

DANIEL ANDRÉS CASTRO CERÓN

**TOXICIDADE DO ISOTIOCIANATO DE ALILO COM E SEM
RECIRCULAÇÃO NO CONTROLE DE INSETOS EM MILHO ARMAZENADO**

Dissertação apresentada à Universidade Federal de Viçosa como parte das exigências do Programa de Pós-Graduação em Engenharia Agrícola, para obtenção do título *de Magister Scientiae*.

Orientador: Ernandes Rodrigues de Alencar

Coorientadora: Lêda Rita D'Antonino Faroni

**VIÇOSA - MINAS GERAIS
2022**

**Ficha catalográfica elaborada pela Biblioteca Central da Universidade
Federal de Viçosa - Campus Viçosa**

T

C355t
2022
Castro Cerón, Daniel Andrés, 1993-
Toxicidade do isotiocianato de alilo com e sem recirculação
no controle de insetos em milho armazenado / Daniel Andrés
Castro Cerón. – Viçosa, MG, 2022.
1 dissertação eletrônica (54 f.): il. (algumas color.).

Orientador: Ernandes Rodrigues de Alencar.
Dissertação (mestrado) - Universidade Federal de Viçosa,
Departamento de Engenharia Agrícola, 2022.
Inclui bibliografia.
DOI: <https://doi.org/10.47328/ufvbbt.2022.370>
Modo de acesso: World Wide Web.

1. Insetos como transmissores de doenças das plantas.
2. Insetos nocivos - Controle. 3. Milho - Doenças e pragas.
4. Essências e óleos essenciais. 5. Isotiocianato de alila. 6.
Sitophilus zeamais. 7. *Ryzophertha dominica*. 8. *Tribolium
castaneum*. I. Alencar, Ernandes Rodrigues de, 1980-.
II. Universidade Federal de Viçosa. Departamento de Engenharia
Agrícola. Programa de Pós-Graduação em Engenharia Agrícola.
III. Título.

CDD 22. ed. 632.7

DANIEL ANDRÉS CASTRO CERÓN

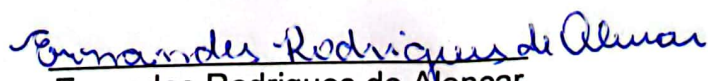
**TOXICIDADE DO ISOTIOCIANATO DE ALILO COM E SEM
RECIRCULAÇÃO NO CONTROLE DE INSETOS EM MILHO ARMAZENADO**

Dissertação apresentada à Universidade Federal de Viçosa como parte das exigências do Programa de Pós-Graduação em Engenharia Agrícola, para obtenção do título de *Magister Scientiae*.

APROVADA: 24 de fevereiro de 2022.

Assentimento:


Daniel Andrés Castro Cerón
Autor


Ernandes Rodrigues de Alencar
Orientador

AGRADECIMENTOS

A Deus pela vida e pelas grandes oportunidades que ela nos oferece diariamente para nos aprimorarmos como pessoas.

À minha mãe Lida Cerón, minha avó Ana Chicunque e toda minha família que são a motivação que me impulsiona a seguir em frente todos os dias e por estarem presentes em todos os momentos com o seu apoio.

Ao Professor Ernandes Rodrigues de Alencar pelo apoio incondicional na realização desta pesquisa, pela motivação e pelo exemplo como professor.

À professora Lêda Rita D'Antonino Faroni que me deu a oportunidade de ingressar no laboratório e me orientou com disciplina no aprendizado sobre armazenamento de grãos.

Ao meu colega Marcus Vinicius pela força e o auxílio prestado para a realização deste trabalho.

A todo o pessoal do laboratório pela disponibilidade, tempo e toda a ajuda que me brindaram para realizar os experimentos; sem vocês não teria sido possível.

Aos meus grandes amigos Jose Morales e Jhon Lopez por se tornarem minha família aqui no Brasil, e pelos bons momentos compartilhados.

À CAPES, Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior, e ao CNPq, Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico, pela bolsa de estudo concedida.

BIOGRAFIA

DANIEL ANDRES CASTRO CERON, filho de Lida Cerón e de Daniel Castro, nasceu em Mocoa no Departamento do Putumayo na Colômbia, no dia 28 de abril de 1993.

Ingressou no curso de Engenharia Agrônômica em 2012 na Universidade de Caldas, em Manizales -Colômbia.

Em fevereiro do 2019 ingressou no estágio no Setor de Armazenamento e Processamento de Produtos Agrícolas do Departamento de Engenharia Agrícola na Universidade Federal de Viçosa, como requisito de prática para finalização do curso.

Graduou-se como Engenheiro agrônomo em novembro do 2019.

Em fevereiro do ano 2020 ingressou no Programa de Pós-Graduação em Engenharia Agrícola, em nível de Mestrado, Área de Concentração em Armazenamento e Processamento de Produtos Agrícolas, na Universidade Federal de Viçosa.

RESUMO

CERON, Daniel Andrés Castro, M.Sc., Universidade Federal de Viçosa, fevereiro de 2022. **Toxicidade do isotiocianato de alilo em sistema de recirculação no controle de insetos em milho armazenado.** Orientador: Ernandes Rodrigues de Alencar. Coorientadora: Lêda Rita D'Antonino Faroni.

O isotiocianato de alilo (AITC) é considerado um fumigante alternativo, destacando-se pela sua alta toxicidade para populações de insetos de grãos armazenados, inclusive em populações de insetos resistentes à fosfina. Entretanto, grande parte dos estudos com AITC são realizados com aplicação direta ou utilizando pequenos volumes de grãos. Além disso, uma das limitações para o uso do AITC é seu baixo coeficiente de difusão, o que dificulta a sua distribuição na massa de grãos. Logo, o presente estudo teve como objetivo determinar a eficácia do AITC aplicado em sistema com recirculação no controle de *Sitophilus zeamais* (Mots. 1855) (Coleoptera: Curculionidae), *Rhyzopertha dominica* (Fabr.) (Coleoptera: Bostrichidae) e *Tribolium castaneum* (Herbst) (Coleoptera: Tenebrionidae) em grãos de milho e caracterizar a qualidade do produto após exposição ao AITC. Nos bioensaios de toxicidade nos sistemas com recirculação e sem recirculação do AITC, foi utilizado um protótipo de PVC com 1,60 m de comprimento e 0,30 m de diâmetro com capacidade estática para 60 kg de grãos de milho. A vazão volumétrica adotada no sistema de recirculação do AITC foi de 27,6 L/min. Para avaliar a toxicidade do AITC em sistemas sem recirculação e com recirculação, insetos adultos de *S. zeamais*, *T. castaneum* e *R. dominica* foram dispostos em diferentes posições da coluna de grãos: i) na base da coluna de grãos (0,0 m); ii) a 0,5 m da base da coluna de grãos; e iii) no topo da coluna de grãos (1,0 m). Foram determinadas as CL₅₀ e CL₉₅, para as diferentes espécies de insetos, em cada posição da coluna de grãos. O tempo de exposição ao AITC adotado foi de 48 h. As concentrações de AITC utilizadas foram 8,33, 12,50, 16,67, 20,83, 25,00, 29,17, 33,33 e 37,50 µL/kg. Determinaram-se a taxa instantânea de crescimento populacional dos insetos e a perda de matéria seca dos grãos 55 dias após a fumigação. Para determinar a qualidade dos grãos o teor de água, a coloração e a condutividade elétrica foram avaliadas. Adotou-se o Delineamento Inteiramente Casualizado, em esquema fatorial de 2 (sistemas de fumigação) x 8 (concentrações

de AITC) x 3 (disposições dos insetos nas colunas), com três repetições. Para *S. zeamais*, no sistema com recirculação, foram estimados valores de CL₅₀ iguais a 17,68, 18,20 e 18,95 µL/kg, na base, a 0,5 m da base e no topo da coluna de grãos (1,0 m), respectivamente. Para *R. dominica*, os valores de CL₅₀ variaram entre 15,54 e 18,60 µL/kg, enquanto que as CL₉₅ permaneceram entre 26,32 e 32,01 µL/kg. Com relação a *T. castaneum*, os valores de CL₅₀ e CL₉₅ variaram entre 27,72 a 31,37 µL/kg e 49,13 a 60,36 µL/kg, respectivamente. No sistema sem recirculação, foi verificada mortalidade dos insetos somente na base da coluna de grãos, sendo igual a 100%, em todas as concentrações adotadas. Quanto à taxa instantânea de crescimento populacional verificou-se redução à medida que se elevou a concentração do AITC, nas diferentes posições da coluna de grãos, quando se adotou o sistema com recirculação, para *S. zeamais* e *R. dominica*. Tendência semelhante foi verificada para a perda de matéria seca nos grãos. Nas condições adotadas no presente estudo, o AITC não alterou a qualidade dos grãos de milho. De acordo com os resultados obtidos, é possível concluir que a aplicação do AITC em sistema com recirculação contribui para o controle de *S. zeamais*, *T. castaneum* e *R. dominica* de forma uniforme na massa de grãos de milho, sem alterar a qualidade do produto.

Palavras-chave: AITC. Óleos essenciais. Grãos armazenados. Inseticidas botânicos.

ABSTRACT

CERON, Daniel Andrés Castro, M.Sc., Universidade Federal de Viçosa, February 2022. **Toxicity of allyl isothiocyanate with and without recirculation in insect control in stored corn.** Advisor: Ernandes Rodrigues de Alencar. Co-advisor: Lêda Rita D'Antonino Faroni.

Allyl isothiocyanate (AITC) is considered an alternative fumigant, standing out for its high toxicity to stored grain insect populations, including phosphine resistant populations of insects. However, most studies with AITC are performed with direct application or using small volumes of grains. In addition, one of the limitations for the use of AITC is its low diffusion coefficient, which makes it difficult to distribute it in the grain mass. Therefore, the present study aimed to determine the effectiveness of AITC applied in a system with recirculation in the control of *Sitophilus zeamais* (Mots. 1855) (Coleoptera: Curculionidae), *Rhizopertha dominica* (Fabr.) (Coleoptera: Bostrichidae) and *Tribolium castaneum* (Herbst) (Coleoptera: Tenebrionidae) in corn grains and to characterize the quality of the product after exposure to AITC. In the toxicity bioassays in systems with recirculation and without recirculation of the AITC, a PVC prototype with 1.60 m in length and 0.30 m in diameter with a static capacity of 60 kg of corn grains was used. The volumetric flow rate adopted in the AITC recirculation system was 27.6 L/min. For evaluate the toxicity of AITC in systems without recirculation and with recirculation, adult insects of *S. zeamais*, *R. dominica* and *T. castaneum* were placed in different positions of the grain column: i) at the base of the grain column (0.0 m); ii) 0.5 m from the base of the grain column; and iii) at the top of the grain column (1.0 m). The LD₅₀ and LD₉₅ were determined for the different insect species at each position of the grain column. The AITC exposure time adopted was 48 h. The AITC concentrations used were 8.33, 12.50, 16.67, 20.83, 25.00, 29.17, 33.33 and 37.50 µL/kg. The instantaneous rate of population growth and dry matter loss in grains after 55 days after grain fumigation were determined. To determine the quality of the grains, the moisture content, color and electrical conductivity were evaluated. A completely randomized design was adopted, in a 2X8X3 factorial scheme, with three replications. For *S. zeamais* in the recirculation system, LD₅₀ values equal to 17.68, 18.20 and 18.95 µL/kg were estimated at the base, 0.5 m from the base and at the top of the grain column (1.0 m), respectively.

For *R. dominica*, the LD₅₀ values ranged between 15.54 and 18.60 µL/kg, while the LD₉₅ remained between 26.32 and 32.01 µL/kg. Regarding *T. castaneum*, the LD₅₀ and LD₉₅ values ranged between 27.72 - 31.37 µL/kg and 49.13 - 60.36 µL/kg, respectively. In the system without recirculation, insect mortality was verified only at the base of the grain column, being equal to 100%, at all concentrations adopted. As for instantaneous rate of population growth, there was a reduction as the AITC concentration was increased, in the different positions of the grain column, when the system with recirculation was adopted, for *S. zeamais* and *R. dominica*. A similar trend was observed for the dry matter loss in the grains. Under the conditions adopted in the present study, the AITC did not change the quality of the corn. According to the results obtained, it is possible to conclude that the application of AITC in a system with recirculation contributes to the control of *S. zeamais*, *T. castaneum* and *R. dominica* in a uniform way in the corn grain mass and does not change the quality of the product.

Keywords: AITC. Essential oils. Stored grains. Botanical Insecticide.

SUMÁRIO

INTRODUÇÃO GERAL.....	10
REFERENCIAS BIBLIOGRAFICAS.....	14
TOXICIDADE DO ISOTIOCIANATO DE ALILO EM SISTEMA DE RECIRCULAÇÃO NO CONTROLE <i>Sitophilus zeamais</i> , <i>Rhyzopertha dominica</i> e <i>Tribolium castaneum</i> EM GRÃOS DE MILHO.....	21
RESUMO.....	21
ABSTRACT.....	22
1. INTRODUÇÃO.....	23
2. MATERIAL E MÉTODOS.....	25
2.1 Criação dos Insetos.....	25
2.2. Isotiocianato de alilo.....	25
2.3. Avaliação da toxicidade do AITC no controle de <i>S. zeamais</i> , <i>T. castaneum</i> e <i>R.</i> <i>dominica</i> em sistemas sem e com recirculação.....	26
2.4 Taxa instantânea de crescimento populacional (ri) de <i>S. zeamais</i> , <i>T.</i> <i>castaneum</i> e <i>R. dominica</i> em sistemas sem e com recirculação de AITC.....	28
2.5. Perda de matéria seca nos grãos de milho.....	28
2.6. Qualidade dos grãos de milho expostos ao AITC em sistemas sem e com recirculação.....	29
2.7 Análises estatísticas.....	30
3. RESULTADOS.....	31
4. DISCUSSÃO.....	45
5. CONCLUSÕES.....	48
6. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....	48

INTRODUÇÃO GERAL

O milho é uma das matérias-primas mais importantes do mundo, destacando-se pelo uso na alimentação humana e animal, na produção de etanol, e pela magnitude alcançada na produção mundial, sendo para a safra 2021/2022 estimada em aproximadamente 1,2 bilhões de toneladas (USDA, 2022). Os principais produtores mundiais de grãos de milho são os Estados Unidos, a China e o Brasil (FAO, 2022). De acordo com a estimativa da Companhia Nacional de Abastecimento, a produção de grãos de milho no Brasil na safra 2021/2022 será de aproximadamente 112,3 milhões de toneladas (BRASIL, 2022).

O evidente crescimento populacional nas últimas décadas implica em garantir a disponibilidade de alimentos, como os grãos. Nesse sentido é imprescindível melhorar as condições nas diferentes etapas da cadeia produtiva, desde o plantio até o transporte e o armazenamento, para manter a qualidade e diminuir as perdas causadas por fatores como insetos-praga e microrganismos (LORINI et al., 2015). As perdas verificadas nos grãos armazenados são decorrentes de vários fatores, que comprometem a adequada conservação, sendo um deles as estruturas de armazenamento inadequadas. A falta de sistemas de aeração e de monitoramento de temperatura nas estruturas armazenadoras contribui para o desenvolvimento de insetos praga e microrganismos (LORINI et al., 2015). Em se tratando do milho, as perdas nas etapas pós-colheita variam entre 14 e 36%, sendo que até 10% são causadas por insetos durante o armazenamento (TEFERA, 2012, LÓPEZ-CASTILLO et al., 2018).

A cultura do milho é suscetível ao ataque de diferentes espécies de insetos em sua fase vegetativa no campo, assim como de espécies que infestam os grãos durante o armazenamento. Destacam-se pragas primárias como *Sitophilus granarius* (Linnaeus, 1758) (Coleoptera: Curculionidae), *S. oryzae* (Linnaeus, 1763) (Coleoptera: Curculionidae), e *S. zeamais* (Mots. 1855) (Coleoptera: Curculionidae). Salienta-se que as pragas primárias são capazes de perfurar os grãos e contribuir para a proliferação de pragas secundárias, tais como *Tribolium castaneum* (Herbst) (Coleoptera: Tenebrionidae).

