

STATUS E CARACTERIZAÇÃO DA RESISTÊNCIA DE *Phthorimaea (=Tuta) absoluta*
(MEYRICK) (LEPIDOPTERA: GELECHIIDAE) À ABAMECTINA

por

VITOR QUINTELA SOUSA

Sob Orientação do Professor Herbert Álvaro Abreu de Siqueira - UFRPE

RESUMO

O tomateiro, *Solanum lycopersicum* L., é uma das hortaliças-fruto mais importantes e sua principal praga é *Phthorimaea (=Tuta) absoluta* (Meyrick). O uso de inseticidas é importante dada a enorme capacidade destrutiva da praga. Dentre os mais usados está a abamectina que tem ação neurotóxica e atua nos receptores do Glutamato. Há relatos de resistência para esta molécula. Este estudo buscou entender a herança da resistência de *P. absoluta* à abamectina. Conduzimos cruzamentos recíprocos entre GVT-Sel e JDR1-Sus. Para testar a hipótese de resistência autossomal ou ligada ao sexo, usando curvas de concentração-mortalidade. Os resultados foram comparados por teste de igualdade. Para estimar o número de loci influenciando a resistência as progênies F1 e F1' foram retrocruzadas com os parentais. O grau médio de dominância foi calculado utilizando os valores da CL₅₀ das progênies F1 e F1' e dos parentais JDR1-Sus e GVT-Sel. Os resultados mostraram que GVT-Sel apresentou 25.939 vezes de resistência em comparação à JDR1-Sus. As LC₅₀ de F1 (0,070) e F1' (0,023), comparadas pelo teste de igualdade mostrou rejeição à hipótese de herança autossomal. O grau de dominância (-0,421) F1, (-0,640) F1' e (-0,531) F1 agrupado, expôs dominância incompletamente recessiva para todos os cruzamentos. O teste direto para o modelo monofatorial apresentou diferenças significativas em todos os retrocruzamentos, indicando rejeição ao modelo. A herdabilidade $h^2=0,189$ foi baixa para GVT-Sel. Todos os insetos heterozigotos morreram em 2,5 mg/L de abamectina testados na dominância efetiva. A concentração diagnóstica foi definida

para 5 mg/L. Alta resistência cruzada ocorreu com outras avermectinas e moderadamente com inseticidas de outras classes. Benzoato de emamectina mostrou a maior CL_{50} (21,02 mg/L) e razão de resistência ($RR=1.893.000$ vezes), e indoxacarbe a menor CL_{50} (0,729 mg/L) e ($RR=0,084$ vezes). A ligação ao sexo feminino surge como informação importante. A utilização de feromônios sexuais e o uso de inseticidas com baixo potencial de resistência cruzada é essencial para a manutenção de eficácia desta molécula.

PALAVRAS-CHAVE: Avermectinas, traça-do-tomateiro, *Tuta absoluta*, genética, ligação a sexo, poligênica, herdabilidade, dose diagnóstica.

STATUS AND CHARACTERIZATION OF *Phthorimaea absoluta* (LEPIDOPTERA:
GELICHIIDEA) RESISTANCE TO ABAMECTIN

por

VITOR QUINTELA SOUSA

Sob Orientação do Professor Herbert Álvaro Abreu de Siqueira

ABSTRACT

The tomato plant *Solanum lycopersicum* L. is one of the most important fruit vegetables in the world, its main pest is *Phthorimaea absoluta* (Meyrick). The use of insecticides continues to be important given the enormous destructive capacity of the pest. Among the most used, abamectin has a neurotoxic action and acts on Glutamate receptors. There are reports of resistance to this molecule. This study sought to understand the inheritance of *P. absoluta* resistance to abamectin. We conducted reciprocal crosses between GVT-Sel and JDR1-Sus. To test the hypothesis of autosomal or sex-linked resistance, using concentration-mortality curves. The results were compared by equality test. To estimate the number of loci influencing resistance, the F1 and F1' progenies were backcrossed with the parents. The mean degree of dominance was calculated using the LC₅₀ values of the F1 and F1' progenies and the JDR1-Sus and GVT-Sel parents. The results showed that GVT-Sel presented 25939.43x resistance compared to JDR1-Sus, the LC₅₀ value of F1 (0.070) and F1' (0.023), and the equality test showed rejection of the autosomal inheritance hypothesis. The degree of dominance (-0.421) F1, (-0.640) F1' and (-0.531) F1 pooled, exposed incompletely recessive dominance for all crosses. The direct test for the monofactorial model showed significant differences in all backcrosses, indicating rejection of the model. The heritability $h^2=0.189$ was low for GVT-Sel. At effective dominance, 2.5 mg/L of insecticide killed all heterozygous individuals, and the diagnostic concentration was set to 5 mg/L. High cross-resistance occurred with other avermectins and moderately with insecticides

from other classes. Emamectin benzoate showed the highest LC_{50} (21.02 mg/L) and resistance ratio (RR=1,893,000 vezes), and indoxacarb the lowest LC_{50} (0.729 mg/L) and (RR=0.084 vezes). The female sex-linked resistance emerges as important information. The use of sex pheromones and the use of insecticides with low cross-resistance potential is essential for maintaining the effectiveness of this molecule.

KEY WORDS: Avermectins, tomato pinworm, *Tuta absoluta*, genetics, sex linkage, polygenic, heritability, diagnostic dose.

STATUS E CARACTERIZAÇÃO DA RESISTÊNCIA DE Phthorimaea (=Tuta) absoluta
(MEYRICK) (LEPIDOPTERA: GELECHIIDAE) À ABAMECTINA

por

VITOR QUINTELA SOUSA

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Entomologia da Universidade Federal Rural de Pernambuco como parte dos requisitos para obtenção do grau de Mestre em Entomologia.

RECIFE - PE

Fevereiro – 2023

STATUS AND CHARACTERIZATION OF Phthorimaea absoluta (MEYRICK)

(LEPIDOPTERA: GELECHIIDAE) RESISTANCE TO ABAMECTIN

por

VITOR QUINTELA SOUSA

Comitê de Orientação:

Herbert Álvaro Abreu de Siqueira – UFRPE

Manoel Guedes Corrêa Gondim Jr. - UFRPE

STATUS E CARACTERIZAÇÃO DA RESISTÊNCIA DE Phthorimaea (=Tuta) absoluta

(MEYRICK) (LEPIDOPTERA: GELECHIIDAE) À ABAMECTINA

por

VITOR QUINTELA SOUSA

Banca Examinadora:

Prof. Herbert Álvaro Abreu de Siqueira – UFRPE

Dra. Lílian Maria da Solidade Ribeiro

Profa. Débora Barbosa de Lima - UFPE

Vitor Quintela Sousa
Mestre em Entomologia

Prof. Herbert A. A. Siqueira
Orientador

Dados Internacionais de Catalogação na Publicação
Universidade Federal Rural de Pernambuco
Sistema Integrado de Bibliotecas
Gerada automaticamente, mediante os dados fornecidos pelo(a) autor(a)

Q7s

Quintela Sousa, Vitor

Status e caracterização da resistência de *Phthorimaea (=Tuta) absoluta* (MEYRICK) (Lepidoptera: Gelechiidae) à abamectina / Vitor Quintela Sousa. - 2023.
65 f.

Orientador: Herbert Alvaro Abreu de Siqueira.
Inclui referências e apêndice(s).

Dissertação (Mestrado) - Universidade Federal Rural de Pernambuco, Programa de Pós-Graduação em Entomologia Agrícola, Recife, 2023.

1. Avermectinas. 2. traça-do-tomateiro. 3. Tuta absoluta. 4. genética. 5. ligação a sexo. I. Siqueira, Herbert Alvaro Abreu de, orient. II. Título

CDD 632.7

DEDICATÓRIA

Aos meus amados pais Val e Cícero,

Aos meus irmãos Vânia e Danilo.

Aos meus sobrinhos queridos David, Samuel e Heloísa.

AGRADECIMENTOS

A Universidade Federal Rural de Pernambuco e ao programa de Pós-Graduação em Entomologia Agrícola, pela oportunidade de realização deste curso.

A Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior – CAPES, pela concessão de bolsa de estudo, contribuindo desta forma para a conclusão do trabalho desenvolvido.

Ao Prof. Herbert Álvaro Abreu de Siqueira, por todo o conhecimento, tempo e paciência disponibilizado.

Aos meus pais Valderina Quintela e Cícero Sousa, pelo amor incondicional.

Ao colega de laboratório Daniel Pereira por ser sempre solícito.

Ao Victor Cabral e ao Marcos de Oliveira pelo apoio, em especial nas atividades de manutenção dos insetos e nas atividades de cultivo de tomateiros.

Aos colegas Evaldo Farias e Jéssika Lima pela leitura crítica do Capítulo 1.

Aos colegas Manoely, Felipe, Elton, Ianne e Liz pelo apoio em momentos bons e ruins.

A todos que de alguma forma contribuíram para a conclusão deste trabalho.

SUMÁRIO

	Página
AGRADECIMENTOS	9
CAPÍTULOS	
1. INTRODUÇÃO.....	10
A IMPORTÂNCIA SOCIOECONÔMICA DA CULTURA DO TOMATEIRO.....	12
TAXONOMIA E BIOECOLOGIA DE <i>Phthorimaea absoluta</i>	14
MANEJO DE <i>P. absoluta</i> : POR QUE OS INSETICIDAS AINDA SÃO IMPORTANTES?	15
ABAMECTINA NO CONTROLE DE <i>P. ABSOLUTA</i> E ASPECTOS DA RESISTÊNCIA	16
MONITORAMENTO E HERANÇA DA RESISTÊNCIA À ABAMECTINA: SUBSÍDIO PARA O MANEJO	18
LITERATURA CITADA.....	21
2. GENÉTICA E RESISTÊNCIA CRUZADA DE <i>Phthorimaea absoluta</i> (LEPIDOPTERA: GELECHIIDAE) À ABAMECTINA.....	27
RESUMO	28
ABSTRACT	29
INTRODUÇÃO.....	30
MATERIAL E MÉTODOS.....	32
RESULTADOS	36
DISCUSSÃO.....	39
AGRADECIMENTOS	43
LITERATURA CITADA	43
3. CONSIDERAÇÕES FINAIS	60
APÊNDICES	48

CAPÍTULO 1

Introdução

A importância socioeconômica da cultura do tomateiro. O tomateiro, *Solanum lycopersicum* L. é uma planta alógama com hábito de crescimento rasteiro do tipo determinado ou indeterminado, cujo centro de origem é a região da Mesoamérica onde ainda existem tipos selvagens (Jenkins 1948). Esta planta é considerada uma das espécies agrícolas mais importante dentre as hortaliças, tanto do ponto de vista econômico quanto social, pelo volume da produção e pela geração de emprego e renda. Os maiores produtores do fruto são China (64.865.807 ton.), Índia (20.573.000 ton.) e Turquia (13.204.015 ton.) (FAO 2022). Dados do último censo agropecuário no Brasil apontam uma produção anual de tomate industrial superior a 3.632.780 toneladas em uma área colhida maior que 51 mil hectares (IBGE 2022a). Goiás, Minas Gerais, Bahia e São Paulo, são nesta ordem, os maiores produtores do fruto no Brasil. Grande parte da produção de tomate se destina à indústria de processamento, responsável pelos diversos derivados, enquanto uma parte menor é destinada ao consumo *in natura*. O estado de Pernambuco figura entre os cinco maiores produtores com mais de 67.092 toneladas e com valor estimado em mais de R\$ 135 milhões (IBGE 2022b).

O tomateiro é altamente suscetível ao ataque de doenças, plantas daninhas ou insetos, por isso o sistema produtivo necessita de um planejamento adequado antes, durante e depois da implantação da cultura (Guedes & Picanço 2012). Para a manutenção de bons níveis de produtividade, diversas táticas de controle de insetos devem ser usadas no cultivo de tomate, incluindo controle biológico (Desneux *et al.* 2022), armadilhas com feromônios (Cocco *et al.* 2013) e controle químico (Bacci *et al.* 2021). Muitos insetos fitófagos estão associados ao cultivo de tomateiro, inclusive como vetores de diversas doenças.

Entre os insetos-praga destacam-se a *Bemisia tabaci* Genn. (Hemiptera: Aleyrodidae) que tem alta capacidade de dispersão e adaptação a diferentes condições climáticas e por ser vetor de vírus (Gottlieb *et al.* 2010), dípteros da família Agromyzidae como os do gênero *Liriomyza* (Lopes *et al.* 2019), a ordem Thysanoptera com destaque para a família Thripidae, que tem espécies vetoras do Tospovirus (Shalileh *et al.* 2016). A ordem Lepidoptera tem espécies como as do complexo *Spodoptera*, *Helicoverpa zea* L. (Lepidoptera: Noctuidae) e *Neoleucinodes elegantalis* Guen. (Lepidoptera: Crambidae) e sua principal praga dentro desta ordem é *Phthorimaea* (= *Tuta*) *absoluta* (Meyrick, 1917) (Lepidoptera: Gelechiidae).

O ataque da traça-do-tomateiro causa variação da produtividade, o que reflete diretamente no preço de mercado, acarretando o aumento do custo de produção. As principais consequências de seu ataque dizem respeito às deformações de frutos e/ou produção de unidades com tamanho reduzido (Picanço *et al.* 2007). A *P. absoluta* também ocorre em outras solanáceas de importância econômica como a batata *Solanum tuberosum* L., berinjela *Solanum melongena* L. e pimentão *Capsicum annuum* L. (Cherif & Verheggen 2019). As injúrias causadas à planta e aos frutos levam à redução na qualidade e quantidade do produto. Com isto, ocorre a diminuição da oferta no mercado, o que acaba pressionando os preços do tomate e seus diversos derivados. Além disso, exportações do fruto *in natura* podem ser comprometidas, tendo em vista as barreiras sanitárias impostas por outros países (Keller *et al.* 2011).

Taxonomia e bioecologia de *Phthorimaea absoluta*. A *P. absoluta* foi inicialmente descrita por (Meyrick 1917). Anos mais tarde, Quiroz (1976) descreveu o inseto como um microlepidóptero com envergadura média das asas de 1 cm e corpo de cerca de 6 mm de largura, apresentando dimorfismo sexual, com fêmeas ligeiramente mais robustas que machos. O inseto possui asas franjadas e escamas de coloração marrom-acinzentada, antenas filiformes com anéis de cor café claro e escuro, dispostos de forma alternada.

A classificação de *P. absoluta* já mudou várias vezes, já foi inserida em diversos gêneros dentro da superfamília Gelechioidea, possui quatro sinonímias, são estas: *P. absoluta* (Meyrick, 1917); *Scrobipalpuloides absoluta* (Povolný, 1987); *Scrobipalpula absoluta* (Povolný, 1964; Becker, 1984), *Gnorimoschema absoluta* (Clarke, 1962). Foi inserida no gênero *Tuta*, descrito por Kieffer & Jörgensen (1910), dentro da família Gelechiidae e subfamília Gelechiinae (Chang & Metz 2021, Biondi *et al.* 2018). Desde o trabalho desenvolvido por Chang & Metz (2021) a espécie foi reinserida no gênero *Phthorimaea*, atualmente *Phthorimaea absoluta* é o nome mais adequado para sua designação.

A *P. absoluta* é um inseto holometábolo que possui os estágios de desenvolvimento completo de ovo, larva, pupa e adulto. As larvas são do tipo eruciforme e desenvolvem-se por até 13 dias em quatro ínstaes que variam de 0,4 mm a 7,0 mm de comprimento e 0,1 a 1,6 mm de diâmetro, as pupas desenvolvem-se entre 10 e 11 dias e o ciclo de vida completo é em média de 25 a 30 dias (Coelho & França 1987). A *P. absoluta* é altamente adaptada às diversas condições geográficas, tendo em vista o espectro de sobrevivência dela, que varia em função de temperaturas que vão em média de 17 a 33 °C (Martins *et al.* 2016), mas que possui alta plasticidade para larvas, podendo ir de -2 a 42 °C (Tarusikirwa *et al.* 2020). Estas condições podem retardar ou acelerar as funções metabólicas do inseto e conseqüentemente o seu ciclo de vida. Este é um dos motivos pelos quais a *P. absoluta* vem se espalhando rapidamente para diversas regiões do globo (Biondi *et al.* 2018).

A *P. absoluta* muito provavelmente coevoluiu com as plantas de tomate, devido à proximidade geográfica de seus locais de origem (Saavedra *et al.* 2017). A parte central do Peru é a região de origem de *P. absoluta* (Vargas 1970). Nas décadas de 70 e 80 essa praga se disseminou pela América do Sul e desde 2006 para outras partes do mundo. A provável rota se deu pela Espanha, de onde dispersou para outras áreas da Europa (Desneux *et al.* 2011), seguindo pela Turquia (Kiliç 2010), Irã (Baniameri & Cheraghian 2012) e Índia (Shashank *et*

al. 2015), além dos países do norte da África (Guillemaud *et al.* 2015). Na África subsaariana já há registros da traça em Botswana (Mutamiswa *et al.* 2017), Benin (Karlsson *et al.* 2018), Nigéria (Aigbedion-Atalor *et al.* 2019), Togo (Fiaboe *et al.* 2021) e República do Congo (Mukwa *et al.* 2021). Recentemente esta praga foi identificada na região de Xinjiang na China, que é atualmente o maior produtor mundial (Zhang *et al.* 2020). Nos Estados Unidos, que também são um grande produtor, não há registro da traça, embora essa espécie já esteja presente em países vizinhos ao México na América do Norte (Campos *et al.* 2017, Biondi *et al.* 2018).

A introdução deste inseto no Brasil é incerta, porém alguns estudos que relatam o registro oficial de *P. absoluta*, mostram que a introdução ocorreu em meados de 1980 (Moraes & Normanha Filho 1982). Sua disseminação ocorreu rapidamente pelo Vale do Submédio São Francisco, incluindo o estado de Pernambuco (Haji *et al.* 1988), tornando-se desde então um dos principais insetos-praga para a cultura do tomate em todo o país (Moraes & Normanha Filho 1982).

Quando em altas densidades populacionais, esta espécie é de difícil controle, motivo pelo qual o manejo deve iniciar tão logo os primeiros adultos são identificados. Há, porém, um fator limitante em países da América do Sul onde este inseto pode apresentar de 10 a 15 gerações por ano (Desneux *et al.* 2010). As diversas gerações do inseto se sobrepõem ao longo de um único ciclo da cultura, tornando a tomada de decisão sobre o uso de inseticidas mais complicada (Bacci *et al.* 2021).

