

**UNIVERSIDADE FEDERAL DE VIÇOSA**

**CAROLINA TAVARES DUARTE GODÓI**

**BIOATIVAÇÃO E HORMESE DE TIAMETOXAM EM SOJA**

**VIÇOSA – MINAS GERAIS  
2021**

**CAROLINA TAVARES DUARTE GODÓI**

**BIOATIVÇÃO E HORMESE DE TIAMETOXAM EM SOJA**

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

Orientador: Raul Narciso Carvalho Guedes

Coorientadores: Antônio Alberto da Silva  
Cláudio Pagotto Ronchi

**VIÇOSA – MINAS GERAIS  
2021**

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

T

G588b Godói, Carolina Tavares Duarte, 1992-  
2021 Bioativação e hormese de tiametoxam em soja / Carolina  
Tavares Duarte Godói. – Viçosa, MG, 2021.  
32 f. : il. ; 29 cm.

Orientador: Raul Narciso Carvalho Guedes.  
Dissertação (mestrado) - Universidade Federal de Viçosa.  
Referências bibliográficas: f. 28-32.

1. Neonicotinóides. 2. Hormese . 3. Compostos bioativos.  
I. Universidade Federal de Viçosa. Departamento de  
Entomologia. Programa de Pós-Graduação em Entomologia.  
II. Título.

CDD 22. ed. 632.9517

Bibliotecário(a) responsável: Alice Regina Pinto Pires CRB 2523

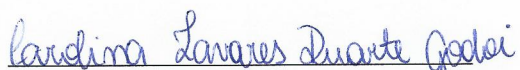
**CAROLINA TAVARES DUARTE GODÓI**

**BIOATIVAÇÃO E HORMESE DE TIAMETOXAM EM SOJA**

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

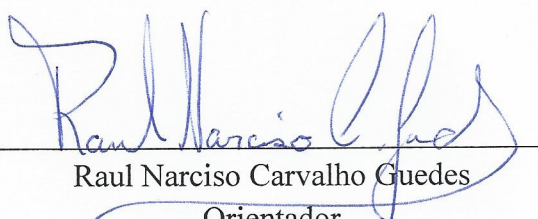
APROVADA: 29 de março de 2021.

Assentimento:



Carolina Tavares Duarte Godói

Autora



Raul Narciso Carvalho Guedes

Orientador

*DEDICO...*

*...Às companhias da vida que me fazem sorrir.*

## AGRADECIMENTOS

Aos meus queridos pais, Helena e Benito, pelo amor incondicional e apoio às minhas escolhas.

À minha irmã Raquel, por acreditar em mim e me passar a tranquilidade necessária para continuar persistindo com meus objetivos.

Ao meu companheiro de vida Mateus, pelo amor, companheirismo, aconselhamento, paciência, apoio e ajuda nos experimentos durante o momento de pandemia, ainda que tivesse que acordar às seis.

Aos meus amigos Bruna e Pedro, por me trazerem felizes distrações em momentos difíceis.

À Universidade Federal de Viçosa (UFV) e ao Programa de Pós-Graduação em Entomologia, pela oportunidade de realizar este curso.

À Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior (CAPES), pela concessão da bolsa de estudos.

Ao Prof. Raul Narciso C. Guedes, pela oportunidade, orientação, confiança e amizade.

Aos meus co-orientadores Profs. Cláudio Pagotto Ronchi e Antônio Alberto Silva, pela ajuda, confiança e, sobretudo, por estarem sempre acessíveis ao longo do projeto.

Aos técnicos e estudantes que de alguma forma contribuíram para a execução do experimento, especialmente ao Sr. Luís, Júlio, Martha, César, Silvério, Léo, Jéssica e Lara, que não hesitaram em me ajudar.

Aos meus colegas de laboratório e agregados: Juliana, Lara, Lírio, Leonardo, César, Lisbedt, Thiago, Diego, Andressa, Mayara e Luana, pelo acolhimento, amizade e convivência nos últimos anos.

À Daiane e à Jéssica, minhas companheiras de mestrado e amigas, por compartilharem experiências e estarem presentes durante as dificuldades.

A todos os professores do Programa de Pós-Graduação em Entomologia, que sempre se mostraram dispostos a me aconselhar e ajudar.

A Deus, pela trajetória até aqui. Sou muito grata pela oportunidade de aprender todos os dias e estou pronta para os próximos desafios!

## BIOGRAFIA

Carolina Tavares Duarte Godói nasceu em Belo Horizonte, Estado de Minas Gerais, no dia 25 de novembro de 1992, e foi a primeira filha da família composta de duas filhas de Helena Tavares Leandro e Benito Duarte de Godói.

Estudou o ensino fundamental no Colégio “Nossa Senhora da Piedade” e concluiu o Ensino Médio no Colégio Soma, em 2010.

Em março de 2013, aos 20 anos, passou a residir na cidade de Florestal, onde ingressou na Universidade Federal de Viçosa – *Campus* Florestal com o propósito de se formar Engenheira Agrônoma. No dia 6 de novembro de 2017 defendeu sua monografia, para obtenção do referido título.

Em março de 2019, mudou-se para Viçosa onde iniciou o Mestrado no Programa de Pós-Graduação em Entomologia da Universidade Federal de Viçosa. Durante a execução da pesquisa foi orientada pelo Prof. Raul N. C. Guedes e contou com o auxílio dos co-orientadores Dr. Antônio Alberto Silva e Dr. Cláudio Pagotto Ronchi. Submeteu-se à defesa de sua dissertação em março de 2021.

## RESUMO

GODÓI, Carolina, M.Sc., Universidade Federal de Viçosa, março de 2021. **Bioativação e hormese de tiametoxam em soja**. Orientador: Raul Narciso Carvalho Guedes. Coorientadores: Antônio Alberto Silva e Cláudio Pagotto Ronchi.

Neonicotinoides são inseticidas sistêmicos muito utilizados na agricultura devido à sua capacidade de penetração e translocação nos tecidos vegetais, baixa toxicidade a mamíferos e versatilidade nos modos de aplicação. Suspeita-se que essas moléculas, em especial o tiametoxam, possam estimular o crescimento e o desenvolvimento de plantas, favorecendo componentes de produção e controlando insetos-praga simultaneamente, remetendo ao fenômeno de hormese, já documentado para alguns herbicidas. Embora estudos prévios com plântulas tenham confirmado essa suspeita, ainda não existem trabalhos científicos que analisem de forma completa a ação dessas moléculas durante todo o ciclo da cultura. A confirmação do efeito bioativador do tiametoxam em plantas, como reflexo de seu efeito hormético, e o conhecimento de suas consequências em insetos fitófagos possibilitaria o melhor uso desse inseticida. Nesse contexto, esta pesquisa objetivou testar as seguintes hipóteses: (i) o inseticida tiametoxam causa alteração na morfologia e fisiologia das plantas, alterando parâmetros produtivos; (ii) estes parâmetros alteram-se conforme a concentração do inseticida, de forma a caracterizar hormese; e (iii) a ingestão de tiametoxam pela alimentação de plantas contaminadas desencadeia efeito hormético em mosca-branca (*Bemisia tabaci* MEAM1). Para tanto, sementes de soja do híbrido GMS 8365 COLUMBA foram tratadas com tiametoxam em oito concentrações, que corresponderam a concentrações acima e abaixo da recomendada pelo fabricante. Elas foram semeadas em e as plantas originadas foram conduzidas em casa de vegetação durante todo o ciclo da cultura, sendo avaliadas periodicamente quanto a parâmetros morfológicos, fisiológicos, produtivos. A taxa instantânea de crescimento populacional de mosca-branca *Bemisia tabaci* MEAM1 foi também avaliada. Como resultado, constatou-se efeito hormético do tratamento de sementes com tiametoxam na área foliar e matéria seca das raízes em plantas de soja, com pico coincidente com as concentrações 0,7 g i.a kg<sup>-1</sup> e 1,05 i.a kg<sup>-1</sup>, recomendadas na bula do produto. Entretanto, não houve alteração nos componentes fisiológicos e de produção nas condições do experimento. Para a mosca-branca foi observada relação inversamente proporcional da concentração aplicada com a taxa instantânea de crescimento populacional do inseto que, portanto, parece não ser afetado pelo efeito (indireto) do inseticida na planta. Conclui-se que o tiametoxam causa efeito hormético no crescimento da

soja. Porém, este efeito não refletiu em aumento de produtividade da soja, melhoria nas trocas gasosas ou performance inseticida contra a mosca-branca.

Palavras-chave: Neonicotinóide. Hormese. Bioativação.

## ABSTRACT

GODÓI, Carolina, M.Sc., Universidade Federal de Viçosa, March, 2019. **Bioactivation and hormesis of thiamethoxam in soybean.** Advisor: Raul Narciso Carvalho Guedes. Co-advisors: Antônio Alberto Silva and Cláudio Pagotto Ronchi.

Neonicotinoids are systemic insecticides widely used in agriculture due to their versatile modes of application, ability to penetrate and translocate in plant tissues, and the low mammalian toxicity. These molecules, especially thiamethoxam, may also stimulate the plant development increasing yield parameters and controlling pest insects. This phenomenon is referred to as hormesis and is already well documented for some herbicides. Although previous studies in some species have confirmed this suspicion through experiments with plants at an early developmental stage, there are still no studies that analyze the action of these molecules throughout the plant phenology. The confirmation of occurrence of thiamethoxan-mediated hormesis and/or bioactivation on plants and its potential consequences to phytophagous insect pests could help us to improve its use. In this context, our research aimed to test the following hypotheses: (i) thiamethoxam causes changes in plant development, altering yield parameters; (ii) these parameters are concentration-dependent, characterizing the hormesis phenomenon; and (iii) the intake of thiamethoxam through ingestion of contaminated plants have a hormetic effect on whiteflies (*Bemisia tabaci* MEAM1). For the experiment, we treated soybean seeds GMS 8365 COLUMBA using the insecticide thiamethoxam at eight concentrations, which correspond to concentrations above and below that recommended by the product label. The seeds were planted and the cultivation was carried out in greenhouse during the entire crop cycle, and subjected to periodical assessment of the plant morphological, productive, physiological parameters. The instantaneous rate of population growth of whiteflies *Bemisia tabaci* MEAM1 was also evaluated. As a result, we verified a hormetic effect of seed treatment with thiamethoxam in the leaf area and root dry weight of soybean plants with a peak of response around the recommended label rate. However, this effect did not affect the physiological plant production components. For whiteflies, an inverse relationship between the concentration and insect population growth was observed, which does not seem linked with the thiamethoxam effect on soybean plants. In conclusion, under the conditions of this research, thiamethoxam causes a hormetic response on the development of soybeans at concentrations close to those of the label rate, but this effect did not translate into an increase in crop yield, improvement in gas exchange or insecticidal performance against whiteflies.