A espécie *S. zeamais* é considerada uma praga cosmopolita, podendo atacar grãos de milho e outros cereais de importância econômica, em regiões tropicais e subtropicais. Apresenta infestação cruzada, ou seja, o inseto pode atacar no campo bem como contaminar os grãos de milho em estruturas de armazenamento (LORINI

et al., 2015; FREITAS et al., 2016). *T. castaneum* pertence a uma família composta por mais de 10.000 espécies, das quais aproximadamente 100 foram associadas a produtos armazenados (SUBRAMANYAM, 1995). Essa espécie, também cosmopolita, é definida como praga secundária, sendo capaz de atacar grãos quebrados e farinhas. Considera-se importante praga de produtos armazenados como cereais, ração animal e outros produtos processados (SUBRAMANYAM, 1995; FARONI E SILVA 2000; PIMENTEL, 2006). Outra espécie de inseto que é importante durante o armazenamento de grãos armazenados é *Rhyzopertha dominica* (Fabr.) (Coleoptera: Bostrychidae). É uma praga primária principalmente de trigo, embora tenha capacidade de infestar outros tipos de grãos como a cevada, triticale, arroz, aveia e milho (LORINI, 2007).

A proliferação dos insetos praga em grãos armazenados, além dos prejuízos diretos nos grãos, como a perda de peso ou alteração do padrão na classificação, a perda de valor nutritivo e de qualidade, também permitem a entrada de microrganismos como ácaros e fungos que contaminam os alimentos (SANTOS, 2006; CASTRO, 2011). No que se refere aos microrganismos, destacam-se as espécies de fungos capazes de produzir micotoxinas, que são substâncias ou metabólitos que podem ser tóxicas para humanos e animais (CASTRO, 2011). Nesse cenário, é de suma importância a adoção de medidas de controle de insetos durante o armazenamento.

O manejo integrado de pragas é uma filosofia de controle de pragas que emprega uma série de métodos de controle com o objetivo de reduzir o uso de pesticidas, de tal forma que estes só serão utilizados quando a densidade dos insetos exceder o nível de controle. As medidas de controle que fazem parte do manejo integrado de pragas podem ser classificadas em: controle legislativo, controle físico, controle químico e biológico (FARONI e SILVA, 2000).

Com relação à aplicabilidade do controle químico para preservação e proteção dos grãos de armazenados, tem-se que o uso de inseticidas pode ser implementado através de diferentes modalidades: pulverização residual, pulverização protetora, nebulização e fumigação ou expurgo (FARONI e SILVA, 2000). Entretanto, tem-se verificado que o uso indiscriminado desses produtos químicos contribui para a seleção de populações de insetos resistentes, o que influencia os custos de aplicação e impacta a saúde do consumidor (DE ASSIS et

al., 2014). As aplicações excessivas também geram diversos problemas como desequilíbrios ambientais, riscos de intoxicações e resíduos tóxicos nos alimentos.

Os inseticidas de contato, do grupo químico dos piretróides e organofosforados, estão entre os poucos produtos registrados para o controle de pragas de grãos armazenados no Brasil. Esses produtos são aplicados no início do armazenamento e apresentam persistência prolongada (FARONI e SILVA, 2000). No que se refere aos fumigantes dos grãos armazenados, poucos produtos são registrados, sendo a maioria deles compostos de fosfina ou de seus precursores como fosfeto de alumínio e fosfeto de magnésio (PIMENTEL et al., 2020). Geralmente, esses compostos são apresentados na forma de pastilhas ou comprimidos, que ao entrar em contato com o ar do ambiente liberam a fosfina.

A fosfina, por sua alta eficácia, tornou-se um dos princípios ativos mais popularmente utilizados no controle de pragas, mas com o passar dos anos a falta de pessoal treinado para sua aplicação e o uso inadequado em armazéns não hermeticos, levaram ao surgimento de populações de pragas resistentes. Este produto carece de toxicidade residual, o que significa que qualquer inseto que sobreviva em uma aplicação incorretamente executada pode reinfestar o produto (CHAUDHRY et al., 2000).

Objetivando-se aumentar a eficácia da fosfina, foi proposta a fumigação em sistema com recirculação. Para contribuir para o transporte e difusão da fosfina em grãos armazenados, um sistema de fumigação chamado J-System (CLF) foi proposto por James Cook, na década de 1980 (NOYES et al., 1999). Este sistema consiste na recirculação da fosfina na massa de grãos, por meio de dutos que conectam a entrada e a saída de ar, em estruturas herméticas de armazenamento. A partir de então, a recirculação da fosfina passou a ser considerada e estudada para o controle de pragas em grãos armazenados em distintas estruturas (BOLAND, 1984; ZAKLADNOY et al., 2012; KALOUDIS et al., 2018; AGRAFIOTI et al., 2020). No entanto, na literatura existem diversos estudos que confirmam a proliferação de populações de insetos que infestam grãos armazenados que já são resistentes à fosfina (BELL, HOLE E EVANS, 1977; PIMENTEL, 2006; PIMENTEL et al., 2009; OPIT et al., 2012; HOLLOWAY et al., 2016).

O problema da resistência dos insetos aos produtos químicos vem sendo estudado há muitas décadas, mas foi nos anos 40 que os relatos se intensificaram concomitantemente ao surgimento dos inseticidas organosintéticos na agricultura.

Na década dos 90, já existiam 540 espécies de pragas resistentes a algum produto químico (PIMENTEL, 2006). Diante da resistência dos insetos aos fumigantes usados no seu controle, especialmente a fosfina, faz-se necessário a busca por métodos alternativos de controle. Uma das alternativas promissoras é o uso de compostos botânicos, como os óleos essenciais. É crescente o número de pesquisas que realizem prospecção de compostos botânicos com efeito inseticida, por serem menos impactantes ao meio ambiente (ISMAN E GRIENEISEN, 2014).

Diversas pesquisas foram realizadas com extratos e óleos essenciais de plantas, que contêm metabólitos secundários ou compostos orgânicos que podem ter propriedades inseticidas. Estrela et al. (2006) avaliaram diferentes modos de aplicação de óleos essenciais para a mortalidade de *S. zeamais*. Os resultados indicaram que a fumigação com o óleo essencial de *Piper aduncum* foi mais efetiva em causar mortalidade de adultos de *S. zeamais* do que os demais tratamentos em que se testou a ação por contato. O óleo essencial de *Pothomorphe umbellata* foi avaliado por Pauliquevis et al. (2015) para o controle de *S. zeamais*. O composto apresentou toxicidade tanto por fumigação quanto por contato, e também apresentou efeito de repelência.

Magalhães et al. (2015) avaliaram a toxicidade dos óleos essenciais de *Croton heliotropiifolius*, *Croton pulegiodorus*, *Myracrodruon urundeuva* e *Ocimum basilicum* sobre populações de *T. castaneum* em milho armazenado. Os resultados mostram efeito inseticida do óleo essencial de *M. urundeuva*, e efeito repelente de todos os óleos essenciais testados. Souza et al. (2016) avaliaram os óleos essenciais de *O. basilicum* L., *C. aurantium* L., *M. spicata* L. e *C. pulegiodorus* no controle de adultos de *R. dominica* em grãos de milho armazenado. Os autores relataram que todos os óleos utilizados apresentaram potencial de utilização para o manejo desta praga. O óleo essencial de *O. basilicum* foi o que apresentou maior toxicidade para os adultos de *T. castaneum*.

O óleo essencial de mostarda e seu composto majoritário (isotiocianato de alilo - AITC) tem sido objeto de estudo para o controle de diferentes fases de insetos de grãos armazenados. Santos et al. (2011) demonstraram o efeito tóxico do óleo essencial de mostarda sobre todos os estágios de *T. castaneum*. Os autores também afirmaram que nenhuma das populações estudadas apresentou resistência ao óleo, e que este pode ser utilizado no manejo integrado desta praga de grãos armazenados. Freitas et al. (2016) avaliaram a toxicidade do AITC no controle de

cinco populações de *S. zeamais*, incluindo uma população resistente a fosfina. As maiores CL₅₀ e CL₉₅, de 2,97 e 6,82 µL/L, respectivamente, foram encontradas para a população resistente à fosfina.

O modo de ação do AITC nos insetos é similar ao da fosfina, atuando nas mitocôndrias e afetando a respiração dos insetos (MANSOUR et al., 2012). A atividade inseticida do AITC interrompe principalmente as funções do complexo mitocondrial IV e de forma secundária do complexo I (MANSOUR et al., 2012; PENG et al., 2014; WU et al., 2014). Freitas et al. (2016) demonstraram que o AITC causa distúrbio no sistema respiratório dos insetos, dependendo de sua concentração. Este composto é amplamente utilizado na indústria alimentícia como agente aromatizante, sendo que sua atividade na conservação de alimentos, inseticida e antimicrobiana também já foi avaliada (ISSHIKI et al., 1992; LUCIANO E HOLLEY, 2009; SANTOS et al., 2011; CLEMENTE et al., 2016). De acordo com Dhingra et al. (2004), o AITC foi classificado pela Food and Drug Administration (FDA) dos EUA como um composto “Geralmente Considerado como Seguro” ou pela sigla em inglês GRAS.

Apesar do potencial do uso do AITC para o controle de insetos de grãos armazenados, o coeficiente de difusão desse composto é considerado baixo, quando comparado com os da fosfina e do CO₂, o que dificulta a sua distribuição na massa de grãos (MILLS et al., 2000; SHUNMUGAM et al., 2005; PRATES et al., 2019). Nesse contexto, a adoção do sistema de recirculação pode ser uma medida importante a ser adotada, no intuito de melhorar a distribuição do AITC na massa de grãos. Consequentemente, o controle dos insetos na massa de grãos poderá ser intensificado.

Diante do exposto, objetivou-se com o presente estudo determinar a viabilidade da adoção da recirculação do AITC no controle de *S. zeamais*, *R. dominica* e *T. castaneum* em grãos de milho e verificar possíveis alterações na qualidade do produto.

REFERENCIAS BIBLIOGRAFICAS

AGRAFIOTI, P., KALOUDIS, E., BANTAS, S., SOTIROUDAS, V., ATHANASSIOU, C. G. Modeling the distribution of phosphine and insect mortality in cylindrical grain

silos with Computational Fluid Dynamics: Validation with field trials. **Computers and Electronics in Agriculture**, v. 173, p. 105383, 2020

BELL, C. H.; HOLE, B. D.; EVANS, P. H. The occurrence of resistance to phosphine in adult and egg stages of strains of *Rhyzopertha dominica* (F.) (Coleoptera: Bostrichidae). **Journal of Stored Products Research**, v. 13, p. 91–94, 1 jun. 1977.

BOLAND, F. B. **Phosphine fumigations in silo bins**. In: RIPP, B. E. **Developments in Agricultural Engineering**, p. 425–430, 1984.

BRASIL, CONAB - **Companhia Nacional de Abastecimento. Acompanhamento da safra brasileira** - Boletim da safra de grãos, Disponível em: <https://www.conab.gov.br/info-agro/safras/graos> Acesso em 14 de fevereiro 2022.

CASTRO, Fabiane Lucy Ferreira. **Interação entre fungos toxigênicos (*Aspergillus flavus* e *Fusarium verticillioides*) e carunchos (*Sitophilus zeamais*) em amostras de grãos de milho**. 2011. Tese de Doutorado. Universidade de São Paulo.

CHAUDHRY, M. Q. Phosphine resistance. **Pesticide Outlook**, v. 11, p. 88–91, 2000.

CLEMENTE, I., AZNAR, M., SILVA, F., NERÍN, C. Antimicrobial properties and mode of action of mustard and cinnamon essential oils and their combination against foodborne bacteria. **Innovative Food Science & Emerging Technologies**, v. 36, p. 26–33, 1 ago. 2016.

ASSIS de C. A. F., SILVA da J. P. J., QUEIROGA, V. D. P., FIGUEIREDO N. A., CÁRDENAS O. N., ROJAS, A. B. G. Eficiência de extractos vegetales como insecticida sobre *Sitophilus zeamais* en granos de maíz almacenados. **Revista Ciencias Técnicas Agropecuarias**, v. 23, p. 57–62, 2014.

DHINGRA, O.D.; COSTA, M.L.N.; SILVA, G.J.; MIZUBUTI, E.S.G. Essential oil of mustard to control *Rhizoctonia solani* seedling damping off and seedling blight in nursery. **Fitopatologia Brasileira**, v.29, p.683–686, 2004

ESTRELA, J.; FAZOLIN, M.; CATANI, V. Toxicidade de óleos essenciais de *Piper aduncum* e *Piper hispidinervum* em *Sitophilus zeamais*. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, v. 41, p. 217–222, 2006.

FARONI, L. R. A.; SILVA, J. S. Manejo de pragas no ecossistema de grãos armazenados. **JS SILVA. Secagem e armazenagem de produtos agrícolas. 2nd ed. Viçosa: Aprenda Fácil**, p. 371–406, 2008.

FREITAS, R. C. P., FARONI, L. R. D. A., HADDI, K., JUMBO, L. O. V., OLIVEIRA, E. E. Allyl isothiocyanate actions on populations of *Sitophilus zeamais* resistant to phosphine: Toxicity, emergence inhibition and repellency. **Journal of Stored Products Research**, v. 69, p. 257–264, 2016.

FOOD AND AGRICULTURE ORGANIZATION OF THE UNITED NATIONS. (2022). Faostat. Disponível em <https://www.fao.org/faostat/en/#data>. Acesso em 10 fev. 2022.

HOLLOWAY, J. C., FALK, M. G., EMERY, R. N., COLLINS, P. J., NAYAK, M. K. . Resistance to phosphine in *Sitophilus oryzae* in Australia: A national analysis of trends and frequencies over time and geographical spread. **Journal of Stored Products Research**, v. 69, p. 129–137, 1 out. 2016.

ISMAN, M. B., GRIENEISEN, M. L. Botanical insecticide research: many publications, limited useful data. **Trends in plant science**, v. 19, p. 140–145, 2014.

ISSHIKI, K., TOKUOKA, K., MORI, R., CHIBA, S. Preliminary Examination of Allyl Isothiocyanate Vapor for Food Preservation. **Bioscience, Biotechnology, and Biochemistry**, v. 56, p. 1476–1477, 1992.

KALOUDIS, E., BANTAS, S., ATHANASSIOU, C. G., AGRAFIOTI, P., SOTIROUDAS, V. Modeling the distribution of phosphine in cylindrical grain silos with CFD methods for precision fumigation. In: **Proceedings of the 12th**

International Working Conference for Stored Product Protection, Berlin, Germany. 2018. p. 7-11.

LÓPEZ-CASTILLO, L. M., SILVA-FERNÁNDEZ, S. E., WINKLER, R., BERGVINSON, D. J., ARNASON, J. T., GARCÍA-LARA, S. Postharvest insect resistance in maize. **Journal of Stored Products Research**, v. 77, p. 66–76, 2018.

LORINI, I. Manual técnico para o manejo integrado de pragas de grãos de cereais armazenados. **Embrapa Trigo-Documentos (INFOTECA-E)**, 2007.

LORINI, I., KRZYZANOWSKI, F. C., FRANÇA-NETO, J. B., HENNING, A. A., HENNING, F. A. **Manejo Integrado de Pragas de Grãos e Sementes Armazenadas**. CEP, v. 86001, p. 970, 2015.

LUCIANO, F. B.; HOLLEY, R. A. Enzymatic inhibition by allyl isothiocyanate and factors affecting its antimicrobial action against *Escherichia coli* O157:H7. **International Journal of Food Microbiology**, v. 131, p. 240–245, 2009.

MAGALHÃES, C. R. I., OLIVEIRA, C. R. F., MATOS, C. H. C., BRITO, S. S. S., MAGALHÃES, T. A., FERRAZ, M. S. S. Potencial inseticida de óleos essenciais sobre *Tribolium castaneum* em milho armazenado. **Revista Brasileira de Plantas Mediciniais**, v. 17, p. 1150–1158, 2015.

MANSOUR, E. E., MI, F., ZHANG, G., JIUGAO, X., WANG, Y., KARGBO, A. Effect of allyl isothiocyanate on *Sitophilus oryzae*, *Tribolium confusum* and *Plodia interpunctella*: Toxicity and effect on insect mitochondria. **Crop Protection**, v. 33, p. 40–51, 2012.