As larvas de *P. absoluta* atacam principalmente as folhas, alimentando-se do mesófilo e deixando a epiderme intacta, fazendo as galerias que necrosam e conseqüentemente diminuem o potencial de fotossíntese da planta, levando ao estresse fisiológico (Ghaderi *et al.* 2019). Os brotos apicais, caules e botões florais também são atacados quando em altas infestações (Torres *et al.* 2001). Quando atacam os frutos, as larvas formam injúrias que servem de entrada para patógenos ocasionando infecções secundárias e provocando perdas severas (Silva *et al.* 2016).

Quando os ataques ocorrem em estádios muito jovens das plantas há um comprometimento do ciclo de desenvolvimento da cultura (Picanço *et al.* 2007).

Manejo de *P. absoluta*: por que os inseticidas ainda são importantes? Diversas táticas de controle são empregadas para redução dos danos causados por *P. absoluta*, entre elas o controle biológico. Rubio *et al.* (2022) relataram que a associação de parasitoides e predadores levou ao decréscimo de até 28% na população de adultos de *P. absoluta* e conseqüentemente reduziu o número de larvas e as injúrias causadas à planta. Atualmente novas tecnologias estão sendo estudadas e desenvolvidas como o uso de nematoides (Bem Husin & Port 2021), fungos (Aynalem *et al.* 2022) e bactérias (Youssef & Hassan 2013) para o controle do inseto. O controle agrônômico e cultural que englobam técnicas como a manipulação nutricional da planta, o uso de cultivares mais resistentes, emprego de armadilhas, catação e destruição de plantas infestadas, barreiras físicas, rotação de culturas e o uso de feromônios, despontam como boas alternativas dentro de programas de manejo integrado (Desneux *et al.* 2010, Desneux *et al.* 2022, Zekeya *et al.* 2022). Entretanto, tais técnicas não são suficientes para minimizar os danos ocasionados quando a praga atinge altas infestações, o que torna seu controle fortemente dependente do uso de inseticidas (Campos *et al.* 2017, Desneux *et al.* 2022).

Os inseticidas, por outro lado, são de modo geral, majoritariamente moléculas químicas com ações diversas que agem interferindo nas funções metabólicas vitais do inseto. O IRAC (Insecticide Resistance Action Committee) classifica os inseticidas em 34 grupos de acordo com seu modo de ação no organismo do inseto, incluindo aqueles que não possuem modo de ação bem conhecido, como alguns de base biológica como fungos, bactérias, vírus ou de extratos ou óleos botânicos (IRAC 2022). Apesar de serem vistos como vilões por parte da sociedade, os inseticidas ainda são importantes, tendo em vista a relação custo-benefício, mas principalmente porque os modelos de agricultura sustentável embasados em filosofias modernas como o Manejo Integrado de Pragas (MIP), ainda são pouco compreendidos e pouco implantados, isto significa

que ainda há pouco uso de práticas de controle integradas em boa parte dos sistemas produtivos do país (Moura *et al.* 2014).

As preocupações crescentes da sociedade levaram à proibição de inseticidas devido a algumas destas moléculas apresentarem alta bioacumulação e biomagnificação como os organoclorados (Chopra *et al.* 2011). Organofosforados e carbamatos embora sejam menos persistentes no meio ambiente, são bastante tóxicos (Mustapha *et al.* 2019, Fu *et al.* 2022), principalmente porque ocasionam distúrbios nos organismos não-alvos (Moura *et al.* 2005). Ainda assim, os inseticidas continuam sendo importantes para a agricultura, de forma que seu uso é vantajoso, quando comparado à não utilização. Além disto, a pressão da sociedade por métodos mais sustentáveis e seguros na produção de alimentos, têm levado o setor da indústria a pensar em formulações menos tóxicas aos mamíferos.

No contexto do controle de *P. absoluta* os primeiros inseticidas utilizados na América do Sul foram os organofosforados, piretroides e análogos da nereistoxina (Souza & Reis 1986, Salazar & Araya 1997, Siqueira *et al.* 2000, Lietti *et al.* 2005, Guedes & Picanço 2012). No início dos anos 90, outros inseticidas foram introduzidos, entre eles a abamectina, os disruptores de crescimento de insetos, espinosade, indoxacarbe e clorfenapir (Siqueira *et al.* 2000). Atualmente 148 produtos são recomendados para o controle de *P. absoluta*, nos grupos das avermectinas, benzilureias, piretroides, tetranotriterpenoides, diamidas do ácido fitálico, tiocarbamatos, diacilhidrazinas, antranilamidas, oxadiazinas, milbemicinas, metilcarbamatos de oxima, análogos do pirazol, éter difenílicos e espinosinas, além dos biológicos à base de *Bacillus thuringiensis* (MAPA 2022).

Abamectina no controle de *P. absoluta* e aspectos da resistência. A abamectina, inseticida inserido no grupo das avermectinas, é usada desde a década de 1990 para o controle de *P. absoluta* (Siqueira *et al.* 2000). As avermectinas são derivadas de lactonas macrocíclicas que compreendem um grupo de substâncias de ação anti-helmíntica, acaricida e inseticidas, com

pouca ou nenhuma ação bactericida ou fungicida. As moléculas de avermectinas foram isoladas inicialmente a partir da fermentação da actinobactéria *Streptomyces avermitilis* obtidas de uma amostra de solo no Japão (Jansson & Dybas 1998). O grupo das avermectinas é composto por cerca de 16 membros dos quais as formas B1a (> 90%) e B1b (< 20%) são as principais na biossíntese da abamectina. Outra avermectina muito usada para o controle de artrópodes em lavouras é o benzoato de emamectina que se diferencia por conter uma mistura de 90% de avermectina B1a e cerca de 10% de B1b e que está associado ao ácido benzoico, tornando-o mais solúvel em água (Jansson & Dybas 1998).

As avermectinas atuam como bloqueadores da transmissão de impulsos nervosos no sistema nervoso central e os alvos são em menor proporção, os canais iônicos de cloro mediados pelo GABA (Ácido gama-aminobutírico) e em maior medida os canais de cloro específicos controlados pelo Glutamato (GluCl) (Cully *et al.* 1996, Wolstenholme 2010), portanto existem ao menos dois sistemas neurotransmissores responsáveis pela ação da abamectina no organismo do inseto (Schaeffer *et al.* 1989, Arena *et al.* 1992). Quando as moléculas do inseticida se ligam aos receptores do Glutamato, ocorre um incremento na permeabilidade da membrana celular aos íons cloro, por meio da abertura desses canais. Com o fluxo de íons elevados nas sinapses nervosas em vermes, e no sistema neuromuscular de artrópodes, ocorre hiperpolarização da membrana celular (Arena 1994). Com isso, os sistemas neuronais e muscular entram em colapso provocando paralisação imediata da alimentação e oviposição, porém, a morte efetiva só ocorre após alguns dias (Lasota & Dybas 1991, Fisher & Mrozik 1992). Os primeiros relatos de resistência de *P. absoluta* a esse composto foram apresentados por Siqueira *et al.* (2000a) e Siqueira *et al.* (2001). Recentemente Stavrakaki *et al.* (2022) relatou resistência metabólica ao benzoato de emamectina em *P. absoluta*, através do aumento de enzimas do complexo monooxigenases dependentes de citocromo P450, descartando a possibilidade de mutação em sítio alvo.

De modo geral a resistência aos inseticidas tornou-se um problema, pois algumas populações de *P. absoluta* já não respondem às concentrações de inseticidas indicadas para o seu controle (Silva *et al.* 2011, Reyes *et al.* 2012, Guedes & Siqueira 2012, Silva *et al.* 2019, Prasannakumar *et al.* 2021). Três fenômenos fisiológicos estão ligados à evolução da resistência; destoxificação metabólica por meio da ação de enzimas (Hemingway 2000), mutações no sítio alvo do inseticida (Hemingway *et al.* 2004) e redução na penetração por alteração na espessura da cutícula (Balabanidou *et al.* 2018), os quais podem evoluir de forma isolada ou em conjunto, conferindo resistência elevada. A destoxificação metabólica do inseticida está ligada aos vários processos metabólicos nas fases I e II, através dos quais o produto é transformado em uma forma menos tóxica ou atóxica e posteriormente conjugado para excreção. Embora existam várias enzimas ou famílias de enzimas envolvidas no metabolismo de xenobióticos, três sistemas enzimáticos são destaque neste processo: esterases, glutatona *S*-transferases e monooxigenases. Na maioria dos casos de resistência a inseticidas é possível detectar alterações nas atividades dessas enzimas em indivíduos resistentes em relação aos indivíduos sensíveis (Hemingway 1989, Conyers *et al.* 1998). Estudo realizado com sinergistas: butóxido piperonila (PBO), dietilmaleato (DEM) e trifenilfosfato (TPP) apontaram para possível ação de enzimas monooxigenases em maior proporção, como principal mecanismo envolvido na resistência da *P. absoluta* ao inseticida benzoato de emamectina (Stavrakaki *et al.* 2022). Adicionalmente, o mecanismo enzimático, parece ser o que melhor explica a resistência à avermectinas em *P. absoluta*, tendo em vista os resultados encontrados por Siqueira *et al.* (2001) com ensaios de sinergismo e a indicação de enzimas esterases e monooxigenases como causa da resistência à abamectina.

Embora alterações no sítio alvo confira níveis de resistência mais elevados, não há evidências suficientes que sustente a hipótese de resistência à abamectina em *P. absoluta* ligada a alteração nos canais de cloro mediados pelo glutamato (GluCl), nem de que haja mutação no

sítio de ação da abamectina no sistema neuromuscular do inseto, que é um sítio alostérico, ou seja, difere do sítio de ação do GluCl (Lee & Soderlund 2001, Soderlund & Knipple 2003, Hemingway *et al.* 2004). A resistência decorrente da redução na penetração de inseticidas no corpo de insetos é aquela resistência que pode estar relacionada com a quantidade de lipídeos presente no corpo dos insetos, capaz de reter o inseticida na cutícula e diminuir a penetração (Ahmad *et al.* 2006). Não há evidências que sustentem este mecanismo para resistência de *P. absoluta* à abamectina.

Monitoramento e herança da resistência à abamectina: subsídio para o manejo. Duas características da *P. absoluta* tornam o monitoramento importante: (I) é uma espécie multivoltina, desta forma este inseto pode ter até 15 gerações em um ano (Silva *et al.* 2018) e (II) possui alta plasticidade térmica (Tarusikirwa *et al.* 2020), o que facilita a adaptação e sobrevivência do inseto em vários ambientes. Desta forma, em poucos meses se não houver detecção precoce e um controle adequado a resistência poderá atingir altas proporções. Por isto é importante a utilização de uma concentração de inseticida para monitorar fenotipicamente indivíduos resistentes de sensíveis. Deste modo, esta concentração discriminatória poderá auxiliar no monitoramento de fenótipos resistentes. A detecção precoce de indivíduos resistentes em baixas frequências fará com que o manejo possa ser iniciado numa margem de segurança que vai da concentração diagnóstica até a concentração de bula (campo) e isto evitará os surtos do inseto e as falhas de controle e conseqüentemente manterá a eficácia do inseticida por mais tempo (Denholm 1990, Denholm *et al.* 2002).

Os primeiros casos de resistência de *P. absoluta* foram relatados no Chile por Salazar & Araya (1997) que encontraram resistência a deltametrina, esfanvalerato e cialotrina. Castelo Branco *et al.* (2001) documentaram a resistência de populações de *P. absoluta* a organofosforados e piretroides em populações do Brasil. Na Argentina Lietti *et al.* (2005) documentaram resistência a deltametrina e abamectina. Siqueira *et al.* (2000b) encontraram

resistência a cartape. Atualmente a traça-do-tomateiro tornou-se resistente a inseticidas novos como espinosade e espinetoram (Campos *et al.* 2015). Reditakis *et al.* (2015) relataram resistência à diamidas em populações de *P. absoluta* da Itália, anos depois Silva *et al.* (2018) realizou levantamento em populações do Brasil e também encontrou altos níveis de resistência, incluindo resistência cruzada com outras diamidas, sugerindo mutação em sítio alvo como principal mecanismo de resistência. O mesmo ocorreu para diacilhidrazinas como o demonstrado por Langa *et al.* (2021). Tais casos demonstram que a resistência aos produtos recomendados para o controle dessa praga é uma realidade. No entanto, o trabalho mais significativo sobre a resistência à abamectina no Brasil foi desenvolvido por Siqueira *et al.* (2000a), quem primeiro relatou resistência à abamectina, posteriormente sugerindo o envolvimento de enzimas destoxificativas como mecanismo principal (Siqueira *et al.* 2001).

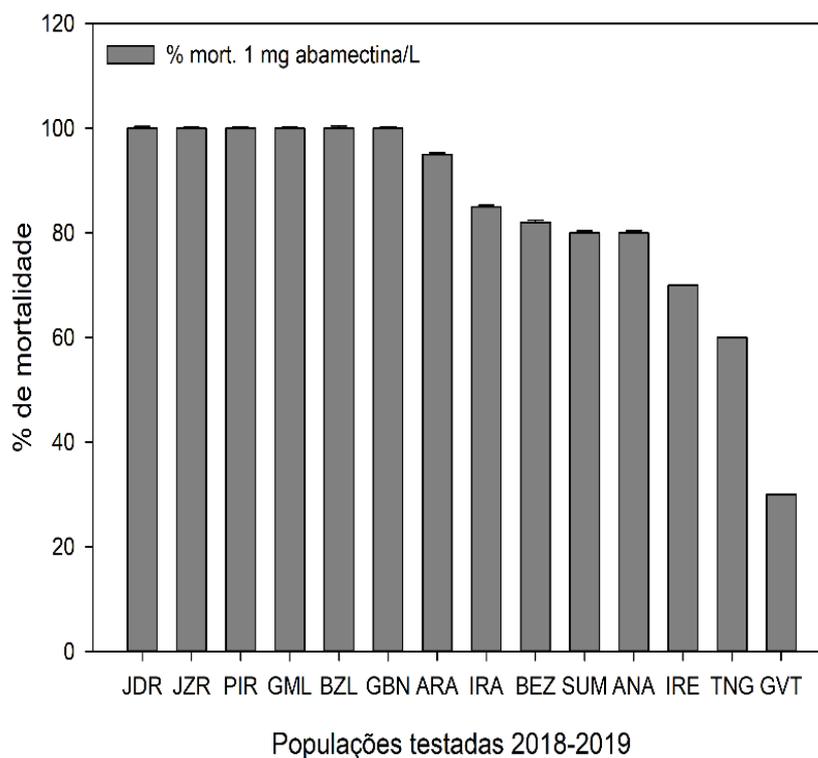


Figura 1. Levantamento com abamectina (1 mg/L) em 14 populações de *P. absoluta* provenientes das regiões Centro-Oeste, Nordeste e Sudeste do Brasil em 2018-2019.

Para entender o cenário atual da resistência à abamectina no Brasil, a concentração prévia de 1 mg/L foi usada em catorze populações de campo (Figura 1). Esta informação possibilitou a visualização de um panorama geral da suscetibilidade ao inseticida. Diante disto, fizemos um levantamento prévio da resistência para abamectina usando curvas de concentração-mortalidade e posteriormente fizemos a caracterização da genética da resistência de *P. absoluta* para abamectina. Nas populações levantadas houve expressiva variação fenotípica para a sobrevivência com a concentração de 1 mg abamectina/L. A população que mostrou maior nível de tolerância foi selecionada e cruzada com a população mais sensível, com isto, os heterozigotos foram submetidos a ensaios toxicológicos. A hipótese norteadora era de que os alelos que conferem esta resistência são transmitidos facilmente para as próximas gerações, apresentando alta herdabilidade para a característica em questão. Além disso hipotetizamos que os genes estão nos cromossomos autossômicos e que a dominância seria recessiva e seguindo um modelo monogênico.

Literatura Citada

- Aigbedion-Atalor, P.O., A.O. Oke, A.A. Oladigbolu, A.A. Layade, I.B. Igbinosa & S.A. Mohamed. 2019.** *Tuta absoluta* (Lepidoptera: Gelechiidae) invasion in Nigeria: first report of its distribution. *J. Plant Dis. Protect.* 126: 603–606.
- Arena, J.P., K.K. Liu, P.S. Paress, J.M. Schaeffer, & D.F. Cully. 1992.** Expression of a glutamate-activated chloride current in *Xenopus oocytes* injected with *Caenorhabditis elegans* RNA: evidence for modulation by avermectin. *Mol. Brain Res.* 15: 339.
- Aynalem, B., D. Muleta, M. Jida, F. Shemekite, & F. Aseffa. 2022.** Biocontrol competence of *Beauveria bassiana*, *Metarhizium anisopliae* and *Bacillus thuringiensis* against tomato leaf miner, *Tuta absoluta* Meyrick 1917 under greenhouse and field conditions. *Heliyon.* 8: e09694.
- Bacci, L., É.M. da Silva, J.C. Martins, R.S. da Silva, M. Chediak, C.C. Milagres, & M.C. Picanço. 2021.** The seasonal dynamic of *Tuta absoluta* in *Solanum lycopersicon* cultivation: Contributions of climate, plant phenology, and insecticide spraying. *Pest. Manag. Sci.* 77: 3187–3197.

