UNIVERSIDADE FEDERAL DO PIAUÍ – UPFI
CENTRO DE CIÊNCIAS AGRÁRIAS
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM AGRONOMIA

ALEXANDRA LOPES CARVALHO

BIOATIVIDADE DE ÓLEOS ESSENCIAIS DE *Litsea cubeba* Pers. E *Melaleuca alternifolia* Cheel SOB DIFERENTES TEMPERATURAS NO CONTROLE DE *Oligonychus punicae* (Hirst) (ACARI: TETRANYCHIDAE) EM EUCALIPTO

TERESINA – PI

2026

ALEXANDRA LOPES CARVALHO

BIOATIVIDADE DE ÓLEOS ESSENCIAIS DE *Litsea cubeba* Pers. E *Melaleuca alternifolia* Cheel SOB DIFERENTES TEMPERATURAS NO CONTROLE DE *Oligonychus punicae* (Hirst) (ACARI: TETRANYCHIDAE) EM EUCALIPTO

Dissertação apresentada à Universidade Federal do Piauí, como parte das exigências do Programa de Pós-Graduação em Agronomia, área de concentração Manejo de Espécies Vegetais, para obtenção do título de Mestre em Manejo de Espécies Vegetais.

Orientador:
Dr. Douglas Rafael e Silva Barbosa.

Coorientador (a):
Dra. Rosenya Michely Cintra Filgueiras.

TERESINA – PI

2026

FICHA CATALOGRÁFICA

Universidade Federal do Piauí Biblioteca Setorial CCA

Serviço de Representação da Informação

C331b Carvalho, Alexandra Lopes.

Bioatividade de óleos essenciais de *Litsea cubeba* pers. e *Melaleuca alternifolia* Cheel sob diferentes temperaturas no controle de *Oligonychus punicae* (Hirst) (Acari: Tetranychidae) em eucalipto. / Alexandra Lopes Carvalho. -- 2026.

62 f.

Dissertação (Mestrado) – Universidade Federal do Piauí, Centro de Ciências Agrárias, Programa de Pós-graduação em Agronomia, Teresina, 2026.

"Orientador: Prof. Dr. Douglas Rafael e Silva Barbosa."

Bibliotecário: Rafael Gomes de Sousa - CRB3/1163

ALEXANDRA LOPES CARVALHO

BIOATIVIDADE DE ÓLEOS ESSENCIAIS DE *Litsea cubeba* Pers. E *Melaleuca alternifolia* Cheel SOB DIFERENTES TEMPERATURAS NO CONTROLE DE *Oligonychus punicae* (Hirst) (ACARI: TETRANYCHIDAE) EM EUCALIPTO

Dissertação apresentada à Universidade Federal do Piauí, como parte das exigências do Programa de Pós-Graduação em Agronomia, área de concentração Manejo de Espécies Vegetais, para obtenção do título de Mestre em Manejo de Espécies Vegetais.

APROVADA em 24 de julho de 2026 Comissão Julgadora:

Documento assinado digitalmente
gov.br
ROSENYA MICHELY CINTRA FILGUEIRAS
Data: 24/07/2026 18:11:54-0300
Verifique em https://validar.iti.gov.br

Profa. Dra. Rosenya Michely Cintra Filgueiras - Itaueira Agropecuária SA

Documento assinado digitalmente
gov.br
GUTIERRES NELSON SILVA
Data: 28/07/2026 07:42:56-0300
Verifique em https://validar.iti.gov.br

Prof. Dr. Gutierres Nelson Silva - IFMS

Documento assinado digitalmente
gov.br
MARIANO OSCAR ANIBAL IBANEZ ROJAS
Data: 29/07/2026 15:00:57-0300
Verifique em https://validar.iti.gov.br

Prof. Dr. Mariano Oscar Aníbal Ibanez Rojas – IFMA

Documento assinado digitalmente
gov.br
DOUGLAS RAFAEL E SILVA BARBOSA
Data: 24/07/2026 18:06:54-0300
Verifique em https://validar.iti.gov.br

Prof. Dr. Douglas Rafael e Silva Barbosa – UFP

Orientador

TERESINA-PI

2026

Dedico este trabalho à Silvia Cristina, minha fonte de apoio e carinho, e à minha mãe, Denise Carvalho, a mulher mais forte que já conheci.

AGRADECIMENTOS

Agradeço a Deus, pois nada seria possível sem o seu agir constante em minha vida, sobretudo nos momentos mais difíceis e desafiadores. Assim como à minha família, minha maior fonte de carinho e apoio. Agradeço à minha noiva e melhor amiga, Silvia Cristina, por toda compreensão e companheirismo. À minha mãe, Denise Carvalho, por ter me ensinado a ser forte e ser o meu maior exemplo de garra. Ao meu padrinho, Jorge Francisco (*in memoriam*), a pessoa mais íntegra e gentil que já existiu.

Agradeço ao meu orientador, Douglas Rafael Barbosa, e à minha coorientadora, Rosenya Cintra, pela confiança e pelos ensinamentos que contribuíram para que tudo fosse possível, aqui expresso o meu muitíssimo obrigada aos dois! Agradeço aos colegas de laboratório que se tornaram amigos, Renata Dourizete, Eslane Mendes, Felipe Barbosa, Marcus Briozo e Adriele Castro, obrigada por todo o suporte e companheirismo. Registro também o meu agradecimento ao grupo Entomol, coordenado pelo meu orientador, agradeço todo o suporte técnico.

Agradeço à UFPI – Universidade Federal do Piauí, por me proporcionar essa experiência profissional, que também é uma realização pessoal. Agradeço ainda à CAPES – Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior, pela concessão de bolsa.

RESUMO

O gênero *Eucalyptus* destaca-se como um dos mais importantes para a economia brasileira, especialmente devido à sua ampla utilização na indústria florestal. No entanto, fatores bióticos, como a ocorrência de pragas, comprometem a qualidade e a fitossanidade dos cultivos. Entre os artrópodes associados a essa cultura, ácaros fitófagos da família Tetranychidae têm sido registrados em diferentes espécies de eucalipto, incluindo *Oligonychus punicae*, já observado em minijardins clonais de *Eucalyptus urophylla*. Tradicionalmente, o controle de ácaros é realizado com acaricidas sintéticos; contudo, esses produtos apresentam baixa seletividade, podendo afetar organismos benéficos, como ácaros predadores, representam riscos ambientais e à saúde humana, além da resistência dos ácaros a esses produtos químicos. Como alternativa, compostos naturais, como óleos essenciais ricos em metabólitos secundários, têm demonstrado potencial no manejo de pragas agrícolas. A eficácia desses produtos, porém, pode variar conforme a temperatura, que influencia simultaneamente a bioatividade dos compostos voláteis e o metabolismo dos ácaros, tornando essencial compreender como diferentes condições térmicas afetam o desempenho desses óleos. Diante disso, objetivou-se com este estudo avaliar a toxicidade e os efeitos subletais dos óleos essenciais de *Litsea cubeba* e *Melaleuca alternifolia* sobre fêmeas adultas e ovos de *O. punicae* sob diferentes condições térmicas. Para tanto, procedeu-se inicialmente à caracterização química das matrizes botânicas por GC-MS, seguida da determinação das concentrações letais (CL_{50} e CL_{90}) e subletais (CL_{20} e CL_{30}) para fêmeas adultas sob as temperaturas de 22, 25, 27, 29 e 31 ± 1 °C. Subsequentemente, a partir da definição da temperatura de máxima toxicidade encontrada para cada óleo (29 °C para *L. cubeba* e 31 °C para *M. alternifolia*), avaliou-se a atividade ovicida, o comportamento de repelência e a taxa instantânea de crescimento populacional (r_i) de *O. punicae*. Os resultados demonstraram que o incremento térmico aumentou a toxicidade de *M. alternifolia* (reduzindo a sua CL_{50}), mas limitou a eficiência de *L. cubeba* em temperaturas superiores a 29 °C. Em concentrações subletais, ambos os óleos suprimiram o crescimento populacional do ácaro e exerceram efeito repelente na CL_{30}, embora apenas *L. cubeba* tenha manifestado repelência na CL_{20}. Adicionalmente, as duas matrizes botânicas exibiram elevada atividade ovicida na CL_{90}. Estes achados confirmam que os óleos essenciais testados são bioacaricidas promissores para o manejo integrado de *O. punicae*, devendo a escolha da matriz botânica e a sua concentração de uso serem recomendadas de acordo com as condições térmicas locais do cultivo.

Palavras-chave: bioacaricida; temperatura; efeitos subletais; manejo integrado de pragas.

ABSTRACT

The genus *Eucalyptus* stands out as one of the most important for the Brazilian economy, particularly due to its extensive use in the forestry industry. However, biotic factors, such as pest infestations, compromise the quality and phytosanitary status of plantations. Among the arthropods associated with this crop, phytophagous mites of the family Tetranychidae have been reported on different *Eucalyptus* species, including *Oligonychus punicae*, which has been observed in clonal mini gardens of *Eucalyptus urophylla*. Traditionally, mite control has relied on synthetic acaricides; however, these products exhibit low selectivity and may negatively affect beneficial organisms, such as predatory mites, represent environmental and human health risks, in addition to mite resistance to these chemical products. As an alternative, natural compounds such as essential oils rich in secondary metabolites have shown potential for the management of agricultural pests. Nevertheless, the efficacy of these products may vary according to temperature, which simultaneously influences the bioactivity of volatile compounds and the metabolism of mites, making it essential to understand how different thermal conditions affect the performance of these oils. Therefore, the present study aimed to evaluate the toxicity and sublethal effects of the essential oils of *Litsea cubeba* and *Melaleuca alternifolia* on adult females and eggs of *O. punicae* under different thermal conditions. To this, the chemical characterization of the botanical matrices was initially performed using GC-MS, followed by the determination of lethal concentrations (CL_{50} and CL_{90}) and sublethal concentrations (CL_{20} and CL_{30}) for adult females under temperatures of 22, 25, 27, 29, and 31 ± 1 °C. Subsequently, based on the temperature of maximum toxicity found for each oil (29 °C for *L. cubeba* and 31 °C for *M. alternifolia*), egg viability, repellency behavior, and the instantaneous population growth rate (r_i) of *O. punicae* were evaluated. The results demonstrated that the thermal increment increased the toxicity of *M. alternifolia* (reducing its CL_{50}), but limited the efficiency of *L. cubeba* at temperatures above 29 °C. At sublethal concentrations, both oils suppressed the population growth of the mite and exerted a repellent effect at CL_{30}, although only *L. cubeba* manifested repellency at CL_{20}. Additionally, both botanical matrices exhibited high ovicidal activity at CL_{90}. These findings confirm that the tested essential oils are promising bioacaricides for the integrated management of *O. punicae*, and the choice of botanical matrix and its concentration of use should be recommended according to the local thermal conditions of the crop.

Keywords: bioacaricide; temperature; sublethal effects; integrated pest management.

SUMÁRIO

1 INTRODUÇÃO **8**
2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA **10**
2.1 Ácaros de importância agrícola **10**
2.2 Família Tetranychidae **11**
2.3 *Oligonychus punicae* Hirst (1926) **12**
2.4 Impacto de ácaros fitófagos em mudas de eucalipto **14**
2.5 Óleos essenciais no controle de ácaros fitófagos **14**
2.6 Influência da temperatura na eficácia dos óleos essenciais **16**
2.7 Características das plantas *Melaleuca alternifolia* Cheel e *Litsea cubeba* Pers. **17**
2.8 Uso e composição dos óleos essenciais de *Melaleuca alternifolia* Cheel e *Litsea cubeba* Pers. **18**
3 METODOLOGIA **18**
3.1 Local de estudo **18**
3.2 Delineamento experimental e análise estatística univariada **19**
3.3 Óleos essenciais **19**
3.4 Cromatografia, espectrometria de massas e identificação química **20**
3.5 Criação de *O. punicae* **20**
3. 6 Toxicidade dos OES sobre fêmeas adultas em diferentes temperaturas **21**
3.7 Modelagem da relação entre temperatura e CL_{50} **22**
3.7.1. Modelagem dose–resposta por análise de Probit 23
3.7.2 Modelagem secundária da relação temperatura–CL_{50} 23
3.7.3 Regressão por mínimos quadrados ponderados 24
3.7.4 Seleção do modelo e predição matemática 24
3.8 Efeito sobre ovos (Atividade ovicida) **25**
3.9 Efeito sobre o crescimento populacional **26**
3.10 Efeito repelente dos óleos essenciais **26**
3.11 Análise estatística multivariada **27**
4 RESULTADOS E DISCUSSÃO **28**
4.1 Análise cromatográfica, espectrometria de massas e identificação química **28**
4.2 Toxicidade dos óleos essenciais sobre fêmeas adultas em diferentes temperaturas **31**
4.3 Modelagem da relação entre a temperatura e a CL_{50} **37**
4.4 Efeito sobre ovos **38**
4.5 Efeito sobre o crescimento populacional **40**

4.6 Efeito repelente dos óleos essenciais 42
5 CONCLUSÕES 48
REFERÊNCIAS 49

1 INTRODUÇÃO

O gênero *Eucalyptus* L'Hér destaca-se como um dos mais importantes para a economia florestal brasileira (IBGE, 2022). Dentre os principais usos de suas espécies, sobressaem-se a produção de papel, móveis e carvão vegetal, produtos com forte participação no Produto Interno Bruto (PIB) do país (Reis *et al*., 2024). Nessa perspectiva, os eucaliptos compõem cerca de 76% da área total de plantios florestais no Brasil (IBGE, 2021). Visando otimizar a eucaliptocultura, Silva *et al*. (2022) apontam um crescente interesse no incremento da produção de mudas clonais para alcançar maior produtividade no campo. Como o sucesso do povoamento florestal depende diretamente da sanidade e viabilidade desse material botânico, o sistema de minijardins clonais tem sido amplamente proposto e adotado (Ferraz *et al*., 2020).