MILLS, K. A., WONTNER-SMITH, T. J., BARTLETT, D. I., HARRAL, B. B. A new positive pressure system for combating dilution during phosphine fumigation of bulk grain. In: **Proceeding International Conference Controlled Atmosphere and Fumigation in**. p. 405-420, 2000.

NOYES, R. T., PHILLIPS, T. W., CUPERUS, G. W., BONJOUR, E. L., JIN, Z., LIANG, Q., ... & GUAN, L. Advances in recirculation fumigation technology in the USA In: **Proceedings of the 7th International Working Conference on Stored-product Protection**. p. 454-461. 1999.

OPIT, G. P., PHILLIPS, T. W., AIKINS, M. J., HASAN, M. M. Phosphine resistance in *Tribolium castaneum* and *Rhyzopertha dominica* from stored wheat in Oklahoma. **Journal of Economic Entomology**, v. 105, p. 1107–1114, 2012.

PAULIQUEVIS, C. F., FAVERO, S. Atividade insetistática do óleo essencial de *Pothomorphe umbellata* em *Sitophilus zeamais*. **Rev. bras. eng. agrícola ambiental**. Campina Grande, v. 19, p. 1192-1196, 2015.

PENG, C., ZHAO, S. Q., ZHANG, J., HUANG, G. Y., CHEN, L. Y., ZHAO, F. Y. Chemical composition, antimicrobial property and microencapsulation of Mustard (*Sinapis alba*) seed essential oil by complex coacervation. **Food Chemistry**, v. 165, p. 560–568, 2014.

PIMENTEL, M., de OLIVEIRA, I. R., NORMANDO, C., de OLIVEIRA, C. L. Inseticidas recomendados, limites de resíduos e indicações técnicas para aplicação no controle de pragas durante o armazenamento de grãos de milho. **Embrapa**, v. 267, 2020.

PIMENTEL, M. A. G., FARONI, L. R. D. A., GUEDES, R. N. C., SOUSA, A. H., TÓTOLA, M. R. Phosphine resistance in Brazilian populations of *Sitophilus zeamais* Motschulsky (Coleoptera: Curculionidae). **Journal of Stored Products Research**, v. 45, p. 71–74, 2009.

PIMENTEL, M. A. G., COSTA, R. R., SOUSA, A. H., FARONI, L. R. D. A., DHINGRA, O. D. Toxicity of mustard essential oil to larvae and pupas of *Sitophilus zeamais* (Coleoptera: Curculionidae). **9th International Working Conference on Stored Product Protection**, p. 908–913, 2002.

PIMENTEL, M. A. G. **Resistência à fosfina: Magnitude, mecanismo e custo adaptativo**. Tese (Mestrado em Entomologia) Universidade Federal De Viçosa, p. 67, 2006.

PRATES, L. H. F., FARONI, L. R. D. A., HELENO, F. F., DE QUEIROZ, M. E. L. R., DE SOUSA, A. H., SILVA, M. V. D. A. Eugenol diffusion coefficient and its potential to control *Sitophilus zeamais* in rice. **Scientific reports**, v. 9, p. 1-11, 2019.

SANTOS, J. C., FARONI, L. R. A., SOUSA, A. H., GUEDES, R. N. C. Fumigant toxicity of allyl isothiocyanate to populations of the red flour beetle *Tribolium castaneum*. **Journal of Stored Products Research**, v. 47, p. 238–243, 2011.

SANTOS, J. P. Controle de pragas durante o armazenamento de milho. **Embrapa Milho e Sorgo-Circular Técnica (INFOTECA-E)**, 2006.

SHUNMUGAM, G., JAYAS, D. S., WHITE, N. D. G., MUIR, W. E. Diffusion of carbon dioxide through grain bulks. **Journal of Stored Products Research**, v. 41, p. 131–144, 2005.

SOUZA, V. N. D., OLIVEIRA, C. R. F. D., Matos, C. H. C., ALMEIDA, D. K. F. D. Fumigation toxicity of essential oils against *Rhyzopertha dominica* (F.) in stored maize grain. **Revista Caatinga**, v. 29, p. 435-440, 2016.

SUBRAMANYAM, B. (Ed.). **Integrated management of insects in stored products**. CRC Press, 1995.

TEFERA, T. Post-harvest losses in African maize in the face of increasing food shortage. **Food Security**, v. 4, p. 267–277, 2012.

USDA - United States Department of Agriculture - Feed grains Sector at a Glance, Disponível em: <https://www.ers.usda.gov/topics/crops/corn-and-other-feedgrains/feedgrains-sector-at-a-glance/>. Acesso em 16 jan. 2021.

WU, H., LIU, X. R., YU, D. D., ZHANG, X., & FENG, J. T. Effect of allyl isothiocyanate on ultra-structure and the activities of four enzymes in adult *Sitophilus zeamais*. **Pesticide Biochemistry and Physiology**, v. 109, p. 12–17, 2014.

ZAKLADNOY, G.; ABDIUSHEV, M.; SOSKIN, M. Phosphine Recirculation System in a Metal Bin. **Proc 9th. Int. Conf. on Controlled Atmosphere and Fumigation in Stored Products**, Antalya, Turkey. 15 – 19 October 2012 v. 9, p. 603–606, 2012.

**TOXICIDADE DO ISOTIOCIANATO DE ALILO EM SISTEMA DE RECIRCULAÇÃO
NO CONTROLE *Sitophilus zeamais*, *Rhyzopertha dominica* e *Tribolium
castaneum* EM GRÃOS DE MILHO**

DANIEL ANDRÉS CASTRO CERÓN

¹ Departamento de Engenharia Agrícola

Universidade Federal de Viçosa, CEP 36.570-900, Viçosa, Minas Gerais, Brasil

e-mail: daniel.ceron@ufv.br

RESUMO

A aplicação do isotiocianato de alilo (AITC) tem sido proposta como alternativa no controle de insetos-praga de grãos armazenados. Entretanto, o AITC é um composto que possui baixo coeficiente de difusão, o que dificulta a sua distribuição na massa de grãos. Objetivou-se com o presente estudo avaliar a eficácia do AITC aplicado em sistemas sem recirculação e com recirculação no controle de *Sitophilus zeamais* (Mots. 1855) (Coleoptera: Curculionidae), *Rhyzopertha dominica* (Fabr.) (Coleoptera: Bostrichidae) e *Tribolium castaneum* (Herbst) (Coleoptera: Tenebrionidae) infestando a massa de grãos de milho. Utilizou-se um protótipo de PVC com 1,60 m de comprimento e 0,30 m de diâmetro com capacidade estática de 60 kg de grãos de milho. A toxicidade do AITC sobre os insetos foi avaliada na base da coluna de grãos, a 0,5 m da base e no topo da coluna de grãos (1,0 m). As concentrações de AITC testadas foram de 8,33, 12,50, 16,66, 20,83, 25,00, 29,16, 33,33 e 37,50 $\mu\text{L}/\text{kg}$, com período de exposição de 48 h. Determinaram-se o efeito do AITC na taxa de crescimento populacional dos insetos e na perda de matéria seca dos grãos. Na avaliação da qualidade dos grãos expostos ao AITC, analisaram-se o teor de água, a condutividade elétrica e a coloração. No sistema sem recirculação de AITC, observou-se a mortalidade dos insetos somente na base da coluna de grãos. Por outro lado, verificou-se mortalidade considerada uniforme nas diferentes posições da coluna de grãos, quando se adotou o sistema de recirculação de AITC. Nesse sistema, verificou-se também redução acentuada na taxa de crescimento populacional de *S. zeamais* e de *R. dominica* e na perda de matéria seca nos grãos,

à medida que se elevaram as concentrações do AITC. A fumigação com AITC não provocou alterações na qualidade dos grãos de milho. A recirculação do AITC se mostrou uma estratégia viável para a proteção de grãos de milho, no que se refere as espécies *S. zeamais*, *R.dominica* e *T. castaneum*.

Palavras-chave: Controle de insetos; fumigação; AITC; grãos armazenados.

ABSTRACT

The application of allyl isothiocyanate (AITC) has been proposed as an alternative to control stored grain insects. However, AITC is a compound that has a low diffusion coefficient, which makes its distribution in the grain mass difficult. Therefore, the objective of the present study was to evaluate the effectiveness of AITC applied in systems without recirculation and with recirculation in the control of *Sitophilus zeamais* (Mots. 1855) (Coleoptera: Curculionidae), *Rhyzopertha dominica* (Fabr.) (Coleoptera: Bostrichidae) and *Tribolium castaneum* (Herbst) (Coleoptera: Tenebrionidae), in infested corn grain mass. A PVC prototype measuring 1.60 m in length and 0.30 m in diameter was used, with a static capacity of 60 kg of corn grains. The toxicity of AITC on insects was evaluated at the base of the grain column, 0.5 m from the base and at the top of the grain column (1.0 m). The AITC concentrations tested were 8.33, 12.50, 16.66, 20.83, 25.00, 29.16, 33.33 and 37.50 $\mu\text{L}/\text{kg}$, with an exposure period of 48 h. The effect of AITC on instantaneous rate of population growth of the insects and grain dry matter loss were determined. In evaluating the quality of grains exposed to AITC, moisture content, electrical conductivity and color were analyzed. In the system without AITC recirculation, mortality of the insects was observed only at the base of the grain column. On the other hand, mortality of the insects was considered uniform in the different positions of the grain column, when the AITC recirculation system was adopted. In this system, there was also a marked reduction in the instantaneous rate of population growth of *S. zeamais* and *R. dominica* and in the dry matter loss in the grains, when the AITC concentrations were increased. AITC fumigation did not cause changes in corn grain quality. The recirculation of the AITC proved to be a viable strategy for the protection of corn grains, regarding the species *S. zeamais*, *R.dominica* and *T. castaneum*.

Keywords: Insect control; fumigation; AITC; stored grains.

1. INTRODUÇÃO

No armazenamento de grãos e cereais, o controle de pragas é de expressiva importância para garantir a comercialização do produto. As perdas na pós-colheita causadas por insetos-praga, durante as etapas de transporte, processamento e armazenamento, podem representar até 36% do total produzido (LÓPEZ-CASTILLO et al., 2018). O método de controle predominante em unidades armazenadoras de grãos é o tratamento químico. A fumigação com fosfina (PH₃) é uma forma de controle curativo muito utilizada para a maioria das pragas nos grãos armazenados (CHAUDHRY, 2000; HAGSTRUM et al., 2012; ARORA et al., 2021). Os fumigantes têm como vantagem o fato de poderem atingir as pragas em locais onde os inseticidas de contato e ingestão não as alcançam. A fosfina é o fumigante que vem sendo utilizado na proteção de grãos armazenados, uma vez que o brometo de metila foi banido pelo Protocolo de Montreal, por ser um depletor da camada de ozônio (PIMENTEL, 2006; PIMENTEL et al., 2008).

A aplicação inadequada e o uso intensivo do gás fosfina têm resultado no desenvolvimento de resistência nos insetos-praga (PIMENTEL et al., 2008; NAYAK et al., 2021). Estruturas de armazenamento mal vedadas e a própria sorção da fosfina pelos grãos (DAGLISH et al., 2008; DAGLISH et al., 2009) resultam em dosagens insuficientes e contribuem para a seleção de populações resistentes (LORINI et al., 2015). Pimentel et al. (2009) verificaram resistência à fosfina em populações de *Sitophilus zeamais* (Mots. 1855) (Coleoptera: Curculionidae) de diferentes localidades do Brasil. Os autores confirmaram um alto nível de resistência para uma população específica de *S. zeamais* proveniente de Paracatu, MG.

Na busca por alternativas mais sustentáveis e ecologicamente viáveis, Saito e Lucchini (1998) consideraram as plantas como uma fonte potencial de compostos químicos que podem ser utilizados para proteger a produção agrícola. Muitos compostos derivados de plantas já foram estudados para o controle de insetos-praga em grãos armazenados, através da adoção de metodologias distintas de aplicação (ESTRELA et al., 2006; SALGADO et al., 2012; DE ASSIS et al., 2014; FREITAS et al., 2016; SOUZA et al., 2016). Os óleos essenciais e seus constituintes oferecem alternativas aos inseticidas convencionais, devido à sua limitada persistência no meio ambiente, baixa toxicidade em mamíferos (SPOCHACZ et al., 2018; PESCHIUTTA et al., 2021).

Dentre os óleos essenciais que já foram testados para o controle de insetos em grãos armazenados, tem-se o óleo essencial de mostarda. De acordo com Quiles et al. (2019), o isotiocianato de alilo (AITC) é o principal composto do óleo essencial de mostarda, assim como de outras plantas crucíferas ou brassicáceas. Paes et al. (2012) determinaram o efeito de óleo essencial de mostarda, contendo 90-95% de AITC, no controle das fases imaturas (ovo, larva de terceiro ínstar e pupa) e adultos de *S. zeamais* em grãos de milho. Esses autores verificaram que o AITC é capaz de controlar *S. zeamais*, inclusive as fases imaturas. No que se refere às alterações decorrentes da exposição de insetos ao AITC, Mansour et al. (2012) afirmaram que o AITC provocou rarefação e vacuolização da matriz mitocondrial, confirmando o efeito inseticida desse composto, quando o testaram para o controle de *Sitophilus oryzae* (Linnaeus, 1763) (Coleoptera: Curculionidae), *Tribolium confusum* (Duval 1868) (Coleoptera: Tenebrionidae) e *Plodia interpunctella* (Hübner) (Lepdoptera: Pyralidae). Santos et al. (2011) demonstraram o efeito tóxico do AITC sobre populações de *T. castaneum* resistentes à fosfina. A mortalidade foi uniforme para os estágios imaturos e adultos na maioria das populações, e os autores indicaram que os mecanismos de defesa que o inseto desenvolveu para a fosfina não são efetivos para o AITC.

O AITC apresenta-se como um fumigante alternativo e com alta toxicidade para populações de insetos de grãos armazenados e inclusive em populações de insetos que foram descritas na literatura como resistentes à fosfina (FREITAS, 2011). Além disso, é um produto natural considerado seguro para a saúde humana e para o meio ambiente, não deixando resíduos tóxicos nos grãos (EFSA, 2010). Grande parte dos estudos que envolvem bioensaios de toxicidade com AITC são realizados com aplicação direta ou ainda em pequenos volumes de grãos (MANSOUR et al., 2012; VILELA et al., 2021;). Poucos estudos com AITC são encontrados na literatura buscando-se por novas estratégias de aplicação em maiores volumes de grãos. Investigações científicas com este foco são importantes a fim de buscar reduzir os tempos letais, potencializar a toxicidade e estabelecer parâmetros para aplicações em escala comercial.

A recirculação é uma estratégia que vem sendo apresentada como uma alternativa para melhorar a distribuição de fumigantes no controle de insetos-praga de grãos armazenados (HARDIN et al., 2009; AGRAFIOTI et al., 2020). O uso da recirculação potencializa o transporte e a distribuição dos fumigantes através da

massa de grãos. A ventilação forçada induzida pelo sistema de recirculação permite que além da difusão os fumigantes possam ser transportados também por convecção forçada. Os óleos essenciais são constituídos por compostos voláteis e estes compostos apresentam comportamento difusivo e ação no controle de insetos-praga quando aplicado em grãos (PAES et al., 2011; PRATES et al., 2019). Investigações científicas anteriores já demonstraram o comportamento difusivo do AITC (PAES et al., 2011). Quando comparado com a fosfina, o AITC apresenta um coeficiente de difusão inferior (PRATES et al., 2019), dessa forma ao associar a aplicação deste composto em sistema de recirculação é esperado que se verifique uma aplicação mais eficiente.

Diante do apresentado, objetivou-se com o presente estudo determinar a eficácia do AITC aplicado em sistema com recirculação no controle de *S. zeamais*, *R. dominica* e *T. castaneum* em grãos de milho infestados e caracterizar a qualidade do produto após exposição ao AITC.