- Balabanidou, V., L., Grigoraki & J., Vontas. 2018.** Insect cuticle: a critical determinant of insecticide resistance. *Curr Opin Insect Sci* 27:68–74.
- Guedes, R.N.C. & H.A.A Siqueira. 2012.** The tomato borer *Tuta absoluta*: Insecticide resistance and control failure. *CABI Rev* 2012:1–7.
- Baniameri, V. & A. Cheraghian. 2012.** The first report and control strategies of *Tuta absoluta* in Iran. *EPPO Bulletin*. 42: 322–324.
- Biondi, A., R. N. C. Guedes, F. H. Wan, & N. Desneux. 2018.** Ecology, worldwide spread, and management of the invasive South American Tomato Pinworm, *Tuta absoluta*: Past, present, and future. *Annu. Rev. Entomol.* 63: 239–258.
- Campos, M. R., A. Biondi, A. Adiga, R.N.C. Guedes, & N. Desneux. 2017.** From the western palaeartic region to beyond: *Tuta absoluta* 10 years after invading Europe. *J. Pest Sci.* 90: 787–796.
- Campos, M.R., T.B.M. Silva, W.M. Silva, J.E. Silva, & H.A.A. Siqueira. 2015.** Spinosyn resistance in the tomato borer *Tuta absoluta* (Meyrick) (Lepidoptera: Gelechiidae). *J. Pest Sci.* 88: 405–412.
- Castelo Branco, M., F.H. França, M.A. Medeiros, & J.G.T. Leal. 2001.** Uso de inseticidas para o controle da traça-do-tomateiro e traça-das-crucíferas: um estudo de caso. *Hortic. Bras.* 19: 60–63.
- Chang, P.E. C., & M.A. Metz. 2021.** Classification of *Tuta absoluta* (meyrick, 1917) (Lepidoptera: Gelechiidae: Gelechiinae: Gnorimoschemini) based on cladistic analysis of morphology. *Proc. Entomol. Soc. Wash.* 123: 41–54.
- Cherif, A., & F. Verheggen. 2019.** A review of *Tuta absoluta* (Lepidoptera: Gelechiidae) host plants and their impact on management strategies. *Biotechnol. Agron. Soc.* 23: 270–278.
- Chopra, A.K., M.K. Sharma, & S. Chamoli. 2011.** Bioaccumulation of organochlorine pesticides in aquatic system an overview. *Environ. Monit. Assess.* 173: 905–916.
- Cocco, A., S. Deliperi, & G. Delrio. 2013.** Control of *Tuta absoluta* (Meyrick) (Lepidoptera: Gelechiidae) in greenhouse tomato crops using the mating disruption technique. *J. Appl. Entomol.* 137: 16–28.
- Coelho, M. de C. F., & F.H. França. 1987.** Biologia, quetotaxia larva e descrição da pupa e adulto da traça-do-tomateiro. *Pesqui. Agropecu. Bras.* 22: 129–135.
- Cully, D.F., H. Wilkinson, D.K. Vassilatis, & A.E.P. Arena. 1996.** Molecular biology and electrophysiology of glutamate-gated chloride channels of invertebrates. *Parasitology* 113: 191–200.
- Desneux, N., P. Han, R. Mansour, J. Arnó, T. Brévault, M.R. Campos, A. Chailleux, R.N. C. Guedes, J. Karimi, K.A.J. Konan, A. violette Lavoit, M.G. Luna, M. Perez-Hedo, A. Urbaneja, F.J. Verheggen, L. Zappalà, K. Abbas, A. Ali, Y. Bayram, F. Cantor, A.G.S. Cuthbertson, R. de Vis, F. Erler, D.M. Firake, K. Haddi, M.J. Hajjar, K.**

- Ismoilov, C.C. Jaworski, M. Kenis, H. tian Liu, H. Madadi, T. Martin, A. Mazih, G. J. Messelink, S.A. Mohamed, R.S. Nofemela, A. Oke, C. Ramos, M. Ricupero, E. Roditakis, P.R. Shashank, F.H. Wan, M. hui Wang, S. Wang, Y.B. Zhang, & A. Biondi. 2022.** Integrated pest management of *Tuta absoluta*: practical implementations across different world regions. *J. Pest Sci.* 95: 17–39.
- Desneux, N., M.G. Luna, T. Guillemaud, & A. Urbaneja. 2011.** The invasive South American Tomato Pinworm, *Tuta absoluta*, continues to spread in Afro-Eurasia and beyond: The new threat to tomato world production. *J. Pest Sci.* 84: 403–408.
- Desneux, N., E. Wajnberg, K.A.G. Wyckhuys, G. Burgio, S. Arpaia, C.A. Narváez-Vasquez, J. González-Cabrera, D.C. Ruescas, E. Tabone, J. Frandon, J. Pizzol, C. Poncet, T. Cabello, & A. Urbaneja. 2010.** Biological invasion of European tomato crops by *Tuta absoluta*: Ecology, geographic expansion and prospects for biological control. *J. Pest Sci.* 83: 197–215.
- Fiaboe, K.R., K. Agboka, L.K. Agboyi, D. Koffi, R. Ofoe, G.E. Kpadonou, A.O. Agnamba, K. Assogba, M.K. A. Adjevi, K.T. Zanou, & O.K. Fening. 2021.** First report and distribution of the South American Tomato Pinworm, *Tuta absoluta* (Meyrick) (Lepidoptera: Gelechiidae) in Togo. *Phytoparasitica* 49: 167–177.
- FAO, 2022.** FAOSTAT. Statistical Database. Food and Agricultural Organization, Rome. Disponível em: <https://www.fao.org/faostat/en/#home>. Acessado 25 de novembro 2022.
- Fu, H., P. Tan, R. Wang, S. Li, H. Liu, Y. Yang, & Z. Wu. 2022.** Advances in organophosphorus pesticides pollution: Current status and challenges in ecotoxicological, sustainable agriculture, and degradation strategies. *J. Hazard. Mater.* 424: 127494.
- Ghaderi, S., Y. Fathipour, S. Asgari, & G.V.P. Reddy. 2019.** Economic injury level and crop loss assessment for *Tuta absoluta* (Lepidoptera: Gelechiidae) on different tomato cultivars. *J. Appl. Entomol.* 143: 493–507.
- Gottlieb, Y., E. Zchori-Fein, N. Mozes-Daube, S. Kontsedalov, M. Skaljac, M. Brumin, I. Sobol, H. Czosnek, F. Vavre, F. Fleury, & M. Ghanim. 2010.** The transmission efficiency of tomato yellow leaf curl virus by the whitefly *Bemisia tabaci* is correlated with the presence of a specific symbiotic bacterium species. *J. Virol.* 84: 9310–9317.
- Guedes, R.N.C., & M.C. Picanço. 2012.** The tomato borer *Tuta absoluta* in South America: Pest status, management and insecticide resistance. *EPPO Bulletin.* 42: 211–216.
- Guedes, R.N.C. & H.A.A. Siqueira. 2012.** The tomato borer *Tuta absoluta*: insecticide resistance and control failure. *CABI Reviews.* 1-7
- Guillemaud, T., A. Blin, I. le Goff, N. Desneux, M. Reyes, E. Tabone, A. Tsagkarakou, L. Niño, & E. Lombaert. 2015.** The tomato borer, *Tuta absoluta*, invading the Mediterranean Basin, originates from a single introduction from Central Chile. *Sci Rep.* 5: 8371.
- Haji, F.N.P., A.V. Oliveira, M.S. Amorim Neto, & J.G.S. Batista. 1988.** Flutuação populacional da traça do tomateiro, no submédio São Francisco. *Pesqui. Agropecu. Bras.* 23: 7–14.

- Hemingway, J. 1989.** A note on simple biochemical methods for resistance detection and their field application in Sri Lanka. *Pestic. Sci.* 27: 281–285.
- Hemingway, J. 2000.** The molecular basis of two contrasting metabolic mechanisms of insecticide resistance. *Insect Biochem. Mol. Biol.* 30: 1009–1015.
- Hemingway, J., N. J. Hawkes, L. McCarroll, & H. Ranson. 2004.** The molecular basis of insecticide resistance in mosquitoes. *Insect Biochem. Mol. Biol.* 34: 653–665.
- Husin, T.O., & G.R. Port. 2021.** Efficacy of entomopathogenic nematodes against *Tuta absoluta*. *Bio. Control.* 160: 1–10.
- IBGE. 2022a.** Produção de tomate no Brasil. Disponível em: <https://www.ibge.gov.br/explica/producao-agropecuaria/tomate/br>. Acessado em 3 de novembro de 2022.
- IBGE. 2022b.** Produção agrícola - Lavoura temporária. Disponível em: <https://sidra.ibge.gov.br/home/ipca15/brasil>. Acessado 05 de novembro de 2022.
- IRAC. 2022.** The IRAC mode of action classification online. Disponível em: <https://irac-online.org/mode-of-action/classification-online/>. Acessado 03 de dezembro 2022.
- Jansson, R.K., & R.A. Dybas. 1998.** Avermectins: Biochemical mode of action, biological activity and agricultural importance, p. 152–170. *In Insecticide with Novel Modes of Action.* Springer-Verlag, Berlin.
- Jenkins, J. A. 1848.** The origin of the cultivated tomato. *Econ. Bot.* 2: 379–392.
- Karlsson, F.M., S. Rachidatou, M.S. Sahadatou, Z.A. Joseph, & G. Georg. 2018.** First report of *Tuta absoluta* Meyrick (Lepidoptera: Gelechiidae) in the Republic of Benin. *Bioinvasions Rec.* 7: 463–468.
- Keller, R. P., J. Geist, J. M. Jeschke, and L. Kühn. 2011.** Invasive species in Europe: Ecology, status, and policy. *Environ. Sci. Eur.* 23: 2–17.
- Kiliç, T. 2010.** First record of *Tuta absoluta* in Turkey. *Phytoparasitica.* 38: 243–244.
- Langa, T. P., K. C. T. Dantas, D. L. Pereira, M. de Oliveira, L. M. S. Ribeiro, & H. A. A. Siqueira. 2021.** Basis and monitoring of methoxyfenozide resistance in the South American Tomato Pinworm *Tuta absoluta*. *J. Pest Sci.* 95: 351–364.
- Lietti, M.M.M., E. Botto, & R.A. Alzogaray. 2005.** Insecticide resistance in Argentine populations of *Tuta absoluta* (Meyrick) (Lepidoptera: Gelechiidae). *Neotrop. Entomol.* 34: 113–119.
- Lopes, M.C., E.S. Farias, T.L. Costa, L.P. Arcanjo, A.A. Santos, A.V. Ribeiro, R.C. Santos, & M.C. Picanço. 2019.** Economic injury level and sequential sampling plan for *Liriomyza huidobrensis* management in tomato crops. *Crop. Prot.* 124: 104848.
- Martins, J.C., M.C. Picanço, L. Bacci, R.N.C. Guedes, P.A. Santana, D.O. Ferreira, & M. Chediak. 2016.** Life table determination of thermal requirements of the tomato borer *Tuta absoluta*. *J. Pest Sci.* 89: 897–908.

- MAPA, Ministério da Agricultura, Pecuária e Abastecimento. 2022.** AGROFIT: Sistema de Agrotóxicos Fitossanitários. Brasília, Brasil: MAPA/CGAF/DFIA/DAS. Disponível em: http://extranet.agricultura.gov.br/agrofit_cons/principal_agrofit_cons. Acessado em 11 de novembro de 2022.
- Meyrick, E. 1917.** Descriptions of South American micro-lepidoptera. Trans. R. Entomol. Soc. Lond. 65: 1–52.
- Moraes, G.J., & A. Normanha Filho. 1982.** Surto de *Scrobipalpa absoluta* (MEYRICK) em tomateiro no trópico semi-árido. Pesqui. Agropecu. Bras. 17: 503–504.
- Moura, A.P., G.A. Carvalho, & R. De Oliveira Rigitano. 2005.** Toxicidade de inseticidas utilizados na cultura do tomateiro a *Trichogramma pretiosum*. Pesq. Agropecu. Bras. 40: 203–210.
- Moura, A.P. de, M. Michereff Filho, J. A. Guimarães, & R.S. de Liz. 2014.** Manejo integrado de pragas do tomateiro para processamento industrial. Brasília, Embrapa Hortaliças, 24p (Circular Técnica 129).
- Mukwa, L.F.T., J. Mukendi, F.G. Adakate, D.M. Bugeme, A. Kalonji-Mbuyi, & S. Ghimire. 2021.** First report of the South American Tomato Pinworm *Tuta absoluta* (Meyrick) (Lepidoptera: Gelechiidae) and its damage in the democratic republic of Congo. Bioinvasions Rec. 10: 33–44.
- Mustapha, M.U., N.B. Halimoon, W. Lutfi, W. Johari, M. Yunus, A. Shukor, M. Umar Mustapha, N. Halimoon, W. Johar, & M. Yunus. 2019.** An overview on biodegradation of carbamate pesticides by soil bacteria Pertanika. J. Sci. & Technol. 27: 547–563.
- Mutamiswa, R., H. Machekano, & C. Nyamukondiwa. 2017.** First report of tomato leaf miner, *Tuta absoluta* (Meyrick) (Lepidoptera: Gelechiidae), in Botswana. Agric. Food Secur. 6: 1–10.
- Picanço, M.C., L. Bacci, A.L.B. Crespo, M.M.M. Miranda, & J.C. Martins. 2007.** Effect of integrated pest management practices on tomato production and conservation of natural enemies. Agric. For. Entomol. 9: 327–335.
- Prasannakumar, N.R., Jyothi, N., Saroja, S., & Kumar, G. R. 2021.** Relative toxicity and insecticide resistance of different field population of tomato leaf miner, *Tuta absoluta* (Meyrick). Int. J. Trop. Insect Sci. 41: 1397-1405.
- Quiroz, C.E. 1976.** Nuevos antecedentes sobre la biología de la pollila del tomate, *Scrobipalpa absoluta* (Meyrick). 36: 82–86.
- Reyes, M. K. Rocha, L. Alarcón, M. Siegwart & B. Sauphanor. 2012.** Metabolic mechanisms involved in the resistance of field populations of *Tuta absoluta* (Meyrick)(Lepidoptera: Gelechiidae) to spinosad. Pestic. Biochem. Physiol. 102: 45-50.
- Roush, R.T., & G.L. Miller. 1986.** Considerations for design of insecticide resistance monitoring programs. J. Econ. Entomol. 79: 293–298.
- Rubio, F.A., F.C. Montes, G. Alpizar-Brenes, J.R.P. Parra, J.A. Jamielniak, L.P. Lombardi Junior, & T.N. Vilches. 2022.** A predator-parasitoid mathematical model to

- describe the biological control of the tomato leafminer *Tuta absoluta*. Ecol. Complex. 50: 100995.
- Saavedra, T.M., G.A. Figueroa, & J.G.D. Cauhi. 2017.** Origem e evolução da produção de tomate *Lycopersicon esculentum* no México. Ciência Rural. 47.
- Salazar, E., & C.J. Araya. 1997.** Detección de resistencia a insecticidas em la Polilla del Tomate. Simiente. 67: 8–22.
- Schaeffer, J.M., H.W. Haines, & M. Sharp. 1989.** Avermectin binding *Caenorhabditis elegans* a two-state model for the avermectin binding site. Biochem. Pharmacol. 38: 2329–2338.
- Shalileh, S., P.A. Ogada, D.P. Moualeu, & H.M. Poehling. 2016.** Manipulation of *Frankliniella occidentalis* (Thysanoptera: Thripidae) by tomato spotted wilt virus (Tospovirus) via the host plant nutrients to enhance its transmission and spread. Environ. Entomol. 45: 1235–1242.
- Shashank, P.R., K. Chandrashekar, N.M. Meshram, & K. Sreedevi. 2015.** Occurrence of *Tuta absoluta* (Lepidoptera: Gelechiidae) An invasive pest from India. Indian J. Entomol. 77: 323.
- Silva, G.T.V., M.C. Picanço, D.O. Ferreira, G.A.R. Silva, T.C. de Souza, & G.A. Silva. 2015.** Is the performance of a specialist herbivore affected by female choices and the adaptability of the offspring? PLoS One. 10: 01–18.
- Silva, J.E., C.P. O. Assis, L.M.S. Ribeiro, & H.A.A. Siqueira. 2016.** Field-evolved resistance and cross-resistance of Brazilian *Tuta absoluta* (Lepidoptera: Gelechiidae) populations to diamide insecticides. J. Econ. Entomol. 109: 2190–2195.
- Siqueira, H.A.A., R.N.C. Guedes, D.B. Fragoso, & L.C. Magalhaes. 2001.** Abamectin resistance and synergism in Brazilian populations of *Tuta absoluta* (Meyrick) (Lepidoptera: Gelechiidae). Int. J. Pest Manag. 47: 247–251.
- Siqueira, H.A.A., R.N.C. Guedes, & M.C. Picanço. 2000a.** Insecticide resistance in populations of *Tuta absoluta* (Lepidoptera: Gelechiidae). Agric. For. Entomol. 2: 147–153.
- Siqueira, H.A.A., R.N.C. Guedes, & M.C. Picanço. 2000b.** Cartap resistance and synergism in populations of *Tuta absoluta* (Lep., Gelechiidae). J. App. Entomol. 124: 233–238.
- Souza, J.C., & P.R. Reis. 1986.** Controle da traça-do-tomateiro em Minas Gerais. Pesqui. Agropecu. Bras. 21: 353–354.
- Stavrakaki, M., A. Ilias, P. Ioannidis, J. Vontas, & E. Roditakis. 2022.** Investigating mechanisms associated with emamectin benzoate resistance in the tomato borer *Tuta absoluta*. J. Pest Sci. 95: 1163–1177.
- Tarusikirwa, V.L., R. Mutamiswa, S. English, F. Chidawanyika, & C. Nyamukondiwa. 2020.** Thermal plasticity in the invasive South American Tomato Pinworm *Tuta absoluta* (Meyrick) (Lepidoptera: Gelechiidae). J. Therm. Biol. 90: 102–598.

- Torres, J.B., C.A. Faria, W.S.J. Evangelista, & D. Pratissoli. 2001.** Within-plant distribution of the leaf miner *Tuta absoluta* (Meyrick) immatures in processing tomatoes, with notes on plant phenology. *Int. J. Pest Manag.* 47: 173–178.
- Vargas, H. 1970.** Observaciones sobre la biología y enemigos naturales de la polilla del tomate, *Gnorimoschema absoluta*. (Meyrick). (Lep. Gelechiidae). Tese, Universidade del Norte-Arica, 41 p.
- Wolstenholme, A. J. 2010.** Recent progress in understanding the interaction between avermectins and ligand-gated ion channels: Putting the pests to sleep. *Invertebrate Neuroscience.* 10: 5–10.
- Youssef, N. A., & G.M. Hassan. 2013.** Activity of *Bacillus thuringiensis* isolates on tomato borer, *Tuta absoluta* (Meyrick) and their molecular identification. *Afr. J. Biotechnol.* 12: 3699–3709.
- Zekeya, N., T. Dubois, J. Smith, & S. Ramasamy. 2022.** Field effectiveness of *Metarhizium anisopliae* and pheromone traps against *Phthorimaea absoluta* on tomato in Tanzania. *Crop Protec.* 156: 1–7.
- Zhang, G.F., D.Y. MA, Y.S. Wang, Y.H. Gao, W.X. LIU, R. Zhang, W.J. Fu, X.Q. Xian, J. Wang, M. Kuang, & F.H. WAN. 2020.** First report of the South American Tomato Leafminer, *Tuta absoluta* (Meyrick), in China. *J. Integr. Agric.* 19: 1912–1917.