Contudo, fatores bióticos, como a ocorrência de pragas, colocam em risco os padrões de qualidade e a fitossanidade desse gênero botânico. Espécies de ácaros fitófagos, sobretudo da família Tetranychidae, têm sido reportadas em diferentes cultivos de eucalipto (Queiroz; Soliman, 2021). Os ácaros dessa família são mundialmente conhecidos como “spider mites” devido à capacidade de produzir teias (Moraes; Castilho; Flechtmann, 2024; Ferraz *et al*., 2020). Dentre os representantes taxonômicos da família, o gênero *Oligonychus* Berlese destaca-se como um dos mais relevantes, sendo capaz de provocar injúrias severas ao hospedeiro (Moraes; Flechtmann, 2024). Nesse sentido, a presença do ácaro *Oligonychus yothersi* (McGregor) (Acari: Tetranychidae), por exemplo, já foi registrada em plantas de *Eucalyptus urophylla* S.T. Blake (Pinto *et al*., 2012).

Adicionalmente, há registros da ocorrência de *Oligonychus punicae* Hirst, 1926 (Acari: Tetranychidae) em minijardins clonais de *E. urophylla* (Ferraz, 2019). Esses ácaros provocam injúrias inicialmente nas proximidades da nervura central das folhas, evoluindo para necrose e, por fim, à desfolha precoce (Ferraz *et al*., 2020). Diante disso, a espécie configura-se como uma praga de alto potencial de dano para a cultura, especialmente ao se considerar que o eucalipto possui um ciclo de desenvolvimento significativamente mais longo, quando comparado a outros hospedeiros tradicionais do ácaro, como a videira, por exemplo (Ferraz, 2019).

O ácaro fitófago *O. punicae* foi identificado inicialmente no México e alimenta-se preferencialmente na face adaxial das folhas, embora possa colonizar a face abaxial em situações de alta densidade populacional (Reyes-Zepeda *et al*., 2022). O processo de alimentação causa o bronzeamento do tecido foliar, resultando em intensa queda de folhas em determinadas épocas do ano (Oliveira *et al*., 2021). Reyes-Zepeda *et al*. (2022) explicam que os indivíduos inserem seu estilete no tecido vegetal para sugar o conteúdo das células; as células

remanescentes coagulam, o que gera o amarelecimento da folha e a subsequente necrose total do tecido.

Dessa forma, os ácaros fitófagos representam um desafio de extrema relevância para a produtividade agrícola (Migeon; Dorkeld, 2026). Consequentemente, estudos que visam mitigar ou suprimir os efeitos dessas espécies nas plantações têm aumentado, em decorrência dos prejuízos econômicos que comprometem diferentes culturas globalmente (Camilo *et al*., 2017). Historicamente, o uso de acaricidas sintéticos têm sido a estratégia mais comum para o controle de ácaros, ainda que não exista registro junto ao MAPA (Ministério da Agricultura e Pecuária) para espécie de *O. punicae*, em mudas de eucalipto (Brasil, 2026). Com tudo, apesar do uso indiscriminado, os acaricidas e inseticidas apresentam baixa seletividade, prejudicando organismos benéficos — como ácaros predadores — e gerando riscos ambientais e à saúde humana (Moraes; Castilho; Flechtmann, 2024).

Como alternativa aos impactos causados pelos agrotóxicos, os metabólitos secundários de plantas, a exemplo dos óleos essenciais, têm demonstrado eficácia promissora no manejo de pragas agrícolas (Ferreira *et al.*, 2026; Freitas *et al*., 2024; Silva *et al*., 2025; Sousa *et al.*, 2025). Os óleos essenciais destacam-se por apresentar vantagens como a rápida degradação no ambiente (baixo efeito residual), compatibilidade com inimigos naturais e menor toxicidade a mamíferos, além de sua característica volatilidade (Camilo *et al*., 2017). Entre os principais constituintes voláteis desses extratos, destacam-se os monoterpenos (C10), sesquiterpenos (C15) e fenilpropanoides, moléculas que exercem propriedades inseticidas e acaricidas por meio de mecanismos de toxicidade, repelência e inibição do crescimento (Kumar *et al*., 2012; Jiang *et al*., 2012; Teodoro *et al*., 2019).

A eficácia biológica dos óleos essenciais, contudo, é fortemente influenciada por fatores abióticos. A temperatura, em particular, afeta diretamente as taxas de volatilização, a estabilidade química e a dinâmica de exposição dos artrópodes aos compostos voláteis (Camilo *et al*., 2017). Estudos demonstram que variações térmicas pós-aplicação pode alterar significativamente a toxicidade de óleos essenciais sobre diferentes alvos (Pavela, 2018). Por outro lado, estratégias de formulação e encapsulamento podem atenuar perdas por evaporação, estendendo sua persistência no campo (Ayllón-Gutiérrez *et al*., 2024). Portanto, avaliar a ação acaricida sob diferentes gradientes de temperatura é crucial para determinar as condições de aplicação que maximizem a eficácia dos produtos, garantindo sua viabilidade em sistemas de produção protegidos, como os minijardins clonais.

Nesse contexto, o óleo essencial extraído de folhas de *M. alternifolia* possui um histórico consolidado na indústria devido às suas propriedades antissépticas, antimicrobianas e

anti-inflamatórias de amplo espectro (Danna *et al*., 2024). Recentemente, esse extrato botânico ganhou relevância na agricultura por ser classificado como um insumo natural, seguro para o ecossistema e altamente eficaz no controle de pragas (Palermo *et al*., 2021).

Quanto ao óleo essencial obtido dos frutos de *L. cubeba*, a literatura científica reporta uma expressiva versatilidade funcional que engloba propriedades antioxidantes, antifúngicas e bactericidas (Camilo *et al*., 2017). No âmbito da proteção vegetal, esse extrato destaca-se por sua marcante atividade inseticida e acaricida sobre tripes, pulgões e tetraniquídeos (Li *et al*., 2022). A elevada toxicidade por contato e fumigação do OE de *L. cubeba* decorre de sua alta concentração de isômeros monoterpênicos acíclicos, como o geranial e o neral (Seo *et al*., 2009). Essas moléculas majoritárias interagem com o sistema nervoso dos organismos alvo, provocando paralisia neuromuscular imediata e subsequente mortalidade em ácaros fitófagos (Jiang *et al*., 2012; Seo *et al*., 2009).

Diante do exposto, objetivou-se com este estudo investigar o potencial acaricida dos óleos essenciais de *Litsea cubeba* (Lour.) Pers. e *Melaleuca alternifolia* (Maiden & Betche) Cheel sobre *O. punicae*, analisando sua eficácia sob diferentes temperaturas. A partir da identificação da condição térmica que otimiza a toxicidade, buscou-se compreender os impactos letais sobre os ovos do ácaro, bem como explorar os efeitos subletais associados à repelência e ao crescimento populacional, visando subsidiar o desenvolvimento de estratégias sustentáveis para o manejo integrado deste ácaro-praga.

2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

2.1 Ácaros de importância agrícola

Os ácaros são classificados dentro do filo Arthropoda, pertencendo ao subfilo Chelicerata, classe Arachnida e subclasse Acari (Moraes; Castilho; Flechtmann, 2024). Por constituírem um dos grupos mais diversos e abundantes entre os artrópodes, esses organismos encontram-se distribuídos nos mais variados hábitats (Fu *et al*., 2021). Esses apresentam hábitos de vida livre ou parasitário, exibindo regimes alimentares que englobam o consumo de animais, fungos, tecidos vegetais, matéria orgânica em decomposição ou até mesmo predação de outras espécies de ácaros (Queiroz; Soliman; Burckhardt, 2021).

No contexto agrícola, as espécies fitófagas possuem estruturas bucais altamente especializadas, denominadas quelíceras, que são modificadas em estiletes perfuradores (Rioja *et al*., 2017). Através desse aparelho bucal, os ácaros perfuram a epiderme vegetal e sugam o

conteúdo citoplasmático das células parenquimáticas (Moraes; Flechtmann, 2008). Esse processo contínuo compromete diretamente a atividade fotossintética da planta, provocando distúrbios fisiológicos, redução do vigor vegetativo e desfolha precoce sob ataques severos, o que limita drasticamente o teto produtivo das culturas (Rioja *et al*., 2017).

Diante disso, os ácaros fitófagos representam um desafio complexo para a agricultura global, sendo responsáveis por injúrias severas em uma ampla variedade de cultivos de interesse econômico (Van Leeuwen *et al*., 2015). A depender do gênero e da espécie avaliada, esses organismos podem expressar hábitos polífagos ou comportamento estritamente especialista (Moraes; Castilho; Flechtmann, 2024). Adicionalmente, apresentam elevada plasticidade ecológica e fisiológica, características que os tornam altamente adaptáveis a diferentes ecossistemas e gradientes ambientais (Sato *et al*., 2016).

2.2 Família Tetranychidae

A família Tetranychidae é mundialmente conhecida como a dos "ácaros-aranha" (spider mites) em decorrência de sua notória capacidade de produzir teias (Inak; Çobanoğlu; Auger, 2022). Esse agrupamento taxonômico possui atualmente mais de 1.300 espécies estritamente fitófagas, cujos tamanhos variam de 200 a 900 µm. Os gêneros pertencentes a essa família apresentam ampla variedade de hospedeiros, incluindo culturas de alta relevância econômica. Nesse cenário, táxons como *Tetranychus urticae* Koch e *Oligonychus coffeae* (Nietner) destacam-se como pragas agrícolas de grande impacto global (Matsuda *et al*., 2018; Migeon; Dorkeld, 2026).

Além do hábito alimentar fitófago, os tetraniquídeos caracterizam-se pelo curto ciclo de vida e rápido desenvolvimento ontogenético (Crooker, 1985). Quando associados a uma elevada capacidade reprodutiva, esses atributos biológicos contribuem para que esses artrópodes alcancem altas densidades populacionais em curtos intervalos de tempo (Ferraz *et al*., 2019a). Sob condições ambientais favoráveis, essa explosão demográfica resulta em severos danos econômicos às culturas afetadas (Van Leeuwen *et al*., 2015), uma vez que a alimentação contínua desses organismos se baseia na perfuração direta das células epidérmicas por meio de seus estiletes quelíceros (Moraes; Castilho; Flechtmann, 2024).

O ciclo de vida dos tetraniquídeos compreende os estágios de ovo, larva, protoninfa, deutoninfa e adulto para ambos os sexos, intercalados por períodos obrigatórios de quiescência entre cada fase (Moraes; Castilho; Flechtmann, 2024). Os ovos possuem formato esférico e coloração esbranquiçada ou translúcida. Ao eclodirem, dão origem às larvas, que apresentam

corpo ovalado, coloração amarelo-esverdeada e apenas três pares de pernas funcionais (Silva *et. al*, 2018). De forma geral, a velocidade de transição entre esses estágios e a duração total do ciclo biológico são estritamente reguladas por fatores abióticas como temperatura e umidade (Rincón; Rodríguez; Coy-Barrera, 2019).