2. MATERIAL E MÉTODOS

2.1 Criação dos Insetos

Para a criação dos insetos, foram utilizados como substrato alimentar milho com teor de água de 13,0% (base úmida, b.u.), sendo grãos inteiros para *S. zeamais* e grãos triturados para *T. castaneum*. Para as criações de *R. dominica* foi utilizado trigo com teor de água de 13,0%. As condições ambientais em que se encontravam as criações de insetos variaram de acordo com a espécie, de tal forma a otimizar o desenvolvimento: *S. zeamais* foram criados em BOD com uma temperatura média de 27 ± 2 °C e uma umidade relativa de $65 \pm 5\%$; para as criações de *R. dominica* e *T. castaneum*, utilizou-se uma câmara climática com temperatura de 30 ± 2 °C e umidade relativa de $65 \pm 5\%$.

2.2. Isotiocianato de alilo

O composto isotiocianato de alilo (AITC), com pureza de 95% e densidade de 1,013 g/mL a 25 °C, foi obtido da Sigma-Aldrich (EUA), é mantido a 5 °C e ao abrigo da luz, conforme com as recomendações do fabricante.

2.3. Avaliação da toxicidade do AITC no controle de *S. zeamais*, *T. castaneum* e *R. dominica* em sistemas sem e com recirculação

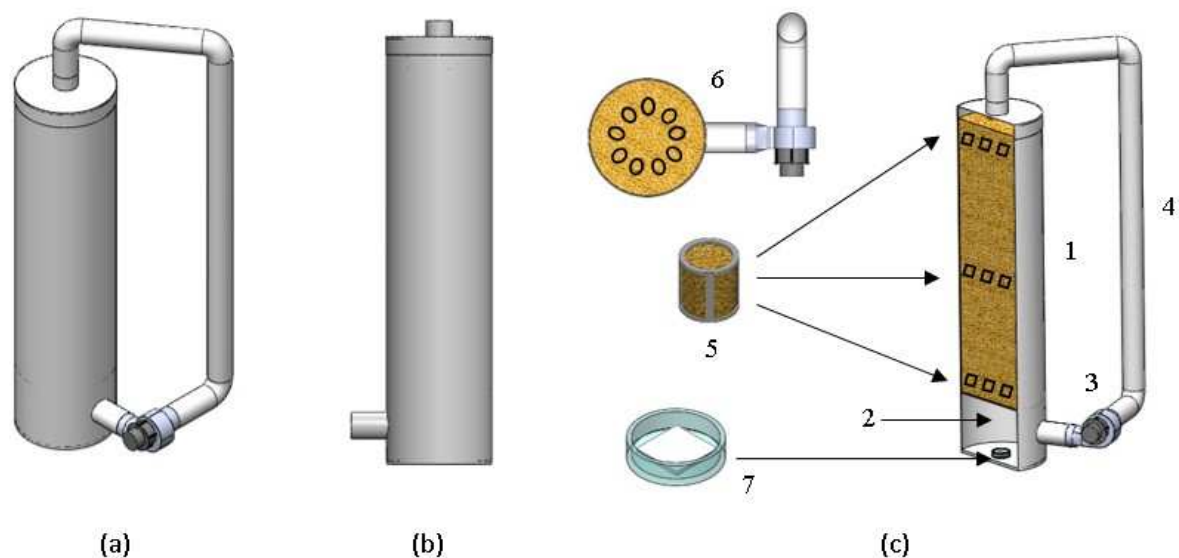
Para a realização dos bioensaios de toxicidade do AITC no controle de *S. zeamais*, *T. castaneum* e *R. dominica* em sistemas com recirculação e sem recirculação foi utilizado um protótipo de PVC (Figura 1). O protótipo apresenta uma coluna cilíndrica (1) com 1,60 m de comprimento e 0,30 m de diâmetro com capacidade estática de 60 kg de grãos de milho. Para promover a sustentação da massa de grãos e a formação de um *plenum* (2), uma tela metálica foi instalada a 0,58 m da base do protótipo. A formação do *plenum* tem por objetivo reduzir a pressão dinâmica do ar e aumentar a pressão estática de forma a garantir a distribuição uniforme do ar de recirculação na massa de grãos. Para promover a aplicação do AITC com recirculação (Figura 1a), foi acoplado na região do *plenum* um ventilador centrífugo tipo blower (3). A lateral de sucção do ventilador foi conectada à parte superior do protótipo através de um duto de recirculação (4) de tal forma a garantir a hermeticidade e recirculação em circuito fechado durante a aplicação do AITC. Para a aplicação do AITC no sistema sem recirculação, o duto de recirculação e o ventilador foram removidos e as extremidades vedadas (Figura 1b).

A vazão volumétrica adotada no sistema de recirculação do AITC foi de 27,6 L/min que corresponde a uma vazão específica de 0,46 m³/min por tonelada. Esta vazão específica está de acordo com as vazões empregadas em operações de aeração de grãos armazenados em silos verticais (WEBER, 2005; KALIYAN et al., 2006; OLATUNDE et al., 2016).

Em cada teste foram utilizados 60 kg de grãos de milho. Para avaliar a toxicidade do AITC em sistemas sem recirculação e com recirculação, insetos adultos de *S. zeamais*, *T. castaneum* e *R. dominica* foram dispostos em diferentes posições da coluna de grãos: i) na base da coluna de grãos (0,0 m); ii) a 0,5 m da base da coluna de grãos; e iii) no topo da coluna de grãos (1,0 m) (Figura 1c). Para conter os insetos foram utilizadas gaiolas cilíndricas (0,04 x 0,04 m) (5) confeccionadas com armação em PVC e revestidas com tecido do tipo organza (100% poliéster, 35 g/m², Eur/fabtex) que permitia a passagem do ar nas direções radial e axial. Cada gaiola continha 20 g de grãos de milho e 20 insetos adultos, sendo usadas três gaiolas por espécie de inseto, totalizando nove gaiolas por posição na coluna de grãos dispostas de forma radial (6) (Figura 1c). Para aplicação

do AITC, o composto foi adicionado em placas de Petri de vidro (7), de 54 mm de diâmetro, que tinham o fundo recoberto com algodão. As placas de Petri contendo o AITC foram acondicionadas no *plenum* do protótipo.

Figura 1. Esquema do protótipo adotado no experimento: vista isométrica do protótipo com sistema de recirculação montado (a); vista frontal do protótipo sem sistema de recirculação (b) e corte transversal mostrando a disposição das gaiolas com insetos no interior da massa de grãos (c): (1) protótipo contendo os grãos; (2) *plenum*; (3) turbina para recirculação; (4) duto de recirculação; (5) gaiolas com os insetos; (6) disposição das gaiolas no interior da massa de grãos e (7) placa de Petri com AITC.



Foram determinadas as concentrações letais do AITC para 50 e 95% dos insetos adultos (CL_{50} e CL_{95}), para as diferentes espécies em cada posição da coluna de grãos de milho. O tempo de exposição ao AITC adotado foi de 48 h. Foram utilizadas diferentes concentrações de AITC, definidas a partir de testes preliminares, sendo elas 0,0, 8,33, 12,50, 16,67, 20,83, 25,00, 29,17, 33,33 e 37,50 $\mu\text{L}/\text{kg}$. A massa do AITC referente a cada concentração foi mensurada em balança analítica antes e depois da aplicação na coluna de grãos. Dessa forma foi possível estimar o percentual do AITC (m/m) volatilizado.

Após 48 h de exposição ao AITC, as gaiolas contendo os insetos foram retiradas da coluna de grãos de milho. Os insetos, assim como os grãos contidos nas gaiolas, foram dispostos em placas de Petri de vidro de 90 mm de diâmetro. A mortalidade dos insetos foi determinada após 48 h da exposição ao AITC. Consideraram-se insetos mortos somente aqueles que não responderam a estímulos realizados com o auxílio de um pincel. Os dados de mortalidade foram

corrigidos em função da mortalidade no controle (sem AITC), conforme a Equação 1 (ABBOTT, 1925).

Em que:

$$MC(\%) = \frac{\%Mo - \%Mc}{100 - \%Mc} \quad \text{Equação (1)}$$

MC = Mortalidade corrigida;

Mo = Mortalidade observada;

Mc = Mortalidade no tratamento controle.

2.4 Taxa instantânea de crescimento populacional (ri) de *S. zeamais*, *T. castaneum* e *R. dominica* em sistemas sem e com recirculação de AITC

A taxa instantânea de crescimento populacional foi determinada, com o intuito de verificar se o AITC influencia o padrão reprodutivo das diferentes espécies de insetos expostas ao AITC. Para isso, depois da exposição ao AITC, as placas de Petri contendo os insetos e a massa de grãos de milho, foram armazenados por 55 dias, conforme as condições descritas no item 3.1. Decorrido esse período, foram contabilizados o número total de insetos de cada espécie estudada. A taxa instantânea de crescimento populacional foi determinada utilizando-se a Equação 2, de acordo com Walthall e Stark (1997).

$$ri = \frac{\left[\ln \left(\frac{N_f}{N_0} \right) \right]}{\Delta t} \quad \text{Equação (2)}$$

Em que:

ri = Taxa de crescimento populacional;

N_0 = Número inicial de insetos;

N_f = Número final de insetos;

Δt = Tempo de armazenamento.

2.5. Perda de matéria seca nos grãos de milho

A perda de matéria seca (Equação 3) foi obtida a partir dos grãos de milho utilizados nos bioensaios de taxa instantânea de crescimento populacional, decorridos 55 dias de armazenamento, conforme Santos et. al. (2002) (Equação 3).

$$PMS(\%) = \frac{Ms_i - Ms_f}{Ms_i} \times 100 \quad \text{Equação (3)}$$

Em que:

PMS = Perda de matéria seca (%);

MS_i = Matéria seca inicial (g);

MS_f = Matéria seca final (g).

2.6. Qualidade dos grãos de milho expostos ao AITC em sistemas sem e com recirculação

Para determinar a qualidade dos grãos de milho expostos ao AITC, em sistemas sem recirculação e com recirculação, utilizaram-se amostras de 1,0 kg de grãos de milho, acondicionadas em sacos de tecido do tipo organza e dispostas na base, a 0,5 m da base e no topo da coluna de grãos, em três repetições. Foram analisados o teor de água, a coloração e a condutividade elétrica da solução de exsudatos de grãos de milho.

2.6.1. Teor de água dos grãos

O teor de água foi determinado utilizando-se o método padrão de estufa, à temperatura de 105 °C durante 72 h, conforme ASABE (2013).

2.6.2. Condutividade elétrica

A condutividade elétrica foi determinada pela metodologia proposta por Vieira et al. (2001). Para cada concentração de AITC testada, tanto para o sistema sem recirculação e com recirculação, amostras de 50 grãos de milho foram pesadas e acondicionadas em recipientes de plástico contendo 75 mL de água destilada. Depois disso, as amostras permaneceram em câmara climática tipo BOD a 25 °C, por 24 h. Decorrido esse período, efetuou-se a leitura da condutividade elétrica da solução de imersão em condutímetro modelo MCA-150 (Tecnocon, Piracicaba, São Paulo, Brasil), e os resultados foram expressos em $\mu\text{S}/\text{cm}$ por grama de grãos.

2.6.3. Coloração dos grãos

Inicialmente foram obtidos por meio da leitura direta de reflectância da luminosidade (L^*), intensidade de cor do vermelho ao verde (a^*) e intensidade de cor do amarelo ao azul (b^*), utilizando-se colorímetro modelo CR-400 (Konica Minolta, Japão). A partir dos valores das coordenadas a e b foram calculados os valores de

saturação de cor (C^*) (Equação 4) e tonalidade de cor (h^*) (Equação 5) como descrito por Maskan, 2001.

$$C^* = (a^{*2} + b^{*2})^{\frac{1}{2}} \quad \text{Equação (4)}$$

$$h^* = \tan^{-1}\left(\frac{b^*}{a^*}\right) \quad \text{Equação (5)}$$

2.7 Análises estatísticas

Adotou-se Delineamento Inteiramente Casualizado, em esquema fatorial de 2 x 9 x 3, sendo dois sistemas de aplicação (com e sem recirculação de ar), nove concentrações de AITC (0,0, 8,33, 12,50, 16,67, 20,83, 25,00, 29,17, 33,33 e 37,50 $\mu\text{L/kg}$) e três posições na coluna de grãos (0,0, 0,5, e 1,0 m), com três repetições. Dados de mortalidade após 48 h de exposição ao AITC foram submetidos à análise de Probit, sendo os valores obtidos utilizados para confecção das curvas utilizando-se o software SAS, versão 9.0. (SAS Institute, 2008). Os dados referentes à taxa instantânea de crescimento populacional, perda de matéria seca, teor de água, coloração e condutividade elétrica foram submetidos à análise de variância a 5% de probabilidade, utilizando-se o software StatPlus v.5 (AnalystSoft Inc, Canada). Posteriormente com as variáveis citadas anteriormente, realizou-se análises de regressão usando as concentrações de AITC como variável independente, utilizando o software SigmaPlot v.10 (Systat Software Inc, Germany).

3. RESULTADOS

3.1. Avaliação da toxicidade do AITC no controle de *S. zeamais*, *T. castaneum* e *R. dominica* em sistemas sem e com recirculação

Os dados da análise de Probit realizada para *S. zeamais*, *R. dominica* e *T. castaneum* expostos ao AITC estão representados na Tabela 1. O modelo probit se ajustou adequadamente aos dados para as três espécies de insetos-praga consideradas no estudo, uma vez que foram obtidos baixos valores de quiquadrado (χ^2) (<9,00) e valores elevados de P ($P > 0,05$). No sistema com recirculação do AITC, foram obtidas as CL₅₀ e CL₉₅ para *S. zeamais*, *R. dominica* e *T. castaneum* na base (0,0 m), a 0,5 m, da base e no topo (1,0 m) da coluna de grãos. Todavia, não foi possível obter as curvas de concentração-mortalidade pelo modelo de probit, quando se adotou o sistema sem recirculação do AITC. Nesse sistema, foi obtida mortalidade de 100% em todas as concentrações de AITC testadas na base da coluna de grãos, para as três espécies de insetos. Por outro lado, o AITC não ocasionou mortalidade dos insetos adultos a 0,5 m da base e no topo da coluna de grãos. É importante mencionar que foi observado que mais de 99% (m/m) do AITC foi volatilizado, nos dois sistemas de aplicação testados, no período de 48 h de exposição.

3.1.1. Toxicidade do AITC sobre *S. zeamais*

Quando se adotou o sistema de recirculação do AITC na massa de grãos de milho, foram estimados os valores de CL₅₀ iguais a 17,68, 18,20 e 18,95 $\mu\text{L}/\text{kg}$, na base, a 0,5 m da base e no topo da coluna de grãos (1,0 m), respectivamente (Tabela 1). No que se refere à CL₉₅, obtiveram-se os valores iguais a 31,07, 28,40 e 30,62 $\mu\text{L}/\text{kg}$, na base, a 0,5 m da base e no topo da coluna de grãos (1,0 m), respectivamente. Verificou-se, dessa forma, proporcionalidade entre os valores estimados para a CL₅₀ e CL₉₅, nas diferentes posições da coluna de grãos de milho, quando se adotou a recirculação do AITC na massa de grãos de milho. Tal tendência também pode ser observada na Figura 2a, na qual são apresentadas as curvas de mortalidade nas três posições da coluna de grãos de milho para *S. zeamais*.

3.1.2. Toxicidade do AITC sobre *R. dominica*

Com relação a *R. dominica*, obtiveram-se resultados e tendência semelhantes aos observados para *S. zeamais*, quando se adotou o sistema com recirculação do AITC na massa de grãos de milho (Tabela 1 e Figura 2b). Os valores de CL_{50} variaram entre 15,54 e 18,60 $\mu\text{L}/\text{kg}$, enquanto que as CL_{95} permaneceram entre 26,32 e 32,01 $\mu\text{L}/\text{kg}$ (Tabela 1). Obteve-se controle efetivo de *R. dominica* nas diferentes posições da coluna de grãos, verificando-se aumento da mortalidade, à medida que se elevou a concentração de AITC (Figura 2).