CAPÍTULO 2

GENÉTICA, MONITORAMENTO E RESISTÊNCIA CRUZADA DE *Phthorimaea absoluta* (LEPIDOPTERA: GELECHIIDAE) À ABAMECTINA¹

VITOR QUINTELA SOUSA

Universidade Federal Rural de Pernambuco

¹Quintela V. Guimarães, M.F.G. Pereira, D.L. Oliveira M. Siqueira, H.A.A. Genetics and cross-resistance of *Phthorimaea absoluta* (Lepidoptera: Gelechiidae) to abmectin. Pest Management Science.

RESUMO – *Phthorimaea absoluta* (Meyrick) (Lepidoptera: Gelechiidae) é um dos principais insetos-praga em cultivos de tomate e casos de resistência são comuns para esta praga. Este estudo caracterizou a genética da resistência da *P. absoluta* à abamectina, bem como a resistência cruzada com outros inseticidas. Cruzamentos entre linhagens resistente (GVT-Sel) e suscetível (JDR1-Sus) foram feitos para testar a hipótese de resistência autossomal ou ligada ao sexo, através de curvas de concentração-mortalidade. Comparamos os resultados pelo teste de igualdade, que indicou ligação ao sexo. As progênies F1 e F1' foram retrocruzadas com os parentais para testar o modelo monofatorial, que foi rejeitado, e para estimar o número de loci, que indicou ao menos 7 genes. Os retrocruzamentos indicaram ligação ao sexo feminino. O fenótipo foi incompletamente recessivo e um único alelo não foi suficiente para conferir resistência elevada. Na dominância efetiva, 2,5 mg/L de inseticida matou todos os indivíduos heterozigotos e a concentração diagnóstica foi definida para 5 mg/L. Alta resistência cruzada ocorreu com outras avermectinas e moderadamente com inseticidas de outras classes. Benzoato de emamectina mostrou a maior CL₅₀ (21,02 mg/L) e razão de resistência (RR=1.893.000 vezes), e indoxacarbe a menor CL₅₀ (0,729 mg/L) e (RR=0,084 vezes). Indoxacarbe é uma alternativa para rotação com abamectina, juntamente com as espinosinas. Status recente da resistência sugere que as populações da traça-do-tomateiro estão em geral sensíveis à molécula, apesar do longo tempo de uso. Estratégias de manejo devem ser melhoradas a partir deste estudo, incluindo o monitoramento na concentração diagnóstica, o incremento de inimigos naturais e táticas disruptivas usando feromônio, a destruição de restos culturais e a rotação de culturas. Se a população da praga se aproximar do nível de controle, sugerimos o uso de abamectina com uma sequência de inseticidas com baixo potencial de resistência cruzada.

PALAVRAS-CHAVE: Traça-do-tomateiro, ligação a sexo, *Solanum lycopersicum*, avermectinas.

ABSTRACT - *Phthorimaea absoluta* (Meyrick) (Lepidoptera: Gelechiidae) is a major pest insect on tomato crops and cases of resistance are common for this pest. This study characterized the genetics of *P. absoluta* resistance to abamectin, as well as cross-resistance with other insecticides. Crosses between resistant (GVT-Sel) and susceptible (JDR1-Sus) strains were performed to test the hypothesis of autosomal or sex-linked resistance using concentration-mortality curves. We compared the results through the equality test, which indicated sex-linked. The F1 and F1' progenies were backcrossed with the parents to test the single-factor model, which was rejected, and to estimate the number of loci, which indicated at least 7 genes. The backcrosses indicated female linkage. The trait was incompletely recessive, and a single allele was not sufficient to confer high resistance. In effective dominance, 2.5 mg/L insecticide killed all heterozygous individuals, and the diagnostic concentration was set to 5 mg/L. High cross-resistance occurred with other avermectins and moderately with insecticides from other classes. Emamectin benzoate showed the highest LC₅₀ (21.02 mg/L) and resistance ratio (RR=1893000 vezes), and indoxacarb the lowest LC₅₀ (0.729 mg/L) and (RR=0.084 vezes). Indoxacarb is an alternative to rotation with abamectin along with spinosyns. Recent resistance status suggests that tomato moth populations are generally sensitive to the molecule despite long time of use. Management strategies should be improved from this study, including monitoring at diagnostic concentration, augmentation of natural enemies and disruptive tactics using pheromone, destruction of crop remains, and crop rotation. If the pest population approaches the control level, we suggest using abamectin with a sequence of insecticides with low cross-resistance potential.

KEYWORDS: South American tomato pinworm, sex linkage, *Solanum lycopersicum*, avermectins,

Introdução

Phthorimaea (= *Tuta*) *absoluta* (Meyrick, 1917) (Lepidoptera: Gelechiidae) é atualmente a principal praga do tomateiro no mundo (Campos *et al.* 2017). Este inseto possui características bioecológicas que o tornam altamente adaptável a diferentes condições ambientais, motivo pelo qual vem se espalhando por várias regiões do mundo (Biondi *et al.* 2018). Desde que foi identificada na Eurásia seu controle tornou-se estratégico nos países produtores (Desneux *et al.* 2011). As injúrias causadas por alta infestações da praga podem levar a 100% de perdas se o manejo não for adequado ao longo do ciclo da cultura (Guedes *et al.* 2019).

O controle de *P. absoluta* envolve diversas práticas dentro do manejo integrado de pragas (MIP), como o uso de populações de insetos entomófagos, importante no controle biológico da praga (Picanço *et al.* 2007), o uso de feromônios, particularmente no monitoramento de populações, mas promissor no controle maçal (Zekeya *et al.* 2022). A associação destas técnicas a outras práticas de manejo leva a uma menor utilização de inseticidas (Cocco *et al.* 2013). Apesar disto, o emprego de inseticidas ainda constitui medida importante. Por outro lado, o uso inadequado e excessivo do controle químico, ao longo do tempo tornou a resistência deste inseto aos inseticidas um dos maiores problemas para a o cultivo do tomate (Guedes & Siqueira 2012, Hawkins *et al.* 2019).

Os primeiros inseticidas utilizados na América do Sul para o controle de *P. absoluta* foram os organofosforados, piretroides e análogos da nereistoxina (Souza & Reis 1986). Ainda nos anos 90 foram introduzidos os disruptores de crescimento de insetos e avermectinas (Siqueira *et al.* 2000). As avermectinas estão inseridas no grupo 6 do IRAC (IRAC 2022), este grupo de inseticidas tem modo de ação neurotóxico e atuam especificamente como moduladores alostéricos dos canais iônicos controlados por ligantes (Wolstenholme 2010). Nos artrópodes

estes inseticidas agem nos canais de cloro mediados pelo glutamato (GluCl) (Cully *et al.* 1996). As avermectinas ligam-se a um sítio alostérico do GluCl, mantendo estes canais abertos e aumentando a passagem dos íons de cloro para os neurônios pós-sinápticos, acarretando a hiperpolarização das células nervosas (Arena *et al.* 1992). Os insetos expostos a este inseticida apresentam ataxia e paralisia, o que leva à interrupção da alimentação e à morte pouco tempo depois (Wolstenholme 2010).

Há registros de resistência para *P. absoluta* à abamectina (Siqueira *et al.* 2000, Castelo Branco *et al.* 2001, Siqueira *et al.* 2001, Lietti *et al.* 2005). Estes casos de resistência foram relatados em baixos níveis (Siqueira 2001). Apesar disto, muitos estudos mostram boa eficácia da abamectina frente à *P. absoluta* (Khani *et al.* 2014, Silva *et al.* 2016, Ahmed *et al.* 2020, Langa *et al.* 2021). Por outro lado, não sabemos como a transmissão da resistência à abamectina se comporta para *P. absoluta*. Diante disto, conhecer os mecanismos genéticos envolvidos nesta resistência, pode contribuir para traçar estratégias de manejo e conseqüentemente para a manutenção da vida útil do inseticida.

Neste estudo, levantamentos prévios indicaram baixa mortalidade na população de Gravatá. Esta população foi mantida sob pressão de seleção para homogeneizar estes alelos de resistência e posteriormente foram conduzidos estudos genéticos. Investigamos se a herança da resistência de *P. absoluta* à abamectina era autossomal ou ligada ao sexo e se houve adequação ao modelo monofatorial. Estimamos o número de genes, grau de dominância e herdabilidade. Na dominância efetiva, procuramos encontrar uma concentração que matasse todos os heterozigotos, para determinar uma concentração diagnóstica que discriminasse indivíduos resistentes, esta concentração usamos para testar em quinze populações provenientes de campos de cultivo de tomate ao longo de 2022. Por fim, traçamos o perfil de resistência cruzada com outros inseticidas na população selecionada, que poderá contribuir na elaboração de esquema de rotação de inseticidas.

Material e métodos

Coleta e criação de *Phthorimaea absoluta*. Populações de *P. absoluta* provenientes das regiões Sudeste, Centro-oeste e Nordeste do Brasil foram usadas para o levantamento de resistência à abamectina. Entre 2018 e 2019 um levantamento prévio do *status* de resistência à abamectina foi realizado com 14 populações com a concentração de 1 mg abamectina/L (Figura 1). As larvas foram coletadas em folhas, hastes e frutos de tomate infestados e enviadas para o Laboratório de Interações Inseto-Tóxico em Recife-PE. O material infestado de cada população foi colocado imediatamente em gaiola de criação (45x45x45 cm) feita com malha antiafídeo. Os adultos foram mantidos em gaiolas com dimensões de (30x30x30 cm) e diariamente alimentados com solução de mel a 10% e uma fonte de proteína fornecida através de levedura. Folhas de tomate da cultivar “Santa Clara” (IC 5500) foram oferecidas como substrato para oviposição e para alimentação das larvas. As populações foram mantidas a 25 ± 1 °C, com umidade relativa de $65 \pm 5\%$ e fotoperíodo de 12 h. A população suscetível João Dourado 1 (JDR1) foi coletada em 2014 no município de João Dourado no estado da Bahia/Brasil. Por apresentar características de suscetibilidade aos compostos da classe das avermectinas, foi mantida em condições de laboratório como população de referência de suscetibilidade sem pressão de seleção por inseticidas.

Bioensaios toxicológicos. Os ensaios toxicológicos foram conduzidos em delineamento inteiramente casualizado e cada concentração preparada em duplicata (Campos *et al.* 2015). Os bioensaios foram conduzidos pelo método de imersão de folíolos por 30 segundos em solução tratamento contendo inseticida e adjuvante, lado a lado com tratamento controle com água e adjuvante de acordo com a metodologia do IRAC (IRAC 2022). Em todos os tratamentos utilizou-se o adjuvante Agr’óleo® (Gota Ltda, Contenda, PR, Brasil) a 0,025%. O inseticida

utilizado foi abamectina (Vertimec® 18 g a.i./L, concentrado emulsionável, Syngenta S.A., São Paulo, Brasil). Os folíolos foram mantidos à temperatura ambiente até a secagem completa. Posteriormente, os folíolos foram colocados em placas de Petri (8 cm de diâmetro por 1,5 cm de altura), forrados com papel filtro umedecido com 400 µL de água destilada. Dez larvas de segundo instar foram transferidas para cada placa de Petri. As placas foram seladas com papel filme e posteriormente foram mantidas em câmara climática (tipo BOD) regulada para 25 ± 1 °C, UR $65 \pm 5\%$ e fotoperíodo de 12 h. As avaliações foram realizadas após tempo de exposição de 48 h (inseticidas neurotóxicos) ou 96 h (inseticidas não neurotóxicos), com auxílio de lupa (Zeiss, Alemanha). Como critério de avaliação, larvas que se mexeram ativamente após serem tocadas cuidadosamente com um pincel de cerdas macias foram consideradas vivas, aquelas que não se mexeram ativamente foram consideradas mortas.

Seleção com abamectina e herdabilidade realizada. De forma a isolar a característica de resistência e avaliar o risco de evolução desta resistência à abamectina, a população de oriunda de Gravatá, Pernambuco/Brasil (identificada a partir daqui como GVT-Sel), por haver apresentado maior resistente no levantamento feito com a concentração de 1 mg/L, foi mantida sob seleção por 16 gerações. A concentração inicial de 1,97 mg/L de abamectina baseou-se na CL_{50} após bioensaios de concentração-mortalidade e foi gradualmente aumentada até a concentração final de 95,10 mg/L, que foi mantida como concentração padrão para manutenção da resistência selecionada. A herdabilidade foi estimada conforme Tabashnik (1992), onde $h^2 = R/S$, em que R é a resposta de seleção, dado: $R = (\text{Log final } CL_{50}) - (\text{Log inicial } CL_{50}) / n$. A CL_{50} final foi obtida após 16 gerações de seleção de GVT-Sel com abamectina e a CL_{50} inicial obtida antes do processo de seleção, n é o número de gerações selecionado com abamectina, S é a seleção diferencial, dado: $S = i \times \sigma_p$, em que i é a intensidade de seleção, estimada conforme o método Falconer & Mackay (1996), σ_p é o desvio padrão fenotípico, dado: $\sigma_p = [(\text{inclinação}$

inicial_{GVT-Sel}) – (inclinação final_{GVT-Sel})0,5]⁻¹. O número de gerações necessárias para um aumento de dez vezes na CL₅₀ (G) foi estimado da seguinte forma: $G = 1/R$.

Herança da resistência à abamectina. Cruzamentos recíprocos foram conduzidos entre fêmeas resistentes e machos suscetíveis (GVT-Sel ♀ x JDR1-Sus ♂) e entre machos resistentes e fêmeas suscetíveis (GVT-Sel ♂ x JDR1-Sus ♀) para testar a hipótese da herança da resistência à abamectina ser autossomal ou ligada ao sexo, assim como o grau de dominância. A sexagem foi conduzida em larvas de quarto ínstar de *P. absoluta* para compor 100 casais virgens (Liu & Tabashnik 1997). Para determinar o grau de dominância e se a hipótese de resistência era autossomal ou ligada ao sexo foram realizados bioensaios toxicológicos para estimar curvas de concentração resposta para indivíduos F₁ e F₁'. As curvas foram submetidas ao teste de igualdade, caso as curvas fossem iguais, indicavam que as progênes F₁ e F₁' não eram diferentes entre si, não havendo, por tanto, ligação ao sexo. Para estimar o número de loci influenciando a resistência, as progênes F₁ e F₁' dos cruzamentos recíprocos foram retrocruzadas com as populações resistente e suscetível conforme o esquema seguinte: (F₁ ♀ x GVT-Sel ♂), (F₁ ♂ x GVT-Sel ♀), (F₁' ♀ x GVT-Sel ♂), (F₁' ♂ x GVT-Sel ♀), (F₁ ♀ x JDR1-Sus ♂), (F₁ ♂ x JDR1-Sus ♀), (F₁' ♀ x JDR1-Sus ♂) e (F₁' ♂ x JDR1-Sus ♀), sendo a descendência obtidas destes cruzamentos submetidas a bioensaio de mortalidade. Além disso, as progênes (F₂) foram também obtidas através de autocruzamentos das progênes F₁. O grau médio de dominância (GD) da resistência foi calculado utilizando os valores obtidos das CL₅₀ das progênes F₁ e F₁' e das CL₅₀ das linhagens parentais JDR1-Sus e GVT-Sel, de acordo com a fórmula $GD = (2L_{F1} - L_{GVT-Sel} - L_{JDR1-Sus}) / (L_{GVT-Sel} - L_{JDR1-Sus})$ (Stone 1964), onde: GD é o grau de dominância, L_{F1} é o valor de log da CL₅₀ de F₁ ou F₁', e $L_{GVT-Sel}$ e $L_{JDR1-Sus}$ são os valores em log da CL₅₀ de GVT-Sel e JDR1-Sus, respectivamente. Os valores podem variar de -1 a 1, onde -1 indica recessividade completa, 1 dominância completa e 0 codominância.

Teste direto para o modelo monofatorial. Para estimar se a herança da resistência de *P. absoluta* à abamectina era monogênica ou poligênica as respostas esperadas e observadas dos retrocruzamento foram comparadas através do teste de hipótese nula utilizando o teste de Qui quadrado (χ^2) (Tsukamoto 1983). A mortalidade esperada do retrocruzamento para cada concentração foi calculada pela fórmula seguinte: $Y_x = 0,50(W_{RS} + W)$. Onde W_{RS} são a mortalidade esperada de (F1 ou F1') e W mortalidade esperada da linhagem parental resistente ou suscetível na concentração X . A mortalidade da progênie F1 e dos parentais foram calculadas nas mesmas concentrações: 3,00; 2,50; 2,00; 1,50; 1,00; 0,50 e 0,25 (Tabashnik 1991).

Número de genes. O número mínimo de fatores que influenciam a resistência foi obtido através do seguinte método $(nE) = (X_{GVT-Sel} - X_{JDR1-Sus})^2 / (8\sigma^2_s)$ (Lande 1981), onde: $X_{GVT-Sel}$ e $X_{JDR1-Sus}$ correspondem ao Log da CL_{50} das populações GVT-Sel e JDR1-Sus, respectivamente, e σ^2_s corresponde à variação fenotípica estimada pelo valor inverso do quadrado do coeficiente angular, obtida através do método de Lande (1981): $\sigma^2_s = \sigma^2_{B1} + \sigma^2_{B2} - [\sigma^2_{F1} + 0,5 \sigma^2_{p1} + 0,5 \sigma^2_{p2}]$. Onde σ^2_{B1} , σ^2_{B2} , σ^2_{F1} , σ^2_{p1} e σ^2_{p2} correspondem às variações fenotípicas do retrocruzamento (F1 x JDR1-Sus) e (F1 x GVT-Sel), o heterozigoto F1 agrupado e os parentais GVT-Sel e JDR1-Sus, respectivamente.