Entre os táxons mais estudados da família Tetranychidae, destaca-se *T. urticae*, reconhecido como uma praga altamente relevante em hortaliças, plantas ornamentais e frutíferas (Van Leeuwen *et al*., 2015). Sob condições abióticas favoráveis combinadas à ausência de manejo apropriado, há registros de 50% a 100% de perdas na produção dessas culturas (SHEASHA *et al*., 2023). Paralelamente, o gênero *Oligonychus* engloba espécies com relatos de injúrias em cultivos como cafeeiro (*Coffea* sp.), videira (*Vitis vinifera* L.), eucalipto (*Eucalyptus* sp.) e mangueira (*Mangifera indica* L.) (Reis; Zacarias, 2007; Vásquez *et al*., 2008; Santos *et al*., 2022; Mushtaq *et al*., 2023). Registros apontam que a primeira ocorrência desse gênero associada a plantios de abacateiro *Persea americana* Mill. nas Ilhas Canárias data de 1986 (Torres *et al*., 2024), evidenciando a relevância global deste grupo biológico e justificando a necessidade de detalhamento de suas principais espécies agrícolas.

2.3 *Oligonychus punicae* Hirst (1926)

Como um dos representantes de maior relevância econômica dentro do gênero, o ácaro fitófago *O. punicae* destaca-se pelo elevado potencial de dano e comportamento polífago, alimentando-se de mais de 35 espécies vegetais (Vásquez *et al*., 2008; Ferraz et al., 2020). Conhecido popularmente como ácaro-vermelho ou ácaro-marrom-do-abacate, o artrópode possui provável centro de origem no México (Heinz-Castro *et al*., 2021). Historicamente, a descrição original foi realizada por Hirst em 1926 sob a denominação *Paratetranychus punicae*, sendo posteriormente reclassificado por Pritchard e Baker (1955) no gênero *Oligonychus* (Imbachi-López; Estrada-Venegas; Equihua-Martínez, 2017).

O padrão de injúria provocado por *O. punicae* está diretamente associado ao seu mecanismo de alimentação por sucção do conteúdo citoplasmático das células parenquimáticas. Esse processo causa danos foliares progressivos que evoluem do bronzeamento inicial para a necrose tecidual e desfolha precoce sob alta infestação (Reyes-Zepeda *et al*., 2022). No micro-habitat foliar, a colonização ocorre prioritariamente na face adaxial, com lesões concentradas ao longo da nervura central; contudo, em altas densidades populacionais, as colônias migram para a superfície abaxial da lâmina foliar (Ferraz *et al*., 2019; Ferreira *et al*., 2026).

Do ponto de vista morfológico, a espécie exibe um acentuado dimorfismo sexual que facilita a diferenciação entre os sexos. As fêmeas adultas possuem o opistossoma arredondado de coloração vermelho-escura (Figura 1), com uma faixa longitudinal dorsal opaca, enquanto o propodossoma e as pernas anteriores são alaranjados (Hoy, 2011; Ferraz *et al*., 2019). Em contrapartida, os machos distinguem-se por possuírem dimensões corporais reduzidas e corpo nitidamente afilado, conferindo-lhes uma conformação triangular (Hoy, 2011; Ferraz *et al*., 2019).



Figura 1. Fêmea adulta de *Oligonychus punicae* ovipositando em folha de *Eucalyptus grandis*

Fonte: Autor.

Paralelamente às suas características biológicas, a espécie apresenta uma notável capacidade de adaptação ecológica, o que lhe confere um status cosmopolita, com registros em mais de 20 países das regiões tropicais e subtropicais da América, Ásia, África e Europa (Moraes; Castilho; Flechtmann, 2024; Heinz-Castro *et al*., 2021). Essa ampla distribuição geográfica é sustentada por sua habilidade em colonizar cultivos de alta relevância econômica, como a videira (*V. vinifera*) (Mushtaq *et al*., 2023), o abacateiro (*P. americana*) (Segovia *et al*., 2022) e o cafeeiro (*Coffea canephora* ex. A. Froehner) (Reis; Zacarias, 2007).

Alinhada a esse panorama de dispersão global, a presença do tetraniquídeo no território brasileiro também foi mapeada. Embora os relatos iniciais tenham ocorrido em gramíneas do gênero *Olyra* L. e plantas de *Eucalyptus* sp. (Flechtmann; Baker, 1970; Feres; Lofego; Oliveira, 2005), o status fitossanitário desse tetraniquídeo alterou-se recentemente. A constatação de surtos severos em viveiros destinados à produção de mudas clonais consolidou a espécie como uma praga emergente e destrutiva para o setor florestal nacional (Pereira *et al*., 2005; Ferraz *et al*., 2019; Ferraz *et al*., 2020b).

2.4 Impacto de ácaros fitófagos em mudas de eucalipto

O surgimento dessa ameaça emergente ao setor florestal correlaciona-se diretamente com a expressiva expansão da silvicultura brasileira, que conta atualmente com cerca de 7,4 milhões de hectares cultivados com *Eucalyptus* sp. (IBGE, 2021). Para abastecer a alta demanda industrial por essa matéria-prima vegetal, o segmento investe na produção intensiva de mudas clonais de alta performance em viveiros comerciais (Silva *et al*., 2022). No entanto, o adensamento de plantas mesmo sob condições controladas eleva a vulnerabilidade fitossanitária dos minijardins clonais, criando o microclima ideal para o estabelecimento e a rápida dispersão de diferentes espécies de ácaros (Santarosa *et al*., 2014; Mota; Barbosa; Marchioro, 2022).

Dentro desse complexo de organismos que afetam os minijardins clonais, os ácaros fitófagos pertencentes à família Tetranychidae destacam-se como os principais agentes causadores de injúrias severas ao material vegetativo (Queiroz; Soliman; Burckhardt, 2021). No Brasil, o histórico de danos à eucaliptocultura envolve espécies como *Oligonychus ilicis* (McGregor), *Oligonychus yothersi* (McGregor), *T. urticae* e, mais recentemente, *O. punica*e (Flechtmann; Baker, 1970; Flechtmann, 1983; Pereira *et al*., 2005). Embora historicamente associado a outras culturas agrícolas, o primeiro relato de *O. punicae* em mudas de *E. urophylla* alterou o panorama de manejo nesses sistemas de produção, evidenciando o perigo latente de infestações severas no setor (Ferraz *et al.,* 2019).

Esta espécie fitófaga possui alta capacidade de estabelecimento, e os danos severos causados ao gênero Eucalyptus demonstram seu potencial em comprometer a produção de mudas. Ao avaliar os parâmetros biológicos de *O. punicae* em seis hospedeiros florestais, constatou-se que o ácaro é capaz de sobreviver, reproduzir e completar seu ciclo ontogenético em todos os materiais analisados (Ferraz et al., 2020a). Adicionalmente, o período mais curto de desenvolvimento de ovo a adulto foi registrado em *Eucalyptus tereticornis* Sm. (10,92 dias) e *Eucalyptus grandis* W. Hill ex. Maiden (11,08 dias), valores que não diferiram estatisticamente do observado em *E. urophylla* (11,19 dias) (Ferraz et al., 2020b). Essa rápida evolução populacional reduz a janela de tomada de decisão, tornando imperativa a busca por ferramentas de controle viáveis e sustentáveis.

2.5 Óleos essenciais no controle de ácaros fitófagos

O controle de ácaros fitófagos na agricultura tem sido realizado, majoritariamente, por meio da aplicação de defensivos químicos sintéticos (Attia *et al*., 2013; Van Leeuwen *et al*., 2015). Contudo, essa dependência exclusiva de moléculas sintéticas tem gerado a rápida seleção de populações de ácaros resistentes no campo (Sato *et al*., 2016; Heinz-Castro *et al*., 2021). Além do fator de resistência, o uso contínuo desses insumos provoca severos desequilíbrios ecológicos e sérios riscos à saúde humana (Santos *et al*., 2022). Essa pressão química inadequada acarreta, ainda, um impacto deletério sobre organismos não-alvo, reduzindo drasticamente as populações de inimigos naturais que poderiam atuar na supressão espontânea dessas pragas (Alves *et al*., 2023).

Como alternativa promissora, os óleos essenciais (OEs) destacam-se por serem metabólitos secundários de origem botânica com sustentabilidade e rápido decaimento no ecossistema (Isman, 2020). O potencial dessas substâncias voláteis já foi validado na literatura, consolidando o uso de extratos vegetais como eficientes agentes biopesticidas (Palermo *et al*., 2021). Essa versatilidade biológica é evidenciada em estudos que demonstram a capacidade dos compostos voláteis em atuar tanto no bloqueio alimentar e mortalidade de insetos-praga (Jiang et al., 2012) quanto no controle direto de mosquitos vetores e moscas sinantrópicas (Kumar; Mishra; Malik, 2012; Pavela, 2015). Assim, ensaios controlados reforçam que essas misturas complexas exercem marcante atividade inseticida e acaricida sobre diferentes alvos agrícolas (Li *et al*., 2022).

Extraídos de mais de 17.000 espécies de angiospermas, os OEs são produzidos em estruturas histológicas especializadas das plantas, tais como tricomas glandulares, idioblastos e canais secretores, com destaque para as famílias Lamiaceae, Rutaceae, Myrtaceae, Zingiberaceae e Asteraceae (Maes; Bouquillon; Fauconnier, 2019; Danna *et al*., 2024). No entanto, a constituição química e o rendimento final desses compostos são dinâmicos, variando de acordo com a espécie utilizada, estádio fenológico do vegetal e fatores edafoclimáticos do ambiente (Santos *et al*., 2019). Do ponto de vista químico, esses complexos hidrofóbicos são formados por unidades de isopreno associadas, reunindo moléculas com diferentes pesos moleculares e pontos de ebulição (Adams, 2009; Pavela, 2015). Enquanto substâncias de cadeias menores apresentam pressões de vapor elevadas e rápida liberação de vapores bioativos, a interação sinérgica entre os múltiplos componentes viabiliza a penetração cuticular e potencializa a eficiência neurotóxica sistêmica sobre a praga (Camilo *et al*., 2017; Isman, 2020).

Outro atributo fundamental dos OEs é a seletividade ecológica, uma vez que exercem toxicidade diferencial que afeta severamente os ácaros fitófagos sem comprometer a sobrevivência de inimigos naturais, como os predadores da família Phytoseiidae (Santos *et al*.,

2019; Rincón; Rodríguez; Coy-Barrera, 2019). Essa característica viabiliza a associação harmônica entre o controle biológico e o químico-botânico dentro de sistemas de cultivo protegido, como minijardins clonais (Queiroz; Soliman, 2021). S Sob essa dinâmica, diversos trabalhos práticos têm demonstrado eficácia acaricida expressiva sobre as espécies T. urticae (Han et al., 2011; Susurluk, 2023), *Tetranychus evansi* Baker & Pritchard (Camilo *et al*., 2017), *Tetranychus neocaledonicus* André (Camilo *et al*., 2017) e *O. punicae* (Ferreira *et al*., 2026). Os efeitos reportados abrangem a mortalidade direta de adultos, inviabilidade de ovos, repelência e drástica redução no crescimento populacional dos ácaros nos hospedeiros (Sheasha *et al*., 2023; Ferreira *et al*., 2026).

Apesar do notável potencial bioativo, a transposição dos OEs para a aplicação prática em viveiros enfrenta desafios relacionados à estabilidade física das formulações sob condições de campo (Maes; Bouquillon; Fauconnier, 2019). Por possuírem alta volatilidade e sensibilidade à degradação oxidativa, a persistência biológica desses ativos no ambiente é reduzida (Fu; Zeng; Xiao, 2021). Desse modo, a taxa de liberação dos compostos e a sua eficiência acaricida final no ecossistema são estritamente moduladas pelas condições climáticas locais (Palermo *et al*., 2021). Assim, as flutuações nas variáveis meteorológicas atuam como o principal fator interferente na cinética de evaporação desses produtos, tornando imperativo o estudo do comportamento dessas interações sob diferentes condições térmicas (Maes; Bouquillon; Fauconnier, 2019).

2.6 Influência da temperatura na eficácia dos óleos essenciais

A eficácia biológica e a persistência dos OEs no controle de artrópodes-praga são estritamente condicionadas por fatores abióticos ambientais, com destaque para a temperatura (Attia *et al*., 2013). Sob condições térmicas elevadas, a maioria dos constituintes químicos voláteis sofre uma aceleração acentuada em sua taxa de evaporação (Pavela, 2015). Esse fenômeno físico-químico reduz drasticamente o período de contato residual do produto sobre a superfície foliar, limitando a janela de ação letal sobre os ácaros fitófagos (Attia *et al*., 2013).

Além da evaporação, o incremento do calor intensifica os processos de degradação térmica ou fotoquímica por radiação ultravioleta sobre as moléculas botânicas expostas (Pavela, 2015). Essa rápida dissipação das frações ativas diminui a persistência do bioinsumo no ambiente foliar (Maes; Bouquillon; Fauconnier, 2019). Por essa razão, torna-se imprescindível mapear o comportamento e a estabilidade desses produtos sob condições climáticas oscilantes, comuns em viveiros tropicais (Maes; Bouquillon; Fauconnier, 2019).