3.1.3. Toxicidade do AITC sobre *T. castaneum*

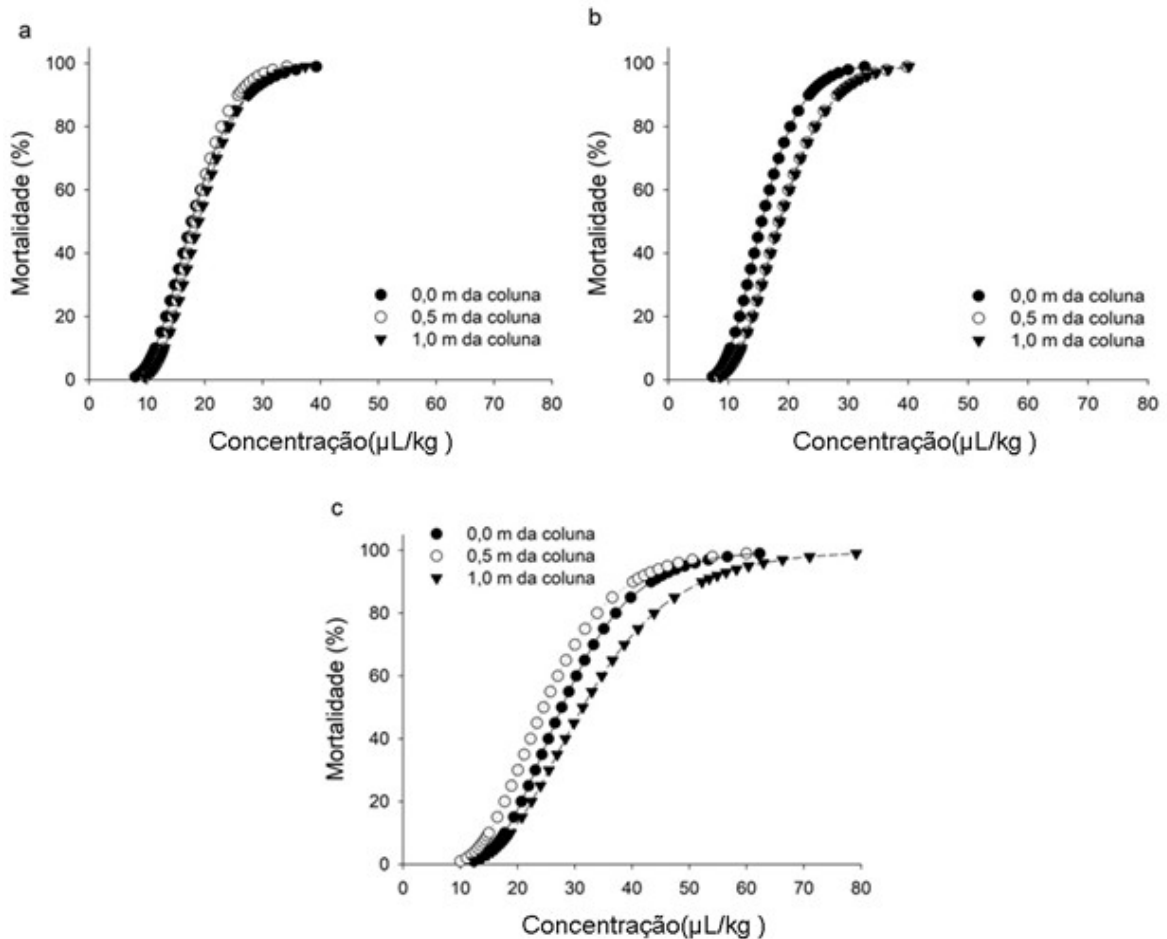
Com relação ao efeito do AITC aplicado em sistema com recirculação na massa de grãos sobre adultos de *T. castaneum*, obtiveram-se maiores valores de CL_{50} e CL_{95} , nas diferentes posições na coluna de grãos, quando se compararam com os resultados verificados para *S. zeamais* e *R. dominica* (Tabela 1 e Figura 2c). Insetos adultos de *T. castaneum* demonstraram-se mais tolerantes ao AITC que adultos de *S. zeamais* e *R. dominica*, nas condições adotadas no presente estudo. Os valores de CL_{50} e CL_{95} variaram entre 27,72 - 31,37 $\mu\text{L}/\text{kg}$ e 49,13 - 60,36 $\mu\text{L}/\text{kg}$, respectivamente. Tem-se que o valor de CL_{50} para *T. castaneum* foi equivalente a aproximadamente 1,70 vezes aos obtidos para *S. zeamais* e *R. dominica*, no topo da coluna de grãos. Quanto à CL_{95} , verificou-se que o valor estimado para *T. castaneum* foi 1,88 e 1,97 vezes maior que as CL_{95} estimadas para *S. zeamais* e *R. dominica*, respectivamente, no topo da coluna de grãos (Tabela 1). É importante destacar, entretanto, que a recirculação do AITC favoreceu o controle de *T. castaneum* nas diferentes posições da coluna de grãos, de forma semelhante ao que foi observado para *S. zeamais* e *R. dominica*.

Tabela 1. Toxicidade do AITC para *S. zeamais*, *R. dominica* e *T. castaneum* aplicado em grãos de milho em sistema com recirculação, depois de 48 h de exposição.

	Posição(m)	N	Inclinação \pmEPM	CL₅₀ (IC)	CL₉₅ (IC)	GL	χ^2	P valor
<i>S. zeamais</i>	0,0	359	6.7210 \pm 0,5981	17,68 (16,63-18,75)	31,07 (28,27-35,29)	4	6,5635	0,1608
	0,5	360	8,5101 \pm 0,8128	18,20 (17,3-19,11)	28,40 (26,23-31,71)	4	6,7442	0,1500
	1,0	360	7,8996 \pm 0,7552	18,95 (17,99-19,94)	30,62 (28,09-34,50)	4	5,7129	0,2216
<i>R. dominica</i>	0,0	413	7,1930 \pm 0,6061	15,44 (14,62-16,42)	26,32 (24,33-29,13)	5	5,5743	0,3499
	0,5	410	6,9643 \pm 0,5883	18,44 (17,42-19,44)	31,77 (29,25-35,41)	5	6,7021	0,2438
	1,0	412	6,9792 \pm 0,5882	18,60 (17,58-19,60)	32,01 (29,49-35,67)	5	6,8369	0,2330
<i>T. castaneum</i>	0,0	298	6,6200 \pm 0,8157	27,72 (25,83-29,52)	49,13 (43,84-58,63)	3	4,3297	0,2280
	0,5	358	5,9932 \pm 0,5993	24,53 (23,02-26,29)	46,15 (40,56-55,56)	4	7,7575	0,1009
	1,0	411	5,7899 \pm 0,6252	31,37 (28,41-33,83)	60,34 (52,09-75,16)	5	8,6752	0,1227

N = Número total de insetos por bioensaio; EPM = Erro padrão da média; CL = Concentração Letal ($\mu\text{L}/\text{kg}^{-1}$); IC 95% = Intervalo de confiança a 95% de probabilidade; GL = Graus de liberdade; χ^2 = qui-quadrado

Figura 2. Curvas de concentração/mortalidade para *S. zeamais* (a), *R. dominica* (b) e *T. castaneum* (c) decorrente da exposição ao AITC aplicado em sistema com recirculação durante 48h, em diferentes posições da coluna de grãos.

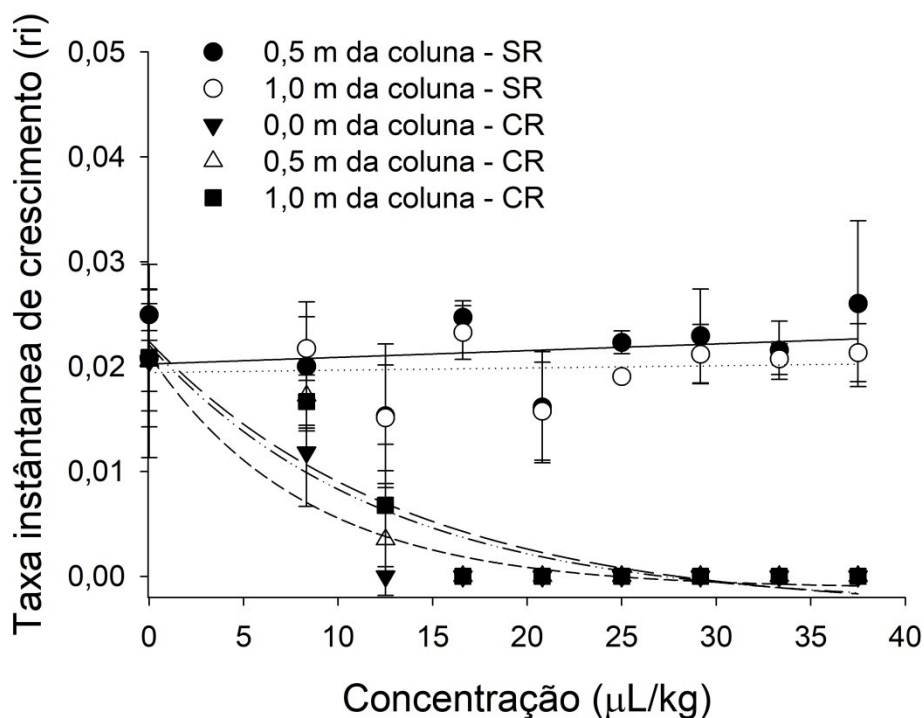


3.2. Taxa instantânea de crescimento populacional

Foram obtidas as taxas de crescimento populacional (r_i) de *S. zeamais*, *R. dominica* e *T. castaneum*, depois da exposição ao AITC em sistema sem recirculação e com recirculação na massa de grãos de milho (Figuras 3, 4 e 5 e Tabela 2 e 3). Verificou-se variação significativa ($P < 0,05$) na taxa instantânea de crescimento de *S. zeamais* e *R. dominica*, em decorrência da interação tripla entre sistema de aplicação, concentração de AITC e as três posições das amostras na coluna de grãos. No que se refere à *T. castaneum*, houve variação significativa ($P < 0,05$) na taxa instantânea de crescimento devido à interação entre sistema de aplicação e a concentração de AITC. É importante mencionar que não foi observado crescimento populacional de *S. zeamais*, *R. dominica* e *T. castaneum*, quando os insetos foram dispostos na base da coluna de grãos (0,0 m), em todas as concentrações de AITC adotadas, uma vez que se obteve mortalidade de 100%.

No sistema sem recirculação (SR) do AITC, as taxas instantâneas de crescimento populacional de *S. zeamais* apresentaram tendências semelhantes ao longo da coluna de grãos, com os valores estimados permanecendo entre 0,020 e 0,023 (Figura 3 e Tabela 2). Observou-se redução expressiva da taxa instantânea de crescimento de *S. zeamais*, nas diferentes posições da coluna de grãos, à medida que se elevou a concentração de AITC quando se utilizou o sistema com recirculação (CR) (Figura 3).

Figura 3. Taxa instantânea de crescimento (r_i) de *S. zeamais* em grãos de milho em função de concentrações de AITC ($\mu\text{L}/\text{kg}$) aplicado em sistema sem e com recirculação durante 48h, em diferentes posições da coluna grãos; SR – sem recirculação; CR – com recirculação.



No que tange a *R. dominica* exposta ao AITC em sistema sem recirculação (SR), a tendência observada em relação à taxa instantânea de crescimento foi semelhante à verificada para *S. zeamais*, em que os valores estimados permaneceram praticamente constantes à medida que se elevou a concentração do AITC, a 0,5 e 1,0 m da base da coluna de grãos (Figura 4 e Tabela 2) e oscilaram entre 0,011 e 0,014 $\mu\text{L}/\text{kg}$. Por outro lado, quando adotado o sistema com recirculação, verificou-se que à medida que se elevou a concentração de AITC, observou-se redução expressiva na taxa instantânea de crescimento, nas diferentes posições da massa de grãos.

Figura 4. Taxa instantânea de crescimento (ri) de *R. dominica* em milho em função de concentrações de AITC ($\mu\text{L}/\text{kg}$) aplicado em sistema sem e com recirculação durante 48h, em diferentes posições da coluna grãos; SR – sem recirculação; CR – com recirculação.

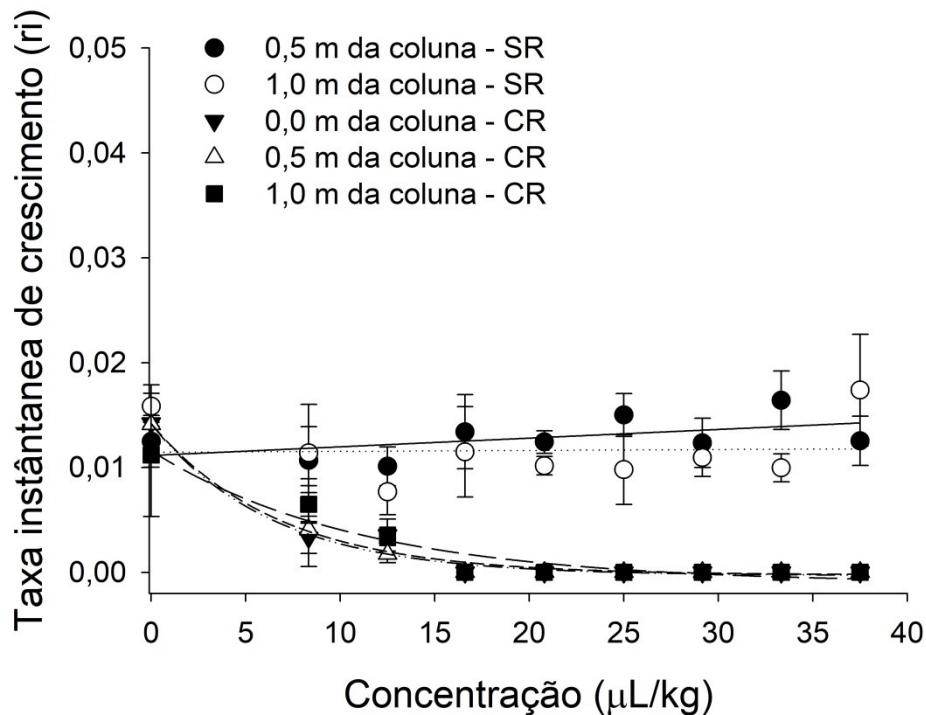


Tabela 2. Equações de regressão e respectivos coeficientes de determinação para taxa instantânea de crescimento (ri) de *S. zeamais* e *R. dominica* em milho em função das concentrações de AITC ($\mu\text{L}/\text{kg}$) aplicado em sistema sem e com recirculação durante 48h, em diferentes posições da coluna grãos.

Sistema	Posição na coluna de grãos (m)	Equações de regressão	R ²	EPE
<i>Sitophilus zeamais</i>				
Sem recirculação (SR)	0,5	$\hat{y} = 0,02020 + 0,00006^{\text{ns}} X$	0,04	0,0040
	1,0	$\hat{y} = 0,01940 + 0,00002^{\text{ns}} X$	0,01	
Com recirculação (CR)	0,0	$\hat{y} = -0,0012 + 0,0223^* e^{(-0,1203^* X)}$	0,90	0,0027
	0,5	$\hat{y} = -0,0028 + 0,0248^* e^{(-0,0810^* X)}$	0,84	
	1,0	$\hat{y} = -0,0033 + 0,0257^* e^{(-0,0735^* X)}$	0,88	
<i>Rhyzopertha dominica</i>				
Sem	0,5	$\hat{y} = 0,0111 + 0,00008^{\text{ns}} X$	0,2	0,0018

recirculação			7	
o (SR)	1,0	$\hat{y} = 0,01150 + 0,00009^{ns} X$	0,0	0,0033
<hr/>				
Com	0,0	$\hat{y} = -0,0003 + 0,0145^* e^{(-0,1497^* X)}$	0,9	0,0008
recirculação	0,5	$\hat{y} = -0,0003 + 0,0145^* e^{(-0,1568^* X)}$	8	0,0004
o (CR)	1,0	$\hat{y} = -0,0011 + 0,0127^* e^{(-0,0904^* X)}$	9	0,0011
			4	

EPE – Erro padrão da estimativa; * - significativo ($P < 0,05$)

Na Figura 5 e na Tabela 3, são apresentadas as curvas da taxa instantânea de crescimento para *T. castaneum* em função da concentração de AITC, nos sistemas sem recirculação e com recirculação. É importante destacar que a taxa instantânea de crescimento inicial de *T. castaneum* foi inferior àquelas obtidas para *S. zeamais* e *R. dominica*, independentemente da posição na coluna de grãos. Inicialmente, foi observada redução mais expressiva da taxa instantânea de crescimento no sistema sem recirculação. É importante ressaltar que o AITC ocasionou mortalidade de 100% dos insetos adultos na base da coluna de grãos. Entretanto, para concentrações de AITC iguais ou superiores a 25,0 $\mu\text{L/kg}$, os valores estimados para a taxa instantânea de crescimento no sistema com recirculação foram inferiores àqueles obtidos no sistema sem recirculação.