Keywords: Neonicotinoid. Hormesis. Bioactivation.

## LISTA DE FIGURAS

Figura 1: Umidade relativa do ar e temperaturas máximas e mínimas da germinação à colheita do experimento .....	16
Figura 2: Medidas de trocas gasosas em estádios fenológicos da soja.....	20
Figura 3: Área foliar de soja em função da idade e tratamento de sementes com concentrações de tiametoxam. ....	21
Figura 4: Médias de massa de matéria seca de raiz de plantas de soja, cujas sementes foram tratadas com concentrações de tiametoxam.....	22
Figura 5: Componentes fisiológicos de produção em função de concentrações de tiametoxam. ....	23
Figura 6: Taxa instantânea de crescimento populacional para população de Bemisia tabaci MEAM1 submetidas a aplicação de concentrações do tiametoxam no tratamento de sementes de soja. ....	24

## SUMÁRIO

<b>1 INTRODUÇÃO</b> .....	12
<b>2 MATERIAL E MÉTODOS</b> .....	14
2.1 Tratamento de sementes .....	14
2.2 Condições de cultivo .....	14
2.3 Experimento Um: Tratamento de sementes com tiametoxam e desenvolvimento da soja	16
2.3.1 Medição de trocas gasosas.....	16
2.3.2 Altura e área foliar.....	17
2.3.3 Componentes fisiológicos da produção e massa seca da parte aérea .....	17
2.3.4 Matéria seca e volume de raiz .....	18
2.3.5 Análises estatísticas .....	18
2.4 Experimento Dois: Tratamento de sementes com neonicotinóides e mosca-branca.....	18
2.4.1 Criação dos insetos .....	19
2.4.2 Infestação das plantas .....	19
2.4.3 Análises estatística.....	19
<b>3 RESULTADOS</b> .....	20
<b>4 DISCUSSÃO</b> .....	24
<b>5 CONCLUSÕES</b> .....	27
<b>REFERÊNCIAS</b> .....	28

## 1 INTRODUÇÃO

Pesticidas são substâncias usadas para controlar, eliminar, prevenir ou atenuar organismos indesejados encontrados no ambiente, como pragas agrícolas, plantas daninhas ou vetores de doenças e são uma ferramenta importante para a produção de alimentos (Popp et al., 2013). No cenário agrícola, o uso dessas substâncias é visto pelos produtores como uma solução eficiente e econômica para os problemas encontrados na lavoura (Damalas e Eleftherohorinos, 2011), o que gera uma demanda mundial de 4,12 milhões de toneladas de pesticidas por ano (Food and Agriculture Organization, 2018). Apesar de ser a solução mais comumente utilizada pelos produtores, ela tem sido questionada pela comunidade científica e agências de regulamentação internacionais, que criticam as consequências do uso de algumas dessas substâncias, especialmente quanto à exposição de organismos não-alvo (Ali et al., 2020; Leong et al., 2020; Li, 2017).

No caso dos inseticidas, os neonicotinóides causam preocupação. Estes são muito utilizados no controle de insetos fitófagos e seu diferencial consiste na capacidade de penetração e translocação nos tecidos vegetais. O inseticida se distribui sobre todas as partes da planta e os tecidos permanecem contaminados durante várias semanas, sendo ingeridos pelos insetos que se alimentam da mesma, onde irão agir sobre os receptores nicotínicos de acetilcolina (nAChRs) (Jeschke et al., 2011; Juraske et al., 2009; Sharma e Singh, 2014; Simon-Delso et al., 2015). Apesar das consequências da exposição e seus efeitos residuais sobre mamíferos, polinizadores e inimigos naturais serem foco de vários estudos (Ardalani et al., 2021; Cheng et al., 2018; Li et al., 2020; Li, 2017), as alterações no desenvolvimento de organismos vegetais é um assunto pouco estudado, ainda que no cenário agrícola estes sejam o alvo da aplicação inseticida e a principal via de contato entre inseticida e inseto.

O modo como inseticidas podem causar alterações nas plantas é frequentemente postulado como se relacionando ao aumento ou diminuição da produção de espécies reativas de oxigênio (EROs), o que causa mudanças nos balanços de fitohormônios e na biossíntese de moléculas essenciais (Toumi et al., 2015; Yengkokpam e Mazumder, 2020; Yilmaz et al., 2017). O aumento das EROs pode ocasionar efeitos negativos na produção de plantas decorrentes de baixos índices de germinação, crescimento e alta taxa transpiratória (Ahmed et al., 2018; Ford et al., 2011; Macedo et al., 2013b). No que tange à diminuição das EROs observa-se aumento na germinação, crescimento e desenvolvimento de raízes e parte aérea (Dhungana et al., 2016; Kunal e Sharma, 2012; Macedo e Castro, 2011). Apesar dos

mecanismos determinantes da ocorrência dessas alterações ainda serem pouco conhecidos, o efeito bioativador ou fitotóxico para o mesmo produto remete ao fenômeno de hormese, que é bem documentado para herbicidas (Ather Nadeem et al., 2017; Belz et al., 2011; Boutin et al., 2014; Silva et al., 2018).

A hormese é um fenômeno refletido em curvas de concentração-resposta bifásicas em que substâncias químicas têm efeito estimulante acentuado em concentrações relativamente baixas e um efeito tóxico em altas concentrações (Calabrese et al., 2007; Cutler, 2013; Guedes e Cutler, 2014). Expandindo-se do princípio de Paracelsus de que “a dose determina o veneno”, normalmente aplicado a curvas concentração-resposta monofásicas, para o de hormese, a exposição de plantas a inseticidas poderia ter efeito bioativador ou tóxico, dependendo da concentração aplicada. No caso específico de neonicotinóides essa hipótese se torna ainda mais curiosa pois, devido à sua persistência na planta, seu resíduo poderia exibir efeito hormético também, porém indireto, em insetos fitófagos que venham a se alimentar da mesma. Alguns estudos já demonstraram hormese de neonicotinóide em pragas agrícolas (Ayyanath et al., 2014, 2013; Haddi et al., 2016), no entanto nenhum deles em decorrência da alimentação em plantas tratadas sistemicamente.

Alguns trabalhos mostram indícios preliminares de hormese mediada por neonicotinóides em organismos vegetais, especialmente quando se trata do tiametoxam. Essa molécula parece alterar a fisiologia de plantas, modificando a distribuição de fotoassimilados, aumentando o conteúdo de proteína total e favorecendo o ganho de biomassa (Annamalai et al., 2018; Lanka et al., 2017; Macedo e Castro, 2011; Preetha e Stanley, 2012). Ainda assim, trabalhos que evidenciem efeitos concretos durante todo o ciclo da cultura ou que avaliem o impacto de seu efeito bioativador sobre insetos fitófagos inexistem.

Visando preencher essa lacuna, foram aplicadas diferentes concentrações do inseticida tiametoxam no tratamento de sementes de soja (*Glycine max*) com o intuito de avaliar alterações na morfologia, fisiologia, e produtividade das plantas, além do seu impacto no incremento populacional de mosca-branca (*Bemisia tabaci* MEAM1). A soja é a principal fonte de proteína na alimentação animal e uma das principais *commodities* mundiais, com uma produção de 337,298 milhões de toneladas apenas em 2020 (United States Department of Agriculture, 2021). Já a mosca-branca é uma praga-chave da cultura, que se alimenta pela sucção de seiva no floema, injeta toxinas e transmite viroses (De Barro et al., 2011). Sua característica sugadora torna esta espécie praga um dos principais alvos de controle por inseticidas sistêmicos (Simon-

Delso et al., 2015). Dessa forma, detectar alterações na produtividade de soja e na reprodução da mosca-branca quando submetidas a tiametoxam, não apenas aumentam os conhecimentos sobre as propriedades destas moléculas amplamente utilizadas, como também auxilia para um melhor manejo da cultura e das pragas associadas a ela.

Nesse contexto, o presente trabalho objetivou testar as seguintes hipóteses: (i) o inseticida tiametoxam causa alteração na morfologia e fisiologia das plantas, alterando parâmetros produtivos; (ii) estes parâmetros alteram-se conforme a concentração do inseticida, de forma a caracterizar hormese; e (iii) a ingestão de tiametoxam pela alimentação de plantas contaminadas desencadeia efeito hormético em mosca-branca (*Bemisia tabaci* MEAM1). Dessa maneira, espera-se que os resultados dessa pesquisa possam contribuir para entendimento da interação inseticida-planta-inseto e para o melhor uso dessa molécula inseticida.

## 2 MATERIAL E MÉTODOS

### 2.1 Tratamento de sementes

Sementes de soja (*Glycine max*) do híbrido foram tratadas com uma formulação comercial do inseticida tiametoxam (Cruiser ® 350 FS, Syngenta, São Paulo, SP) diluído em água (3 mL de água/kg de sementes), em diferentes concentrações do ingrediente ativo (0,00 g kg<sup>-1</sup>, 0,21 g kg<sup>-1</sup>, 0,525 g kg<sup>-1</sup>, 0,70 g kg<sup>-1</sup>, 1,05 g kg<sup>-1</sup>, 2,10 g kg<sup>-1</sup>, 5,25 g kg<sup>-1</sup> e 10,5 g kg<sup>-1</sup>). Essas concentrações correspondem ao tratamento sem inseticida (controle), e a concentrações abaixo e acima da recomendação de bula do produto para o controle de *Bemisia tabaci*, que é de 0,7g kg<sup>-1</sup> e 1,05 g kg<sup>-1</sup>.

