radio frequency selective heating of insects in soybeans. **International Journal of Heat and Mass Transfer**, v. 90, p. 406-417, 2015.
- IBGE - Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística. **Divisão regional do Brasil em regiões geográficas imediatas e regiões geográficas intermediárias**. Rio de Janeiro: IBGE, 2017. 82 p.
- JAYAKUMAR, M.; ARIVOLI, S.; RAVEEN, R.; TENNYSON, S. Repellent activity and fumigant toxicity of a few plant oils against the adult rice weevil *Sitophilus oryzae* Linnaeus 1763 (Coleoptera: Curculionidae). **Journal of Entomology and Zoology Studies**, v. 5, n. 2, p. 324-335, 2017.

KHATCHATOURIAN, O. A.; BINELO, M. O.; NEUTZLING, R.; FAORO, V. Models to predict the thermal state of rice stored in aerated vertical silos. **Biosystems Engineering**, v. 161, p. 14-23, 2017.

LONGSTAFF, B. C. The manipulation of the population growth of a pest species: an analytical approach. **Journal of Applied Ecology**, v. 18, n. 6, p. 727-736, 1981.

LOPES, D. C.; MARTINS, J. H.; MONTEIRO, P. M. B.; FILHO, A. F. L. Efeitos de diferentes estratégias de controle no ambiente de armazenamento de grãos em regiões tropicais e subtropicais. **Revista Ceres**, v. 57, n. 2, p. 157-167, 2010.

LORINI, I. Perdas anuais em grãos armazenados chegam a 10% da produção nacional. **Revista Visão Agrícola**, n. 13, p. 127-129, jul.-dez. 2015.

NAVARRO, S.; NOYES, R. T.; CASADA, M.; ARTHUR, F. H. Aeration of grains. In: HAGSTRUM, D. W., PHILLIPS, T. W., CUPERUS, G. (Eds.). **Stored Product Protection**, Kansas State Research and Extension as Publication, 2012. Cap. 11, p. 121-134.

NEME, K.; MOHAMMED, A. Mycotoxin occurrence in grains and the role of postharvest management as a mitigation strategies. A review. **Food Control**, v. 78, p. 412-425, 2017.

PEIXOTO, M. G.; BACCI, L.; BLANK, A. F.; ARAÚJO, A. P. A.; ALVES, P. B.; SILVA, J. H. S.; SANTOS, A. A.; OLIVEIRA, A. P.; COSTA, A. S.; ARRIGONI-BLANK, M. F. Toxicity and repellency of essential oils of *Lippia alba* chemotypes and their major monoterpenes against stored grain insects. **Industrial Crops and Products**, v. 71, p. 31-36, 2015.

PROCER. **Sistema de gerenciamento CERES**. Disponível em: <www.procer.com.br>. Acesso em: 16 set. 2019.

RIUDAVENTS, J. C.; CASTANE, O.; ALOMA, M. J.; PONS, R. The use of carbon dioxide at high pressure to control nine stored product pests. **Annual Review of Entomology**, v. 57, p. 405-424, 2010.

SARWAR, M. Distinguishing and controlling insect pests of stored foods for improving quality and safety. **American Journal of Marketing Research**, v. 1, n. 3, p. 201-207, 2015.

SCHLIPALIUS, D. I.; TUCK, A. G.; REJESWARAN, J.; NGUYEN, T.; RAMANDEEP, K.; SABTHARISHI, S.; BARRERO, R.; NAYAK, M.; EBERT, P. R. Variant linkage analysis using de *Novo* transcriptome sequencing identifies a conserved phosphine resistance gene in insects. **Genetics**, v. 209, n. 1, p. 281-290, 2018.

SCHWERTMAN, N. C.; OWENS, M. A.; ADNAN, R. A simple more general boxplot method for identifying outliers. **Computational Statistics & Data Analysis**, v. 47, n. 1, p. 165-174, 2004.

SHARMA, K. K.; SINGH, U. S.; SHARMA, P.; KUMAR, A. SHARMA, L. Seed treatments for sustainable agriculture: a review. **Journal of Applied and Natural Science**, v. 7, n. 1, p. 521-539, 2015.

SILVA, A. D.; FARONI, L. R. D. A.; GUEDES, R. N.; MARTINS, J. H.; PIMENTEL, M. A. Modelos analíticos do crescimento populacional de *Sitophilus zeamais* em trigo armazenado. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, v. 10, p. 155-161, 2006.

SILVA, F. F.; ESCOVAR, R. L.; DIAS, N. P.; BERTAN, L. C. Pontos críticos em unidades armazenadoras de arroz para ocorrência de insetos. **Revista Engenharia na Agricultura**, v. 25, n. 3, p. 223–229, 2017.

THOMPSON, T. L.; PEART, R. M.; FOSTER, G. H. Mathematical simulation of corn drying - a new model. **Transactions of ASAE**, v.11, p. 582-586, 1968.

VIEBRANTZ, P. C. **Armazenagem de grãos de milho infestados com *Sitophilus zeamais* e *Tribolium castaneum* em sistema hermético e convencional**. 2014. Dissertação (Mestrado em Fitotecnia) – Faculdade de Agronomia, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2014.

WALTER, G. H.; CHANDRASEKARAN, S.; COLLINS, P. J.; JAGADEESAN, R.; MOHANKUMAR, S.; ALAGUSUNDARAM, K.; EBERT, P. R.; DAGLISH, G. J.; NAYAK, M. K.; MOHAN, S. CHITRA S.; CHADDA, I. C.; RAJAGOPAL, A.; REID, R.; SUBRAMANIAN, S. The grand challenge of food security - general lessons from a comprehensive approach to protecting stored grain from insect pests in Australia and India. **Indian Journal of Entomology**, v. 78, n. especial, p. 7, 2016.

WERMELINGER, E. D.; FERREIRA, A. P. Métodos de controle de insetos vetores: um estudo das classificações. **Revista Pan-Amaz Saúde**, v. 4, n. 3, p. 49-54, 2013.

WIEST, R. **Crescimento populacional de *Rhopalosiphum padi* (Linnaeus, 1758) (Hemiptera: Aphididae) em trigo: uma aproximação por simulação**. 2019. Tese (Doutorado em Agronomia) – Faculdade de Agronomia e Medicina Veterinária, Universidade de Passo Fundo, Passo Fundo, RS, 2019.