Figura 5. Taxa instantânea de crescimento (ri) de *T. castaneum* em grãos de milho em função das concentrações de AITC ($\mu\text{L/kg}$) aplicado em sistema sem e com recirculação durante 48h, independentemente da posição na coluna grãos; SR – sem recirculação; CR – com recirculação.

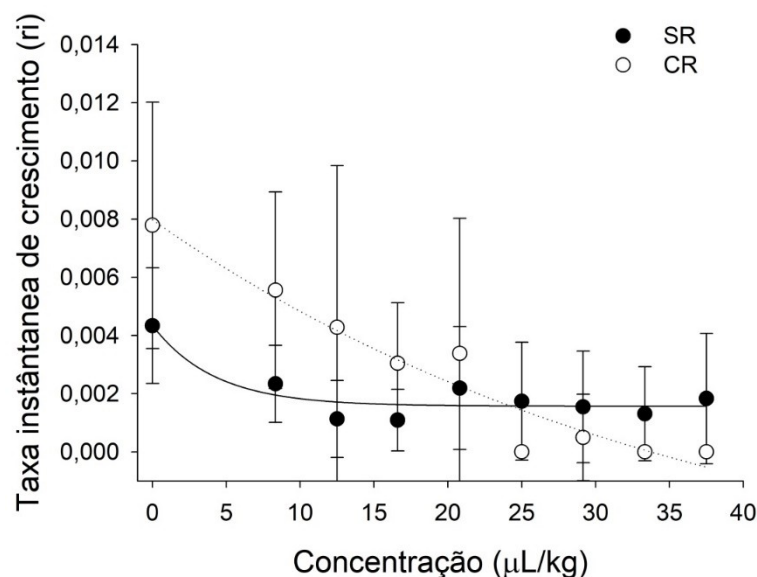


Tabela 3. Equações de regressão e respectivos coeficientes de determinação para taxa instantânea de crescimento (ri) de *T. castaneum* em grãos de milho em função das concentrações de AITC ($\mu\text{L}/\text{kg}$) aplicado em sistema sem e com recirculação durante 48h, independentemente da posição na coluna grãos.

Sistema	Equações de regressão	R ²	EPE
SR	$\hat{y} = 0,0016 + 0,0045^* e^{(-0,2771^* X)}$	0,87	0,0005
CR	$\hat{y} = -0,0300 + 0,0366^* e^{(-0,0059^* X)}$	0,90	0,0009

EPE – Erro padrão da estimativa; * - significativo ($p < 0,05$)

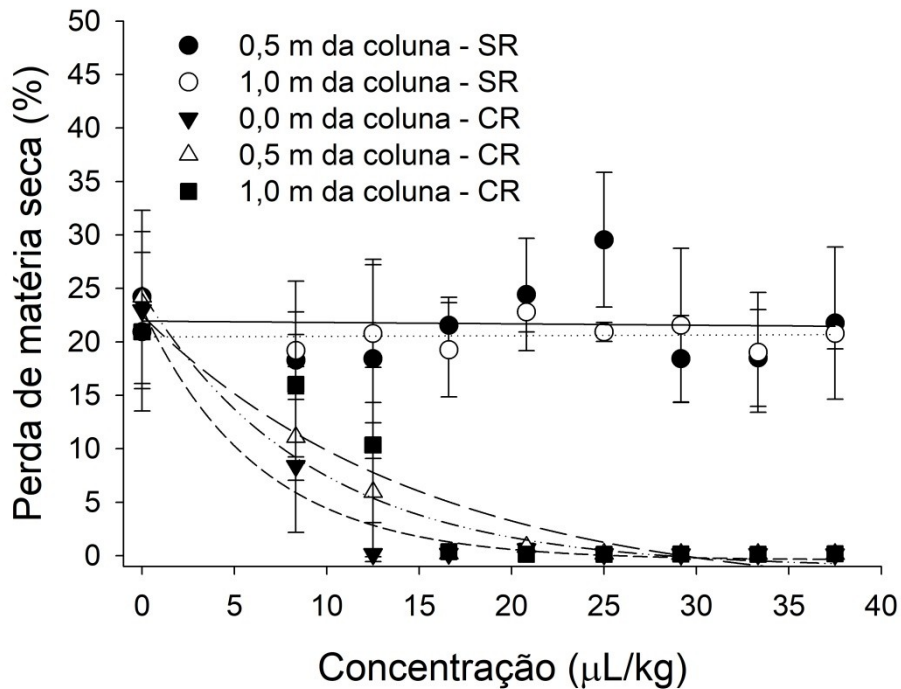
3.3. Perda de matéria seca

Verificou-se variação significativa ($P < 0,05$) na perda de matéria seca ocasionada por *S. zeamais* e *R. dominica* nos grãos de milho, devido à interação tripla entre sistema de aplicação, concentração de AITC e as três posições na coluna de grãos. Entretanto, não houve variação significativa ($P > 0,05$) da perda de matéria seca para *T. castaneum*, devido à interação tripla entre tipo de sistema de aplicação do AITC (com e sem recirculação), posição na coluna de grãos e as concentrações, assim como devido às interações duplas entre os fatores. Quando analisados os efeitos dos fatores isoladamente, também não foi observada variação significativa ($P > 0,05$) da perda de matéria seca. Para *T. castaneum*, a perda de matéria seca média nos grãos de milho foi de $1,20 \pm 0,92\%$.

Na Figura 6 e Tabela 4 são apresentadas as curvas referentes à perda de matéria seca em grãos de milho para *S. zeamais* expostos ao AITC em sistemas sem recirculação e com recirculação. É importante mencionar que não foi possível ajustar a equação de regressão para os dados de perda de matéria seca, na base da coluna de grãos, quando se adotou o sistema sem recirculação do AITC. Nessa condição, a perda de matéria seca para concentração de AITC de $0,0 \mu\text{L}/\text{kg}$ foi igual a $22,97 \pm 3,25\%$, enquanto que para as concentrações de AITC entre $8,33$ e $37,50 \mu\text{L}/\text{kg}$, os valores observados permaneceram iguais ou inferiores a $0,40\%$ (Figura 6). Com relação à perda de matéria seca a $0,5$ e a $1,0$ m da base da coluna de grãos, os valores estimados permaneceram em torno de $21,0\%$ (Figura 6). Em contrapartida, a perda de matéria seca ocasionada por *S. zeamais* nos grãos expostos ao AITC em sistema com recirculação diminuiu expressivamente à medida que se elevou a concentração do composto, independentemente da posição da amostra na coluna.

Figura 6. Perda de matéria seca (%) em grãos de milho infestados com adultos *S. zeamais* em função das concentrações de AITC ($\mu\text{L}/\text{kg}$) aplicado em sistema sem e

com recirculação durante 48h, em diferentes posições da coluna grãos, depois de 55 dias de armazenamento; SR – sem recirculação; CR – com recirculação.



Apresentam-se na Figura 7 e Tabela 4, as curvas de perda de matéria seca nos grãos infestados por *R. dominica* em função das diferentes concentrações de AITC aplicado em sistemas sem recirculação e com recirculação em diferentes posições na coluna de grãos. De forma semelhante ao que foi observado para *S. zeamais*, não foi possível ajustar equação de regressão para os dados de perda de matéria seca, no que tange aos grãos dispostos na base da coluna de grãos do sistema SR. Nessa condição, a perda de matéria seca para concentração de AITC de 0,0 µL/kg foi equivalente a $7,72 \pm 1,16\%$, enquanto que para as concentrações de AITC entre 8,33 e 37,50 µL/kg, foram obtidos valores iguais ou inferiores a 0,11%. Não houve redução expressiva da perda de matéria seca nos grãos a 0,5 e 1,0 m da base da coluna de grãos, no sistema sem recirculação de AITC, com os valores estimados permanecendo entre 6,0 e 4,4% e 7,5 e 5,7%, respectivamente (Figura 7). No que se refere à perda de matéria seca no sistema com recirculação, observou-se tendência de redução acentuada, sendo mais expressiva na base da coluna de grãos (Figura 7).

Figura 7. Perda de matéria seca (%) em grãos de milho infestados com adultos *R. dominica* em função de concentrações de AITC (µL/kg) aplicado em sistema sem e

com recirculação durante 48h, em diferentes posições da coluna grãos, depois de 55 dias de armazenamento.

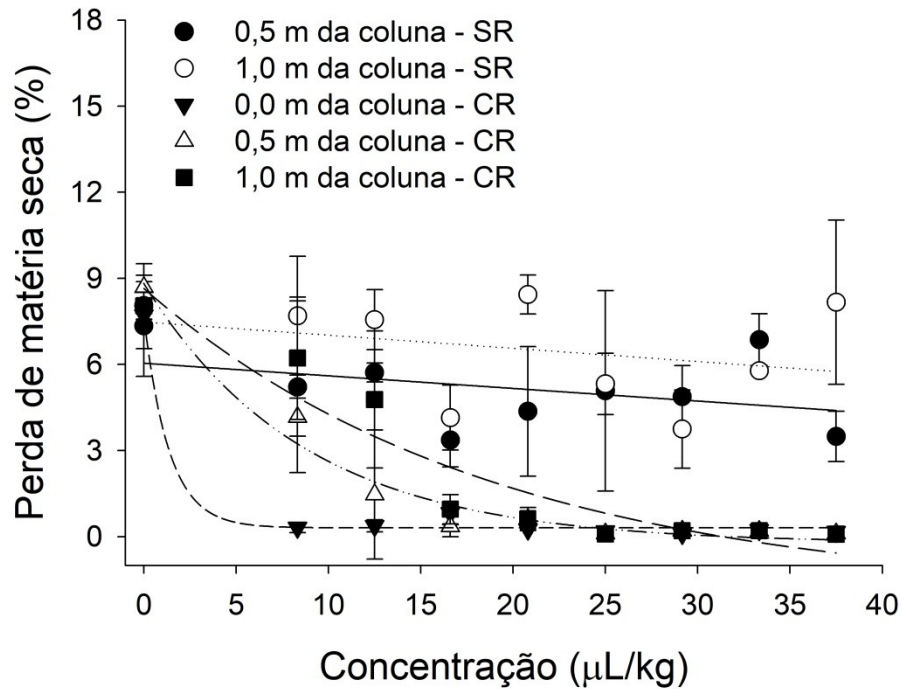


Tabela 4. Equações de regressão e respectivos coeficientes de determinação para perda de matéria seca (%) em grãos de milho infestados com adultos de *S. zeamais* e *R. dominica* em função de concentrações de AITC (µL/kg) aplicado em sistema sem e com recirculação durante 48h, em diferentes posições da coluna grãos, depois de 55 dias de armazenamento

Sistema	Posição na coluna de grãos (m)	Equações de regressão	R ²	EPE
<i>Sitophilus zeamais</i>				
SR	0,5	$\hat{y} = 21,9339 - 0,0128^{ns} X$	0,01	4,1162
	1,0	$\hat{y} = 20,4565 + 0,0057^{ns} X$	0,01	1,3222
CR	0,0	$\hat{y} = -0,4170 + 23,6132^* e^{(-0,1585^* X)}$	0,97	1,6021
	0,5	$\hat{y} = -1,1667 + 25,7638^* e^{(-0,1097^* X)}$	0,97	1,5234
	1,0	$\hat{y} = -3,9751 + 26,4793^* e^{(-0,0650^* X)}$	0,88	3,3166
<i>Rhizopertha dominica</i>				
SR	0,5	$\hat{y} = 6,0405 - 0,0439^{ns} X$	0,16	1,3331
	1,0	$\hat{y} = 7,4810 - 0,0460^{ns} X$	0,10	1,8506
CR	0,0	$\hat{y} = 0,3047 + 7,4123^* e^{(-0,7348^* X)}$	0,99	0,2416
	0,5	$\hat{y} = -0,2327 + 9,0577^* e^{(-0,1154^* X)}$	0,98	0,5473
	1,0	$\hat{y} = -2,0615 + 10,7125^* e^{(-0,0526^* X)}$	0,90	1,1510

EPE – Erro padrão da estimativa; ^{ns} – não significativo ($P > 0,05$); * - significativo ($p < 0,05$).

3.4. Qualidade dos grãos de milho expostos ao AITC em sistemas sem recirculação e com recirculação

Não houve variação significativa ($P>0,05$) no que se refere às variáveis teor de água, condutividade elétrica, luminosidade (L^*), saturação de cor (C^*) e tonalidade de cor (h^*), em decorrência da interação tripla entre tipo de sistema de aplicação do AITC (com e sem recirculação), posição na coluna de grãos e concentração do AITC. As variáveis de qualidade dos grãos também não variaram significativamente ($P>0,05$) quando se analisam as interações duplas entre os fatores, assim como devido aos fatores isoladamente.

Quanto ao teor de água dos grãos, obtiveram-se valores médios entre 11,17 e 12,67% (Tabela 5). A condutividade elétrica da solução que continha os grãos de milho, expostos ou não ao AITC e nas diferentes condições, permaneceram na faixa entre 8,67 e 12,44 $\mu\text{S}/\text{cm}$ por grama de grãos (Tabela 6). Com relação à luminosidade (L^*) dos grãos, foram obtidos valores médios entre 64,92 e 68,40 (Tabela 7). Os valores médios de saturação de cor (Tabela 8) e tonalidade de cor (Tabela 9) variaram entre 23,75 e 28,86 e 80,88 e 83,83, respectivamente.

Tabela 5. Teor de água (%; b.u.) em grãos de milho expostos a diferentes concentrações de AITC ($\mu\text{L}/\text{kg}$) aplicado em sistema sem e com recirculação e em diferentes posições da coluna grãos, durante 48 h.

Sistema	Posição na coluna de grãos (m)	Concentração do AITC ($\mu\text{L}/\text{kg}$)							
		8,33	12,50	16,66	20,83	25,00	29,16	33,33	37,50
SR	0,0	12,15 \pm 0,2	12,13 \pm 0,1	12,12 \pm 0,11	11,58 \pm 0,1	11,26 \pm 0,08	11,19 \pm 0,1	12,18 \pm 0,7	11,76 \pm 0,18
		5	2		3		3	4	
	0,5	11,54 \pm 0,0	12,03 \pm 0,1	12,20 \pm 0,08	11,49 \pm 0,1	11,17 \pm 0,13	11,90 \pm 0,0	12,69 \pm 0,1	11,71 \pm 0,15
		5	5		6		8	6	
	1,0	11,50 \pm 0,0	11,97 \pm 0,1	12,15 \pm 0,14	11,44 \pm 0,1	11,65 \pm 0,55	11,90 \pm 0,1	12,65 \pm 0,1	11,81 \pm 0,27
		9	1		1		0	2	
CR	0,0	12,21 \pm 0,3	12,64 \pm 0,1	12,46 \pm 0,14	12,46 \pm 0,0	12,16 \pm 0,55	12,00 \pm 0,0	12,26 \pm 0,0	11,67 \pm 0,37
		6	2		9		7	5	
	0,5	12,27 \pm 0,6	12,67 \pm 0,1	12,41 \pm 0,15	12,56 \pm 0,0	12,49 \pm 0,62	12,18 \pm 0,1	12,20 \pm 0,1	11,91 \pm 0,12
		0	6		8		0	4	
	1,0	12,44 \pm 0,9	12,57 \pm 0,1	12,48 \pm 0,19	12,42 \pm 0,0	12,67 \pm 0,11	12,14 \pm 0,1	12,15 \pm 0,0	11,73 \pm 0,10
		0	7		4		2	6	

Tabela 6. Condutividade elétrica ($\mu\text{S}/\text{cm}$ por grama) em grãos de milho expostos a diferentes concentrações de AITC ($\mu\text{L}/\text{kg}$) aplicado em sistema sem e com recirculação e em diferentes posições da coluna grãos, durante 48 h.