### 2.2 Condições de cultivo

As sementes tratadas foram semeadas em vasos de plástico contendo 8 L de amostras de Argissolo Vermelho-Amarelo, previamente adubado de acordo com análises químicas do solo e recomendações técnicas para a cultura. A análise final do solo antes do plantio se encontra na Tabela 1.

Tabela 1: Resultados das análises químicas do solo utilizado no experimento

pH	P	K	Al <sup>3+</sup>	Ca <sup>2+</sup>	Mg <sup>2+</sup>	H+Al	SB	t	T	V	MO
----	---	---	------------------	------------------	------------------	------	----	---	---	---	----

	mg dm <sup>3</sup>		cmol <sub>c</sub> dm <sup>-3</sup>						%	dag/kg	
6,0	167,0	410	0	7,85	0,84	2,64	9,74	9,74	12,38	78,7	2,96

Análises realizadas no Laboratório de Análise de Solos Viçosa LTDA. Extratores: B= Água quente 1:2,5; P e K = Mehlich 1; Ca, Mg e Al = KCL 1mol/L. SB = soma de bases; t = capacidade efetiva de troca de cátions; T = capacidade de troca catiônica à pH 7,0; V= índice de saturação por bases; MO = matéria orgânica.

Após a fertilização do solo utilizando os fertilizantes superfosfato simples, NPK 8-28-16 e CaCO<sub>3</sub> nas doses de 3 kg m<sup>-3</sup>, 1,5 kg m<sup>-3</sup>, e 1 kg m<sup>-3</sup>, respectivamente, fez-se o enchimento dos vasos e semeio da soja utilizando cinco sementes por vaso. Dez dias após a emergência das plântulas, estas foram desbastadas de forma a deixar apenas uma por vaso; aos quinze dias após emergência foi realizada adubação nitrogenada com sulfato de amônio na dose 0,6 g por vaso. Ao todo foram semeados 11 vasos para cada tratamento, totalizando 88 vasos, sendo que 64 foram destinados ao Experimento I e 24 ao Experimento II, conforme será descrito a seguir.

Durante todo o período de condução do experimento na casa de vegetação (março a agosto de 2020), as plantas estiveram expostas a condições de luz e temperatura natural, em casa de vegetação localizada na Universidade Federal de Viçosa, Viçosa (MG) (latitude 20° 45' 37" S, longitude 42° 52' 04" O e altitude de 650 m). O cultivo foi suspenso em mesas e a irrigação se deu por microaspersores suspensos e automatizados do início do ciclo até a fase reprodutiva das plantas, quando a irrigação passou a ser feita manualmente. Um termohigrômetro foi utilizado para registro diário da temperatura e umidade relativa do ar desde a germinação (25 de março de 2020) até a colheita (dois de agosto de 2020) (Figura 1).

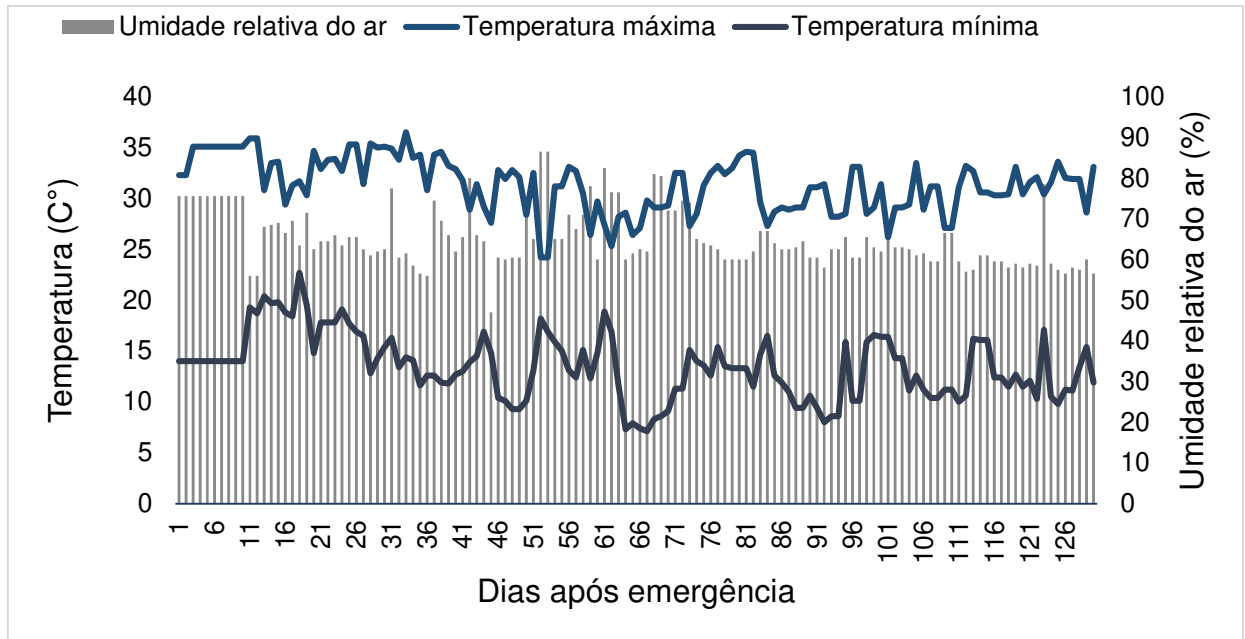


Figura 1: Umidade relativa do ar e temperaturas máximas e mínimas da germinação à colheita do experimento

### 2.3 Experimento I: Tratamento de sementes com tiametoxam e desenvolvimento da soja

Para este experimento, 64 plantas foram divididas em oito blocos casualizados, com oito plantas por tratamento, sendo uma planta por vaso. Aos 15 e 30 dias de idade, as plantas foram submetidas à adubação foliar com micronutrientes ( $1 \text{ kg ha}^{-1}$  SQL Super, Quimifol, Tietê, SP) e a partir do período reprodutivo foram realizadas três pulverizações com um fungicida de ação tóxica ( $3 \text{ kg ha}^{-1}$  Mancozebe, Nortox, Araçongas, PR), no intuito de prevenir o aparecimento da ferrugem asiática nas plantas. Foram avaliados parâmetros morfológicos, fisiológicos e produtivos das plantas de soja tratadas com as diferentes concentrações do inseticida.

#### 2.3.1 Medição de trocas gasosas

As medidas de assimilação líquida de  $\text{CO}_2$  ( $A$ ), condutância estomática ( $g_s$ ), relação entre concentração interna e externa de  $\text{CO}_2$  ( $C_i/C_a$ ), taxa transpiratória ( $E$ ), *deficit* de pressão de vapor entre atmosfera e espaços intercelulares (DPV) e eficiência instantânea no uso da água ( $A/E$ ) foram determinadas utilizando um analisador de gases no infravermelho (LI-6400XT, LICOR, Lincoln, NE, EUA). As medições foram realizadas em diferentes estádios vegetativos V3, V5, V6, V8, V9 e, também, nos estádios reprodutivos R2 e R3 (16, 23, 28, 38, 41, 58 e 64

dias após emergência, respectivamente). As medições foram feitas no folíolo terminal do segundo trifólio superior totalmente expandido das plantas, exceto no estádio V3, em que foi medido o primeiro trifólio superior totalmente expandido. As medições foram feitas no horário de 7h as 11h, sob umidade relativa do ar e temperatura ambientes. Foi utilizada a radiação artificial saturante com fluxo de fótons de  $1.200 \mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$ , de acordo com a curva de radiação saturante (Bezerra, 2000).

### 2.3.2 Altura e área foliar

Três plantas por tratamento foram utilizadas para medir a altura e área foliar das plantas durante o ciclo, nos estádios V3, V5, V6, V9, R2 e R5 (16, 23, 28, 41, 58 e 78 dias após emergência). Com o auxílio de uma trena, foram medidos a altura das plantas, bem como o comprimento e largura do folíolo terminal de todos os trifólios das mesmas. Os valores de largura e comprimento encontrados foram posteriormente usados para o cálculo da área foliar, utilizando a seguinte equação (Richter et al., 2014):

$$AF = 2,0185x(CL) \quad (\text{Equação 1})$$

onde AF = área foliar do trifólio, C = comprimento do folíolo terminal e L = largura do folíolo terminal.

### 2.3.3 Componentes fisiológicos da produção e massa seca da parte aérea

Ao final do ciclo, todas as plantas foram cortadas rentes ao solo e sua parte aérea foi pesada e acondicionada em sacos de papel para avaliação em laboratório. Foram avaliados o número de nós no caule principal (NNMS), bem como os componentes fisiológicos da produção de soja, a saber: número de vagens por planta (NPP), número de grãos por vagem (GPP), número de grãos por planta (GPL), peso de mil grãos (WTG) e massa de grãos por planta (BPF). Para a avaliação dos grãos, a umidade deles foi padronizada para 13%, utilizando o método da estufa.

Após a determinação dos componentes fisiológicos, a parte aérea das plantas foi submetida à estufa de circulação forçada de ar a  $65^{\circ}\text{C}$ , até atingir massa constante, quando foi registrado seu peso com o auxílio de uma balança semi-analítica (L303IH, Bel, Piracicaba, São Paulo, Brasil).

### 2.3.4 Matéria seca e volume de raiz

Após retirada da parte aérea, as raízes das plantas foram separadas do solo com o auxílio de água corrente e uma peneira de malha 2 mm. O volume foi calculado através do método de deslocamento de água, onde era colocado um volume conhecido de água em uma proveta, e em seguida mergulhada cada raiz (Harrington et al., 1994). O volume radicular corresponde ao volume de água deslocado na proveta, que foi expresso em  $\text{cm}^3$ . Em seguida, as raízes eram acondicionadas em sacos de papel e direcionadas à estufa de circulação forçada de ar a  $65^\circ\text{C}$ , onde ficavam até atingir temperatura constante, sendo então determinada sua massa seca com o auxílio de balança analítica (L303IH, Bel, Piracicaba, São Paulo, Brasil).