Paralelamente às alterações sofridas pelas moléculas botânicas, as flutuações de temperatura modificam diretamente a fisiologia dos próprios artrópodes (Han *et al*., 2011). A tolerância química de insetos e ácaros a compostos tóxicos varia substancialmente em função do estresse térmico local (Thia *et al*., 2022). O aumento da temperatura acelera a taxa respiratória dos ácaros, o que favorece uma maior e mais rápida penetração cuticular e traqueal dos vapores neurotóxicos do óleo (Enan, 2005).

Contudo, esse mesmo aquecimento ambiental também pode induzir a superprodução de enzimas endógenas associadas à destoxificação celular no organismo alvo (Enan, 2005). Essa resposta metabólica permite que o ácaro degrade o princípio ativo antes que ele atinja o sistema nervoso (Enan, 2005). Desse modo, a eficiência acaricida final de uma formulação depende do equilíbrio dinâmico entre a velocidade de volatilização do OE e a capacidade de defesa fisiológica da praga sob a temperatura de exposição (Thia *et al*., 2022).

2.7 Características das plantas *Melaleuca alternifolia* Cheel e *Litsea cubeba* Pers.

A espécie *Melaleuca alternifolia* Cheel, pertencente à família Myrtaceae e popularmente conhecida como *Tea Tre*e (árvore-do-chá), é uma planta arbustiva e perene nativa das regiões costeiras e pantanosas da Austrália, essa espécie adaptou-se com sucesso a diferentes condições subtropicais devido ao seu robusto sistema radicular e foliar (Danna *et al*., 2024). O vegetal ganhou relevância mundial em função de sua alta capacidade de produção de biomassa rica em compostos voláteis de interesse comercial (Bakkali *et al*., 2008).

Do ponto de vista morfológico, as folhas de *M. alternifolia* são lineares e dotadas de uma grande densidade de glândulas epidérmicas e tricomas secretores (Danna *et al*., 2024). Essas estruturas histológicas especializadas são os sítios responsáveis pela biossíntese e pelo armazenamento dos metabólitos secundários da planta (Danna *et al*., 2024). Essa proteção celular impede a evaporação precoce dos voláteis e atua como uma barreira de defesa natural do vegetal contra o ataque de microrganismos e herbívoros (Bakkali *et al*., 2008).

Por sua vez, a espécie *Litsea cubeba* Pers., pertencente à família Lauraceae, constitui uma árvore decídua de pequeno a médio porte (Maes; Bouquillon; Fauconnier, 2019). Esta planta é amplamente distribuída pelas regiões tropicais e subtropicais da Ásia Oriental, estendendo-se por países como China, Japão e Indonésia (Maes; Bouquillon; Fauconnier, 2019). Trata-se de uma espécie perene de rápido crescimento e alta capacidade de regeneração em ecossistemas florestais (Camilo *et al*., 2017).

Os órgãos vegetativos e reprodutivos de *L. cubeba*, com especial destaque para os seus frutos globosos, acumulam teores expressivos de óleos aromáticos (Camilo *et al*., 2017). Toda a estrutura da planta exala um odor cítrico característico, gerado pela alta concentração de voláteis específicos presentes em seus idioblastos oleíferos (Maes; Bouquillon; Fauconnier, 2019). Essa assinatura química diferencia o vegetal no cenário fitossanitário internacional como uma fonte sustentável para a extração de biopesticidas (Bakkali *et al*., 2008).

2.8 Uso e composição dos óleos essenciais de *Melaleuca alternifolia* Cheel e *Litsea cubeba* Pers.

Do ponto de vista de sua constituição cromatográfica, o OE de *M. alternifolia* é caracterizado por uma fração majoritária superior a 70% composta por terpinen-4-ol, γ-terpineno e α-terpineno (Adams, 2009). Embora reúna dezenas de monoterpenos minoritários, a amplitude de suas atividades biológicas e os efeitos neurotóxicos agudos sobre ácaros fitófagos são atribuídos principalmente à ação isolada ou sinérgica da molécula de terpinen-4-ol (Han *et al*., 2011).

Apesar do reconhecido potencial biocida de ambas as matrizes botânicas, a eficiência acaricida desses compostos voláteis contra o ácaro-praga *O. punicae* em mudas clonais de eucalipto ainda carece de validação sistemática (Ferreira *et al*., 2026). Essa lacuna técnico-científica torna-se ainda mais complexa ao considerar as variações microclimáticas de temperatura que ocorrem no interior de viveiros comerciais e minijardins clonais (Mota; Barbosa; Marchioro, 2022). Como a temperatura altera de forma diferencial a cinética de evaporação dos OEs e a suscetibilidade fisiológica dos ácaros, torna-se imperativo quantificar a bioatividade dessas interações sob diferentes gradientes térmicos (Maes; Bouquillon; Fauconnier, 2019; Thia *et al*., 2022).

Desse modo, o estabelecimento de parâmetros como toxicidade, repelência, além de efeitos letais e subletais sob influência térmica, constitui o subsídio necessário para a estruturação de programas de manejo integrado de pragas na eucaliptocultura nacional (Santos *et al*., 2022; Ferreira *et al*., 2026).

3 METODOLOGIA

3.1 Local de estudo

Os bioensaios foram conduzidos no Laboratório de Entomologia do Departamento de Fitotecnia da Universidade Federal do Piauí (UFPI), em Teresina, PI. As condições ambientais para a manutenção dos estoques biológicos e execução dos ensaios complementares foram mantidas sob umidade relativa do ar de 70±10% e fotofase de 12 horas, utilizando câmaras climáticas do tipo BOD, com os gradientes de temperatura regulados especificamente de acordo com o protocolo de cada etapa experimental.

3.2 **Delineamento experimental e análise estatística univariada**

Todos os experimentos laboratoriais descritos foram conduzidos adotando-se o Delineamento Inteiramente Casualizado (DIC), com 10 repetições independentes por tratamento, com exceção estrita dos bioensaios de toxicidade aguda (curvas dose-resposta), que operaram com três repetições independentes por nível de concentração testado. As estimativas das concentrações letais (CL_{50} e CL_{90}), concentrações subletais (CL_{20} e CL_{30}), respectivos erros-padrão e as razões de toxicidade (RT) baseadas na sobreposição de $IC_{95\%}$ foram geradas via modelagem dose-resposta por análise de PROBIT, executada no programa ProbitCalc (Barbosa, 2025).

Os dados quantitativos univariados referentes à taxa instantânea de crescimento populacional (r_i) e à viabilidade embrionária de ovos foram submetidos aos testes de pressuposição de normalidade dos resíduos (Shapiro-Wilk) e homogeneidade de variâncias (Bartlett). Atendidos os requisitos estatísticos, os dados foram avaliados por análise de variância (ANOVA), com o desdobramento das médias dos tratamentos comparadas pelo teste de Tukey ao nível de 5% de significância estatística.

Os dados de distribuição de frequência e preferência do bioensaio de repelência foram avaliados por meio do teste não-paramétrico do Qui-quadrado (X^2), processado através do procedimento PROC FREQ no pacote estatístico SAS (SAS Institute, 2001). Toda a modelagem secundária de regressão linear ponderada (WLS), análise multivariada (PCA) e plotagem das superfícies e mapas de calor de resposta foram executadas e validadas no ambiente estatístico R.

3.3 Óleos essenciais

Os óleos essenciais comerciais de *Litsea cubeba* e *Melaleuca alternifolia*, foram extraídos dos frutos e folhas, respectivamente, por meio de hidrodestilação. Adquiridos junto à empresa

Ferquima Indústria e Comércio Ltda. (Vargem Grande Paulista, SP, Brasil) e utilizados como princípios ativos em todos os bioensaios.

3.4 Cromatografia, espectrometria de massas e identificação química

As análises químicas dos óleos essenciais foram realizadas no Laboratório de Ecologia Química do Departamento de Química Fundamental da Universidade Federal de Pernambuco (UFPE), em Recife, PE. Os perfis voláteis foram traçados em um sistema GC-MS Agilent 5975C Series, equipado com uma coluna capilar apolar DB-5 (60 m × 0,25 mm de diâmetro interno; espessura de filme de 0,25 μm). Injetou-se uma alíquota de 1 μL de cada óleo essencial diluído em hexano analítico no modo split (proporção de 1:20), utilizando hélio como gás de arraste sob pressão constante de 100 kPa.

O programa térmico do forno iniciou-se a 60 °C por 3 minutos, com aquecimento progressivo à razão de 2,5 °C por minuto até atingir o patamar final de 240 °C, mantido por 10 minutos estáveis. A temperatura da interface do espectrômetro foi fixada em 200 °C, operando por impacto eletrônico a 70 eV com varredura na faixa de massa (m/z) de 20 a 350. Os constituintes foram identificados por meio do cálculo de seus Índices de Retenção Lineares (IR), utilizando uma curva padrão de alcanos lineares (C_9-C_{34}, Sigma-Aldrich) e posterior comparação dos espectros de massas obtidos com os dados das bibliotecas MassFinder 4, NIST08 e Wiley Registry 9th Edition. As proporções relativas dos compostos foram expressas em porcentagem de área através da integração dos picos cromatográficos.

3.5 Criação de *O. punicae*

Os espécimes de *O. punicae* utilizados no presente estudo foram coletados no minijardim clonal de *Eucalyptus spp*. na cidade de Monsenhor Gil, no estado do Piauí, nordeste do Brasil (5°34'50,9"S, 42°37'20,8"W), entre maio e julho de 2017, e posteriormente identificados por Ferraz *et al*. (2019). A população-estoque do ácaro-praga *O. punicae* foi estabelecida e mantida sobre folhas de mudas clonais de eucalipto (*Eucalyptus grandis* W. Hill ex. Maiden) cultivadas em vasos plásticos de 15L contendo uma mistura de solo, substrato comercial e esterco caprino (proporção 3:1:1), sob condições de casa de vegetação. Para a manutenção das colônias em condições laboratoriais, folhas infestadas com diferentes estádios

ontogenéticos do ácaro foram transferidas para arenas montadas em bandejas plásticas (140 mm × 15 mm).

As arenas consistiram em uma camada de espuma de poliuretano saturada com água destilada, coberta por papel de filtro, sobre o qual as folhas foram dispostas e circundadas com algodão hidrofílico umedecido para evitar o escape dos indivíduos. A criação estoque permaneceu isenta de qualquer pressão de seleção ou contato com óleos essenciais, mantida em ambiente climatizado a 25 ± 1 °C, umidade relativa de 70 ± 10% e fotofase de 12 horas (Santana *et al.,* 2020).

3. 6 Toxicidade dos OES sobre fêmeas adultas em diferentes temperaturas

A toxicidade dos óleos essenciais (OEs) foi avaliada sob o gradiente térmico de 22, 25, 27, 29 e 31 ± 1 °C, mantendo-se a umidade relativa do ar em 70 ± 10% no interior de câmaras climáticas do tipo BOD. A escolha da faixa térmica explica-se no fato de que muitas regiões produtoras registram temperaturas entre 25 e 31°, além de que para a produção da espécie *E. grandis* a faixa recomendada é a utilizada neste trabalho (Embrapa Florestas, 2019). Utilizou-se o método de imersão de discos foliares (contato residual). Os bioensaios foram conduzidos adotando-se o delineamento inteiramente casualizado em triplicata, utilizando 10 fêmeas adultas por concentração em cada repetição, totalizando a amostragem de 150 indivíduos por tratamento.

Previamente aos ensaios definitivos, realizaram-se testes preliminares de exposição para delimitar as faixas de concentração adequadas em cada nível de temperatura, assegurando uma distribuição de mortalidade ideal entre 5% e 95% para a modelagem por análise de Probit. Com base no rastreio inicial, as concentrações biológicas estabelecidas para o óleo essencial de *L. cubeba* e *M. alternifolia* foram:

Tabela 1. Concentrações e temperaturas previamente estabelecidas para os testes de toxicidade dos óleos de *L. cubeba* e *M. alternifolia* sobre fêmeas de *O. punicae*

Óleo essencial	**Temperatura (°C)**	**Concentrações testadas (µL/mL)**
Litsea cubeba	22	0,5; 1,0; 5,0; 7,5; 15,0
Litsea cubeba	25	0,5; 1,0; 5,0; 7,5; 15,0

Óleo essencial	Temperatura (°C)	Concentrações testadas (µL/mL)
Litsea cubeba	27	0,5; 1,0; 5,0; 7,5; 15,0
Litsea cubeba	29	0,5; 1,0; 5,0; 7,5; 15,0
Litsea cubeba	31	5,0; 10,0; 15,0; 20,0; 25,0
Melaleuca alternifolia	22	7,0; 10,0; 12,0; 16,0; 20,0
Melaleuca alternifolia	25	7,0; 10,0; 12,0; 16,0; 20,0
Melaleuca alternifolia	27	7,0; 13,0; 16,0; 20,0
Melaleuca alternifolia	29	3,0; 10,0; 13,0; 16,0; 20,0
Melaleuca alternifolia	31	3,0; 7,0; 10,0; 13,0; 20,0

Para a montagem do ensaio, discos foliares de eucalipto com 3,0 cm de diâmetro foram imersos individualmente nas respectivas caldas químicas (óleo essencial + água destilada + DMSO) ou na solução controle (água destilada + DMSO) por 5 segundos sob leve agitação manual. Após a secagem completa dos discos sobre papel-filtro por 30 minutos em condições ambientais, cada unidade foliar recebeu a infestação de 10 fêmeas adultas de *O. punicae* com idade padronizada de 4 a 5 dias.