Sistema	Posição na coluna de grãos (m)	Concentração do AITC ($\mu\text{L}/\text{kg}$)							
		8,33	12,50	16,66	20,83	25,00	29,16	33,33	37,50
SR	0,0	11,35 \pm 1,30	11,74 \pm 1,0	9,31 \pm 0,86	11,50 \pm 0,3	10,67 \pm 0,68	10,29 \pm 1,0	9,77 \pm 1,37	8,67 \pm 1,17
		6		8		9			
	0,5	10,71 \pm 2,21	10,12 \pm 1,2	10,34 \pm 0,55	11,40 \pm 1,6	10,57 \pm 0,16	10,35 \pm 0,4	10,19 \pm 0,4	9,87 \pm 1,16

	1,0	10,26±2,39	4 11,56±2,3	10,27±1,04	3 11,36±0,6	11,04±1,83	8 10,11±1,4	2 10,27±0,7	10,28±0,97
	0,0	9,84±1,61	4 10,57±0,3	10,75±1,28	7 11,35±0,2	11,93±2,56	3 10,26±2,4	1 9,67±1,38	11,53±1,22
CR	0,5	10,54±1,65	9 9,93±1,52	11,55±1,42	4 11,39±2,0	10,64±0,37	1 9,98±1,41	11,10±0,4	10,91±1,22
	1,0	9,79±1,09	11,03±1,7	11,20±2,49	1 12,44±1,8	10,34±0,59	10,85±1,9	0 10,55±1,4	10,58±0,54
			8		4		3	8	

Tabela 7. Luminosidade (L*) em grãos de milho expostos a diferentes concentrações de AITC ($\mu\text{L}/\text{kg}$) aplicado em sistema sem e com recirculação e em diferentes posições da coluna grãos, durante 48 h.

Sistem a	Posição na coluna de grãos (m)	Concentração do AITC ($\mu\text{L}/\text{kg}$)							
		8,33	12,50	16,66	20,83	25,00	29,16	33,33	37,50
	0,0	66,43±6,72	66,11±2,8	65,67±2,78	65,69±1,5	65,86±2,71	66,31±1,2	67,92±2,1	65,87±5,09
SR	0,5	66,30±3,38	3 66,97±3,6	65,76±5,01	6 65,77±3,8	65,54±4,40	9 66,81±3,6	1 68,83±7,6	68,40±1,59
	1,0	65,25±1,26	5 65,68±3,5	66,74±3,48	0 66,31±0,9	67,10±4,35	6 65,52±2,0	3 65,39±1,9	67,14±6,78
	0,0	67,81±8,06	6 66,71±0,8	67,53±7,11	3 68,21±5,9	62,19±4,78	0 64,94±4,7	7 67,07±4,0	65,98±2,03
CR	0,5	65,27±5,96	5 65,61±2,9	67,23±3,65	7 65,24±5,5	67,41±7,69	9 67,42±3,5	4 63,27±4,4	65,75±6,71
	1,0	65,29±7,15	1 66,83±6,0	67,65±6,55	8 65,75±5,5	67,91±5,78	3 64,20±2,5	8 65,24±3,8	64,92±6,83
			9		5		3	2	

Tabela 8. Tonalidade de cor (h^*) em grãos de milho expostos a diferentes concentrações de AITC ($\mu\text{L/kg}$) aplicado em sistema sem e com recirculação e em diferentes posições da coluna grãos, durante 48 h.

Sistema	Posição na coluna de grãos (m)	Concentração do AITC ($\mu\text{L/kg}$)							
		8,33	12,50	16,66	20,83	25,00	29,16	33,33	37,50
SR	0,0	83,29±0,7	81,47±4,4	82,29±1,2	82,18±2,4	80,30±1,7	82,18±4,3	82,23±3,1	83,71±3,49
		5	5	1	0	1	6	1	
	0,5	82,05±3,5	80,39±0,8	82,49±1,2	81,22±6,9	82,73±1,6	81,32±1,4	82,69±2,2	82,25±1,52
		4	6	6	6	5	7	7	
	1,0	81,72±4,3	80,92±1,9	82,91±2,5	80,88±1,4	82,45±1,8	82,18±4,2	81,76±1,3	83,17±3,35
		0	1	9	6	2	3	2	
CR	0,0	81,98±2,2	82,51±0,6	82,34±2,3	83,82±1,7	82,85±2,2	82,84±3,4	82,11±1,4	82,17±1,29
		1	1	7	5	2	4	5	
	0,5	81,93±2,0	82,73±2,2	83,83±1,6	82,64±4,1	82,69±1,7	81,65±2,3	83,36±7,3	83,38±2,71
		4	6	1	6	8	0	6	
	1,0	82,74±5,5	83,04±3,9	82,91±2,2	81,38±2,2	82,73±3,39	80,97±1,0	83,09±4,7	83,37±2,26
		5	0	2	0		7	1	

Tabela 9. Saturação de cor (C^*) em grãos de milho expostos a diferentes concentrações de AITC ($\mu\text{L/kg}$) aplicado em sistema sem e com recirculação e em diferentes posições da coluna, durante 48 h.

Sistema	Posição na coluna de grãos (m)	Concentração do AITC ($\mu\text{L/kg}$)							
		8,33	12,50	16,66	20,83	25,00	29,16	33,33	37,50
SR	0,0	26,98±6,0	26,63±5,8	27,03±3,0	25,36±4,5	26,85±5,7	25,27±6,2	26,68±1,7	27,83±3,95
-----		4	3	1	6	2	6	4	

	0,5	25,99±5,6 9	26,24±3,4 0	27,28±1,5 9	24,85±4,4 5	27,50±4,1 4	25,83±4,7 8	26,00±4,8 3	27,70±3,87
	1,0	25,95±2,9 2	27,15±3,3 9	26,03±5,2 4	25,15±3,6 4	27,20±2,0 1	27,11±4,3 1	26,50±5,7 2	27,18±5,57
	0,0	26,73±2,3 8	27,91±3,1 7	28,31±4,7 9	26,77±2,6 4	25,41±3,5 5	27,97±6,0 4	25,87±4,1 2	25,15±2,25
CR	0,5	23,75±5,2 5	25,77±5,6 2	25,22±2,3 6	28,40±5,0 7	28,86±5,1 4	26,68±4,2 9	26,77±2,8 2	25,70±6,10
	1,0	25,84±4,4 6	26,39±3,0 1	26,66±4,7 7	26,07±3,2 0	25,84±2,8 7	25,73±2,7 5	27,62±5,9 4	26,22±4,12

4. DISCUSSÃO

Diversos autores demonstraram a eficácia do AITC no controle de insetos-praga de grãos armazenados (SANTOS et al., 2011; PAES et al., 2012; FREITAS et al., 2016; VILELA et al., 2020). Santos et al. (2011) avaliaram a toxicidade do AITC em populações suscetíveis e resistentes a fosfina. Esses autores afirmaram que todas as populações de *T. castaneum* foram suscetíveis ao AITC e não houve resistência cruzada entre o AITC e a fosfina. Resultados similares foram obtidos por Freitas et al. (2016), que observaram que o AITC é eficaz no controle de populações de *S. zeamais* resistentes a fosfina. De acordo com Paes et al. (2012), o AITC é capaz de controlar todas as fases de desenvolvimento de *S. zeamais*, quando aplicado como fumigante em grãos de milho. Vilela et al. (2021) utilizaram AITC em grãos de feijão caupi e verificaram que esse composto inibe o desenvolvimento da espécie *C. maculatus*. Ainda de acordo com esses autores, concentrações subletais são capazes de inibir a reprodução dos insetos. Diante do exposto, pode se afirmar que os resultados obtidos no presente estudo corroboram com aqueles já descritos na literatura tendo em vista que o AITC foi eficaz para o controle de *S. zeamais*, *R. dominica* e *T. castaneum*, quando aplicado em sistema com recirculação em massa de grãos de milho.

É importante mencionar o mecanismo de ação e as alterações ocasionadas pelo AITC nos insetos. A citocromo c oxidase é a proteína alvo e a mitocôndria é relatada como o local de ação do AITC (WU et al., 2014; ZHANG et al., 2016; ZHANG et al., 2020). Ressalta-se que a citocromo c oxidase é importante no que tange ao consumo de oxigênio pelas células e a produção de ATP, que é essencial para controle metabólico, sinalização e sobrevivência celular (ARNOLD, 2012; TIMÓN-GÓMEZ et al., 2018). Mansour et al. (2012) relataram que o AITC atua nas células mitocondriais do tegumento e nas células epiteliais do intestino médio. Esses autores observaram que o AITC causa alteração morfológica ultraestrutural semelhante ao efeito ocasionado pela fosfina em larvas de *T. confusum*. Wu et al. (2014) analisaram as mitocôndrias das células epiteliais dos estigmas de insetos adultos de *S. zeamais* fumigados com AITC. Foi evidenciado que o AITC provoca redução da quantidade de cristas, rarefação e vacuolização nas mitocôndrias das células epiteliais dos estigmas ou espiráculos e, conseqüentemente, afeta a respiração dos insetos. Nesse sentido, Vilela et al. (2020) verificaram que o AITC aplicado em concentrações subletais

provoca redução na taxa respiratória de adultos de *Callosobruchus maculatus*. Tem-se ainda que o AITC é capaz de provocar má-formação em adultos de *T. castaneum*, quando as larvas e pupas são expostas a esse composto (SANTOS et al., 2011).

Conforme pôde ser atestado nos resultados do presente trabalho é importante adotar a recirculação para que o AITC seja eficaz no controle de *S. zeamais*, *R. dominica* e *T. castaneum*, na massa de grãos de milho. Utilizando-se o sistema de recirculação, verificou-se aumento da mortalidade dos insetos à medida que se elevou a concentração, nas três posições consideradas na camada de grãos (base, a 0,5 e a 1,0 m da base). Destaca-se que esse aumento na mortalidade dos insetos pode ser considerado uniforme, quando se compararam as tendências nas diferentes posições na coluna de grãos, no sistema com recirculação do AITC. No que tange à taxa específica de crescimento populacional e à perda de matéria seca, principalmente relacionadas a *S. zeamais* e *T. castaneum*, pode-se afirmar que os resultados obtidos confirmaram a importância da recirculação do AITC, seguindo a mesma tendência observada em relação aos dados de mortalidade dos insetos. Por outro lado, no sistema sem recirculação, a aplicação do AITC provocou mortalidade dos insetos somente na base da coluna de grãos. Nessa posição foi obtida mortalidade de 100%, para as três espécies de insetos testadas. A 0,5 e 1,0 m da base da coluna de grãos, o AITC não controlou os insetos, o que implicou em maior taxa de crescimento populacional e maior perda de matéria seca.

As diferenças nas tendências observadas nos dois sistemas de aplicação do AITC, no que se refere ao percentual de mortalidade dos insetos, podem ser explicadas pelo baixo valor do coeficiente de difusão do AITC e pela alta taxa de sorção desse composto pelos grãos (PAES et al., 2011). O transporte de gases em meios porosos ocorre por difusão e por convecção (INCROPERA et al., 2008). A difusão ocorre por diferença de concentração, a convecção se caracteriza por ser natural, devido à diferença de densidade, ou forçada, mediante uso de ventiladores. Enquanto que no sistema sem recirculação há somente o mecanismo de difusão, no sistema com recirculação é predominante o transporte por convecção.

De acordo com Paes et al. (2011), o coeficiente de difusão do AITC em massa de grãos de milho é igual a $7.2 \times 10^{-3} \text{ cm}^2/\text{s}$. Tem-se que o coeficiente de difusão do AITC é inferior ao da fosfina, que é de $1,59 \times 10^{-1} \text{ cm}^2/\text{s}$ e ao do CO_2 , que é da ordem de $10^{-2} \text{ cm}^2/\text{s}$ (MILLS et al., 2000; SHUNMUGAM et al., 2005; PRATES et al., 2019). Diante do exposto, o menor coeficiente de difusão do AITC justifica a mortalidade dos

insetos somente na base da coluna de grãos, quando se adotou o sistema sem recirculação do composto. Em contrapartida, quando adotado o sistema com recirculação do AITC, foi possível o controle adequado dos insetos, nas diferentes posições da camada de grãos. É importante mencionar que a vazão específica adotada no presente estudo (0,46 m³/min por tonelada) está de acordo com as recomendações para aeração de grãos em silos verticais (WEBER, 2005; KALIYAN et al., 2006; OLATUNDE et al., 2016).

Destaca-se que foram observadas diferenças expressivas quanto à tolerância das diferentes espécies ao AITC, quando se adotou o sistema de recirculação. A espécie mais tolerante ao AITC no sistema com recirculação foi *T. castaneum*, com CL₉₅ equivalentes a 1,88 e 1,97 vezes que as obtidas para *S. zeamais* e *R. dominica* respectivamente, no topo da coluna de grãos. Outros autores também avaliaram a tolerância e/ou resistência de diferentes espécies a fumigantes, obtendo resultados semelhantes ou diferentes dos obtidos no presente estudo. Pimentel et al. (2008) avaliaram a resistência de diferentes populações de *T. castaneum*, *R. dominica*, *S. zeamais* e *Oryzaephilus surinamensis* (Linnaeus, 1758) (Coleoptera: Sivanidae) à fosfina. As espécies menos suscetíveis a fosfina foram *R. dominica*, *S. zeamais* e *O. surinamensis*. Rozado et al. (2008) verificaram que *T. castaneum* é mais tolerante ao gás ozônio que *S. zeamais*. Lougraimzi et al. (2018) afirmaram que *T. castaneum* é mais tolerante ao óleo essencial de poejo (*Mentha pulegium* L.), aplicado por fumigação, que *S. oryzae*. Stefanazzi et al. (2011) avaliaram o efeito fumigante do óleo essencial de *Tagetes terniflora* sobre adultos de *T. castaneum* e *S. zeamais*. Os autores não observaram diferença na mortalidade, quando compararam os resultados obtidos para as duas espécies de insetos. O modo de ação do AITC é similar ao da fosfina, atuando no tegumento dos insetos e afetando sua respiração dos insetos (Mansour et al, 2012). Pode-se inferir ainda que as diferenças observadas, quando à toxicidade do AITC entre as três espécies de insetos avaliados no presente estudo, estejam associadas aos mecanismos de defesa utilizados para compostos fumigantes, como redução da atividade respiratória. A taxa respiratória dos insetos é um fator determinante no que se refere à susceptibilidade a fumigantes. De acordo com Pimentel et al. (2008), baixas taxas respiratórias resultam em absorção reduzida do fumigante.

Outros resultados relevantes do presente estudo são aqueles relacionados à qualidade dos grãos. A aplicação do AITC nos sistemas sem recirculação e com

recirculação não alterou a qualidade dos grãos imediatamente depois da exposição, quando se consideraram as variáveis teor de água, condutividade elétrica e coloração. Tais variáveis são importantes no que tange aos grãos armazenados e a adoção de tecnologias que não alterem a qualidade é de extrema relevância.

A viabilidade da aplicação do AITC em grãos de milho conforme demonstrado no presente estudo, adotando-se sistema de recirculação, amplia as possibilidades de uso desse composto para a proteção de grãos armazenados. Com essa forma de aplicação, pode-se afirmar que o AITC é uma alternativa viável tecnicamente à fumigação convencional com fosfina, para controlar insetos adultos de *S. zeamais*, *T. castaneum* e *R. dominica*. Entretanto, estudos posteriores são necessários no intuito de: i) determinar o efeito da recirculação do AITC sobre estágios imaturos das diferentes espécies de insetos de grãos armazenados; ii) avaliar o efeito inseticida de diferentes combinações de concentração e tempo de exposição; iii) estudar diferentes posições de aplicação do AITC; e iv) testar o efeito de diferentes vazões específicas do ar na distribuição do AITC na massa de grãos.