### 2.3.5 Análises estatísticas

Os dados relativos à altura das plantas, área foliar, matéria seca e componentes fisiológicos de produção foram sujeitos a análises de regressão tendo concentração de tiametoxam e idade da planta como variáveis independentes. Os modelos obtidos foram testados e selecionados baseando-se nos critérios de parcimônia, valores de  $F$  e  $P$ , e nível de aumento de  $R^2$  com aumento de complexidade do modelo, sempre usando o procedimento de ajuste de curvas dos programas TableCurve 3D e 2D (Systat, San Jose, CA, EUA). Os parâmetros de trocas gasosas foram sujeitos à análise de variância utilizando modelo linear generalizado (GLM), considerando como variáveis independentes concentração (contínuo) e estágio fenológico (categórico). As pressuposições de normalidade e homocedasticidade foram checadas usando gráficos diagnósticos (*normal Q-Q plot* e *Residuals vs Fitted*). Quando necessário, a superdispersão foi ajustada usando *quasipoisson*. Tratamentos significativos foram comparados por contraste ( $P < 0,05$ ). As últimas análises foram realizadas no programa R v.3.5.1 (R Core-Team, 2019).

## 2.4 Experimento II: *Tratamento de sementes com neonicotinóides e efeito em mosca-branca*

No segundo experimento, foi avaliada a taxa instantânea de crescimento populacional de mosca-branca (*Bemisia tabaci* MEAM1) ao se alimentar de plantas submetidas a diferentes

concentrações de tiametoxam (mesmas do experimento anterior). O experimento foi inteiramente casualizado, com três repetições (plantas) por tratamento, totalizando 24 plantas.

#### **2.4.1 Criação dos insetos**

Adultos de mosca-branca (espécie putativa MEAM1; *Bemisia tabaci*) foram coletados a campo e sua criação foi estabelecida em laboratório, em plantas de beringela. Um dia antes da infestação, os insetos foram sexados e acomodados em gaiolas com plantas de soja.

#### **2.4.2 Infestação das plantas**

Ao atingir o estágio vegetativo V3, cada planta de soja foi envolta por uma sacola de tecido organza, que era suportada com o auxílio de estacas de madeira cravadas no solo. Essas sacolas permitiam a circulação de ar e passagem de luz para absorção pela planta, mas impediam o escape dos insetos. As plantas foram infestadas com três casais de mosca-branca, em duas ocasiões, a primeira com 15 dias após emergência (i.e., 15 DAE) e, posteriormente, com 29 DAE. Cinquenta dias após a primeira infestação (65 DAE), adultos e ninfas foram contabilizados com o auxílio de lupas e um sugador, e foi calculada a taxa instantânea de crescimento populacional ( $r_i$ ), seguindo Stark e Banks (2003).

#### **2.4.3 Análises estatística**

Os dados relativos à taxa instantânea de crescimento populacional de mosca-branca foram submetidos a análise de regressão tendo concentração de tiametoxam como variável independente. Os modelos obtidos foram testados e selecionados baseando-se nos critérios de parcimônia, valores de  $F$  e  $P$ , e nível de aumento de  $R^2$  com aumento de complexidade do modelo, usando o procedimento de ajuste de curvas do programa TableCurve 2D (Systat, San Jose, CA, EUA).

### 3 RESULTADOS

Ao todo foram realizadas medições em 8 plantas por tratamento em 7 diferentes idades, totalizando 448 medições de trocas gasosas. Não foi comprovado efeito das concentrações de tiametoxam para nenhum dos parâmetros de trocas gasosas avaliados dentro de cada estágio fenológico. No que tange a comparação dos parâmetros entre estádios, observou-se diferença significativa para  $A$  ( $F_{6,440} = 111.66$ ,  $p < 0,001$ ,  $R^2 = 0,87$ ),  $g_s$  ( $F_{6,440} = 379.53$ ,  $p < 0,001$ ),  $E$  ( $F_{6,440} = 258,04$ ,  $p < 0,001$ ) DPV ( $F_{6,440} = 202,39$ ,  $p < 0,001$ ),  $Ci/Ca$  ( $F_{6,440} = 145.08$ ,  $p < 0,001$ ) e  $A/E$  ( $F_{6,440} = 220.62$ ,  $p < 0,001$ ) (Figura 2).

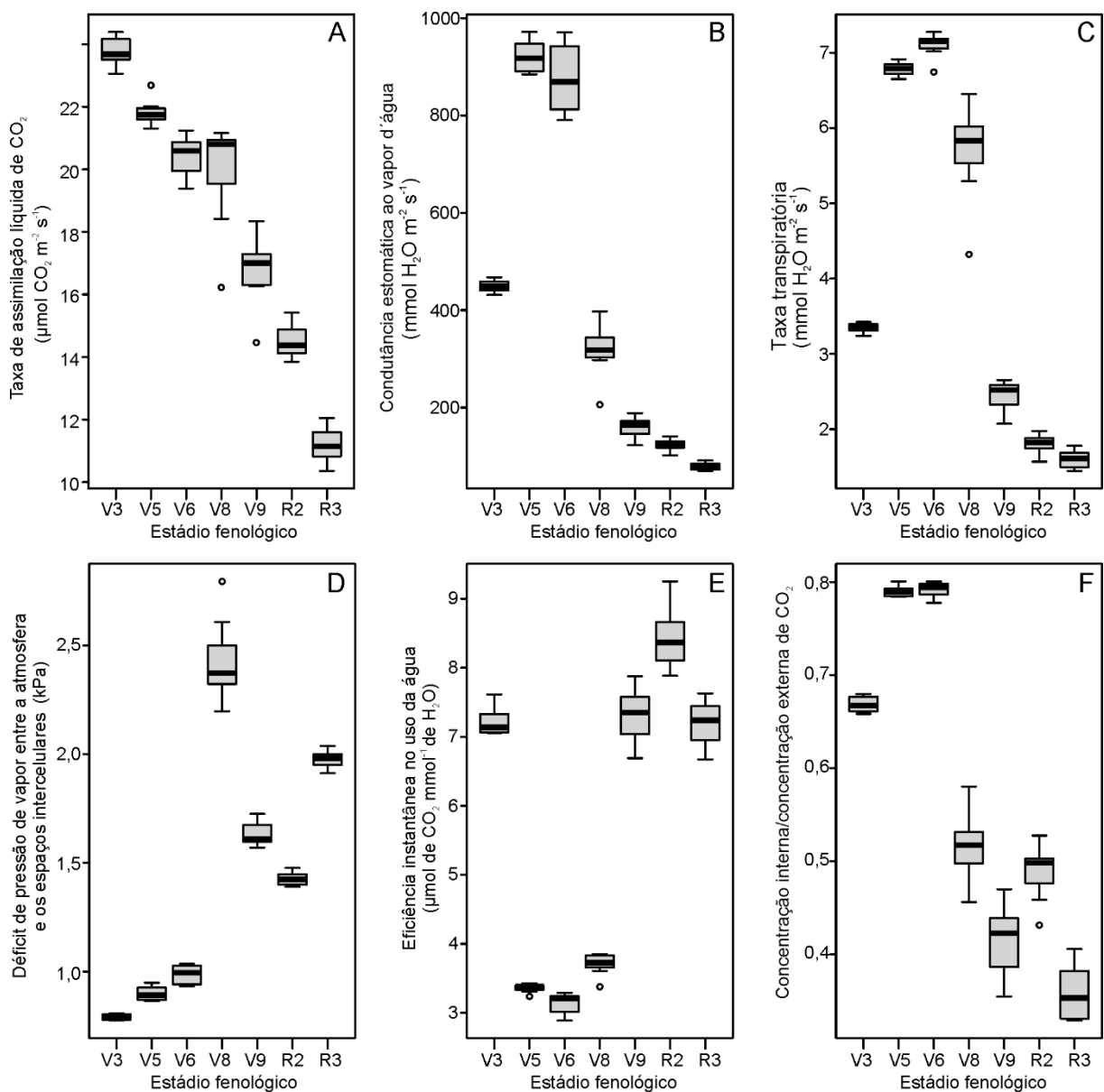


Figura 2: Medidas de trocas gasosas em estádios fenológicos da soja.

A partir dos 41 DAE verificou-se efeito hormético da interação entre a concentração de tiametoxam e idade da soja na área foliar (Figura 3). Conforme a idade da soja avança, naturalmente verificou-se aumento da área foliar e posterior uma queda ao fim da fase reprodutiva. Contudo, também foi observado efeito da variação das concentrações aplicadas, com pico próximo a 4000 cm<sup>2</sup>, referente à concentração de 0,7 g i.a. kg<sup>-1</sup> aos 58 DAE (Gaussiano,  $F_{3,140} = 340,31$ ,  $p < 0,001$ ,  $R^2 = 0,87$ ). A altura de plantas também diferiu entre as idades analisadas ( $F_{35,96} = 300,30$ ,  $p < 0,001$ ), mas a mesma relação não foi verificada para as concentrações inseticida ( $F_{7,96} = 1,65$ ,  $p = 0,13$ ).