Os discos infestados foram acondicionados em placas de Petri (90 × 15 mm) sobre papel-filtro apoiado em espuma de poliuretano saturada com água destilada para a manutenção do turgor foliar. O conjunto foi transferido para as respectivas temperaturas controladas nas câmaras BOD. A avaliação do índice de mortalidade dos artrópodes foi realizada após o período de 48 horas de exposição contínua (Santana *et al*., 2020).

3.7 Modelagem da relação entre temperatura e CL_{50}

Um procedimento analítico estruturado em duas etapas foi empregado para quantificar a influência da temperatura sobre a toxicidade aguda dos óleos essenciais para *O. punicae*. Na primeira etapa, realizaram-se análises de Probit independentes para cada nível térmico avaliado, visando descrever a relação dose-resposta clássica. Na segunda etapa, as estimativas de CL_{50} obtidas foram utilizadas como variáveis dependentes para modelar matematicamente a relação temperatura-toxicidade.

3.7.1. Modelagem dose–resposta por análise de Probit

As curvas dose-resposta de mortalidade foram ajustadas de forma independente para cada temperatura com o auxílio do programa ProbitCalc (Barbosa, 2025), adotando concentrações transformadas em $\log_{10}$ e assumindo uma distribuição normal cumulativa. O modelo Probit foi expresso matematicamente pela equação:

$$Probit(p) = a + b \cdot \log_{10}(C)$$

em que: p representa a probabilidade estimada de mortalidade; C corresponde à concentração do óleo essencial (µL/mL); a é o intercepto do modelo; e b denota a inclinação da reta de regressão na escala logarítmica. Para cada temperatura, a concentração correspondente a p = 0,5 (Probit = 5) foi definida como a concentração letal mediana (CL_{50}). Estimou-se também a inclinação da reta, o respectivo erro-padrão (EP) do coeficiente angular e os intervalos de confiança a 95% de probabilidade (IC95%).

3.7.2 Modelagem secundária da relação temperatura–CL_{50}

Os valores de CL_{50} estimados na etapa anterior foram tabulados e utilizados como dados de entrada para a análise de regressão secundária no software R. Visando manter a consistência com as análises de Probit, os valores de CL_{50} foram mantidos e avaliados na escala logarítmica:

$$Y(T) = \log_{10}(CL_{50}(T))$$

em que: $CL_{50}(T)$ representa a concentração letal mediana estimada na temperatura específica T (°C). Dois modelos matemáticos candidatos foram testados para descrever a interação térmica:

Modelo linear: $Y(T) = \alpha_0 + \alpha_1 T + \varepsilon$

Modelo quadrático: $Y(T) = \beta_0 + \beta_1 T + \beta_2 T^2 + \varepsilon$

em que: T representa a temperatura de exposição; α_0, α_1, β_0, β_1 e β_2 correspondem aos parâmetros a serem estimados pelas regressões; e ε representa o erro aleatório residual do modelo.

3.7.3 Regressão por mínimos quadrados ponderados

Considerando que cada estimativa pontual de CL_{50} apresentava um intervalo de confiança associado, o erro-padrão (EP) da variável transformada em $\log_{10}(CL_{50})$ foi aproximado a partir dos limites superior (IC_{sup}) e inferior (IC_{inf}) obtidos no ProbitCalc, conforme a expressão:

$$EP\left[\log_{10}\left(CL_{50}(T)\right)\right] = \frac{\log_{10}\left(IC_{sup}(T)\right) - \log_{10}\left(IC_{inf}(T)\right)}{2 \times 1.96}$$

Subsequentemente, o inverso da variância amostral (quadrado do erro-padrão) foi empregado como o peso estatístico (w) de cada observação na modelagem secundária:

$$w(T) = \frac{1}{SE\left[\log_{10}\left(LC_{50}(T)\right)\right]^2}$$

Assim, os modelos linear e quadrático foram ajustados por meio de regressão por mínimos quadrados ponderados (WLS), rotina executada no ambiente R. Este procedimento metodológico atribui maior peso ponderal às estimativas de CL_{50} que exibem menor erro-padrão, garantindo maior estabilidade matemática e rigor biológico na estimativa dos parâmetros globais.

3.7.4 Seleção do modelo e predição matemática

A seleção do modelo estatístico definitivo baseou-se na significância do termo de segunda ordem e na avaliação comparativa do Critério de Informação de Akaike (AIC). O modelo quadrático foi selecionado unicamente se o termo β_2 apresentasse significância estatística ($p < 0,05$) e se o seu valor de AIC fosse pelo menos duas unidades inferior em relação ao modelo linear. Caso contrário, adotou-se o modelo linear por representar a hipótese biológica mais parcimoniosa. Após a validação do modelo, as estimativas ajustadas de $\log_{10}(CL_{50})$ obtidas ao longo da faixa de temperatura foram reconvertidas para a escala original de concentração (µL/mL) utilizando a função antilogarítmica:

$$CL_{50}(T) = 10^{Y(T)}$$

As equações ajustadas foram utilizadas também para gerar predições matemáticas em gradientes térmicos ligeiramente externos à amplitude experimental real (extrapolações para 18 e 20 °C, e para 34, 35, 38 e 40 °C), substituindo diretamente as respectivas temperaturas no modelo selecionado no ambiente R.

3.8 Efeito sobre ovos (Atividade ovicida)

Os ensaios de atividade ovicida foram realizados utilizando as concentrações letais estimadas CL_{50} e CL_{90} calculadas especificamente na temperatura de máxima toxicidade estabelecida para cada matriz botânica (29 °C para *L. cubeba* e 31 °C para *M. alternifolia*). Para a obtenção dos ovos, discos foliares de eucalipto limpos foram infestados com 10 fêmeas adultas de *O. punicae* durante o período de 48 horas para oviposição padronizada.

Decorrido esse intervalo, as fêmeas foram removidas com o auxílio de pincel de cerdas finas e selecionaram-se 20 ovos viáveis por disco foliar, eliminando-se os excedentes. Os discos contendo os ovos foram imersos nas respectivas soluções dos óleos essenciais (nas concentrações de CL_{50} e CL_{90}, ou na solução controle, por 5 segundos sob leve agitação. A viabilidade embrionária e a taxa de eclosão larval foram monitoradas diariamente sob microscópio estereoscópico até a completa eclosão dos ovos.

3.9 Efeito sobre o crescimento populacional

A dinâmica demográfica de *O. punicae* sob o efeito de pressões subletais foi determinada por meio da estimativa da taxa instantânea de crescimento populacional (r_i). O ensaio foi conduzido utilizando as concentrações de CL_{20} e CL_{30} estimadas para cada óleo essencial, operando nas temperaturas ótimas de 29 °C (*L. cubeba*) e 31 °C (*M. alternifolia*). Adotou-se a mesma metodologia de contato residual por imersão descrita para os testes de toxicidade aguda.

O período experimental de avaliação foi fixado em 10 dias contínuos. Ao final deste intervalo, contabilizou-se o número total de ácaros sobreviventes em cada arena, incluindo os estádios de ovos, imaturos (larvas e ninfas) e adultos. A taxa instantânea de crescimento foi calculada empregando-se a equação proposta por Walthall e Stark (1997):

$$r_i = [\ln(N_f/N_o)] / \Delta t$$

em que: N_f representa o número final de indivíduos vivos ao término do bioensaio; N_o corresponde ao número inicial de fêmeas colonizadoras ($N_o = 50$); e Δt denota o período experimental decorrido em dias ($\Delta t = 10$). Valores positivos de r_i indicam crescimento populacional, $r_i = 0$ representa estabilidade demográfica e valores negativos determinam o declínio e a extinção gradual da população estudada.

3.10 Efeito repelente dos óleos essenciais

O comportamento de repelência ou atratividade de fêmeas adultas de *O. punicae* expostas aos óleos essenciais foi mensurado em arenas de livre escolha (free-choice test), conduzido nas temperaturas de maior toxicidade (29 °C para *L. cubeba* e 31 °C para *M. alternifolia*) utilizando as concentrações subletais CL_{20} e CL_{30}. As arenas experimentais foram montadas no interior de placas de Petri (90 × 15 mm) contendo uma camada de espuma umedecida forrada com papel-filtro.

Dois discos foliares de eucalipto (3,0 cm de diâmetro) foram interconectados por meio de uma lamínula central de vidro (18 × 18 mm), que serviu como ponte de liberação. Um dos discos foi imerso na solução contendo o óleo essencial (lado tratado) e o disco oposto foi imerso na solução controle (lado não tratado). Dez fêmeas adultas do ácaro foram liberadas exatamente

no centro da lamínula de vidro. Após o intervalo de 48 horas de isolamento, registrou-se o número de indivíduos presentes em cada disco foliar. O Índice de Repelência (IR) foi calculado por meio da fórmula estabelecida:

$$IR = 2G / (G + P)$$

em que: G corresponde ao número de ácaros localizados no disco tratado; e P representa o número de indivíduos observados no disco controle. O tratamento foi classificado como repelente quando o valor médio do índice se situou abaixo do limite inferior do intervalo de neutralidade ($IR < 1 – DP$); neutro se posicionado dentro do intervalo ($1 - DP \leq IR \leq 1 + DP$); e atrativo caso ultrapassasse o limite superior ($IR > 1 + DP$), sendo DP desvio padrão. (Matos *et al*., 2020).

3.11 Análise estatística multivariada

Realizou-se uma Análise de Componentes Principais (PCA) para avaliar de forma integrada e simultânea a resposta conjunta das variáveis biológicas e comportamentais (viabilidade embrionária de ovos, taxa instantânea de crescimento populacional e parâmetros de distribuição espacial e repelência) sobre a variabilidade global dos dados experimentais. Este procedimento estatístico permitiu discriminar e identificar padrões espaciais de similaridade ou divergência entre os diferentes tratamentos e concentrações testadas para os dois óleos essenciais.

Previamente à execução do modelo matemático, os dados brutos de todas as variáveis foram normalizados por meio da transformação em escore-z (z-score) para eliminar efeitos de escala e homogeneizar as variâncias. A modelagem estatística por PCA foi processada a partir de uma matriz de covariância, sendo a força e a direção da contribuição de cada variável biológica interpretadas com base no comprimento e orientação de seus respectivos vetores de carga (loadings) no plano bidimensional.

4 RESULTADOS E DISCUSSÃO

4.1 Análise cromatográfica, espectrometria de massas e identificação química

O óleo essencial de *L. cubeba* apresentou composição química complexa, totalizando 98,13% dos compostos voláteis identificados na amostra. A análise cromatográfica revelou a nítida predominância da classe dos monoterpenos oxigenados, com destque majoritário para o neral (32,52%) e para o geranial (44,68%), que em conjunto constituem 77,20% da composição global do óleo. Esses dois compostos correspondem aos isômeros geométricos do citral, substâncias diretamente responsáveis pelo odor cítrico característico da espécie vegetal e por sua marcante bioatividade biológica (Nnamdi; Lin, 2026) (Tabela 2).

Entre os demais constituintes identificados na matriz de *L. cubeba*, destacaram-se o limoneno (9,93%), o acetato de linalila (1,69%), o E-cariofileno (1,52%), o linalol (1,18%) e o geraniol (0,98%). Embora quantificados em menores proporções, estes compostos secundários são de extrema importância, pois podem contribuir de forma sinérgica para o perfil químico total e para os efeitos biológicos observados sobre o artrópode-praga. Outras substâncias, tais como α-pineno, β-pineno, sabineno e citronelal, ocorreram em menor percentual (<1,00%), indicando uma expressiva diversidade molecular, mas com pouca representatividade quantitativa isolada. Embora esses compostos possam apresentar bioatividade em outros sistemas biológicos ou em concentrações mais elevadas, Park *et al*. (2021) observaram que α-pineno, β-pineno, limoneno e eucaliptol não apresentaram atividade acaricida (contra *Haemaphysalis longicornis*) na faixa de concentração avaliada (≤80 mg/mL), ressaltando que a eficácia biológica depende da capacidade intrínseca de cada molécula e da dose empregada. Além disso, os autores demonstraram que pequenas diferenças estruturais entre compostos relacionados podem resultar em mudanças expressivas na atividade biológica.