5. CONCLUSÕES

Os resultados obtidos permitiram concluir que:

1. A aplicação do AITC em sistema com recirculação, adotando-se vazão 0,46 m³/min por tonelada, contribui para a mortalidade de *S. zeamais*, *T. castaneum* e *R. dominica* de forma uniforme na massa de grãos de milho;
2. Nas condições adotadas no presente estudo, o AITC não altera a qualidade de grãos de milho;
3. O sistema de recirculação é uma estratégia viável para aplicação do AITC no controle de *S. zeamais*, *T. castaneum* e *R. dominica*, em grãos de milho.

6. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ABBOTT, W.S. 1925. A method of computing the effectiveness of an insecticide. **Journal of economic entomology**, v. 18, p. 265-267, 1925.

AGRAFIOTI, P., KALOUDIS, E., BANTAS, S., SOTIROUDAS, V., ATHANASSIOU, C. G. Modeling the distribution of phosphine and insect mortality in cylindrical grain silos with Computational Fluid Dynamics: Validation with field trials. **Computers and Electronics in Agriculture**, v. 173, p. 105383, 2020

ARNOLD, S. The power of life—cytochrome c oxidase takes center stage in metabolic control, cell signalling and survival. **Mitochondrion**, v. 12, p. 46–56, 2012.

ARORA, S., STANLEY, J., SRIVASTAVA, C. Temporal dynamics of phosphine fumigation against insect pests in wheat storage. **Crop Protection**, v. 144, p. 105602, 2021.

ASSIS de C. A. F., SILVA da J. P. J., QUEIROGA, V. D. P., FIGUEIREDO N. A., CÁRDENAS O. N., ROJAS, A. B. G. Eficiencia de extractos vegetales como insecticida sobre *Sitophilus zeamais* en granos de maíz almacenados. **Revista Ciencias Técnicas Agropecuarias**, v. 23, p. 57–62, 2014.

CHAUDHRY, M. Q. Phosphine resistance. **Pesticide Outlook**, v. 11, p. 88–91, 2000.

DAGLISH, G. J., PAVIC, H. Effect of phosphine dose on sorption in wheat. **Pest Management Science: formerly Pesticide Science**, v. 64, p. 513–518, 2008.

DAGLISH, G. J., PAVIC, H. Changes in phosphine sorption in wheat after storage at two temperatures. **Pest Management Science: formerly Pesticide Science**, v. 65, p. 1228–1232, 2009.

ESTRELA, J.; FAZOLIN, M.; CATANI, V. Toxicidade de óleos essenciais de *Piper aduncum* e *Piper hispidinervum* em *Sitophilus zeamais*. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, v. 41, p. 217–222, 2006.

EUROPEAN FOOD SAFETY AUTHORITY. EFSA panel on food additives and nutrient sources added to food (ANS): scientific opinion on the safety of allyl isothiocyanate for the proposed uses as a food additive. **EFSA Journal**, v.8, p.1943–1983, 2010

FREITAS, R. C. P., FARONI, L. R. D. A., HADDI, K., JUMBO, L. O. V., OLIVEIRA, E. E. Allyl isothiocyanate actions on populations of *Sitophilus zeamais* resistant to phosphine: Toxicity, emergence inhibition and repellency. *Journal of Stored Products Research*, v. 69, p. 257–264, 2016.

HAGSTRUM, D. W.; PHILLIPS, T. W.; CUPERUS, G. **Stored Product Protection**. Kansas: Kansas State University, 2012.

HARDIN, J. A., JONES, C. L., BONJOUR, E. L., NOYES, R. T., BEEBY, R. L., ELTISTE, D. A., DECKER, S. Ozone fumigation of stored grain; closed-loop recirculation and rate of ozone consumption. In: 2009 Reno, Nevada, June 21-June 24, 2009. **American Society of Agricultural and Biological Engineers**, p. 1, 2009.

INCROPERA, F. P.; DEWITT, D. P.; BERGMAN, T. L.; LAVINE, A. S. **Fundamentos de Transferencia de Calor e de Massa**. Grupo Gen-LTC, 2007.

KALIYAN, N., MOREY, R. V., WILCKE, W. F., CARRILLO, M. A., CANNON, C. A. Low-temperature aeration to control Indianmeal moth, *Plodia interpunctella* (Hübner),

in stored grain in twelve locations in the United States: a simulation study. **Journal of Stored Products Research**, v. 43, p. 177–192, 2006.

LÓPEZ-CASTILLO, L. M., SILVA-FERNÁNDEZ, S. E., WINKLER, R., BERGVINSON, D. J., ARNASON, J. T., GARCÍA-LARA, S. Postharvest insect resistance in maize. **Journal of Stored Products Research**, v. 77, p. 66–76, 2018.

LORINI, I., KRZYŻANOWSKI, F. C., FRANÇA-NETO, J. B., HENNING, A. A., HENNING, F. A. **Manejo Integrado de Pragas de Grãos e Sementes Armazenadas**. CEP, v. 86001, p. 970, 2015.

LORINI, I. **Manual Técnico para o Manejo Integrado de Pragas de grãos e Cereais Armazenados**, Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária, p 2005.

LOUGRAIMZI, H., EL IRAQUI, S., BOUAICHI, A., GOUIT, S., FADLI, M. Insecticidal effect of essential oil and powder of *Mentha pulegium* L. leaves against *Sitophilus oryzae* (Linnaeus, 1763) and *Tribolium castaneum* (Herbst, 1797) (Coleoptera: Curculionidae, Tenebrionidae), the main pests of stored wheat in Morocco. **Polish Journal of Entomology**, v. 87, p. 263–278, 2018.

MANSOUR, E. E., MI, F., ZHANG, G., JIUGAO, X., WANG, Y., KARGBO, A. Effect of allyl isothiocyanate on *Sitophilus oryzae*, *Tribolium confusum* and *Plodia interpunctella*: Toxicity and effect on insect mitochondria. **Crop Protection**, v. 33, p. 40–51, 2012.

MASKAN, M. Effect of maturation and processing on water uptake characteristics of wheat. **Journal of Food Engineering**, 47: 51–57, 2001.

MIKAMI, A. Y., CARPENTIERI-PÍPOLO, V., VENTURA, M. U. Resistance of Maize Landraces to the Maize Weevil *Sitophilus zeamais* Motsch. (Coleoptera: Curculionidae). **Neotropical Entomology**, v. 41, p. 404–408, 2012.

NAYAK, M. K., JAGADEESAN, R., SINGARAYAN, V. T., NATH, N. S., PAVIC, H., DEMBOWSKI, B., ... & EBERT, P. R. First report of strong phosphine resistance in stored grain insects in a far northern tropical region of Australia, combining conventional and genetic diagnostics. **Journal of Stored Products Research**, v. 92, p. 101813, 2021.

OLATUNDE, G., ATUNGULU, G. G., SADAKA, S. CFD modeling of airflow distribution in rice bin storage system with different grain mass configurations. **Biosystems Engineering**, v. 151, p. 286–297, 2016.

PAES, J. L., FARONI, L. R. D. A., DHINGRA, O. D., CECON, P. R., SILVA, T. A. Insecticidal fumigant action of mustard essential oil against *Sitophilus zeamais* in maize grains. **Crop Protection**, v. 34, p. 56–58, 2012.

PAES, J. L., FARONI, L. R. D. A., MARTINS, M. A., DHINGRA, O. D., SILVA, T. A. Diffusion and sorption of allyl isothiocyanate in the process of fumigation of maize. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, v. 15, p. 296–301, 2011.

PESCHIUTTA, M. L., ACHIMÓN, F., BRITO, V. D., PIZZOLITTO, R. P., ZYGADLO, J. A., ZUNINO, M. P. Fumigant toxicity of essential oils against *Sitophilus zeamais* (Motschulsky)(Coleoptera: Curculionidae): a systematic review and meta-analysis. **Journal of Pest Science**, p. 1-20, 2021.

PIMENTEL, M. A. G., COSTA, R. R., SOUSA, A. H., FARONI, L. R. D. A., DHINGRA, O. D. Toxicity of mustard essential oil to larvae and pupas of *Sitophilus zeamais* (Coleoptera: Curculionidae). **9th International Working Conference on Stored Product Protection**, p. 908–913, 2002.

PIMENTEL, M. A. G., FARONI, L. R. D. A., GUEDES, R. N. C., SOUSA, A. H., TÓTOLA, M. R. Phosphine resistance in Brazilian populations of *Sitophilus zeamais* Motschulsky (Coleoptera: Curculionidae). **Journal of Stored Products Research**, v. 45, p. 71–74, 2009.

PIMENTEL, M. A. G., FARONI, L. R. D. A., BATISTA, M. D., SILVA, F. H. D. Resistance of stored-product insects to phosphine. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, v. 43, p. 1671–1676, 2008.

PIMENTEL, M. A. G. **Resistência à fosfina: Magnitude, mecanismo e custo adaptativo**. Tese (Mestrado em Entomologia) Universidade Federal De Viçosa, p. 67, 2006.

PRATES, L. H. F., FARONI, L. R. D. A., HELENO, F. F., DE QUEIROZ, M. E. L. R., DE SOUSA, A. H., SILVA, M. V. D. A. Eugenol diffusion coefficient and its potential to control *Sitophilus zeamais* in rice. **Scientific reports**, v. 9, p. 1-11, 2019.

QUILES, J. M., NAZARETH, T. D. M., LUZ, C., LUCIANO, F. B., MAÑES, J., & MECA, G. Development of an antifungal and antimycotoxigenic device containing allyl isothiocyanate for silo fumigation. **Toxins**, v. 11, 2019.

ROZADO, A. F., FARONI, L. R. D. A., URRUCHI, W. M., GUEDES, R. N., PAES, J. L. Ozone application against *Sitophilus zeamais* and *Tribolium castaneum* on stored maize. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, v. 12, p. 282-285, 2008.

SAITO, M., LUCHINI, F. Substâncias obtidas de plantas e a procura por praguicidas eficientes e seguros ao meio ambiente. **Jaguariúna: Embrapa-CNPMA**, 1998.

SALGADO, N., FARONI, L. R. D. A., SOTO, A. Aceite esencial de *Piper crassinervium* para el control de *Sitophilus zeamais* (Coleoptera: curculionidade). **Boletín Científico Centro De Museos- Museo De Historia Natural**, v. 53, p. 7759, 2012.

SANTOS, A. K., FARONI, L. R. D. A., GUEDES, R. N., SANTOS, J. P. D., ROZADO, A. F. Nível de dano econômico de *Sitophilus zeamais* (M.) em trigo armazenado. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, v. 6, p. 273–279, 2002.

SANTOS, J. C., FARONI, L. R. D. A., SOUSA, A. H., GUEDES, R. N. C. Fumigant toxicity of allyl isothiocyanate to populations of the red flour beetle *Tribolium castaneum*. **Journal of Stored Products Research**, v. 47, p. 238–243, 2011.

SOUZA, V. N. D., OLIVEIRA, C. R. F. D., Matos, C. H. C., ALMEIDA, D. K. F. D. Fumigation toxicity of essential oils against *Rhyzopertha dominica* (F.) in stored maize grain. **Revista Caatinga**, v. 29, p. 435-440, 2016.

SPOCHACZ, M.; CHOWAŃSKI, S.; WALKOWIAK-NOWICKA, K.; SZYMCZAK, M.; ADAMSKI, Z. Plant-derived substances used against beetles—pests of stored crops and food—and their mode of action: A review. **Comprehensive Reviews in Food Science and Food Safety**, v.17, p.1339–1366, 2018.

STEFANAZZI, N., STADLER, T., FERRERO, A. Composition and toxic, repellent and feeding deterrent activity of essential oils against the stored-grain pests *Tribolium castaneum* (Coleoptera: Tenebrionidae) and *Sitophilus oryzae* (Coleoptera: Curculionidae). **Pest Management Science**, v. 67, p. 639–646, 2011.

TIMÓN-GÓMEZ, A., NÝVLTOVÁ, E., ABRIATA, L. A., VILA, A. J., HOSLER, J., BARRIENTOS, A. Mitochondrial cytochrome c oxidase biogenesis: Recent developments. In: **Seminars in cell & developmental biology**. Academic Press, 2018. p. 163–178.

VILELA, A. D. O., FARONI, L. R. D. A., SOUSA, A. H., PIMENTEL, M. A., GOMES, J. L. Toxicological and physiological effects of allyl isothiocyanate upon *Callosobruchus maculatus*. **Journal of Stored Products Research**, v. 87, p. 101625, 2020.

WEBER, É. A. **Exelência em beneficiamento e armazenagem de grãos**. Salles, 2005.

WU, H., LIU, X. R., YU, D. D., ZHANG, X., & FENG, J. T. Effect of allyl isothiocyanate on ultra-structure and the activities of four enzymes in adult *Sitophilus zeamais*. **Pesticide Biochemistry and Physiology**, v. 109, p. 12–17, 2014.

ZHANG, C., WU, H., ZHAO, Y., MA, Z., ZHANG, X. Comparative studies on mitochondrial electron transport chain complexes of *Sitophilus zeamais* treated with allyl isothiocyanate and calcium phosphide. **Pesticide Biochemistry and Physiology**, v. 126, p. 70–75, 2016.

ZHANG, M., ZHANG, D., REN, J., PU, S., WU, H., & MA, Z. Target verification of allyl isothiocyanate on the core subunits of cytochrome c oxidase in *Sitophilus zeamais* by RNAi. **Pest Management Science**, v. 77, p. 1292–1302, 2021.

RESUMO E CONCLUSÕES FINAIS

O presente estudo foi realizado no Setor de Pré-Processamento e Armazenamento de Produtos Agrícolas do Departamento de Engenharia Agrícola DEA, na Universidade Federal de Viçosa, em Viçosa-MG. Objetivou-se determinar a eficácia do AITC aplicado em sistema com recirculação no controle de *S. zeamais*, *Rhizopertha dominica* e *T. castaneum* em grãos de milho e caracterizar a qualidade do produto após exposição ao AITC.

Para a realização dos bioensaios de toxicidade do AITC no controle de *S. zeamais*, *T. castaneum* e *R. dominica* em sistemas com recirculação e sem recirculação foi utilizado um protótipo de PVC, com 1,60 m de comprimento e 0,30 m de diâmetro, dotado de plenum e com capacidade estática de 60 kg de grãos de milho. A vazão volumétrica adotada no sistema de recirculação do AITC foi de 27,6 L/min. Insetos adultos de *S. zeamais*, *T. castaneum* e *R. dominica* foram dispostos em diferentes posições da coluna de grãos: i) na base da coluna de grãos (0,0 m); ii) a 0,5 m da base da coluna de grãos; e iii) no topo da coluna de grãos (1,0 m). Foram determinadas as concentrações letais do AITC para 50 e 95% dos insetos adultos (CL₅₀ e CL₉₅), para as diferentes espécies de insetos em cada posição da coluna de grãos de milho. O tempo de exposição ao AITC adotado foi de 48 h. Foram utilizadas diferentes concentrações de AITC, definidas a partir de testes preliminares, sendo elas 8,33, 12,50, 16,67, 20,83, 25,00, 29,17, 33,33 e 37,50 µL/kg.

Determinaram-se a taxa instantânea de crescimento populacional e a perda de matéria seca nos grãos, depois de 55 dias da fumigação com AITC. Para determinar a qualidade dos grãos de milho expostos ao AITC, foram analisados o teor de água, a coloração e a condutividade elétrica dos grãos de milho.

Os resultados obtidos no presente estudo permitiram concluir que a aplicação do AITC em sistema com recirculação, adotando-se vazão 0,46 m³/min por tonelada, contribui para a mortalidade de *S. zeamais*, *T. castaneum* e *R. dominica* de forma uniforme na massa de grãos de milho. Além disso, nas condições adotadas no presente estudo, o AITC não altera a qualidade de grãos de milho.

Com base no presente estudo, sugere-se a realização de outras pesquisas, com o intuito de: determinar o efeito da recirculação do AITC sobre diferentes fases de espécies de insetos de grãos armazenados; avaliar o efeito inseticida de diferentes combinações de concentração e tempo de exposição; estudar diferente

posições de aplicação do AITC; e testar o efeito de diferentes vazões específicas do ar na distribuição do AITC na massa de grãos.