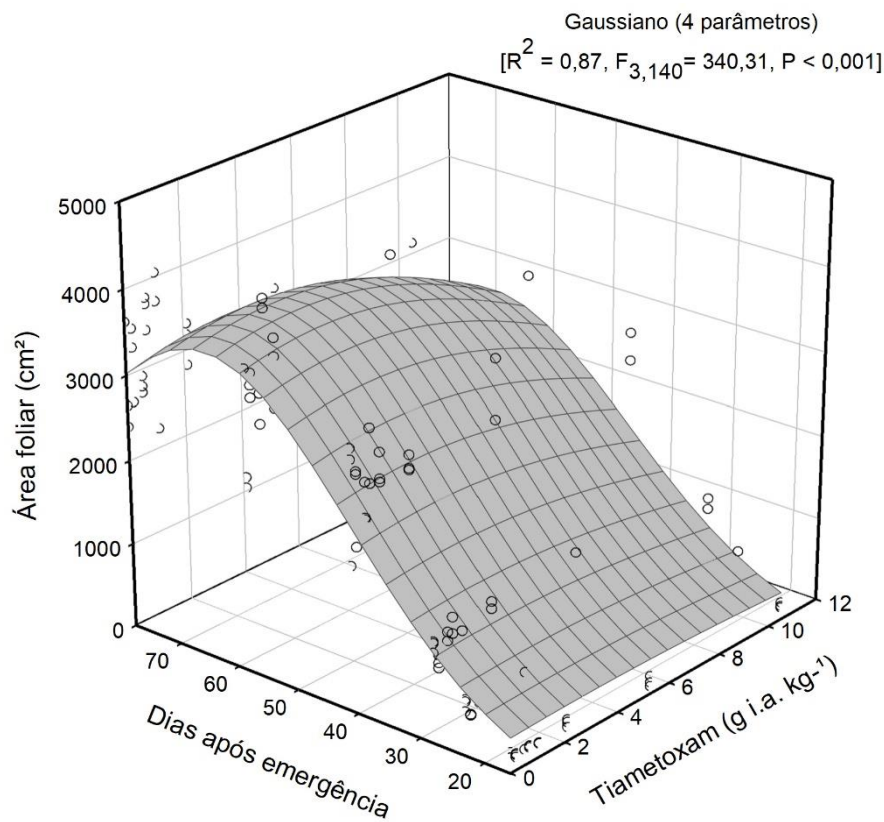


Figura 3: Área foliar de soja em função da idade e tratamento de sementes com concentrações de tiametoxam.

Ao final do ciclo, foi reconhecida relação significativa entre a matéria seca das raízes e concentrações de tiametoxam ( $R^2 = 0,75$ ,  $p < 0,001$ ). A curva caracteriza efeito hormético para este parâmetro, com um pico próximo à concentração 1,05 g i.a. kg<sup>-1</sup> (Figura 4). Em contraste, não houve efeito significativo do inseticida para volume das raízes ( $F_{7,49} = 1,11$ ,  $p = 0,37$ ).

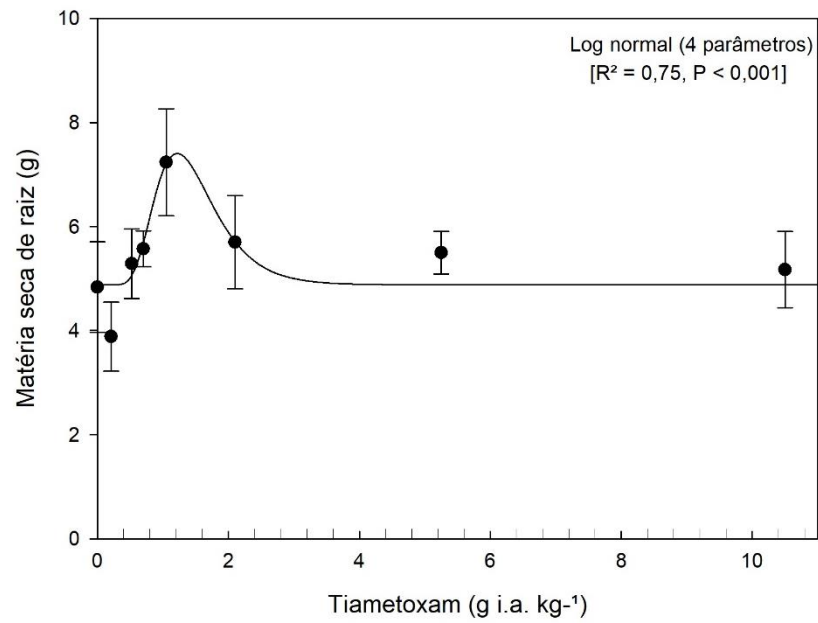


Figura 4: Médias de massa de matéria seca de raiz de plantas de soja, cujas sementes foram tratadas com concentrações de tiametoxam.

Também não foi observado efeito significativo de concentrações de tiametoxam no número de nós no caule principal, ( $F_{7,49} = 0,76$ ,  $p = 0,63$ ), número de vagens por planta ( $F_{7,49} = 1,58$ ,  $p = 0,16$ ), número de grãos por vagem ( $F_{7,49} = 1,05$ ,  $p = 0,41$ ), número de grãos por planta ( $F_{7,49} = 0,67$ ,  $p = 0,69$ ), peso de mil grãos ( $F_{7,49} = 0,61$ ,  $p = 0,75$ ) ou massa de grãos por planta ( $F_{7,49} = 0,36$ ,  $p = 0,92$ ), que consistem nos componentes fisiológicos de produção (Figura 5).

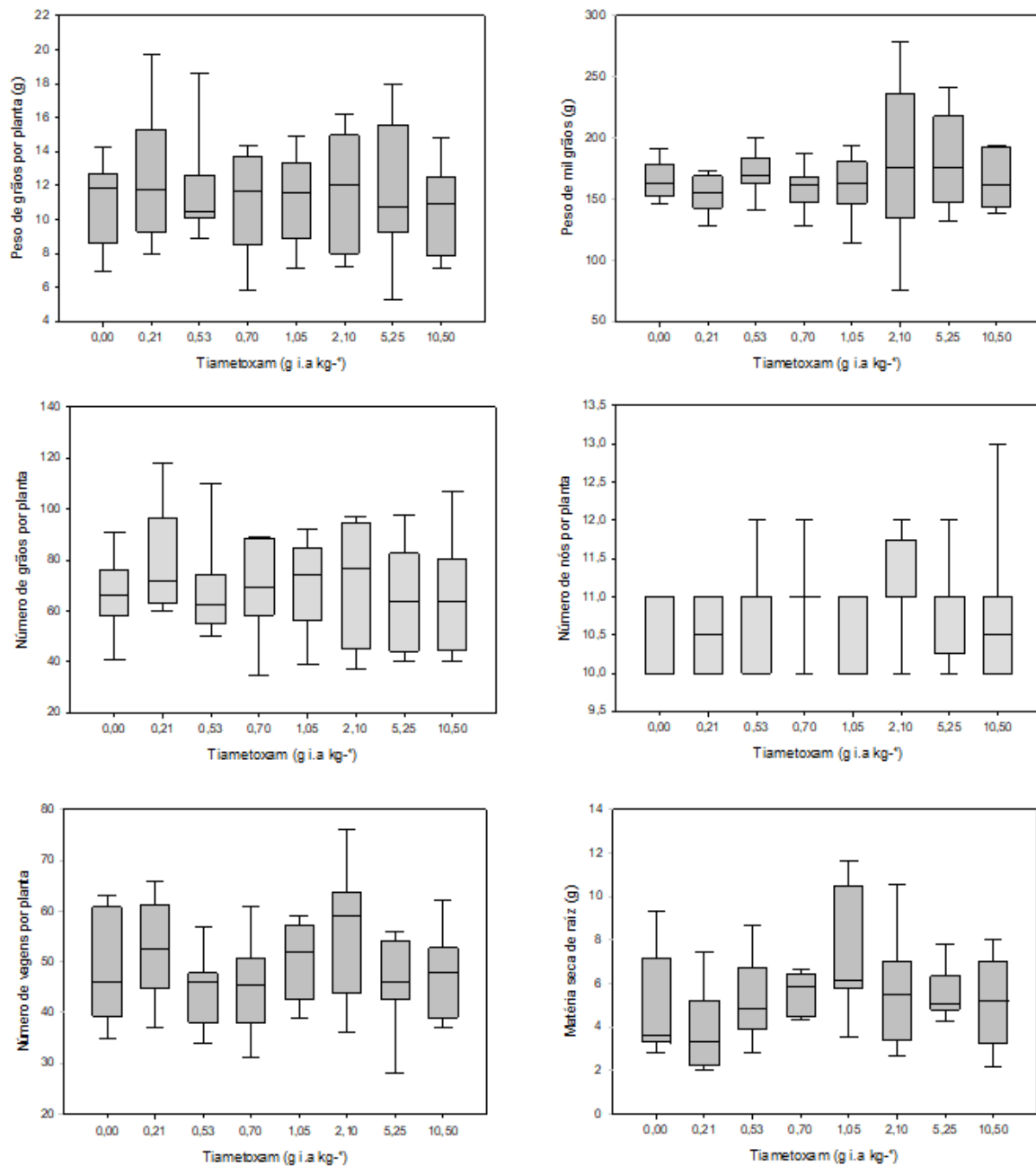


Figura 5: Componentes fisiológicos de produção em função de concentrações de tiametoxam.

No experimento II constatou-se relação inversa entre concentrações do tiametoxam e a taxa instantânea de crescimento populacional de mosca-branca ( $F_{7,16} = 4,06$ ,  $R^2 = 0,94$ ,  $p < 0,01$ ), (Figura 6).

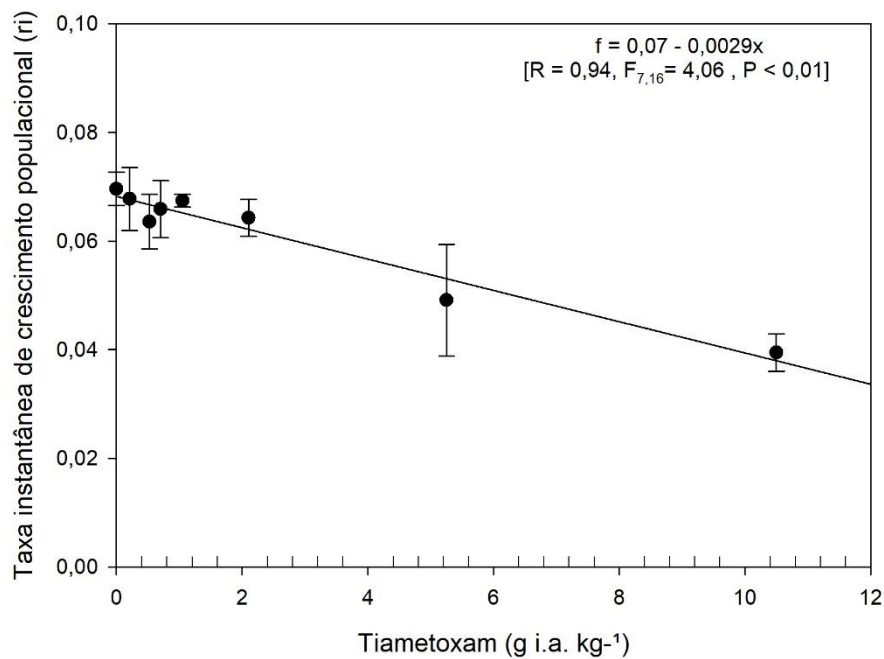


Figura 6: Taxa instantânea de crescimento populacional para população de *Bemisia tabaci* MEAM1 submetidas a aplicação de concentrações do tiametoxam no tratamento de sementes de soja.