De modo geral, o óleo essencial de *L. cubeba* caracteriza-se por apresentar uma elevada proporção de citral (neral + geranial) associada a monoterpenos de cadeia curta. Essa constituição química específica, em consonância com o descrito por Gao *et al*. (2024), pode conferir ao óleo essencial um alto potencial bioativo para o desenvolvimento de aplicações inseticidas e acaricidas no manejo fitossanitário.

Tabela 2. Identificação química do óleo essencial de *Litsea cubeba*.

Nº	Composto	IR^C	IR^L	%
1	α-Pineno	930	932	0,77
2	Camphene	944	946	0,19
3	Sabinene	971	969	0,49
4	β-Pineno	973	974	0,65
5	Myrceno	990	988	0,52
6	Limoneno	1026	1024	9,93
7	Linalool	1099	1095	1,18
8	Citronellal	1153	1158	0,92
9	Z-Isocitral	1165	1160	0,42
10	Terpinene-4-ol	1176	1174	0,21
11	E-Isocitral	1183	1177	0,46
12	α-Terpineol	1190	1186	0,70
13	Citronellol	1229	1223	0,42
14	**Neral**	**1241**	**1235**	**32,52**
15	Geraniol	1255	1249	0,98
16	**Geranial**	**1271**	**1264**	**44,68**
17	Linalool acetate <dihydro->	1281	1272	1,69
18	β-Elemeno	1392	1389	0,17
19	E-Caryophylleno	1420	1417	1,52
20	α-Humuleno	1455	1452	0,14
21	Caryophylleno oxido	1585	1582	0,22
Total				**98,13**

$I.R^L$= índice de retenção de Kratz da literatura (Adams, 2009); **$I.R^c$**=. índice de retenção de Kratz calculado; **%** Porcentagem do composto.

Na caracterização química do óleo essencial de *M. alternifolia*, a identificação cromatográfica cobriu com precisão o total de 98,69% dos constituintes voláteis presentes. O perfil analítico dessa matriz é marcado pela presença característica de monoterpenos hidrocarbonetos e oxigenados, verificando-se o claro predomínio do monoterpeno oxigenado terpinen-4-ol (47,24%), seguido pelos hidrocarbonetos lineares γ-terpineno (18,60%) e α-terpineno (8,77%) (Tabela 3).

Além disso, *M. alternifolia* apresentou teores expressivos de α-terpineol (4,18%), p-cimeno (3,40%), terpinoleno (2,97%), α-pineno (1,93%), viridifloreno (1,86%), 1,8-cineol (1,75%), limoneno (1,45%) e aromadendreno (1,23%) (Tabela 2). Esta distribuição quantitativa das frações de constituintes encontra-se em consonância com o perfil descrito por Borotová *et al*. (2022) para o quimiotipo terpinen-4-ol, considerado o quimiotipo comercial padrão de *M. alternifolia*. Esse quimiotipo é caracterizado pelo predomínio de terpinen-4-ol, acompanhado principalmente por γ-terpineno, α-terpineno, α-terpineol e p-cimeno, além de baixos teores de 1,8-cineol, características observadas no presente estudo e que corroboram a autenticidade e a integridade química do óleo essencial utilizado.

Tabela 3. Identificação química do óleo essencial de *Melaleuca alternifolia*

Nº	**Composto**	**IR^C**	**IR^L**	**%**
1	α-Thujeno	924	924	0,51
2	α-Pineno	930	932	1,93
3	Sabineno	971	969	0,24
4	β-Pineno	973	974	0,45
5	Myrceno	990	988	0,36
6	α-Phellandreno	1003	1002	0,30
7	**α-Terpineno**	**1014**	**1014**	**8,77**
8	p-Cymeno	1022	1020	3,40
9	Limoneno	1026	1024	1,45
10	1,8-Cineol	1028	1026	1,75
11	**y-Terpineno**	**1057**	**1054**	**18,60**
12	Terpinoleno	1087	1086	2,97
13	<Z-p->Menth-2-en-1-ol	1120	1118	0,18
14	<E-p->Menth-2-en-1-ol	1138	1136	0,19
15	**Terpinene-4-ol**	**1177**	**1174**	**47,24**
16	α-Terpineol	1189	1186	4,18
17	y-Terpineol	1196	1199	0,18
18	α-Gurjuneno	1410	1409	0,30
19	E-Caryophylleno	1420	1417	0,18
20	Aromadendreno	1439	1439	1,23
21	Myltayl-4(12)-ene	1444	1445	0,10
22	|allo|-Aromadendreno	1462	1458	0,45
23	E-Cadina-1(6),4-dieno	1474	1475	0,24
24	β-Selineno	1487	1489	0,08
25	<Z- β->Guaieno	1489	1492	0,16

26	Viridifloreno	1496	1496	1,86
27	α-Muuroleno	1501	1500	0,12
28	δ-Cadineno	1525	1522	0,99
29	E-Cadina-1,4-dieno	1534	1533	0,11
30	Globulol	1586	1590	0,17
Total				**98,69**

I.R^{L}= índice de retenção de Kratz da literatura (Adams, 2009); **I.R^{c}**=. índice de retenção de Kratz calculado; **%** Porcentagem do composto.

Destaca-se ainda a presença de γ-terpineno, uma vez que esse monoterpeno apresentou atividade acaricida quando avaliado isoladamente contra o ácaro fitófago T*etranychus neocaledonicus*, além de efeito repelente em concentrações subletais e redução da viabilidade dos ovos, sugerindo que esse constituinte pode contribuir, em conjunto com o terpinen-4-ol e os demais monoterpenos, para a bioatividade observada no óleo essencial de *M. alternifolia* (Silva *et al*., 2025).

4.2 Toxicidade dos óleos essenciais sobre fêmeas adultas em diferentes temperaturas

Na avaliação da toxicidade do óleo essencial de *L. cubeba* sobre *O. punicae*, verificou-se que a CL_{50} diminuiu progressivamente entre 22 e 29 °C, atingindo o menor valor a 29 °C (1,48 µL/mL; IC_{95}%: 1,19–1,83), indicando maior toxicidade do óleo nessa temperatura (Tabela 3 e Figura 1). Em comparação à temperatura de 31 °C, que apresentou a maior CL_{50} (7,63 µL/mL; IC_{95}%: 5,13–9,67), o óleo foi 5,15 vezes mais tóxico a 29 °C, conforme demonstrado pela razão de toxicidade. As temperaturas de 22 °C (2,07 µL/mL; IC_{95}%: 1,70–2,54), 25 °C (1,65 µL/mL; IC_{95}%: 1,35–2,01) e 27 °C (1,98 µL/mL; IC_{95}%: 1,54–2,54) apresentaram sobreposição dos intervalos de confiança com a CL_{50} obtida a 29 °C, indicando ausência de diferença estatísticas entre essas temperaturas.

Para a CL_{90}, o menor valor foi observado a 25 °C (4,84 µL/mL; IC_{95}%: 3,68–6,37), enquanto a maior concentração letal foi registrada a 31 °C (24,29 µL/mL; IC_{95}%: 18,22–42,84). A razão de toxicidade indicou que o óleo foi 5,01 vezes mais tóxico a 25 °C em comparação à temperatura de 31 °C. No entanto, os intervalos de confiança das temperaturas de 22 °C (6,65 µL/mL; IC_{95}%: 5,08–8,72) e 29 °C (5,24 µL/mL; IC_{95}%: 3,88–7,06) apresentaram sobreposição com o obtido a 25 °C, não evidenciando diferença estatística entre essas temperaturas.

Para o óleo essencial de *M. alternifolia* sobre *O. punicae*, a CL_{50} apresentou o menor valor na temperatura de 31 °C (2,33 µL/mL; IC_{95}%: 1,37–3,13), indicando maior eficiência do

óleo sob esta condição térmica. Esse valor foi 3,54 vezes mais tóxico em comparação ao obtido a 22 °C (CL_{50} = 8,24 µL/mL; IC_{95}%: 6,70–10,14), conforme demonstrado pela razão de toxicidade. A ausência de sobreposição entre os intervalos de confiança dessas duas temperaturas confirma a diferença estatística significativa. Por outro lado, as temperaturas de 22 °C a 29 °C apresentaram sobreposição dos intervalos de confiança e entre si, não diferindo estatisticamente.

Quanto à CL_{90}, o menor valor também foi registrado a 31 °C (7,40 µL/mL; IC_{95}%: 6,02–9,65), enquanto o maior foi observado a 25 °C (30,13 µL/mL; IC_{95}%: 21,05–86,96). A razão de toxicidade para a CL_{90} indicou que o óleo foi a 4,07 vezes mais tóxico a 31 °C em relação a 25 °C. Assim como ocorreu para a CL_{50}, as demais temperaturas não diferiram estatisticamente entre si.

Tabela 3. Efeito da temperatura na toxicidade dos óleos essenciais de *Litsea cubeba* e *Melaleuca alternifolia* sobre *Oligonychus punicae*

Litsea cubeba									
Temperatura (°C)	N	GL	Inclinação (±EP)	CL_{50} (IC95%) (µL/mL)	CL_{90} (IC95%) (µL/mL)	RT CL_{50}	RT CL_{90}	χ^2	P
22	750	3	2,53±0,23	2,07 (1,70–2,54)	6,65 (5,08–8,72)	3,69	3,65	3,40	0,3343
25	750	3	2,74±0,26	1,65 (1,35–2,01)	4,84 (3,68–6,37)	4,62	5,01	5,58	0,1341
27	750	3	1,76±0,18	1,98 (1,54–2,54)	10,61 (7,28–15,46)	3,85	2,29	5,19	0,1583
29	750	3	2,33±0,23	1,48 (1,19–1,83)	5,24 (3,88–7,06)	5,15	4,63	3,71	0,2944
31	750	3	2,55±0,32	7,63 (5,13–9,67)	24,29 (18,22–42,84)	-	-	6,79	0,0790
Melaleuca alternifolia									
Temperatura (°C)	N	GL	Inclinação (±EP)	CL_{50} (IC95%) (µL/mL)	CL_{90} (IC95%) (µL/mL)	RT CL_{50}	RT CL_{90}	χ^2	P
22	750	3	2,56±0,54	8,24 (6,70–10,14)	26,13 (18,12–37,69)	-	1,15	1,53	0,6756
25	750	3	2,04±0,54	7,07 (3,86–8,92)	30,13 (21,05–86,96)	1,16	-	2,57	0,4616
27	600	2	2,18±0,57	6,34 (3,21–8,39)	24,43 (18,29–53,26)	1,30	1,23	4,08	0,1296
29	750	3	2,25±0,31	6,92 (5,40–8,32)	25,58 (19,87–38,16)	1,19	1,18	0,83	0,8412
31	750	3	2,55±0,43	2,33 (1,37–3,13)	7,40 (6,02–9,65)	3,54	4,07	0,77	0,8552

n= número de insetos usados no teste; GL= grau de liberdade; CL= concentração letal; EP = erro padrão da média; IC= intervalo de confiança; RT = razão de toxicidade; χ^2= Qui-quadrado; P= probabilidade

Os valores de inclinação da curva concentração-mortalidade variaram de 1,76 a 2,74 para *Litsea cubeba* e de 2,04 a 2,56 para *Melaleuca alternifolia* (Tabela 3). A inclinação da reta é um parâmetro importante da análise de PROBIT, pois fornece informações sobre a uniformidade da resposta da população ao agente tóxico. Valores mais elevados indicam que pequenas variações na concentração resultam em grandes alterações na mortalidade, sugerindo uma população mais homogênea em relação à suscetibilidade ao produto. Por outro lado, menores inclinações refletem uma resposta mais gradual ao aumento da concentração,

indicando maior variabilidade individual na tolerância dos organismos expostos (Robertson *et al*., 2017).

Para *L. cubeba*, a maior inclinação foi observada a 25 °C (2,74 ± 0,26), indicando que nessa temperatura pequenas alterações na concentração do óleo foram capazes de produzir aumentos expressivos na mortalidade de *O. punicae*. Em contraste, a menor inclinação ocorreu a 27 °C (1,76 ± 0,18), sugerindo maior heterogeneidade na resposta da população. Embora a menor CL50 tenha sido registrada a 29 °C, a maior inclinação foi observada a 25 °C, demonstrando que toxicidade e uniformidade da resposta não necessariamente apresentam o mesmo comportamento frente à temperatura.