Dominância efetiva e concentração diagnóstica. Para estimar uma dose que “discriminasse” fenotipicamente indivíduos suscetíveis de resistentes, ensaios foram conduzidos com concentrações próximas às CL_{99} , estimadas a partir das curvas de concentração mortalidade para os heterozigotos F1 e F1'. Em seguida, utilizou-se estas concentrações para testar os parentais suscetíveis, resistentes e as progênies heterozigotas F1. A condução dos experimentos foi semelhante aos bioensaios anteriores. Para cada genótipo foram conduzidas três repetições, cada uma contendo dez larvas de segundo instar mais o controle. A dominância efetiva foi determinada pela equação descrita: $D_{ML} = ML_{F1} - ML_{JDR1-Sus} / ML_{GVT-Sel} - ML_{JDR1-Sus}$ (Bourguet & Genissel 2000). Onde: $ML_{JDR1-Sus}$, ML_{F1} , $ML_{GVT-Sel}$, são a percentagem de mortalidade em uma única

concentração do inseticida para homozigoto suscetível, heterozigoto e homozigoto resistente, respectivamente. Os valores de dominância variam de 0 para completamente recessivo a 1 para completamente dominante. A concentração diagnóstica de 5 mg abamectina/L foi definida com base na dominância efetiva para a progênie F1. Esta concentração foi usada nos monitoramentos de 2021 e 2022 como concentração diagnóstica em 15 populações de campo de *P. absoluta*, mais a população de referência JDR1-Sus.

Monitoramento de populações de *P. absoluta* com abamectina. O monitoramento com a concentração diagnóstica de 5 mg/L de abamectina (dose diagnóstica) foi realizado em 15 populações no ano de 2021 e 2022, mais a população de referência JDR1-Sus para efeito de comparação, além disto 12 populações foram testadas com 18 mg/L (dose de bula) no ano de 2022. Foram testadas populações oriundas das regiões Centro-Oeste, Nordeste e Sudeste do Brasil (Figura 1). O número de insetos necessários para detectar resistência em baixa frequência (1%) na concentração diagnóstica foi definido pela metodologia proposta por Roush & Miller (1986) e a probabilidade de detectar falha de controle em concentração de campo, foi estimada pela metodologia proposta por Guedes (2017), em que $CFL = 100 - [mortalidade alcançada (\%) \times 100]/mortalidade esperada$, considerando 80% como a mortalidade esperada para a eficácia do inseticida em populações de campo (MAPA 2022). Os valores para considerar a falha de controle com alta probabilidade de ocorrência são positivos, enquanto valores negativos indicam baixa probabilidade de ocorrer falha de controle.

Resistência cruzada e múltipla. Foram usadas larvas de segundo ínstar em bioensaios de concentração-mortalidade conduzidos conforme o descrito no tópico “Bioensaios toxicológicos”, utilizando os seguintes inseticidas: benzoato de emamectina (50 g i.a./kg granulado dispersível, Syngenta Ltda., São Paulo, Brasil), milbemecina (50 g i.a./L, concentrado emulsionável, Iharabras S.A., São Paulo, Brasil), espinetoram (250 g i.a./Kg, granulado dispersível, Dow AgroSciences, São Paulo, Brasil), espinosade (480 g i.a./L, suspensão concentrada, Dow

Agrosacience Ltda., São Paulo, Brasil), fipronil (800 g i.a./kg granulado dispersível, Nortox S.A., Paraná, Brasil), deltametrina (789 g i.a./L concentrado emulsionável, Bayer S.A., São Paulo, Brasil), clorantraniliprole (200 g i.a./L suspensão concentrada, DuPont, São Paulo, Brasil), metoxifenoazida (240 g a.i./L, suspensão concentrada, Dow Agrosiences Ltda, São Paulo, Brasil), tebufenoazida (240 g i.a./L Iharabras S.A., São Paulo, Brasil) cartape (500 g i.a./Kg, pó solúvel, Iharabras S.A., São Paulo, Brasil), indoxacarbe (300 g i.a./Kg, granulado dispersível, DuPont, São Paulo, Brasil), tiametoxam (750 g i.a./kg granulado solúvel, Syngenta S.A., São Paulo, Brasil) malationa (1000 g i.a./L, concentrado emulsionável, Cheminova Brasil Ltda., São Paulo, Brasil), metomil (215 g i.a./Litro, concentrado solúvel, Nortox S.A., Paraná, Brasil), para estabelecer o perfil de resistência cruzada e/ou resistência múltipla com abamectina (18 g a.i./L, concentrado emulsionável, Syngenta S.A., São Paulo, Brasil).

Análise estatística. Foi conduzida análise de Probit no software POLO Plus (LeOra-Software 2005) obtendo-se as CL₅₀, CL₈₀ e CL₉₅, limites de confiança a 95% de probabilidade, coeficiente angular das curvas e erros padrões. O teste de igualdade para comparar as progênies F1 e F1' foi feito por meio do mesmo software. As mortalidades observadas nos tratamentos com inseticida foram corrigidas pela mortalidade do controle usando o método de Abbott (1925). As razões de resistência também foram calculadas utilizando o POLO Plus e foram consideradas significativas quando o limite de confiança a 95% não incluiu o valor 1 (Preisler *et al.* 1990). O teste Z unilateral com nível de confiança 100 (1 - α) % com correção para continuidade (Snedecor & Cochran 1989), foi usado para determinar se a fração observada de sobreviventes na dose diagnóstica foi significativamente maior que o 1% esperado de frequência. Sendo assim, o número de sobreviventes necessários para apresentar significância foi determinado a 1% de frequência fenotípica $\alpha = 0,05$ para cada população (Roush & Miller 1986).

Resultados

Status inicial da resistência à abamectina em populações de campo. A CL_{50} para a população mais suscetível (JDR1) foi 0,0036 mg/L de abamectina, enquanto a população (GVT) apresentou CL_{50} de 1,94 mg/L, mostrando indícios de maior resistência ao inseticida. Os resultados do levantamento de suscetibilidade revelaram valores de CL_{50} abaixo de 2 mg/L para todas as populações, com altas variações de resistência. Porém, os valores foram abaixo da dose diagnóstica de 5 mg/L (dominância efetiva) e muito aquém da dose de bula (18 mg/L). O inseto também mostrou níveis de resistência nas CL_{80} (0,01 a 5,61 mg/L) e CL_{95} (0,04 a 15,45 mg/L) em valores abaixo da dose indicada em bula, demonstrando que as populações estavam provavelmente sob controle em campo. A razão de resistência (RR_{50}) variou entre 2,6 (JZR) a 538 (GVT) vezes, quando comparada à população de referência JDR1 (Tabela 1).

Seleção com abamectina e herdabilidade realizada. A população de Gravatá que apresentou maior resistência à abamectina, foi identificada a partir de então como GVT-Sel, e foi selecionada constantemente com este inseticida até a geração 16 (G16). Os resultados mostraram aumento na CL_{50} de 1,94 mg/L (G1) para 95,10 mg/L (G16), o que representou quase 50 vezes de aumento. A mesma tendência foi observada para as CL_{80} e CL_{95} (Tabela 2). A razão de resistência ($RR_{50} = 95\% \text{ IC}$) entre G1 e G16 aumentou de 538 para 26.351 vezes (Tabela 2). Os resultados de herdabilidade mostraram valores da resposta de seleção $R = 0,108$ e de intensidade de seleção de $i = 0,948$ e a herdabilidade realizada foi $h^2 = 0,189$. O número de gerações necessários para aumento de dez vezes na resistência foi de aproximadamente 10,0 (Tabela 3).

Herança da resistência à abamectina. GVT-Sel apresentou (25.939 vezes) de resistência em comparação à população de referência JDR1-Sus, após 16 gerações sob seleção com abamectina em laboratório. Os resultados dos cruzamentos recíprocos mostraram valores de CL_{50} de 0,07 F1 ($\text{♀R} \times \text{♂S}$) e 0,02 F1' ($\text{♀S} \times \text{♂R}$), inclinação de 1,37 e 2,24 para F1 e F1', respectivamente, apontando para rejeição à hipótese de igualdade, pois não houve sobreposição do limite de

confiança a 95% (Tabela 4). O cruzamento identificado como F1 agrupado foi originado da junção dos cruzamentos de F1 e F1' e mostrou um valor intermediário na CL₅₀. Nas CL₅₀ dos F2 observou-se a tendência de maior resistência para cruzamentos com F1 (♀R x ♂S) indicando que houve maior resistência nas progênes obtidas dos cruzamentos com fêmeas resistentes. Para isolar os fatores que conferiram resistência, conduzimos retrocruzamentos que foram identificados do 1 ao 8 (RC1 ao RC8). As maiores RR observadas foram 13.688- (RC2), 6.298- (RC4) e 3.755-vezes (RC1), com valores de CL₅₀ 50,11; 23,06 e 13,75 mg/L, respectivamente. RC5 e RC3 apresentaram RR 595 e 358, respectivamente. As menores RR e CL₅₀ ocorreram nos retrocruzamentos RC6, RC7 e RC8, inferiores a 10x (Tabela 4). O grau de dominância (GD) foi -0,421 (F1), -0,640 (F1') e -0,531 (F1 agrupado). O erro padrão calculado pela fórmula de Robertson (2005) para cada valor de dominância GD ± 1,96 EP confirmou dominância incompletamente recessiva para todos os cruzamentos (Tabela 4). O teste direto foi conduzido com todos os retrocruzamentos para testar o modelo monofatorial através das mortalidades observadas e esperadas, e todos eles apresentaram diferenças significativas (χ^2 significativo a P > 0,05), indicando rejeição ao modelo monofatorial (Tabela 5). O número mínimo efetivo de genes (*nE*) conferindo resistência à abamectina foi aproximadamente 7,0 ± 1,5.

Dominância efetiva e concentração diagnóstica. A partir de 0,25 mg/L de abamectina a progênie F1 (♀R x ♂S) apresentou $h = 0,833$ e sobrevivência de 83,33%, configurando dominância efetiva incompleta. Na concentração de 2,5 mg/L a dominância foi recessiva $h = 0,00$ e sobrevivência de 0,0 %, indicando uma menor suscetibilidade ao inseticida em comparação à progênie F1' (♀S x ♂R), que apresentou $h = 0,400$ e 40% de sobrevivência na menor concentração, enquanto na concentração de 1 mg / L a resistência foi completamente recessiva com sobrevivência de 0,0%. A concentração de 2,5 mg/L foi suficiente para tornar a dominância efetiva de ambas as progênes completamente recessiva (Tabela 6). Para estipular a concentração diagnóstica usamos como base a concentração de 2,5 mg/L de abamectina que matou todos os

indivíduos heterozigotos e usamos o dobro desta concentração, ou seja, 5 mg/L de abamectina, possibilitando a discriminação apenas de genótipos resistentes e diminuindo erros de estimativa.

Monitoramento de populações de *P. absoluta* com abamectina. No monitoramento com concentração diagnóstica o número de indivíduos sobreviventes para obter o nível de significância a pelo menos 1% da frequência fenotípica (com $\alpha = 0,05$) foi de três sobreviventes. Ou seja, em cada população em que foram testados 100 indivíduos, para obter um nível de significância de 1% de sobreviventes foi necessário que ao menos três indivíduos sobrevivessem. Adicionalmente, observamos que das quatorze populações monitoradas, nove populações apresentaram ao menos 3 indivíduos sobrevivendo na concentração diagnóstica, o que demonstrou alta variação fenotípica, a exceção foi para LNS-2022, INJ-2022, PIE-2022, IRE-2022, TNG-2022 e LNS-2021. Por outro lado, todas as populações apresentaram frequência de mortalidade alta na concentração de bula 18 mg/L (Figura 3). O valor médio de CFL = -9,45 mostrou que há baixa probabilidade de falha de controle nas doze populações testadas, oriundas de áreas com plantio de tomate, assumindo-se 80% de mortalidade como parâmetro de eficácia.

Resistência cruzada e múltipla. GVT-Sel mostrou resistência elevada para benzoato de emamectina (RR = 1.893.000 vezes) e milbemecina (RR = 4.506 vezes), compostos com modos de ação similares (grupo 6 do IRAC), configurando claramente uma resistência cruzada. Outros inseticidas de grupos distintos mostraram resultados relativamente altos de resistência como fipronil (RR = 374 vezes), tebufenozida (RR = 198 vezes), metoxifenoazida (RR = 65 vezes), clorantianiliprole (RR = 30 vezes), clorfenapir (RR = 10 vezes) e cloridrato de cartape (RR = 8 vezes), indicando resistência múltipla. Por outro lado, os valores de razão de resistência mais baixos foram verificados para os inseticidas espinetoram (RR = 4 vezes), espinosade (RR = 2 vezes), deltametrina (RR = 2 vezes), tiametoxam (RR = 1 vez), malationa (RR = 0,8 vezes), metomil (RR = 0,2 vezes) e indoxacarbe (RR = 0,08 vezes). Seguindo esta ordem, a maior CL₅₀

foi observada para o inseticida benzoato de emamectina 21 mg/L e a menor para indoxacarbe 0,052 mg/L (Tabela 8).

Discussão

A resistência de populações de *P. absoluta* à abamectina foi relatada pela primeira vez no Brasil e na Argentina no início dos anos 2000 (Siqueira *et al.* 2000, Castelo Branco *et al.* 2001, Siqueira *et al.* 2001, Lietti *et al.* 2005). No Brasil, os maiores níveis de resistência para este inseticida variaram de 5,2 a 9,4 vezes (Siqueira *et al.* 2000). No entanto, o *status* dessa resistência não foi avaliado desde então para *P. absoluta* e o levantamento inicial feito em 2018 e 2019 com concentração diagnóstica de 1 mg/L demonstrou uma grande variação na suscetibilidade à abamectina, com algumas populações ainda suscetíveis e outras apresentando níveis variáveis de resistência. Ensaios de concentração-mortalidade para estas populações mostraram que a população de Gravatá (GVT) foi a mais resistente (538 vezes), enquanto todas as outras populações apresentaram níveis de resistência variando de 2,6 (JZR) a quase 130 vezes (GBN). Portanto, a resistência de *P. absoluta* à abamectina variou no espaço e no tempo, sendo que algumas populações apresentaram suscetibilidade próxima à população de referência, apesar do longo uso de abamectina no Brasil.

A população de Gravatá (GVT-Sel) detectada como a mais resistente à abamectina no levantamento de 2018 e 2019 foi selecionada em laboratório para obtenção de população resistente homocigota. O risco de evolução de resistência para abamectina em populações de *P. absoluta* pareceu moderado, com herdabilidade de senso curto (h^2) baixa, sugerindo baixa variância aditiva. A variação fenotípica em campo devido aos fatores ecológicos, ambientais e de manejo, como migração e alternância de inseticidas são alguns dos fatores que podem ter contribuído na dinâmica da evolução da resistência em campo (Denholm 1990, Denholm *et al.* 2002, Gontijo *et al.* 2013, Biondi *et al.* 2018). Embora GVT-Sel tenha sido selecionada em condições de laboratório e mostrado um padrão de baixa herdabilidade, condições de campo

podem não refletir esta realidade (Tabashnik 1992). Estudos com *Oxycarenum hyalinipennis* (Costa) resistente a clorfenapir (Ullah *et al.* 2016), *Musca domestica* (L.) resistente a espinosade (Shi *et al.* 2011) e a imidacloprido (Khan *et al.* 2014) mostraram uma baixa herdabilidade.

Neste estudo a resistência pareceu seguir um padrão de herança não autossômico, com ligação ao sexo feminino. Embora as progênes F1 e F2 não tiveram valores de CL₅₀ e RR elevados, os resultados dos retrocruzamentos reforçam este achado, porque nos RC2 (F1♂ x ♀GVT-Sel) e RC4 (F1'♂ x ♀GVT-Sel), ambos originados de fêmeas resistentes, os valores da CL₅₀ ficaram acima da concentração de bula e as razões de resistência foram muito maiores quando comparadas aos retrocruzamentos com machos GVT-Sel. Isto fica evidente também ao comparar os RC5 (F1♀ x ♂JDR-Sus) RR = 595 vezes, superior ao RC3 (F1'♀ x ♂GVT-Sel), onde machos GVT-Sel estão presentes e que mostrou RR = 358 vezes. Ou seja, mesmo a presença de machos resistentes no RC3 não foi capaz de elevar a resistência acima da resistência observada para RC5 que é originado de fêmeas resistentes provenientes de F1.

Em lepidópteros a resistência ligada ao sexo feminino foi relatada para tebufenozide em *Plutella xylostella*, a ligação ao cromossomo W foi possivelmente responsável pela resistência (Cao & Han 2015). Fatores biológicos como dimorfismo sexual, com machos de *P. absoluta* menos robustos que fêmeas (Desneux *et al.* 2010), pode ser importante para a maior suscetibilidade de machos ao inseticida (Marín *et al.* 2000, Carrière 2003). Uma hipótese alternativa para a maior resistência de fêmeas de GVT-Sel é a fusão entre o cromossomo neo-sexual Z a um cromossomo autossomal (Mongue *et al.* 2022, Yazdi 2022). Nguyen *et al.* (2013) reportou a ligação do cromossomo sexual Z ao autossomal 15 em *Cydia pomonella* (Tortricidae), no qual há presença de genes hortólogos ao *Rdl*, *Ace-1* e *ABCC2* relacionados à resistência a ciclodienos, carbamatos, organofosfatos e *Bacillus thuringiensis*, respectivamente. Adicionalmente, Paladino *et al.* (2019) relatou fusão do cromossomo sexual ancestral Z feminino ao autossomal 7 em *P. absoluta*. Estes cromossomos possuem genes responsáveis pela

expressão de enzimas destoxicativas, como as da família UDP-glicosiltransferase, que estão ligadas diretamente a adaptações evolutivas frente aos compostos xenobióticos das plantas e que também podem agir no mecanismo destoxicativo de inseticidas. Estudos adicionais são necessários para entender a maior resistência observada em fêmeas desta espécie.

A rejeição ao modelo monofatorial mostrou que há envolvimento de vários genes na resistência a este inseticida. A resistência poligênica é comum em populações selecionadas em laboratório, mas também ocorre em campo e a presença de vários genes de resistência também é mais comum quando a dominância é recessiva (Croft & Van de Baan 1988). Informações sobre a dominância da resistência podem contribuir para melhorar o manejo. Nossos achados mostraram que para abamectina a resistência foi incompletamente recessiva e os heterozigotos respondem mais próximo aos suscetíveis, sendo necessário uma concentração menor do inseticida para matá-los (Asser-Kaiser *et al.* 2007). Neste contexto, a dominância efetiva demonstrou que para *P. absoluta* a resistência à abamectina é dependente da concentração e 2,5 mg/L matou todos os indivíduos F1 e F1' (heterozigotos) e parentais JDR1-Sus (homozigotos suscetíveis). Com base nesta concentração a dose diagnóstica foi extrapolada para 5 mg/L, para garantir que somente homozigotos resistentes sobrevivessem. Isto possibilitou a diminuição de falso positivo, isto é, a discriminação de fenótipos como resistentes, quando de fato são suscetíveis. Este resultado comprovou que a resistência é funcionalmente recessiva para a concentração de bula de 18 mg/L. Complementar a isto, a probabilidade de falha de controle para as populações coletadas em doze regiões produtoras de tomate, indicou que o inseticida continua eficaz para os parâmetros das agências reguladoras do Brasil, que exige o mínimo de 80% de eficácia (MAPA, 2022).