#### 4 DISCUSSÃO

Os efeitos dos inseticidas neonicotinóides no desenvolvimento de plantas vêm sendo destacados em uma série de estudos que abordam o potencial bioativador destas moléculas (Annamalai et al., 2018; Casida, 2018; Dhungana et al., 2020; Macedo et al., 2013a; Preetha e Stanley, 2012). Embora trabalhos prévios tenham observado consequências do tiametoxam na germinação e produção de plântulas, esta é a primeira pesquisa que objetivou avaliar as alterações morfológicas e fisiológicas decorrentes de sua aplicação até o final do ciclo da soja. Constatou-se efeito hormético do tiametoxam nos parâmetros de área foliar (após os 41 DAE) e matéria seca de raízes (ao final do ciclo da cultura) de plantas tratadas, com pico nas concentrações 0,7 g i.a kg<sup>-1</sup> e 1,05 i.a kg<sup>-1</sup>, respectivamente, que caracterizam as concentrações mínima e máxima recomendada para aplicação em soja segundo a bula do produto. Entretanto, não foi observado o mesmo para os componentes fisiológicos de produção, o que significa que o aumento de biomassa não foi convertido em maior produtividade da soja. Possivelmente, este resultado se atribui às condições de cultivo das plantas no experimento, às quais não foram expostas a situações de estresse comumente encontradas em condições de campo.

O uso do tiametoxam e de seu metabólito, clotianidina, tem sido vinculado à redução no acúmulo de EROs e consequente ação antioxidante (Yildiztekin et al., 2015; Zhou et al.,

2013). Tais alterações no metabolismo vegetal corroboram com a hipótese de que o inseticida atua alterando a morfologia de plantas, e contribuem para explicar o aumento da área foliar e matéria seca de raiz encontrada ao final do ciclo da soja. Adicionalmente, essas moléculas induzem a biossíntese endógena de ácido salicílico (AS), que é conhecido por desempenhar o papel de regulador em processos fisiológicos e mediar as defesas e respostas da planta ao estresse (Ford et al., 2010). Estudos prévios constataram alterações benéficas no metabolismo de plantas decorrentes da aplicação do inseticida quando submetidas à competição com plantas daninhas e déficit hídrico (Afifi et al., 2015; Endres et al., 2016; Stamm et al., 2014), o que levanta a hipótese de que os parâmetros de trocas gasosas e os componentes fisiológicos de produção possam ser alterados na soja tratada com tiametoxam, se submetida a condições de campo, onde é comum a ocorrência de estressores.

Embora o experimento tenha sido conduzido em condições naturais de umidade do ar e de temperatura, a umidade do solo, exposição a e estressores bióticos foram controladas, proporcionando condições ótimas de crescimento. Ao contrário do cultivo em ambiente controlado, plantas submetidas a campo, especialmente sob estresse hídrico temporário, exibem maior regulação de sua resistência estomática, desencadeando aumento na temperatura foliar e consequente diminuição da fotossíntese líquida (Gleason et al., 2017; Yan et al., 2004). É possível que nesta situação a alteração na síntese de AS altere a regulação destes processos e o tiametoxam ocasione efeito hormético não apenas em parâmetros morfológicos, mas também em trocas gasosas e produtividade. Esta questão poderá ser esclarecida em experimentos futuros.

Ainda que não tenha sido constatada diferença significativa entre as concentrações de tiametoxam na assimilação líquida de CO<sub>2</sub> por área (*A*), o aumento na área foliar pode implicar em maior interceptação da luz e produção de fotoassimilados (Monteith, 1977). A consequência disso é um acúmulo de biomassa alocada para os órgãos vegetais, incluindo as raízes da planta. Essa situação pode levar à otimização da produção de grãos e também em maior tolerância da planta ao desfolhamento por fatores bióticos e abióticos (Haile et al., 1998). Por outro lado, área foliar excessiva por planta pode significar alto gasto de energia para manter sua estrutura vegetativa, o que possivelmente resultaria em menor produtividade para a cultura (Junior et al., 2018). Todavia, os resultados não mostraram diferença entre as concentrações inseticidas para os componentes fisiológicos de produção da soja, o que indica que sua produtividade não foi melhorada e nem prejudicada pela variação observada em área foliar. Levando-se em conta que o tiametoxam aumentou a área foliar das plantas e não comprometeu sua produção nas

condições estudadas, o inseticida poderia se mostrar um aliado na tolerância das plantas ao desfolhamento por estressores diversos. Essa hipótese, no entanto, ainda carece de investigação.

A identificação de hormese também para matéria seca de raízes pode estar relacionada ao aumento da área foliar, o que possibilita maior acúmulo de biomassa e alocação desta para este órgão. A razão entre a massa de matéria seca da parte aérea e a da raiz é comumente descrita como um indicativo da saúde vegetal e dos balanços (*trade-offs*) utilizados pela planta para coordenar seu crescimento de acordo com os recursos disponíveis (Hermans et al., 2006). O resultado de matéria seca da parte aérea ao final do ciclo da soja (sem folhas) não mostrou efeito significativo, e nossos resultados de área foliar durante o ciclo da cultura mostram tendência similar ao aumento da matéria seca de raiz. Isso sugere que a razão parte aérea:raiz se manteve e a biomassa total das plantas tratadas com concentrações de tiametoxam entre 0.525 e 0.105 g i.a. kg<sup>-1</sup> tenha aumentado durante o ciclo cultura.

No que tange às trocas gasosas, não foi encontrada diferença entre as concentrações de tiametoxam em nenhum estágio fenológico das plantas. Embora algumas evidências indicassem alterações advindas do tiametoxam no aumento de clorofila total e de proteínas solúveis de algodão e quiabo (Preetha e Stanley, 2012), um possível incremento na taxa assimilação ou fixação de CO<sub>2</sub> decorrente do tiametoxam não foi encontrado em plantas de soja em nenhuma idade. A interação entre as concentrações de inseticida e estágio fenológico também não foi significativa, porém as medidas de trocas gasosas foram diferentes entre os estádios fenológicos avaliados. Essa diferença era esperada em vista das trocas gasosas serem altamente influenciadas pelo ambiente (Taiz e Zeiger, 2002), e haver variação de temperatura, umidade e disponibilidade de luz em diferentes datas. O mesmo acontece com a altura de plantas, que naturalmente aumentou conforme a aproximação ao final do ciclo da cultura, porém não exibiu alteração decorrente do tiametoxam.

Apesar de efeitos horméticos decorrentes da aplicação de tiametoxam terem sido relatados para outros insetos sugadores (Ullah et al., 2020; Wang et al., 2017), não se observaram esses efeitos sobre a mosca-branca. Os resultados obtidos indicam menor crescimento populacional dos insetos sujeitos a concentrações crescentes do inseticida. Se a ação inseticida fosse mediada indiretamente pela planta, padrões horméticos desta poderiam ser refletidos no inseto. Isso não aconteceu e o efeito inseticida parece ocorrer diretamente no inseto pela ingestão de seiva da planta contaminada.

Estudos anteriores verificaram efeitos positivos do tiametoxam no desenvolvimento de plantas, como maior crescimento radicular em cana-de-açúcar (Endres et al., 2016), melhoria no vigor de plantas de milho na presença de plantas daninhas (Afifi et al., 2015), maior desempenho de mudas de algodão submetidas ao estresse térmico (Lauxen et al., 2016) e melhoria na germinação e matéria seca de plântulas de arroz (Annamalai et al., 2018). Curiosamente, são poucos os estudos que comparam aplicação de concentrações crescentes do ingrediente ativo e a não há nenhum que associe os resultados com o fenômeno de hormese, ainda que para moléculas herbicidas esse tipo de estudo esteja documentado (Belz e Duke, 2018; Boutin et al., 2014; Brito et al., 2018; Silva et al., 2018). Verificar padrões associados à concentração de inseticidas interferindo nos parâmetros vegetais se torna importante não apenas para otimizar o uso destes compostos, mas principalmente para prever os resultados de sua interação com os alvos de sua aplicação e compreender como as mudanças no organismo vegetal irão impactar outros organismos expostos às plantas tratadas.

## 5 CONCLUSÕES

Constataram-se que as medidas de área foliar e matéria seca de raízes de soja em função de diferentes concentrações do inseticida tiametoxam apresentam configuração de curva dose-resposta bifásica, característica do fenômeno de hormese, com pico próximo às concentrações recomendadas na bula do produto para o tratamento de sementes. Porém, a melhoria nesses parâmetros não refletiu em melhoria na produção de grãos da cultura.

Não houve efeito do tiametoxam nas trocas gasosas e altura em nenhum dos estádios analisados da soja. Sua aplicação também não afetou nenhum componente fisiológico de produção.

Não se verificou carreamento do efeito hormético observado na planta para *Bemisia tabaci*. A taxa instantânea de crescimento populacional para esse inseto se mostrou inversamente proporcional ao aumento da concentração do inseticida.