Para *M. alternifolia*, os maiores valores de inclinação foram registrados a 22 °C (2,56 ± 0,54) e 31 °C (2,55 ± 0,43), indicando uma resposta mais homogênea da população nessas condições térmicas. Particularmente a 31 °C, além da elevada inclinação, observou-se a menor CL50 do estudo (2,33 µL/mL), evidenciando não apenas maior toxicidade do óleo, mas também uma resposta mais consistente dos indivíduos expostos. Esse resultado sugere que o aumento da temperatura pode ter favorecido simultaneamente a atividade biológica dos compostos majoritários de *M. alternifolia* e a uniformidade da resposta dos ácaros ao tratamento.

Dessa forma, a análise da inclinação complementa a interpretação dos valores de CL50 e CL90, permitindo uma compreensão mais abrangente dos efeitos da temperatura sobre a toxicidade dos óleos essenciais e sobre a variabilidade da suscetibilidade de *O. punicae*. A elevada bioatividade do óleo essencial de *L. cubeba* também foi registrada por Silva *et al*. (2025), que o identificaram como o óleo essencial mais tóxico entre os avaliados contra *T. neocaledonicus*, superando *M. alternifolia* nas condições experimentais utilizadas. A toxicidade desse óleo pode está fortemente relacionada a seus constituintes majoritários. Gao *et al*. (2024) demonstraram toxicidade por contato e fumigação do óleo de *L. cubeba* e de seu principal constituinte, o citral, contra *Drosophila suzukii*, confirmando que sua bioatividade pode resultar da combinação entre ação residual e exposição aos compostos voláteis.

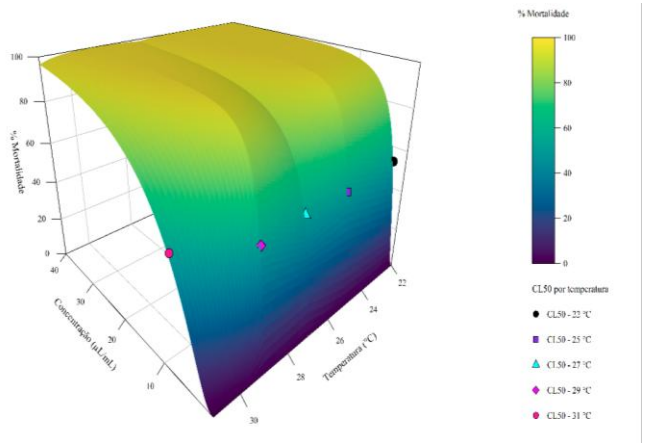
Silva *et al*. (2025) igualmente demonstraram toxicidade de *M. alternifolia* e atividade individual de γ-terpinene contra *T. neocaledonicus*, reforçando a participação dos monoterpenos na resposta acaricida. Esse potencial é corroborado por Alimi *et al*. (2024), que observaram atividade acaricida de *M. alternifolia* contra o carrapato *Hyalomma scupense*.

A mortalidade de *O. punicae* aumentou com o incremento das concentrações do óleo essencial de *L. cubeba* em todas as temperaturas avaliadas, evidenciando uma resposta concentração-dependente modulada pela temperatura. O gráfico de superfície (Figura 2A) demonstra uma interação concentração–temperatura bem definida, na qual a eficiência

acaricida aumenta entre 22 e 29 °C, atingindo sua máxima resposta a 29 °C, condição em que foi obtida a menor CL_{50} (1,48 µL mL^{-1}). Por outro lado, observou-se redução na toxicidade a 31 °C, temperatura que apresentou a maior CL_{50} (7,63 µL mL^{-1}; IC_{95}%: 5,13–9,67), indicando que a partir dessa temperatura há uma tendência na diminuição da eficiência acaricida do óleo essencial. A influência da temperatura sobre a atividade de compostos acaricidas é um fenômeno complexo, normalmente descrito por meio do coeficiente de temperatura (CT), que pode assumir comportamento positivo, negativo ou neutro, dependendo da interação entre o composto bioativo e a fisiologia do organismo-alvo (Li *et al*., 2020; Dou *et al*., 2022). Dessa forma, os resultados demonstram uma dependência do efeito acaricida em função da temperatura.

O mapa de calor (Figura 2B) confirma esse comportamento ao evidenciar que as maiores taxas de mortalidade são alcançadas em concentrações relativamente baixas quando o óleo é aplicado em temperaturas próximas de 29 °C. Portanto, nessa temperatura, infere-se que há um aumento na exposição a esses compostos. Em contrapartida, a 31 °C observa-se um deslocamento da região de máxima mortalidade para concentrações mais elevadas, indicando menor eficiência do óleo nessa condição térmica.

A



B

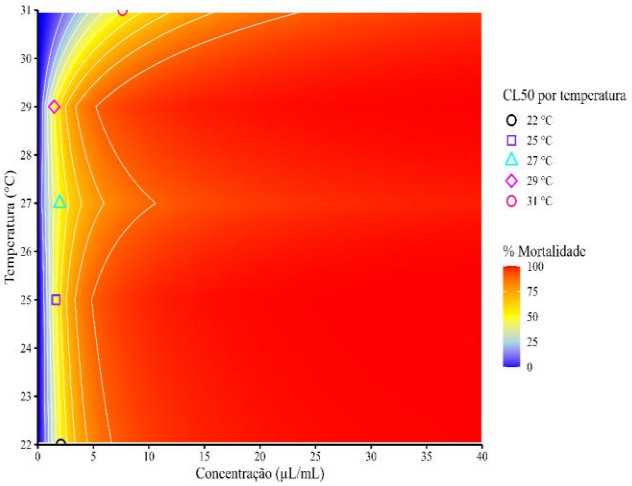


Figura 2. Superfície de resposta (A) e mapa de calor (B) da mortalidade de *Oligonychus punicae* em diferentes temperaturas e concentrações do óleo essencial de *Litsea cubeba*.

A maior eficiência observada entre 22 e 29 °C pode estar relacionada a alterações fisiológicas tanto do ácaro quanto dos constituintes bioativos presentes no óleo essencial. O aumento da temperatura, dentro de determinados limites, pode intensificar a taxa metabólica, a respiração e a atividade locomotora dos ácaros, favorecendo o contato com as superfícies tratadas, a absorção dos compostos tóxicos e, consequentemente, a sua ação biológica (Jegede *et al*., 2017; Tsaganou *et al*., 2021). Além disso, mudanças na permeabilidade da cutícula e na sensibilidade do sistema nervoso também podem contribuir para o aumento da suscetibilidade aos compostos bioativos. Temperaturas mais elevadas também podem reduzir essa eficiência devido à maior volatilização ou degradação dos constituintes do óleo essencial, bem como ao aumento da capacidade de detoxificação do organismo-alvo, fatores que podem explicar a diminuição da toxicidade observada a 31 °C.

A mortalidade de *O. punicae* também aumentou com o acréscimo das concentrações do óleo essencial de *M. alternifolia* em todas as temperaturas, confirmando um efeito modulado pela temperatura. O gráfico de superfície (Figura 3A) evidencia a interação concentração–temperatura, com maior eficácia nas faixas elevadas com desempenho superior a 31 °C, temperatura em que se obteve a CL_{50} mais baixa (2,33 μL mL). O mapa de calor (Figura 3B) reforça esse padrão, delimitando zonas mais quentes de alta mortalidade sobretudo entre ~27–31 °C e concentrações moderadas a altas. Assim, esses resultados demonstram que concentrações maiores e temperaturas próximas de 31 °C potencializam a ação acaricida do óleo de *M. alternifolia* sobre *O. punicae*.

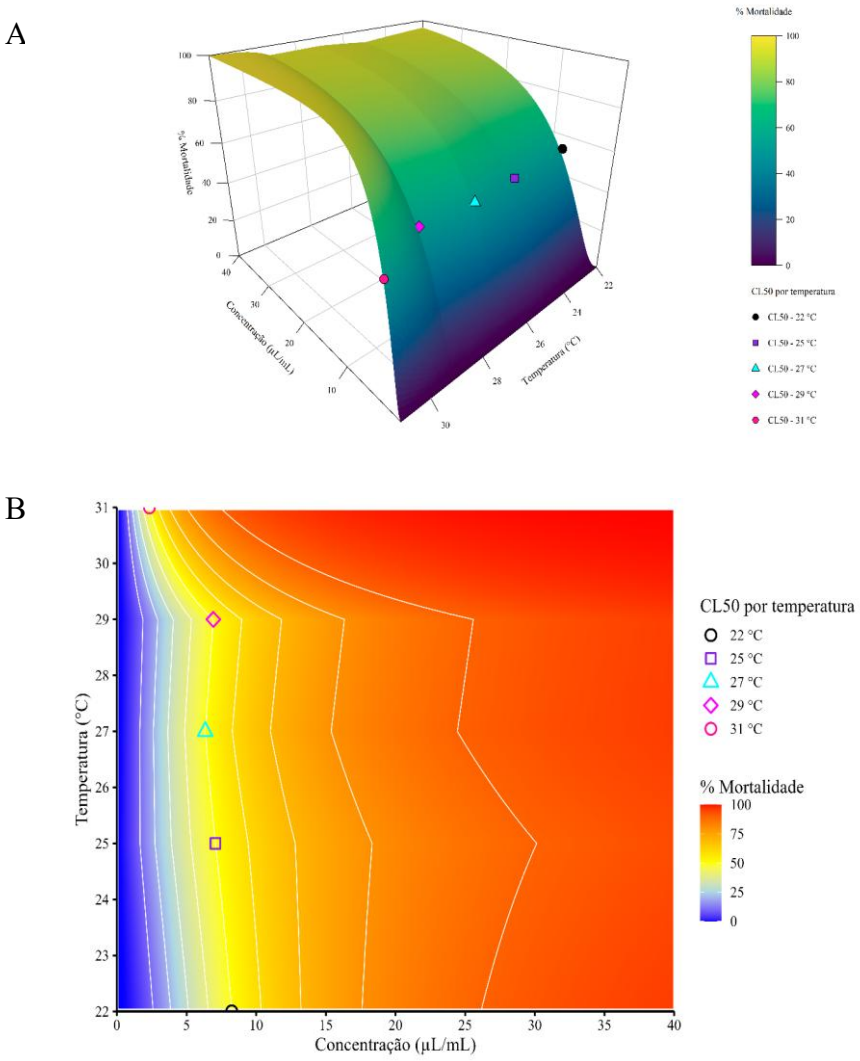


Figura 3. Superfície de resposta (A) e mapa de calor (B) da mortalidade de *Oligonychus punicae* em diferentes temperaturas e concentrações do óleo essencial de *Melaleuca alternifolia*

O comportamento distinto observado para os dois óleos provavelmente está relacionado às diferenças em suas composições químicas e às alterações promovidas pela temperatura sobre as propriedades físico-químicas de seus constituintes. Pois, em *L. cubeba*, a maior eficiência observada a 29 °C pode ser atribuída à elevada concentração de citral (neral + geranial; ~77,2%). Além disso, a presença de limoneno, linalol, geraniol e β-cariofileno também pode contribuir para efeitos sinérgicos, potencializando a ação tóxica (Thielmann; Muranyi, 2019).

Entretanto, temperaturas superiores podem aumentar excessivamente a volatilização desses monoterpenos altamente voláteis, reduzindo sua permanência sobre o substrato e, consequentemente, a fração efetivamente disponível para contato com os ácaros, o que pode

explicar a menor eficiência observada a 31° C e, a partir disso, George *et al.* (2010) reforçam então a importância de os efeitos causados pela temperatura, em um contexto ecológico amplo.

Por outro lado, a maior eficácia de *M. alternifolia* a 31 °C pode estar relacionada ao predomínio de terpinen-4-ol (~47%), γ-terpineno (~19%) e α-terpineno (~9%), além de menores proporções de α-terpineol, *p*-cimeno, terpinoleno, α-pineno e 1,8-cineol (Sousa *et al.*, 2025). Nesse caso, o aumento da temperatura pode de maneira contrária ao que ocorreu com o óleo de *L. cubeba*, aumentar a volatilidade desses compostos e permitir maior fração biologicamente disponível dos princípios ativos, intensificando a toxicidade.

Esses resultados corroboram com Isman (2000) ao afirmar que a atividade inseticida/acaricida depende não apenas do aumento da volatilidade dos óleos essenciais, mas também das características químicas específicas de seus constituintes majoritários e/ou minoritários e de suas interações com a fisiologia do organismo-alvo.