A resistência a abamectina está possivelmente relacionada a enzimas destoxicativas, esta hipótese é reforçada pelos achados de (Siqueira *et al.* 2001), que encontraram sinergismo para PBO, DEM e TPP. Stavrakaki *et al.* (2022) não encontrou mutações relacionados aos sítios

de ação dos canais de cloro mediados pelo Glutamato (GluCl) em larvas de *P. absoluta* resistentes ao benzoato de emamectina, reforçando a hipótese de metabolismo detoxificativo envolvido na resistência a este grupo de inseticida. Nossos achados de resistência cruzada mostraram aumento na resistência para benzoato de emamectina e milbemectina, ambos subgrupos (avermectinas e milbemecinas) com ação no GluCl (Wolstenholme 2010). Portanto, o uso destes inseticidas não é indicado em sequência. Além disso, a toxicidade do indoxacarbe aumentou, o qual é um pró-inseticida com ativação por enzimas esterases. O aumento da sensibilidade de *P. absoluta* ao indoxacarbe, reforça a suposição de que enzimas tenham maior ação na resistência à abamectina, uma vez que, ao aumentar a atividade enzimática para detoxificação de abamectina, o indoxacarbe se tornou mais tóxico para este inseto. Este inseticida é uma alternativa para rotação com abamectina, juntamente com espinosade, espinetoram e malationa que mostraram CL_{50} com valores muito baixos. A resistência elevada observada para fipronil sugere resistência cruzada ou ainda que a população GVT coletada em campo tenha sido exposta a este inseticida, embora no Brasil fipronil não tenha registro para *P. absoluta*. Deste modo, a resistência a esta molécula pode estar relacionada ao uso indevido deste inseticida para o controle da traça do tomateiro. Estudos adicionais precisam ser conduzidos para entender melhor esta relação para *P. absoluta*. GVT-Sel também apresentou resistência a tebufenozide, metoxifenoze, clorfenapir e a clorantraniliprole, o que está de acordo com os achados de Langa *et al.* (2021). Estas informações podem ser úteis para a adequação de um programa de manejo, buscando-se evitar a utilização em sequência de inseticidas com possibilidade de resistência cruzada ou resistência múltipla.

Concluimos que esta resistência está ligada ao sexo feminino (sem evidência de efeito maternal), possui dominância incompletamente recessiva, e que aproximadamente 7 fatores podem estar contribuindo para esta resistência (polifatorial). A população testada mostrou baixa herdabilidade para abamectina e a concentração de 2,5 mg/L foi suficiente para matar os

heterozigotos. No monitoramento de 2022 com concentração de bula as populações de campo estavam sensíveis ao inseticida, além disso existe alta probabilidade de resistência cruzada com outras avermectinas e probabilidade moderada de resistência múltipla com inseticidas de outras classes. Estas informações podem ser úteis na adequação de planos de controle de *P. absoluta*, através da adequação de um plano de rotação de inseticidas.

AGRADECIMENTOS

Agradecemos à fundação CAPES (Ministério da Educação) pelo suporte financeiro e bolsa de estudo ao primeiro autor, ao CNPq pelo suporte e ao IRAC–BR, pelo fornecimento de amostras de insetos.

Literatura Citada

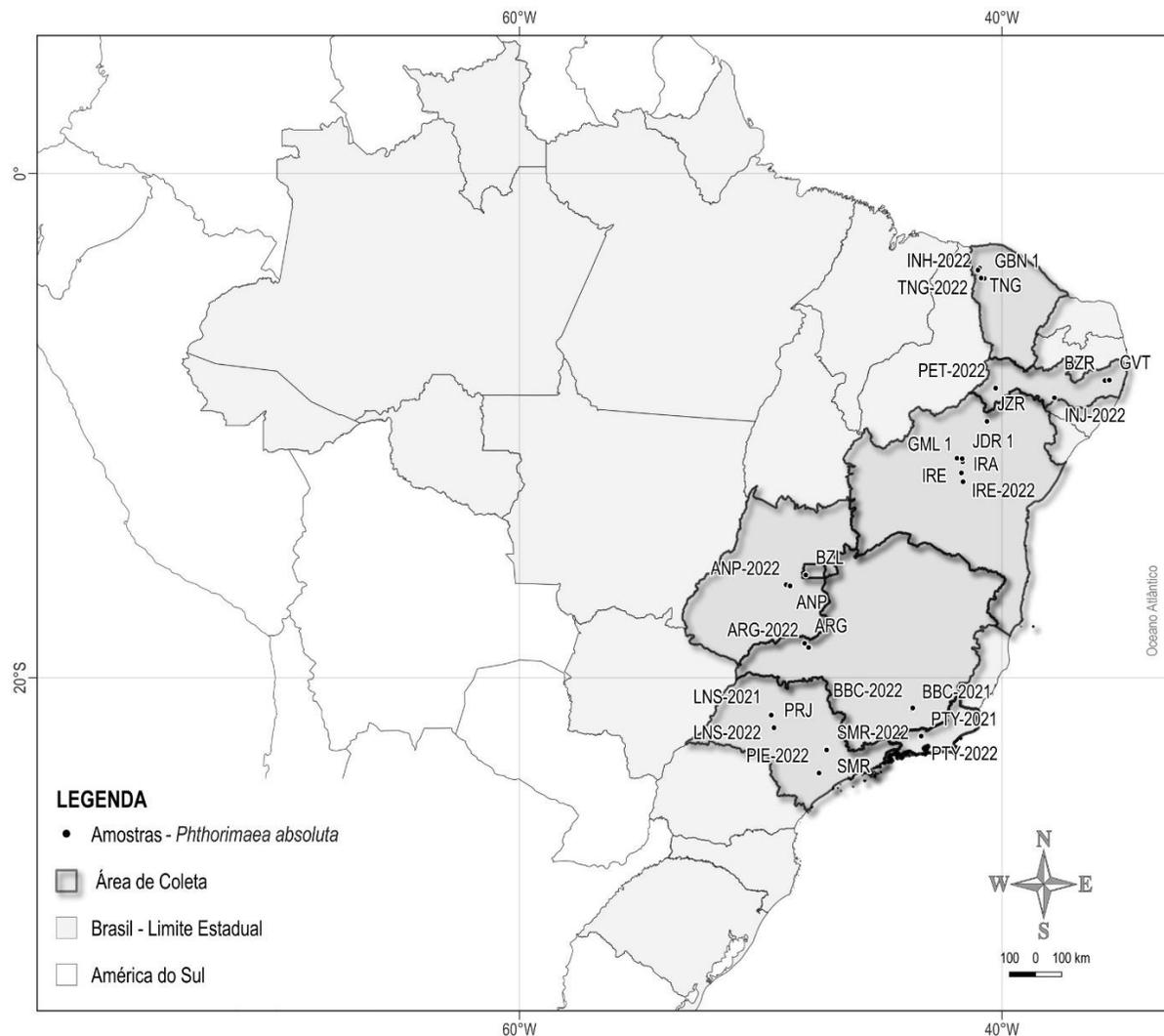
- Abbott, W.S. 1925.** A method of computing the effectiveness of an insecticide. *J. Econ. Entomol.* 18: 265–267.
- Ahmed, R.A., K.M. Mohanny, G. Salah & R.O.H. Allam. 2020.** Evaluation of some pesticides against the Tomato Borer, *Tuta absoluta* (Meyrick) (Lepidoptera: Gelechiidae) under laboratory conditions. *Int. J. Agric. Sci.* 2: 13–21.
- Arena, J.P., K.K. Liu, P.S. Paress, J. M. Schaeffer, & D.F. Cully. 1992.** Expression of a glutamate-activated chloride current in *Xenopus oocytes* injected with *Caenorhabditis elegans* RNA: Evidence for modulation by avermectin. *Mol. Brain Res.* 15: 339.
- Asser-Kaiser, S., E. Fritsch, K. Undorf-Spahn, J. Kienzle, K.E. Eberle, N.A. Gund, A. Reineke, C.P.W. Zebitz, D.G. Heckel, J. Huber, & J.A. Jehle. 2007.** Rapid emergence of baculovirus resistance in Codling Moth due to dominant, sex-linked inheritance. *Science.* 317: 1916–1918.
- Bacci, L., E.M. da Silva, J.C. Martins, R.S. da Silva, M. Chediak, C.C. Milagres, & M.C. Picanço. 2021.** The seasonal dynamic of *Tuta absoluta* in *Solanum lycopersicon* cultivation: Contributions of climate, plant phenology, and insecticide spraying. *Pest. Manag Sci.* 77: 3187–3197.
- Biondi, A., R.N.C. Guedes, F.H. Wan, & N. Desneux. 2018.** Ecology, worldwide spread, and management of the invasive South American Tomato Pinworm, *Tuta absoluta*: Past, present, and future. *Annu. Rev. Entomol.* 63: 239–258.
- Bourguet, D., & A. Genissel. 2000.** Insecticide resistance and dominance levels. 1588–1595.

- Campos, M.R., A. Biondi, A. Adiga, R.N.C. Guedes, & N. Desneux. 2017.** From the western palaeartic region to beyond: *Tuta absoluta* 10 years after invading Europe. *J. Pest Sci.* 90: 787–796.
- Campos, M.R., T.B.M. Silva, W.M. Silva, J.E. Silva, & H.A.A. Siqueira. 2015.** Spinosyn resistance in the tomato borer *Tuta absoluta* (Meyrick) (Lepidoptera: Gelechiidae). *J. Pest Sci.* 88: 405–412.
- Cao, G.C., & Z.J. Han. 2015.** Tebufenozide resistance is associated with sex-linked inheritance in *Plutella xylostella*. *Insect. Sci.* 22: 235–242.
- Carrière, Y. 2003.** Haplodiploidy, sex, and the evolution of pesticide resistance. *J. Econ. Entomol.* 96: 1626–1640.
- Castelo Branco, M., F.H. França, M.A. Medeiros, & J.G.T. Leal. 2001.** Uso de inseticidas para o controle da traça-do-tomateiro e traça-das-crucíferas: Um estudo de caso. *Hortic. Bras.* 19: 60–63.
- Cocco, A., S. Deliperi, & G. Delrio. 2013.** Control of *Tuta absoluta* (Meyrick) (Lepidoptera: Gelechiidae) in greenhouse tomato crops using the mating disruption technique. *J. Appl. Entomol.* 137: 16–28.
- Croft B. & H. Van de Baan 1988.** Ecological and genetic factors influencing evolution of pesticide resistance in Tetranychid and Phytoseiid mites. *Exp. Appl. Acarol.* 4: 277–300.
- Cully, D.F., H. Wilkinson, D.K. Vassilatis, & A.E.P. Arena. 1996.** Molecular biology and electrophysiology of glutamate-gated chloride channels of invertebrates. *Parasitology.* 113: 191–200.
- Desneux, N., E. Wajnberg, K.A.G. Wyckhuys, G. Burgio, S. Arpaia, C.A. Narváez-Vasquez, J. González-Cabrera, D.C. Ruescas, E. Tabone, J. Frandon, J. Pizzol, C. Poncet, T. Cabello, & A. Urbaneja. 2010.** Biological invasion of European tomato crops by *Tuta absoluta*: Ecology, geographic expansion and prospects for biological control. *J. Pest Sci.* 83: 197–215.
- Desneux, N., M. G. Luna, T. Guillemaud, & A. Urbaneja. 2011.** The invasive South American Tomato Pinworm, *Tuta absoluta*, continues to spread in Afro-Eurasia and beyond: The new threat to tomato world production. *J. Pest Sci.* 84: 403–408.
- Denholm, I. 1990.** Monitoring and interpreting changes in insecticide resistance. *Funct. Ecol.* 4: 601–608.
- Denholm, I., G. J. Devine, & M. S. Williamson. 2002.** Evolutionary genetics: Insecticide resistance on the move. *Science.* 297: 2222–2223.
- Falconer, D.S., & T. F. C. Mackay. 1996.** Introduction to quantitative genetics, fourth. Ed, trends in genetics, England, 464 p.
- Gontijo, P.C., M.C. Picanço, E.J. G. Pereira, J.C. Martins, M. Chediak, & R.N.C. Guedes. 2013.** Spatial and temporal variation in the control failure likelihood of the Tomato Leafminer, *Tuta absoluta*. *Ann. Appl. Biol.* 162: 50–59.

- Guedes R.N.C. & H.A.A Siqueira. 2012.** The tomato borer *Tuta absoluta*: insecticide resistance and control failure. CABI Rev 2012:1–7.
- Guedes, R.N.C. 2017.** Insecticide resistance, control failure likelihood and the first law of geography. Pest. Manag. Sci. 73: 479–484.
- Guedes, R.N.C., E. Roditakis, M.R. Campos, K. Haddi, P. Bielza, H.A.A. Siqueira, A. Tsagkarakou, J. Vontas, & R. Nauen. 2019.** Insecticide resistance in the Tomato Pinworm *Tuta absoluta*: patterns, spread, mechanisms, management and outlook. J. Pest. Sci. 92: 1329–1342.
- Haji, F.N.P., A. de V. Oliveira, M. da S. Amorim Neto, & J.G. de S. Batista. 1988.** Flutuação populacional da Traça do Tomateiro, no submédio São Francisco. Pesqui. Agropecu. Bras. 23: 7–14.
- Khan, H., N. Abbas, S.A. Shad, & M.B. S. Afzal. 2014.** Genetics and realized heritability of resistance to imidacloprid in a poultry population of house fly, *Musca domestica* L. (Diptera: Muscidae) from Pakistan. Pestic. Biochem. Physiol. 114: 38–43.
- Khani, S., J. Hejazi, & R. Karimzadeh. 2020.** Susceptibility of eggs and larvae of Tomato Leafminer, *Tuta absoluta* (Meyrick) (Lepidoptera: Gelechiidae) to some insecticides. J. Entomol. Soc. Iran. 4: 398–402.
- Lande, R. 1981.** The minimum number of genes contributing to quantitative variation between and within populations. Genetics. 99: 541–553.
- Langa, T. P., K.C.T. Dantas, D.L. Pereira, M. de Oliveira, L.M.S. Ribeiro, & H.A.A. Siqueira. 2021.** Basis and monitoring of methoxyfenozide resistance in the South American Tomato Pinworm *Tuta absoluta*. J. Pest Sci. 95: 351–364.
- Lietti, M.M.M., E. Botto, & R.A. Alzogaray. 2005.** Insecticide resistance in Argentine populations of *Tuta absoluta* (Meyrick) (Lepidoptera: Gelechiidae). Neotrop. Entomol. 34: 113–119.
- Liu, Y.B., & B.E. Tabashnik. 1997.** Visual determination of sex of Diamondback Moth larvae. Can. Entomol. 129: 585–586.
- MAPA. 2022** (Ministério da Agricultura, Pecuária e Abastecimento), normas e exigências para execução de testes de produtos químicos para fins de registro no MAPA. MAPA, Brasília.
- Marín, I., M.L. Siegal, & B.S. Baker. 2000.** The evolution of dosage-compensation mechanisms. BioEssays. 22: 1106–1114.
- Miller, A.L. E., K. Tindall, & B.R. Leonard. 2010.** Bioassays for monitoring insecticide resistance. J. Vis. Exp. 46: 1–5.
- Mongue, A.J., M.E. Hansen, & J.R. Walters. 2022.** Support for faster and more adaptive Z chromosome evolution in two divergent lepidopteran lineages. Evolution. 76: 332–345.
- Nguyen, P., M. Sýkorová, J. Šichová, V. Kůta, M. Dalíková, R.Č. Frydrychová, L.G. Neven, K. Sahara, & F. Marec. 2013.** Neo-sex chromosomes and adaptive potential in tortricid pests. Proc. Natl. Acad. Sci. 110: 6931–6936.

- Paladino, L.Z.C., I. Provaznikova, M. Berger, C. Bass, N.S. Aratchige, S.N. Lopez, F. Marec, & P. Nguyen. 2019.** Sex chromosome turnover in moths of the diverse superfamily Gelechioidea. *Genome Biol. Evol.* 11: 1307–1319.
- Picanço, M.C., L. Bacci, A.L.B. Crespo, M.M.M. Miranda, & J.C. Martins. 2007.** Effect of integrated pest management practices on tomato production and conservation of natural enemies. *Agric. For. Entomol.* 9: 327–335.
- Preisler, H.K., M.A. Hoy, & J.L. Robertson. 1990.** Statistical analysis of modes of inheritance for pesticide resistance. *J. Econ. Entomol.* 83: 1649–1655.
- Robertson J.L., M.N. Jones, E. Olguin, & B. Alberts. 2017.** *Bioassays with arthropods*, Third. ed. Taylor & Francis Group, Boca Raton, 213p.
- Roush, R.T., & G.L. Miller. 1986.** Considerations for design of insecticide resistance monitoring programs. *J. Econ. Entomol.* 79: 293–298.
- Rubio, F.A., F.C. Montes, G. Alpízar-Brenes, J.R.P. Parra, J.A. Jamielniak, L.P. Lombardi Junior, & T.N. Vilches. 2022.** A predator-parasitoid mathematical model to describe the biological control of the tomato leafminer *Tuta absoluta*. *Ecol. Complex.* 50: 100995.
- Shi, J., L. Zhang, & X. Gao. 2011.** Characterisation of spinosad resistance in the housefly *Musca domestica* (Diptera: Muscidae). *Pest Manag. Sci.* 67: 335–340.
- Silva, J.E., C.P. O. Assis, L.M.S. Ribeiro, & H.A.A. Siqueira. 2016.** Field-evolved resistance and cross-resistance of Brazilian *Tuta absoluta* (Lepidoptera: Gelechiidae) populations to diamide insecticides. *J. Econ. Entomol.* 109: 2190–2195.
- Siqueira, H.A.A., R.N.C. Guedes, D.B. Fragoso, & L.C. Magalhaes. 2001.** Abamectin resistance and synergism in Brazilian populations of *Tuta absoluta* (Meyrick) (Lepidoptera: Gelechiidae). *Int. J. Pest Manag.* 47: 247–251.
- Siqueira, H.A.A., R.N.C. Guedes, & M.C. Picanço. 2000.** Insecticide resistance in populations of *Tuta absoluta* (Lepidoptera: Gelechiidae). *Agric. For. Entomol.* 2: 147–153.
- Siqueira, H.A.A., R.N.C. Guedes, & M.C. Picanço. 2000.** Cartap resistance and synergism in populations of *Tuta absoluta* (Lepidoptera: Gelechiidae). *J. App. Entomol.* 124: 233–238.
- Souza, J.C., & P.R. Reis. 1986.** Controle da Traça-do-Tomateiro em Minas Gerais. *Pesqui. Agropecu. Bras.* 21: 353–354.
- Snedecor, G.W. & W.G. Cochran. 1989.** *Statistical methods*. Iowa state University Press, Ames, IA.503p.
- Stavarakaki, M., A. Ilias, P. Ioannidis, J. Vontas, & E. Roiditakis. 2022.** Investigating mechanisms associated with emamectin benzoate resistance in the tomato borer *Tuta absoluta*. *J. Pest Sci.* 95: 1163–1177.
- Stone, B.F., & C. Scientific. 1964.** A Formula for determining degree of dominance in cases of monofactorial inheritance of resistance to chemicals. 38: 1964–1965.