## REFERÊNCIAS

- Afifi, M., Lee, E., Lukens, L., Swanton, C., 2015. Thiamethoxam as a seed treatment alters the physiological response of maize (*Zea mays*) seedlings to neighbouring weeds. *Pest Manag. Sci.* 71, 505–514. <https://doi.org/10.1002/ps.3789>
- Ahmed, B., Shahid, M., Khan, M.S., Musarrat, J., 2018. Chromosomal aberrations, cell suppression and oxidative stress generation induced by metal oxide nanoparticles in onion (*Allium cepa*) bulb. *Metallomics* 10, 1315–1327. <https://doi.org/10.1039/c8mt00093j>
- Ali, P., Moniruzzaman, M., Shamiul, S., Qin, X., Nasrin, S., Landis, D., Holmquist, B., Ahmed, N., 2020. Farmer ' s behavior in pesticide use : Insights study from smallholder and intensive agricultural farms in Bangladesh. *Sci. Total Environ.* 747, 141160. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2020.141160>
- Annamalai, M., Vasantha-Srinivasan, P., Thanigaivel, A., Muthiah, C., Karthi, S., Jena, M., Pandi, G.G.P., Adak, T., Murugesan, A.G., Senthil-Nathan, S., 2018. Effect of thiamethoxam on growth, biomass of rice varieties and its specialized herbivore, *Scirpophaga incertulas* Walker. *Physiol. Mol. Plant Pathol.* 101, 146–155. <https://doi.org/10.1016/j.pmpp.2017.10.009>
- Ardalani, H., Vidkjær, N.H., Laursen, B.B., Kryger, P., Fomsgaard, I.S., 2021. Dietary quercetin impacts the concentration of pesticides in honey bees. *Chemosphere* 262, 127848. <https://doi.org/10.1016/j.chemosphere.2020.127848>
- Ather Nadeem, M., Abbas, T., Tanveer, A., Maqbool, R., Zohaib, A., Shehzad, M.A., 2017. Glyphosate hormesis in broad-leaved weeds: a challenge for weed management. *Arch. Agron. Soil Sci.* 63, 344–351. <https://doi.org/10.1080/03650340.2016.1207243>
- Ayyanath, M.M., Cutler, G.C., Scott-Dupree, C.D., Prithiviraj, B., Kandasamy, S., Prithiviraj, K., 2014. Gene expression during imidacloprid-induced hormesis in green peach aphid. *Dose-Response* 12, 480–497. <https://doi.org/10.2203/dose-response.13-057.Cutler>
- Ayyanath, M.M., Cutler, G.C., Scott-Dupree, C.D., Sibley, P.K., 2013. Transgenerational Shifts in Reproduction Hormesis in Green Peach Aphid Exposed to Low Concentrations of Imidacloprid. *PLoS One* 8, 1–9. <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0074532>
- Belz, R.G., Cedergreen, N., Duke, S.O., 2011. Herbicide hormesis - can it be useful in crop production? *Weed Res.* 51, 321–332. <https://doi.org/10.1111/j.1365-3180.2011.00862.x>
- Belz, R.G., Duke, S.O., 2018. Predicting hormesis in mixtures of herbicidal compounds – where are we and how far can we go? *1943*, 161–167. <https://doi.org/10.5073/jka.2018.458.023>
- Bezerra, M.A., 2000. Trocas Gasosas, Fluorescência e Níveis de Carboidratos em Cultivares de Soja Submetidos a Défices Hídrico e de Fósforo. Universidade Federal de Viçosa.
- Boutin, C., Strandberg, B., Carpenter, D., Mathiassen, S.K., Thomas, P.J., 2014. Herbicide impact on non-target plant reproduction: What are the toxicological and ecological implications? *Environ. Pollut.* 185, 295–306. <https://doi.org/10.1016/j.envpol.2013.10.009>
- Brito, I.P.F.S., Tropaldi, L., Carbonari, C.A., Velini, E.D., 2018. Hormetic effects of glyphosate on plants. *Pest Manag. Sci.* 74, 1064–1070. <https://doi.org/10.1002/ps.4523>

- Calabrese, E.J., Bachmann, K.A., Bailer, A.J., Bolger, P.M., Borak, J., Cai, L., Cedergreen, N., Cherian, M.G., Chiueh, C.C., Clarkson, T.W., Cook, R.R., Diamond, D.M., Doolittle, D.J., Dorato, M.A., Duke, S.O., Feinendegen, L., Gardner, D.E., Hart, R.W., Hastings, K.L., Hayes, A.W., Hoffmann, G.R., Ives, J.A., Jaworowski, Z., Johnson, T.E., Jonas, W.B., Kaminski, N.E., Keller, J.G., Klaunig, J.E., Knudsen, T.B., Kozumbo, W.J., Lettieri, T., Liu, S.Z., Maisseu, A., Maynard, K.I., Masoro, E.J., McClellan, R.O., Mehendale, H.M., Mothersill, C., Newlin, D.B., Nigg, H.N., Oehme, F.W., Phalen, R.F., Philbert, M.A., Rattan, S.I.S., Riviere, J.E., Rodricks, J., Sapolsky, R.M., Scott, B.R., Seymour, C., Sinclair, D.A., Smith-Sonneborn, J., Snow, E.T., Spear, L., Stevenson, D.E., Thomas, Y., Tubiana, M., Williams, G.M., Mattson, M.P., 2007. Biological stress response terminology: Integrating the concepts of adaptive response and preconditioning stress within a hormetic dose-response framework. *Toxicol. Appl. Pharmacol.* 222, 122–128. <https://doi.org/10.1016/j.taap.2007.02.015>
- Casida, J.E., 2018. Neonicotinoids and Other Insect Nicotinic Receptor Competitive Modulators: Progress and Prospects. *Annu. Rev. Entomol.* 63, 125–144. <https://doi.org/10.1146/annurev-ento-020117-043042>
- Cheng, S., Lin, R., Wang, L., Qiu, Q., Qu, M., Ren, X., Zong, F., Jiang, H., Yu, C., 2018. Comparative susceptibility of thirteen selected pesticides to three different insect egg parasitoid *Trichogramma* species. *Ecotoxicol. Environ. Saf.* 166, 86–91. <https://doi.org/10.1016/j.ecoenv.2018.09.050>
- Cutler, G.C., 2013. Insects, insecticides and hormesis: Evidence and considerations for study. *Dose-Response* 11, 154–177. <https://doi.org/10.2203/dose-response.12-008.Cutler>
- Damalas, C.A., Eleftherohorinos, I.G., 2011. Pesticide Exposure , Safety Issues , and Risk Assessment Indicators. *Int. J. Environ. Res. Public Heal.* 1402–1419. <https://doi.org/10.3390/ijerph8051402>
- De Barro, P.J., Liu, S.S., Boykin, L.M., Dinsdale, A.B., 2011. *Bemisia tabaci*: A statement of species status. *Annu. Rev. Entomol.* 56, 1–19. <https://doi.org/10.1146/annurev-ento-112408-085504>
- Dhungana, S.K., Adhikari, B., Adhikari, A., Kim, I.D., Kim, J.H., Shin, D.H., 2020. Comparative effect of different insecticides on the growth and yield of soybeans. *Plant Prot. Sci.* 56, 206–213. <https://doi.org/10.17221/77/2019-PPS>
- Dhungana, S.K., Kim, I.D., Kwak, H.S., Shin, D.H., 2016. Unraveling the effect of structurally different classes of insecticide on germination and early plant growth of soybean [*Glycine max* (L.) Merr.]. *Pestic. Biochem. Physiol.* 130, 39–43. <https://doi.org/10.1016/j.pestbp.2015.12.002>
- Endres, L., Oliveira, N.G., Ferreira, V.M., Silva, J. V., Barbosa, G.V.S., Maia Junior, S.O., 2016. Morphological and physiological response of sugarcane under abiotic stress to neonicotinoid insecticides. *Theor. Exp. Plant Physiol.* 28, 347–355. <https://doi.org/10.1007/s40626-016-0056-8>
- Food and Agriculture Organization, 2018. Pesticides Use [WWW Document]. URL <http://www.fao.org/faostat> (accessado 12.10.20).
- Ford, K.A., Casida, J.E., Chandran, D., Gulevich, A.G., Okrent, R.A., Durkin, K.A., Sarpong, R., Bunnelle, E.M., Wildermuth, M.C., 2010. Neonicotinoid insecticides induce salicylate-associated plant defense responses. *Proc. Natl. Acad. Sci. U. S. A.* 107,