- Tabashnik, B.E. 1991.** Determining the mode of inheritance of pesticide resistance with backcross experiments. *J. Econ. Entomol.* 84: 703–712.
- Tabashnik, B.E. 1992a.** Resistance risk assessment: Realized heritability of resistance to *Bacillus thuringiensis* in Diamondback Moth (Lepidoptera: Plutellidae), Tobacco Budworm (Lepidoptera: Noctuidae), and Colorado Potato Beetle (Coleoptera: Chrysomelidae). 1551–1559.
- Tsukamoto, M. 1983.** Methods of genetic analysis of insecticide resistance. *Pest Resistance to Pesticides.* 71–98.
- Ullah, S., R.M. Shah, & S.A. Shad. 2016.** Genetics, realized heritability and possible mechanism of chlorfenapyr resistance in *Oxycarenus hyalinipennis* (Lygaeidae: Hemiptera). *Pestic. Biochem. Physiol.* 133: 91–96.
- Wolstenholme, A. J. 2010.** Recent progress in understanding the interaction between avermectins and ligand-gated ion channels: Putting the pests to sleep. *Invert. Neurosc.* 10: 5–10.
- Yazdi, H. P. 2022.** Digest: Neo-sex chromosome underlying the faster-Z effect in a species of Lepidoptera. *Evolution*, 76: 357–358.
- Zekeya, N., T. Dubois, J. Smith, & S. Ramasamy. 2022.** Field effectiveness of *Metarhizium anisopliae* and pheromone traps against *Phthorimaea absoluta* on tomato in Tanzania. *Crop Protection.* 156: 1–7.
- Zhang, G.F., D.Y. MA, Y.S. Wang, Y.H. Gao, W.X. Liu, R. Zhang, W.J. Fu, X.Q. Xian, J. Wang, M. Kuang, & F.H. WAN. 2020.** First report of the South American Tomato Leafminer, *Tuta absoluta* (Meyrick), in China. *J. Integr. Agric.* 19: 1912–1917.



Id da População	Nome da População	Município, Estado	Coordenadas	Ano
GBN 1	Guaraciaba 1	Guaraciaba do Norte, CE	04° 10' S, 40° 44' W	2010
BZL	Brasília	Brasília, DF	15° 56' S, 48° 08' W	2012
IRA	Iraquara Nova	Iraquara, BA	12° 14' S, 41° 37' W	2012
GML 1	Gameleira	João Dourado, BA	11° 26' S, 41° 38' W	2014
JDR 1	João Dourado	João Dourado, CE	11° 19' S, 41° 39' W	2014
BZR	Bezerros	Bezerros, PE	08° 13' S, 35° 44' W	2015
PRJ	Pirajuí	Pirajuí, SP	21° 59' S, 49° 27' W	2019
ARG	Araguari	Araguari, MG	18° 38' S, 48° 11' W	2019
SMR	Sumaré	Sumaré, SP	22° 49' S, 47° 16' W	2019
ANP	Anápolis	Anápolis, GO	16° 19' S, 48° 57' W	2019
IRE	Irecê	Irecê, BA	11° 51' S, 41° 40' W	2019
GVT	Gravatá	Gravatá, PE	08° 12' S, 35° 33' W	2019
TNG	Tianguá	Tianguá, CE	03° 45' S, 40° 56' W	2019
JZR	Juazeiro	Juazeiro do Norte, BA	07°12' S, 39° 18' W	2019
LNS-2021	Lins 2021	Lins, SP	21°27' S, 49°34' W	2020
PTY-2021	Paty do Alferes 2021	Paty do Alferes, RJ	22°20' S, 43°22' W	2021
BBC-2021	Barbacena 2021	Barbacena, MG	21°15' S, 43°44' W	2021
PET-2022	Petrolina	Petrolina, PE	08°31' S, 40°16' W	2022
LNS-2022	Lins 2022	Lins, SP	21°29' S, 49°34' W	2022
PTY-2022	Paty do Alferes 2022	Paty do Alferes, RJ	22°19' S, 43°21' W	2022
ANP-2022	Anápolis	Anápolis, GO	16°22' S, 48°47' W	2022
PIE-2022	Piedade	Piedade, SP	23°47' S, 47°35' W	2022
INJ-2022	Inajá	Inajá, PE	08°54' S, 37°49' W	2022
TNG-2022	Tianguá	Tianguá, CE	03°50' S, 41°00' W	2022
INH-2022	Inhuçú	Inhuçú, CE	04°09' S, 40°52' W	2022
SMR-2022	Sumaré	Sumaré, SP	22°52' S, 47°16' W	2022
IRE-2022	Irecê	Irecê, BA	11°53' S, 41°41' W	2022
BBC-2022	Barbacena 2022	Barbacena, MG	21°12' S, 43°42' W	2022
ARG-2022	Araguari 2022	Araguari, MG	18°48' S, 48°01' W	2022

Base Cartográfica:
 Limites Unidades Federativas - IBGE (2021)
 Sistema Geodésico de Referência - SIRGAS 2000
 Coordenadas Geográficas

Figura 1. Locais de coleta de *Phthorimaea absoluta* utilizadas no monitoramento da resistência para o inseticida abamectina no levantamento prévio com 1 mg/L em 2018-2019 e com a concentração diagnóstica de 5 mg/L em 2021-2022.

Tabela 1. Levantamento de suscetibilidade à abamectina em larvas de segundo ínstar de *Phthorimaea absoluta*.

População (G)	N ^a	Inclinação ± EP ^b	CL ₅₀ (IC95%) ^c	CL ₈₀ (IC95%) ^c	CL ₉₅ (IC95%) ^c	χ ² (Prob.; GL) ^d	RR ₅₀ (IC95%) ^e
João Dourado 1 (F64)	268	1,61 ± 0,17	0,0036 (0,003 - 0,005)	0,01 (0,01 - 0,02)	0,04 (0,02 - 0,07)	1,97 (0,961; 7)	-
Juazeiro (F3)	320	1,31 ± 0,19	0,011 (0,006 - 0,016)	0,05 (0,03 - 0,07)	0,20 (0,12 - 0,43)	3,40 (0,757; 6)	2,6 (1,4 - 4,6)
Pirajuí (F1)	330	1,21 ± 0,11	0,015 (0,01 - 0,02)	0,07 (0,05 - 0,12)	0,35 (0,20 - 0,73)	3,89 (0,918; 9)	8,7 (5,7 - 13,4)
Gameleira I (F65)	297	1,52 ± 0,15	0,044 (0,03 - 0,05)	0,16 (0,11 - 0,24)	0,53 (0,34 - 1,01)	4,18 (0,840; 8)	12,4 (8,3 - 18,5)
Brasília (F 65)	297	1,50 ± 0,14	0,046 (0,04 - 0,06)	0,17 (0,12 - 0,25)	0,57 (0,36 - 1,09)	4,69 (0,790; 8)	12,9 (8,6 - 19,3)
Guaraciaba 1 (F?)	297	1,57 ± 0,15	0,050 (0,04 - 0,07)	0,17 (0,12 - 0,26)	0,56 (0,35 - 1,04)	3,53 (0,896; 8)	13,9 (9,3 - 20,7)
Araguari (F3)	241	1,88 ± 0,24	0,188 (0,12 - 0,28)	0,53 (0,35 - 0,98)	1,40 (0,80 - 4,25)	8,27 (0,218; 6)	52,2 (34,9 - 78,2)
Bezerros (F51)	270	1,25 ± 0,13	0,192 (0,14 - 0,27)	0,90 (0,59 - 1,62)	3,92 (2,08 - 9,96)	3,03 (0,882; 7)	53,4 (34,6 - 82,4)
Iraquara (F3)	240	1,94 ± 0,24	0,217 (0,13 - 0,33)	0,59 (0,38 - 1,16)	1,52 (0,84 - 5,00)	9,59 (0,143; 6)	60,0 (40,5-88,8)
Sumaré (F3)	236	1,90 ± 0,26	0,285 (0,19 - 0,39)	0,80 (0,57 - 1,17)	2,10 (1,37 - 4,05)	3,44 (0,751; 6)	78,9 (50,1-124,3)
Anápolis (F2)	240	1,99 ± 0,22	0,326 (0,25 - 0,42)	0,87 (0,65 - 1,24)	2,17 (1,47 - 3,87)	4,83 (0,565; 6)	90,4 (61,8-132,2)
Irecê (F3)	240	1,81 ± 0,20	0,415 (0,32 - 0,54)	1,20 (0,90 - 1,77)	3,33 (2,19 - 6,11)	3,35 (0,763; 6)	115,0 (78,1-169,5)
Guaraciaba 2 (F3)	241	1,38 ± 0,16	0,461 (0,33 - 0,63)	1,86 (1,30 - 3,01)	7,04 (4,12 - 15,79)	2,80 (0,833; 6)	127,7 (83,4-195,7)
Gravatá (F1)	241	1,82 ± 0,19	1,938 (1,32 - 2,78)	5,61 (3,90 - 9,73)	15,45 (9,04 - 37,20)	7,27 (0,296; 6)	538,1 (365,9-791,4)

^a Número total de insetos usados.

^b Inclinação e erro padrão.

^c Intervalo de confiança a 95%, miligramas de abamectina por litro de água.

^d Qui-quadrado, probabilidade e grau de liberdade.

^e Razão de Resistência: razão da LC_{50} estimada entre a população resistente e a suscetível (JDR1)(Robertson *et al* 2017).

Tabela 2. Seleção da população de Gravatá de *Phthorimaea absoluta* para resistência à abamectina.

População (G)	N ^a	Inclinação ± EP ^b	CL ₅₀ (IC95%) ^c	CL ₈₀ (IC95%) ^c	CL ₉₅ (IC95%) ^c	χ ² (Prob.; GL) ^d	RR ₅₀ (IC95%) ^e
Gravatá (F1)	241	1,82 ± 0,19	1,94 (1,32 - 2,78)	5,61 (3,81 - 9,73)	15,5 (9,1 - 37,2)	7,27 (0,296; 6)	538 (366-791)
Gravatá (F5)	240	1,01 ± 0,15	4,06 (2,56 - 7,97)	27,51 (12,54 - 108,74)	170,8 (52,9 - 1420,8)	2,07 (0,913; 6)	4498 (2440-8294)
Gravatá (F11)	161	1,99 ± 0,26	16,39 (12,10 - 22,26)	43,34 (30,87 - 70,00)	109,7 (68,2 - 230,9)	3,65 (0,723; 6)	4540 (3006-6857)
Gravatá (F13)	269	1,73 ± 0,17	25,15 (19,34 - 32,84)	76,95 (56,42 - 115,51)	224,0 (144,0 - 417,8)	4,34 (0,739; 7)	6968 (4732-10262)
Gravatá (F14)	270	1,74 ± 0,17	29,71 (22,87 - 38,87)	90,42 (66,08 - 136,68)	261,5 (167,5 - 492,8)	5,00 (0,659; 7)	10171 (6979-14821)
Gravatá (F15)	270	1,30 ± 0,14	39,42 (27,96 - 54,64)	174,44 (119,42 - 287,63)	721,3 (412,1 - 1626,1)	1,84 (0,968; 7)	10240 (6754-15528)
Gravatá (F16)	270	1,51 ± 0,15	95,10 (71,56 - 127,42)	342,19 (241,34 - 544,17)	1161,5 (700,9 - 2389,4)	4,58 (0,711; 7)	26351 (17602-39449)

^a Número total de insetos utilizados.

^b Inclinação e erro padrão.

^c Miligramas de abamectina por litro de água e intervalo de confiança a 95%.

^d Qui-quadrado, probabilidade e grau de liberdade.

^e Razão de resistência: razão das estimativas da CL₅₀ entre geração F1 e F16 com intervalo de confiança a 95%.

Tabela 3. Herdabilidade estimada (h^2) de resistência abamectina em *Phthorimaea absoluta* selecionada por um período de 16 gerações.

Parâmetros	Gerações F ₁ -F ₁₆ (n)	
Estimativa da Resposta diferencial	F ₁ CL ₅₀ (mg abamectina/L)	0,287
	F ₁₆ CL ₅₀ (mg abamectina/L)	1,978
	Resposta a Seleção (R) ^a	0,106
Estimativa da Seleção diferencial	Indivíduos sobreviventes da seleção (p%)	41
	Intensidade da Seleção (i) ^b	0,948
	Inclinação Inicial	1,82
	Inclinação Final	1,51
	Desvio padrão fenotípico (σ_p)	0,601
	Seleção diferencial (S) ^c	0,570
	Gerações para aumento de 10 vezes na resistência (G)	9,43
Herdabilidade senso curto (h^2)	0,186	

^a R (Resposta à seleção) = Log (CL₅₀ Final) - Log (CL₅₀ Inicial) /n.

^b Intensidade da seleção (Falconer, 1996).

^c S (Seleção Diferencial) = $\sigma_p \times i$.

Tabela 4. Toxicidade da abamectina em larvas suscetíveis, resistentes e cruzamentos de *Phthorimaea absoluta*.

População ^a	n ^b	χ^2 (Prob.; GL) ^c	Inclinação \pm EP ^d	CL ₅₀ (IC95%) ^e	RR ₅₀ (IC95%) ^f	GD ₅₀ \pm EP ^g
JDR1-Sus	538	4,83 (0,680; 7)	1,60 \pm 0,12	0,0036 (0,003 – 0,005)	-	
GVT-Sel	540	8,05 (0,328; 7)	1,47 \pm 0,11	94,85 (72,84 – 124,48)	25939,43 (19421,03 – 34645,64)	
F1 (♀R x ♂S)	500	14,87 (0,188; 11)	1,37 \pm 0,10	0,07 (0,05 – 0,10)	19,25 (14,07 – 26,33)	-0,421 \pm 0,049
F1' (♀S x ♂R)	500	10,57 (0,479; 11)	2,24 \pm 0,21	0,02 (0,02 – 0,03)	6,26 (4,81 – 8,16)	-0,640 \pm 0,052
F1 agrupado	1000	27,03 (0,004; 11)	1,48 \pm 0,08	0,04 (0,03 – 0,06)	11,04 (8,54 – 14,29)	-0,531 \pm 0,046
F2 (♀F1 x ♂F1)	340	4,07 (0,997; 15)	1,37 \pm 0,14	0,07 (0,05 - 0,10)	18,35 (12,30 – 27,37)	
F2 (♀F1 x ♂F1')	340	9,52 (0,848; 15)	1,62 \pm 0,18	0,05 (0,04 - 0,06)	12,56 (8,68 – 18,18)	
F2 (♀F1' x ♂F1')	340	6,46 (0,970; 15)	2,05 \pm 0,27	0,03 (0,02 - 0,04)	7,41 (5,31 – 10,34)	
RC1 (F1♀ x ♂GVT-Sel)	400	3,12 (0,999; 18)	1,21 \pm 0,12	13,75 (9,41 – 20,18)	3755,18 (2436,83 – 5786,76)	
RC2 (F1♂ x ♀GVT-Sel)	400	2,77 (0,999; 18)	1,27 \pm 0,13	50,11 (34,48 – 73,97)	13688,88 (8896,56 – 21062,68)	
RC3 (F1'♀ x ♂GVT-Sel)	400	2,19 (0,999; 18)	1,62 \pm 0,17	1,31 (0,94 – 1,82)	358,14 (243,30 – 527,20)	
RC4 (F1'♂ x ♀GVT-Sel)	400	2,69 (0,999; 18)	1,32 \pm 0,13	23,06 (16,01 – 33,37)	6298,44 (4142,27 – 9576,95)	
RC5 (F1♀ x ♂JDR-Sus)	400	2,70 (0,999; 18)	1,36 \pm 0,13	2,18 (1,53 – 3,12)	595,54 (394,89 – 898,95)	
RC6 (F1♂ x ♀JDR-Sus)	400	6,38 (0,994; 18)	1,64 \pm 0,20	0,04 (0,03 – 0,06)	10,00 (7,12 – 15,34)	
RC7 (F1'♀ x ♂JDR-Sus)	400	6,57 (0,993; 18)	2,26 \pm 0,32	0,02 (0,02 – 0,03)	5,95 (4,17 – 7,96)	
RC8 (F1'♂ x ♀JDR-Sus)	400	5,79 (0,996; 18)	2,04 \pm 0,32	0,02 (0,02 – 0,03)	4,87 (2,97 – 6,89)	

^a Progenies resultantes dos cruzamentos recíprocos e retrocruzamentos.

^b Número de larvas por bioensaio. ^c Qui-quadrado, probabilidade e grau de liberdade.

^d Erro padrão.

^e Concentração letal (mg abamectina/L) com intervalo de confiança a 95%. ^f Razão de Resistência: CL₅₀ estimada para JDR1-Sus e intervalo de confiança a 95% calculado usando o procedimento de Robertson *et al.* (2017).

^g Grau de dominância e erro padrão.

Tabela 5. Teste direto para herança monofatorial de resistência de *Phthorimaea absoluta* à abamectina, comparando a mortalidade esperada e observada em dois retrocruzamentos.