- 17527–17532. <https://doi.org/10.1073/pnas.1013020107>
- Ford, K.A., Gulevich, A.G., Swenson, T.L., Casida, J.E., 2011. Neonicotinoid insecticides: Oxidative stress in planta and metallo-oxidase inhibition. *J. Agric. Food Chem.* 59, 4860–4867. <https://doi.org/10.1021/jf200485k>
- Gleason, S.M., Wiggans, D.R., Bliss, C.A., Comas, L.H., Cooper, M., Dejonge, K.C., Young, J.S., Zhang, H., 2017. Coordinated decline in photosynthesis and hydraulic conductance during drought stress in *Zea mays*. *Flora* 227, 1–9. <https://doi.org/10.1016/j.flora.2016.11.017>
- Guedes, R.N.C., Cutler, G.C., 2014. Insecticide-induced hormesis and arthropod pest management. *Pest Manag. Sci.* 70, 690–697. <https://doi.org/10.1002/ps.3669>
- Haddi, K., Mendes, M. V., Barcellos, M.S., Lino-Neto, J., Freitas, H.L., Guedes, R.N.C., Oliveira, E.E., 2016. Sexual success after stress? Imidacloprid-induced hormesis in males of the neotropical stink bug *euschistus heros*. *PLoS One* 11, 1–18. <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0156616>
- Haile, F.J., Higley, L.G., Specht, J.E., Spomer, S.M., 1998. Soybean leaf morphology and defoliation tolerance. *Agron. J.* 90, 353–362. <https://doi.org/10.2134/agronj1998.00021962009000030007x>
- Harrington, J., Mexal, J., Fisher, J., 1994. Volume displacement provides a quick and accurate way to quantify new root production. *Tree Plant. Notes* 45, 121–124.
- Hermans, C., Hammond, J.P., White, P.J., Verbruggen, N., 2006. How do plants respond to nutrient shortage by biomass allocation? *Trends Plant Sci.* 11, 610–617. <https://doi.org/10.1016/j.tplants.2006.10.007>
- Jeschke, P., Nauen, R., Schindler, M., Elbert, A., 2011. Overview of the status and global strategy for neonicotinoids. *J. Agric. Food Chem.* 59, 2897–2908. <https://doi.org/10.1021/jf101303g>
- Junior, A.A.B., Ferreira, A.S., Werner, F., Silva, M.A. de A. e, Zucareli, C., 2018. Índice de área foliar da soja em função da redução da densidade de semeadura. Londrina.
- Juraske, R., Castells, F., Vijay, A., Muñoz, P., Antón, A., 2009. Uptake and persistence of pesticides in plants: Measurements and model estimates for imidacloprid after foliar and soil application. *J. Hazard. Mater.* 165, 683–689. <https://doi.org/10.1016/j.jhazmat.2008.10.043>
- Kunal, Sharma, P., 2012. Influence of pesticide-treated seeds on survival of *Mesorhizobium* sp. *Cicer*, symbiotic efficiency and yield in chickpea. *Plant Prot. Sci.* 48, 37–43. <https://doi.org/10.17221/54/2010-pps>
- Lanka, S.K., Senthil-Nathan, S., Blouin, D.J., Stout, M.J., 2017. Impact of Thiamethoxam Seed Treatment on Growth and Yield of Rice, *Oryza sativa*. *J. Econ. Entomol.* 110, 479–486. <https://doi.org/10.1093/jee/tox043>
- Lauxen, L.R., Almeida, A. da S., Deuner, C., Meneghello, G.E., Villela, F.A., 2016. Physiological response of cotton seeds treated with thiamethoxam under heat stress. *J. Seed Sci.* 38, 140–147. <https://doi.org/10.1590/2317-1545v38n2159076>
- Leong, W., Teh, S., Moshaddeque, M., Nadarajaw, T., 2020. Application , monitoring and adverse effects in pesticide use : The importance of reinforcement of Good Agricultural

- Practices ( GAPS ). *J. Environ. Manage.* 260, 109987.  
<https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2019.109987>
- Li, D., Zhang, H., Chang, M., Shen, K., Zhang, N., Zhu, K., Zhou, Z., Zhang, Wu, Wang, Q., Liu, X., Zhang, Wencai, 2020. Neonicotinoid insecticide and their metabolite residues in fruit juices: Implications for dietary intake in China. *Chemosphere* 261, 127682.  
<https://doi.org/10.1016/j.chemosphere.2020.127682>
- Li, Z., 2017. Worldwide Regulations of Standard Values of Pesticides for Human Health Risk Control : A Review. <https://doi.org/10.3390/ijerph14070826>
- Macedo, W.R., Araújo, D.K., Castro, P.R. de C. e., 2013a. Unravelling the physiologic and metabolic action of thiamethoxam on rice plants. *Pestic. Biochem. Physiol.* 107, 244–249. <https://doi.org/10.1016/j.pestbp.2013.08.001>
- Macedo, W.R., Castro, P.R. de C. e., 2011. Thiamethoxam: Molecule moderator of growth, metabolism and production of spring wheat. *Pestic. Biochem. Physiol.* 100, 299–304.  
<https://doi.org/10.1016/j.pestbp.2011.05.003>
- Macedo, W.R., Fernandes, G.M., Possenti, R.A., Lambais, G.R., de Camargo e Castro, P.R., 2013b. Responses in root growth, nitrogen metabolism and nutritional quality in *Brachiaria* with the use of thiamethoxam. *Acta Physiol. Plant.* 35, 205–211.  
<https://doi.org/10.1007/s11738-012-1064-1>
- Monteith, J.L., 1977. Climate and the efficiency of crop production in Britain. *Philos. Trans. R. Soc. London. B, Biol. Sci.* 281, 277–294. <https://doi.org/10.1098/rstb.1977.0140>
- Popp, J., Petó, K., Nagy, J., 2013. Pesticide productivity and food security. A review. *Agron. Sustain. Dev.* 33, 243–255. <https://doi.org/10.1007/s13593-012-0105-x>
- Preetha, G., Stanley, J., 2012. Influence of neonicotinoid insecticides on the plant growth attributes of cotton and okra. *J. Plant Nutr.* 35, 1234–1245.  
<https://doi.org/10.1080/01904167.2012.676134>
- Richter, G.L., Zanon, A.J., Streck, N.A., Guedes, J.V.C., KrÄulich, B., Da Rocha, T.S.M., Winck, J.E.M., Cera, J.C., 2014. Estimating leaf area of modern soybean cultivars by a non-destructive method. *Bragantia* 73, 416–425. <https://doi.org/10.1590/1678-4499.0179>
- Sharma, S., Singh, B., 2014. Persistence of imidacloprid and its major metabolites in sugarcane leaves and juice following its soil application. *Int. J. Environ. Anal. Chem.* 94, 319–331. <https://doi.org/10.1080/03067319.2013.853759>
- Silva, J.R.O., Marques, J.N.R., Godoy, C.V.C., Batista, L.B., Silva, A.A., Ronchi, C.P., 2018. 2,4-D Hormesis Effect on Soybean. *Planta Daninha* 2016, 1–14.  
<https://doi.org/10.1590/S0100-83582019370100>
- Simon-Delso, N., Amaral-Rogers, V., Belzunces, L.P., Bonmatin, J.M., Chagnon, M., Downs, C., Furlan, L., Gibbons, D.W., Giorio, C., Girolami, V., Goulson, D., Kretzweiser, D.P., Krupke, C.H., Liess, M., Long, E., Mcfield, M., Mineau, P., Mitchell, E.A., Morrissey, C.A., Noome, D.A., Pisa, L., Settele, J., Stark, J.D., Tapparo, A., Van Dyck, H., Van Praagh, J., Van Der Sluijs, J.P., Whitehorn, P.R., Wiemers, M., 2015. Systemic insecticides (Neonicotinoids and fipronil): Trends, uses, mode of action and metabolites. *Environ. Sci. Pollut. Res.* 22, 5–34. <https://doi.org/10.1007/s11356-014-3470-y>
- Stamm, M.D., Enders, L.S., Donze-Reiner, T.J., Baxendale, F.P., Siegfried, B.D., Heng-

- Moss, T.M., 2014. Transcriptional response of soybean to thiamethoxam seed treatment in the presence and absence of drought stress. *BMC Genomics* 15, 1–13. <https://doi.org/10.1186/1471-2164-15-1055>
- Stark, J.D., Banks, J.E., 2003. Population-Level Effects of Pesticides and Other Toxicants on Arthropods. *Annu. Rev. Entomol.* 48, 505–519. <https://doi.org/10.1146/annurev.ento.48.091801.112621>
- Taiz, L., Zeiger, E., 2002. *Plant physiology*, 3<sup>o</sup> ed, Science progress. Sinauer Associates. <https://doi.org/10.1017/9781108486392>
- Toumi, H., Boumaiza, M., Millet, M., Radetski, C.M., Camara, B.I., Felten, V., Ferard, J.F., 2015. Investigation of differences in sensitivity between 3 strains of *Daphnia magna* (crustacean Cladocera) exposed to malathion (organophosphorous pesticide). *J. Environ. Sci. Heal. - Part B Pestic. Food Contam. Agric. Wastes* 50, 34–44. <https://doi.org/10.1080/03601234.2015.965617>
- Ullah, F., Gul, H., Tariq, K., Desneux, N., Gao, X., Song, D., 2020. Thiamethoxam induces transgenerational hormesis effects and alteration of genes expression in *Aphis gossypii*. *Pestic. Biochem. Physiol.* 165, 104557. <https://doi.org/10.1016/j.pestbp.2020.104557>
- United States Department of Agriculture, 2021. *Oilseeds: World Markets and Trade*.
- Wang, P., Zhou, L.L., Yang, F., Li, M., Liu, X.M., Wang, Y., Lei, C.L., Si, S.Y., 2017. Sublethal Effects of Thiamethoxam on the Demographic Parameters of *Myzus persicae* (Hemiptera: Aphididae). *J. Econ. Entomol.* 110, 1750–1754. <https://doi.org/10.1093/jee/tox112>
- Yan, J., He, C., Wang, J., Mao, Z., Holaday, S.A., Allen, R.D., Zhang, H., 2004. Overexpression of the Arabidopsis 14-3-3 Protein GF14  $\lambda$  in Cotton Leads to a “ Stay-Green ” Phenotype and Improves Stress Tolerance under Moderate Drought Conditions. *Plant Cell Physiol* 45, 1007–1014.
- Yengkokpam, P., Mazumder, P.B., 2020. Phytotoxicity of malathion (PM) and tatafen (PTF) towards *Solanum melongena* L.cv. Longai: A case study. *Plant Physiol. Reports* 25, 149–156. <https://doi.org/10.1007/s40502-019-00498-0>
- Yildiztekin, M., Kaya, C., Tuna, A.L., Ashraf, M., 2015. Oxidative stress and antioxidative mechanisms in tomato (*Solanum lycopersicum* L.) plants sprayed with different pesticides. *Pakistan J. Bot.* 47, 717–721.
- Yilmaz, S., Kaya, E., Kisacam, M.A., 2017. The Effect on Oxidative Stress of Aflatoxin and Protective Effect of Lycopene on Aflatoxin Damage. *Aflatoxin-Control, Anal. Detect. Heal. Risks.* <https://doi.org/10.5772/intechopen.69321>
- Zhou, G., Wang, Y., Zhai, S., Ge, F., 2013. Biodegradation of the neonicotinoid insecticide thiamethoxam by the nitrogen-fixing and plant-growth-promoting rhizobacterium *Ensifer adhaerens* strain TMX-23 4065–4074. <https://doi.org/10.1007/s00253-012-4638-3>