Conc. (mg/L) ^a	RC1 (F1♀ x ♂R)			RC3 (F1'♀ x ♂R)		
	M Obs (%) ^b	M Exp (%) ^c	χ ^{2d}	M Obs (%) ^b	M Exp (%) ^c	χ ^{2d}
0,002197	0,00	1,25	0,25ns	0,00	6,25	1,33ns
0,004395	0,00	5,00	1,05ns	0,00	10,00	2,22ns
0,008789	0,00	10,00	2,22ns	0,00	15,00	3,53ns
0,017578	0,00	15,00	3,53ns	0,00	25,00	6,67*
0,035156	0,00	21,25	5,40*	0,00	35,00	10,77*
0,070313	0,00	26,25	7,12*	0,00	42,50	14,78*
0,140625	0,00	31,25	9,09*	5,00	46,25	13,69*
0,28125	0,00	37,50	12,00*	15,00	50,00	9,80*
0,5625	5,00	42,50	11,51*	35,00	50,00	1,80ns
1,125	10,00	47,50	11,28*	50,00	50,00	0,00ns
2,25	20,00	50,00	7,20*	65,00	50,00	1,80ns
4,5	35,00	50,83	2,01ns	75,00	50,83	4,67*
9	45,00	53,33	0,56ns	90,00	53,33	10,80*
18	55,00	60,00	0,21ns	95,00	60,00	10,21*
36	65,00	65,00	0,00ns	100,00	65,00	10,77*
72	75,00	70,00	0,24ns	100,00	70,00	8,57*
144	85,00	75,83	0,92ns	100,00	75,83	6,37*
288	95,00	86,67	1,20ns	100,00	86,67	3,08ns
576	100,00	93,33	1,43ns	100,00	93,33	1,43ns
1152	100,00	100,00	0,25ns	100,00	100,00	1,33ns
Total	-	-	77,21*	-	-	122,30*

^a Concentração. ^b Mortalidade observada.

^c Mortalidade esperada em cada concentração x = 0.5 (% de mortalidade em F1 e F1' em x + % de mortalidade em x para GVT-Sel).

^d Qui-quadrado.

ns Não significativo.

* Significativo a 5% de probabilidade com base no teste do Qui-quadrado.

Tabela 6. Dominância efetiva para populações suscetível JDR1-Sus, resistente GVT-Sel, e heterozigoto F₁ e F₁' de *Phthorimaea absoluta* submetidas a diferentes concentrações de abamectina.

Concentração ^a (mg/L)	População/Progênie ^b	n ^c	Sobrevivência (%) ^d	h ^e
0,25	JDR1-Sus	30	0,00	
	FR x MS (F ₁)	30	83,33	0,833
	FS x MR (F ₁ ')	30	40,00	0,400
	GVT-Sel	30	100,00	
0,50	JDR1-Sus	31	0,00	
	FR x MS (F ₁)	30	70,00	0,733
	FS x MR (F ₁ ')	30	23,33	0,233
	GVT-Sel	30	100,00	
1,00	JDR1-Sus	30	0,00	
	FR x MS (F ₁)	30	46,66	0,467
	FS x MR (F ₁ ')	30	0,00	0,000
	GVT-Sel	30	100,00	
1,50	JDR1-Sus	31	0,00	
	FR x MS (F ₁)	30	26,66	0,267
	FS x MR (F ₁ ')	30	0,00	0,000
	GVT-Sel	30	100,00	
2,00	JDR1-Sus	30	0,00	
	FR x MS (F ₁)	31	10,00	0,100
	FS x MR (F ₁ ')	30	0,00	0,000
	GVT-Sel	29	100,00	
2,50	JDR1-Sus	30	0,00	
	FR x MS (F ₁)	29	0,00	0,000
	FS x MR (F ₁ ')	30	0,00	0,000
	GVT-Sel	28	100,00	
3,00	JDR1-Sus	29	0,00	
	FR x MS (F ₁)	30	0,00	0,000
	FS x MR (F ₁ ')	30	0,00	0,000
	GVT-Sel	29	100,00	

^a Concentrações usadas (mg abamectina/L).

^b JDR1-Sus e GVT-Sel são as populações suscetíveis e resistentes, respectivamente; F₁ é proveniente do cruzamento (FR x MS) e F₁' (FS x MR).

^c Número de larvas testadas.

^d Desempenho correspondente à taxa de sobreviventes entre as populações suscetíveis (JDR1-Sus), F₁ e F₁' e a população resistente (GVT-Res).

^e Valores de *h* variam entre 0 (recessividade completa) e 1 (dominância completa). Resistência é codominante ou aditiva se o valor *h* corresponder a 0,5, incompletamente recessiva se entre 0 < *h* < 0,5 e incompletamente dominante se entre 0,5 < *h* < 1.

Tabela 7. Resistência cruzada de *Phthorimaea absoluta*.

População	Inseticida	N ^a	Inclinação ± EP ^b	CL ₅₀ (IC95%) ^c	χ ² (Prob.; GL) ^d	RR ₅₀ (IC95%) ^e
JDR 1-Sus	Abamectina	270	1,33 ± 0,15	0,0038 (0,0027 – 0,0052)	5,39 (0,612; 7)	---
	Benzoato de emamectina	200	1,94 ± 0,26	0,000011 (0,0000075 – 0,000016)	1,32 (0,995; 8)	---
	Milbemectina	200	1,56 ± 0,18	0,000226 (0,000161 – 0,000319)	2,08 (0,978; 8)	---
	Espinetoram	300	1,64 ± 0,16	0,032 (0,024 – 0,042)	5,48 (0,705; 8)	---
	Espinosade	300	1,56 ± 0,15	0,023 (0,018 – 0,031)	3,05 (0,931; 8)	---
	Fipronil	300	1,49 ± 0,16	0,034 (0,024 – 0,048)	9,37 (0,312; 8)	---
	Deltametrina	300	1,35 ± 0,13	3,282 (2,413 – 4,439)	3,01 (0,933; 8)	---
	Metomil	270	1,48 ± 0,15	4,382 (3,236 – 5,856)	1,16 (0,991; 7)	---
	Malation	300	1,28 ± 0,14	51,17 (36,02 – 73,21)	3,31 (0,913; 8)	---
	Clorraniliprole	270	1,67 ± 0,18	0,0030 (0,0022 – 0,0039)	2,23 (0,946; 7)	---
	Metoxifenoziata	300	1,47 ± 0,21	0,261 (0,151 – 0,387)	3,54 (0,896; 8)	---
	Tebufenozida	270	1,53 ± 0,17	0,100 (0,073 – 0,134)	1,13 (0,992; 7)	---
	Cartape	270	1,32 ± 0,14	0,939 (0,683 – 1,286)	4,15 (0,762; 7)	---
	Indoxacarbe	300	1,45 ± 0,15	8,777 (6,449 – 11,734)	2,02 (0,980; 8)	---
Tiametoxam	300	1,43 ± 0,15	6,990 (4,904 – 9,657)	3,14 (0,925; 8)	---	
GVT-Sel	Abamectina	540	1,47 ± 0,10	94,85 (72,84 - 124,47)	8,05 (0,328; 7)	24961 (19421,03 – 34645,64)*
	Benzoato de Emamectina	200	1,53 ± 0,18	21,02 (14,88 – 29,83)	2,07 (0,978; 8)	1893000 (1134000 – 3158000) *
	Milbemectina	200	1,35 ± 0,16	1,016 (0,689 – 1,473)	2,67 (0,953; 8)	4506 (2711 – 7487)*
	Fipronil	270	1,64 ± 0,19	12,71 (8,83 – 17,40)	1,04 (0,994; 7)	374,05 (243,49 – 574,61)*
	Tebufenozide	270	2,02 ± 0,21	19,92 (15,64 – 25,41)	2,71 (0,910; 7)	198,95 (135,19 – 292,76)*
	Metoxifenoziata	180	1,78 ± 0,22	17,12 (12,43 – 23,68)	1,67 (0,975; 7)	65,72 (37,71 – 114,55)*
	Clorraniliprole	180	1,67 ± 0,20	0,092 (0,067 – 0,128)	2,29 (0,942; 7)	30,93 (20,15 – 47,50)*
	Cartape	180	2,12 ± 0,32	7,93 (5,54 – 10,93)	3,83 (0,799; 7)	8,44 (5,34 – 13,34)*
	Espinetoram	180	1,68 ± 0,21	0,151 (0,107 – 0,210)	1,43 (0,984; 7)	4,73 (3,08 – 7,26)*
	Espinosade	180	1,80 ± 0,30	0,052 (0,031 – 0,077)	2,34 (0,938; 7)	2,24 (1,34 – 3,75)*
	Deltametrina	270	1,96 ± 0,23	6,77 (5,16 – 8,70)	1,26 (0,989; 7)	2,06 (1,38 – 3,08)*
	Tiametoxam	300	1,68 ± 0,17	7,90 (5,97 – 10,32)	1,66 (0,989; 8)	1,13 (0,73 – 1,75)
	Malation	300	1,43 ± 0,14	42,39 (31,70 – 56,94)	3,51 (0,898; 8)	0,83 (0,52 – 1,31)
	Metomil	270	1,58 ± 0,16	1,01 (0,77 – 1,35)	1,11 (0,992; 7)	0,23 (0,15 – 0,35)*

Indoxacarbe	180	1,34 ± 0,17	0,729 (0,497 – 1,077)	1,85 (0,967; 7)	0,084 (0,05 – 0,14)*
-------------	-----	-------------	-----------------------	-----------------	----------------------

^a Número de larvas testadas.

^b Erro Padrão.

^c Concentração letal (mg i.a./L) e limites de confiança de 95%.

^d Qui-quadrado, probabilidade e grau de liberdade.

^e RR₅₀: Razão de resistência calculada por Robertson *et al.* (2017). * Razão de resistência significativa a 5% quando os limites de confiança dos valores em parênteses não incluem o valor 1.

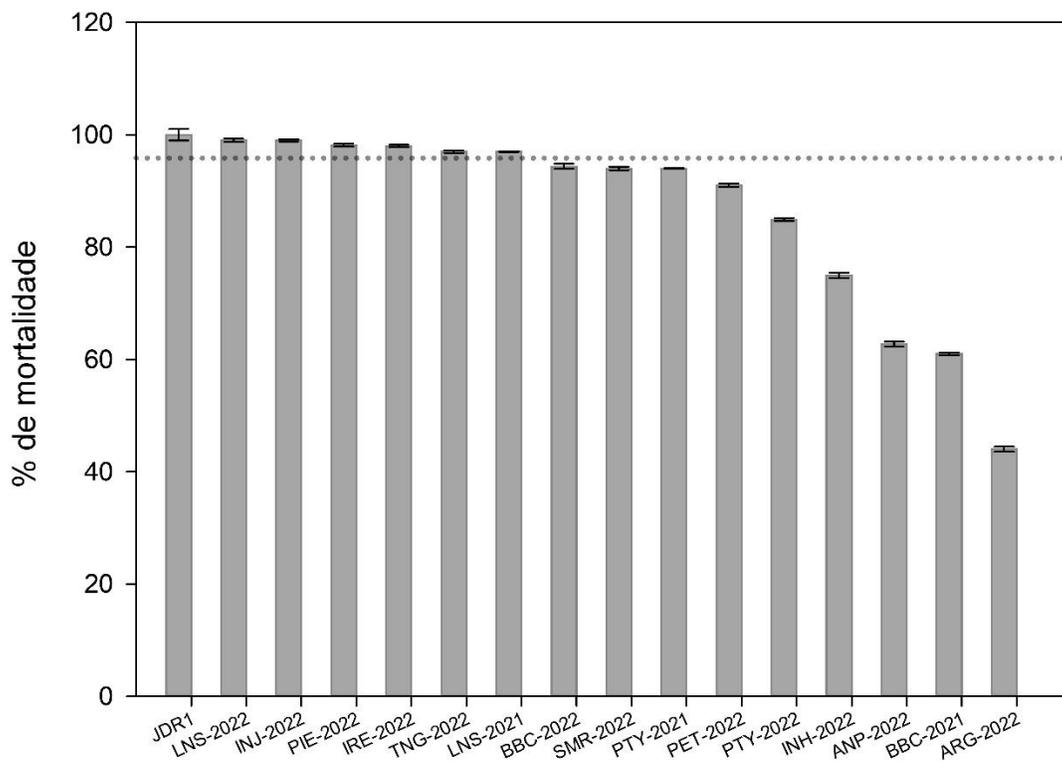


Figura 2. Mortalidade de 100 larvas de *P. absoluta* em 15 populações, submetidas à concentração diagnóstica (5 mg abamectina/L) em 2021-2022. João Dourado 1 (JDR1), Lins (LIN-2022), Inajá (INJ-2022), Piedade (PIE-2022), Irecê (IRE-2022), Lins (LIN-2021), Barbacena (BAB-2022), Sumaré (SMR-2022), Paty do Alferes (PTY-2022), Petrolina (PET-2022), Paty do Alferes (PTY-2022), Inhuçú (INH-2022), Anápolis (ANP-2022), Barbacena (BAB-2021) e Araguari (ARA).

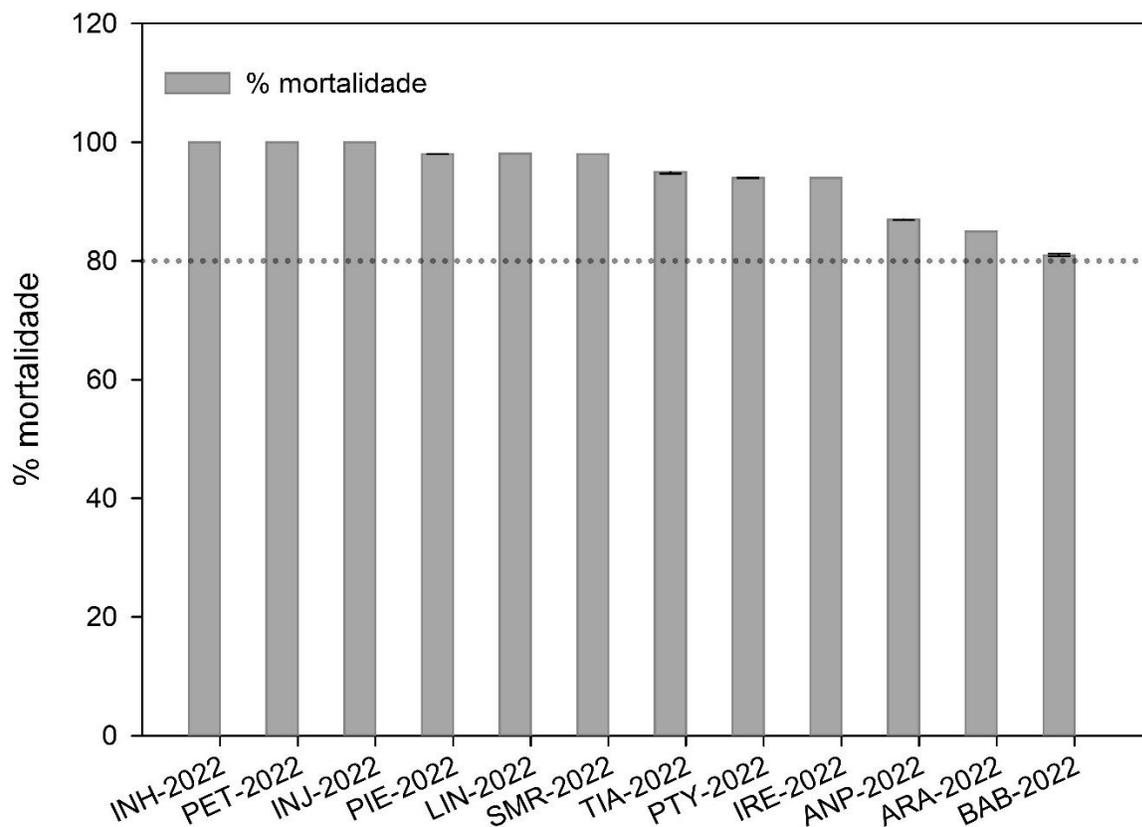


Figura 2. Mortalidade de 100 larvas de *P. absoluta* de 12 populações, submetidas à concentração de bula (18 mg abamectina/L) em 2022. Inhuçu (INH-2022), Petrolina (PET-2022), Inajá (INA-2022), Piedade (PIE-2022), LIN (Lins 2022), Piedade (PIE-2022), Sumaré (SMR-2022), Tianguá (TIA-2022), Paty do Alferes (PTY-2022), Irecê (IRE-2022), Anápolis (ANP-2022), Araguari (ARA-2022) e Barbacena (BAB-2022).

CAPÍTULO 3

Considerações Finais

As populações da traça-do-tomateiro levantadas inicialmente mostraram alta variação fenotípica para suscetibilidade à abamectina, o que demonstra a presença de alelos de resistência já em frequência nestes locais que podem agravar o problema da resistência. Entender esta resistência é importante porque este inseticida está há muito tempo no mercado e estudos escassos foram conduzidos com o objetivo de compreender a resistência para esta molécula em *P. absoluta*. A resistência ligada ao sexo feminino foi o principal achado neste estudo. Embora não se pode assumir que a resistência ligada ao sexo feminino seja uma realidade para todas as populações, nem que haja relação direta com a fusão de cromossomos sexuais e autossomais, entender este fenômeno pode ajudar a traçar estratégias de manejo. Estudos adicionais precisam ser conduzidos para entender melhor esta relação e o papel fundamental das fêmeas na transmissão da resistência à abamectina. Na dominância efetiva 2,5 mg/L foi suficiente para matar os heterozigotos, comprovando que a dominância é dependente da concentração. No geral, o inseticida continua efetivo, levando-se em conta a concentração de 18 mg/L recomendada na bula. Por fim, sugerimos a concentração de 5 mg/L para ser usada como dose diagnóstica no monitoramento. Isto ajudará a melhorar a detecção precoce de populações resistentes em campo, antes que a faixa crítica de falha de controle seja atingida. Sugerimos ainda o incremento de inimigos naturais e o uso de táticas disruptivas como feromônio e armadilhas para evitar o acasalamento entre resistentes e

consequentemente a evolução da resistência. A quebra do ciclo do inseto com a destruição dos restos culturais e a rotação de culturas entre os ciclos de plantio também são importantes para manter a população em baixas densidades. Se a população da praga se aproximar do nível de controle, o uso em sequência de abamectina, indoxacarbe, espinetoram e malationa são uma boa alternativa para diminuir as chances de desenvolvimento de resistência.