Dessa forma, a principal contribuição deste estudo foi demonstrar que a temperatura é um fator determinante na toxicidade dos óleos de *L. cubeba* e *M. alternifolia* contra *O. punicae*. Estes resultados indicam que a eficácia desses produtos não depende apenas da concentração aplicada, mas também das condições térmicas do ambiente, haja vista que também fornecem informações importantes para cenários futuros de mudanças climáticas. Logo, a partir dos resultados é possível se ter uma base de melhores momentos de aplicação dos produtos. Nesse sentido, com um exemplo prático de aplicação em campo, com o L. cubeba, que teve o menor valor na CL50 (1,48) se comparado com M. *alternifolia* (2,33) e temperatura de maior toxicidade a 29°, sugere-se uma aplicação ao final da tarde, momento em que se percebe temperaturas mais amenas nas regiões mais quentes de produção.

4.3 Modelagem da relação entre a temperatura e a CL_{50}

Para ambos os óleos essenciais, o modelo quadrático não foi significativo (*L. cubeba*: p = 0,2638; *M. alternifolia*: p = 0,2940), sendo, portanto, selecionado o modelo linear. Para o óleo essencial de *L. cubeba*, o modelo ajustado foi $\log_{10}(CL_{50}) = -0{,}3073 + 0{,}02377T$, indicando uma tendência ao aumento da CL_{50} com a elevação da temperatura, o que corresponde à redução gradual da toxicidade em temperaturas mais elevadas. Entretanto, essa tendência representa apenas o comportamento geral dos dados e não reproduz o ponto ótimo observado experimentalmente a 29 °C, seguido da perda acentuada de toxicidade a 31 °C. Para *M. alternifolia*, o modelo ajustado foi $\log_{10}(CL_{50}) = 1{,}5881 - 0{,}02951T$, indicando redução da CL_{50} à medida que a temperatura aumenta, refletindo uma tendência de aumento da toxicidade.

A Figura 4 mostra os valores observados de CL_{50}, as curvas ajustadas e seus respectivos intervalos de confiança de 95%, bem como as regiões extrapoladas fora da faixa experimental (18–20 °C e 34–40 °C). Para *L. cubeba*, o modelo estimou CL_{50} de aproximadamente 1,32 e 1,47 µL mL^{-1} a 18 e 20 °C, respectivamente, aumentando para 3,17, 3,35, 3,94 e 4,40 µL mL^{-1} nas temperaturas extrapoladas de 34, 35, 38 e 40 °C. Para *M. alternifolia*, foram estimados valores de 11,40 e 9,95 µL mL^{-1} a 18 e 20 °C, reduzindo-se para 3,84, 3,59, 2,93 e 2,56 µL mL^{-1} a 34, 35, 38 e 40 °C.

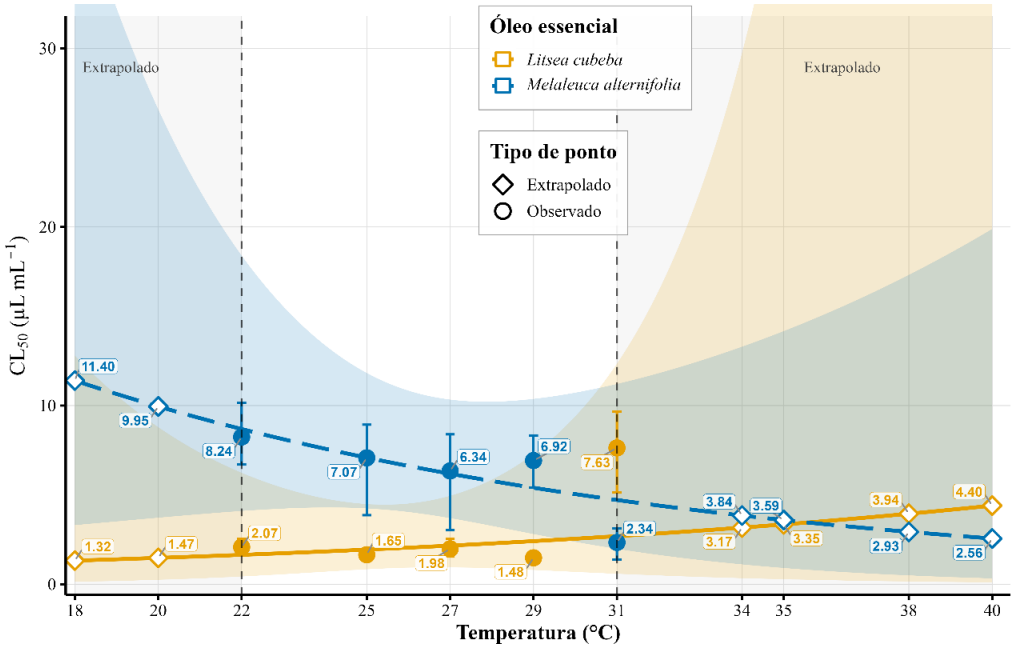


Figura 4. Relação entre temperatura e a CL_{50} dos óleos essenciais de *Litsea cubeba* e *Melaleuca alternifolia* sobe *Oligonychus punicae*, mostrando predições extrapoladas para temperaturas fora da faixa experimental.

De forma geral, a modelagem da relação da CL_{50} com a temperatura se mostrou bastante útil pois revela tendências não diretamente avaliadas em relação à eficiência acaricida dos óleos essenciais testados.

4.4 Efeito sobre ovos

A aplicação dos óleos essenciais reduziu significativamente ($p<0,05$) a viabilidade dos ovos de *O. punicae* em comparação ao controle (Figura 5). O óleo essencial de *M. alternifolia* proporcionou a menor viabilidade média dos ovos (11,5%), diferindo significativamente de *L. cubeba*, cuja viabilidade média foi de 73,0% e do controle (96%) (Figura 4A). Sousa *et al.* (2025), estudando outra espécie de tetraniquídeo, *T. neocaledonicus*, observaram que *M.*

alternifolia não reduziu significativamente a viabilidade dos ovos quando aplicado na CL_{50}, mas apresentou efeito ovicida significativo na CL_{90}, na qual a viabilidade foi reduzida para 68%, em comparação a 100% na testemunha. Silva et al. (2025) também avaliaram os óleos de *M. alternifolia* e *L. cubeba* contra ovos de *T. neocaledonicus*. Na CL_{50}, *L. cubeba* reduziu a viabilidade dos ovos para 58,0%, enquanto *M. alternifolia* apresentou viabilidade de 68,0%, não diferindo estatisticamente da testemunha, que apresentou 93,5%. Portanto, os resultados obtidos para *O. punicae* no presente estudo indicam uma maior resposta ovicida, uma vez que a viabilidade foi reduzida para apenas 11,5% já na CL_{50}.

Na CL_{90}, ambos os óleos promoveram acentuada redução da viabilidade dos ovos em relação à controle (Figura 4B). O óleo de *L. cubeba* proporcionou viabilidade média de 1,5%, enquanto *M. alternifolia* permitiu viabilidade de 10,0%. Esses resultados indicam elevada atividade ovicida de ambos os óleos nessa concentração, consequentemente comprometendo o desenvolvimento embrionário de *O. punicae*. A redução da eclosão pode ocorrer tanto por mecanismos físicos quanto químicos. Devido à sua lipofilicidade e volatilidade, determinados constituintes dos óleos essenciais podem atravessar ou difundir-se pelas estruturas externas do ovo, alcançando o embrião e interferindo em processos fisiológicos e bioquímicos essenciais ao desenvolvimento embrionário. Esse mecanismo foi demonstrado por Gurusubramanian e Krishna (1996), que observaram efeitos ovicidas de compostos voláteis sobre ovos de quatro espécies de insetos-praga do algodoeiro. Infere-se, dessa forma, que o citral (neral + geranial), abundante em *L. cubeba*, pode ter sido o responsável pelo efeito ovicida, enquanto os constituintes terpinen-4-ol e γ-terpineno do óleo de *M. alternifolia* podem ter influenciado esse efeito.

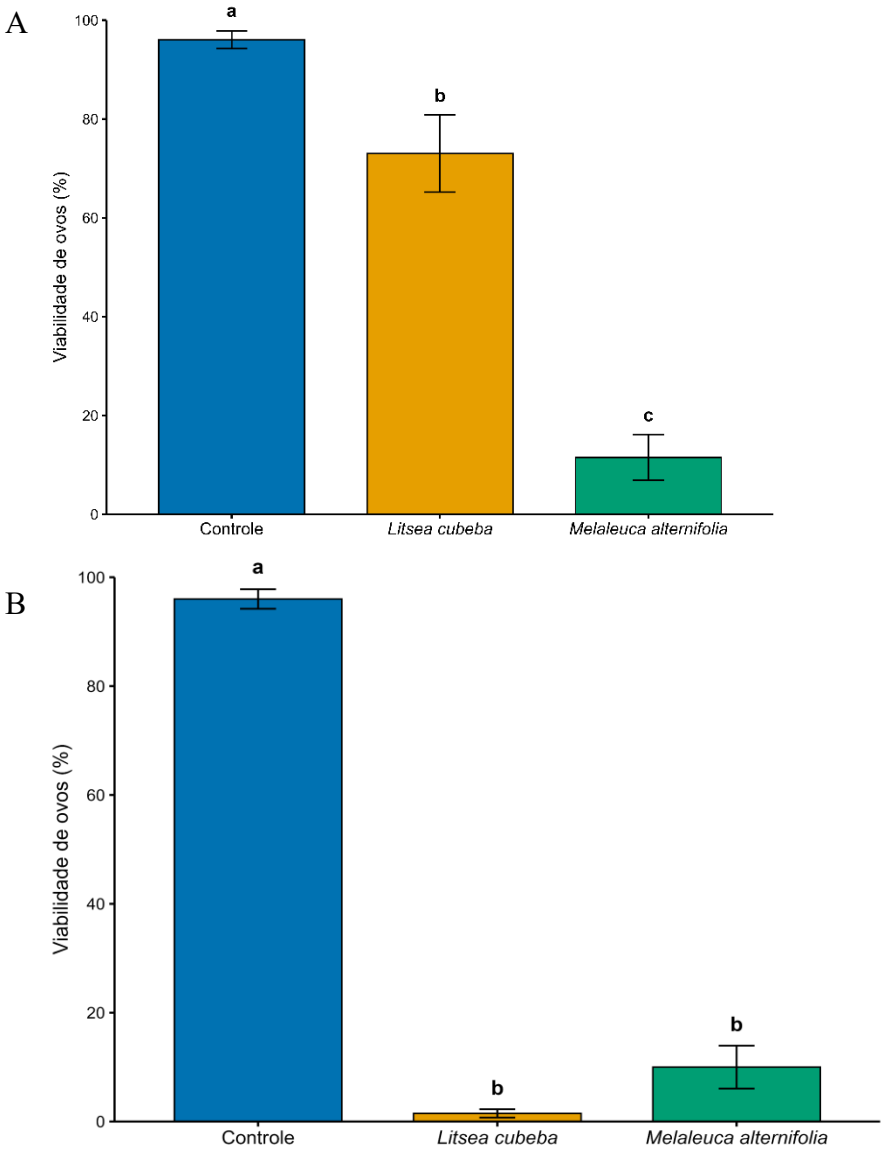


Figura 5. Viabilidade de ovos (%) de *Oligonychus punicae* tratados com óleo essencial de *Litsea cubeba* e *Melaleuca alternifolia* nas concentrações letais CL_{50} (A) e CL_{90} (B). *Médias seguidas pela mesma letra não diferem entre si pelo teste de Tukey a 5% de probabilidade; barras indicam média ± EP.

4.5 Efeito sobre o crescimento populacional

A aplicação das concentrações CL_{20} dos óleos essenciais promoveu redução significativa ($p < 0,05$) na taxa instantânea de crescimento populacional (r_i) de *O. punicae* em comparação ao controle (Figura 6A). O tratamento controle apresentou r_i médio de 0,5073, enquanto *L. cubeba* e *M. alternifolia* apresentaram valores de 0,3116 e 0,2649, respectivamente. Ambos os tratamentos diferiram estatisticamente da testemunha, sendo *M. alternifolia* o óleo

mais eficiente nessa concentração, apresentando r_i significativamente menor que o de *L. cubeba*.

Na CL_{30} (Figura 6B), ambos os óleos essenciais também reduziram significativamente a taxa instantânea de crescimento populacional em relação à testemunha. Os tratamentos com *L. cubeba* e *M. alternifolia* apresentaram valores médios de r_i de 0,2709 e 0,2672, respectivamente, não diferindo estatisticamente entre si. Dessa forma, os dois óleos apresentaram elevada capacidade de suprimir o crescimento populacional de *O. punicae* na CL_{30}, evidenciando que a exposição a essa concentração também compromete a dinâmica populacional do ácaro.

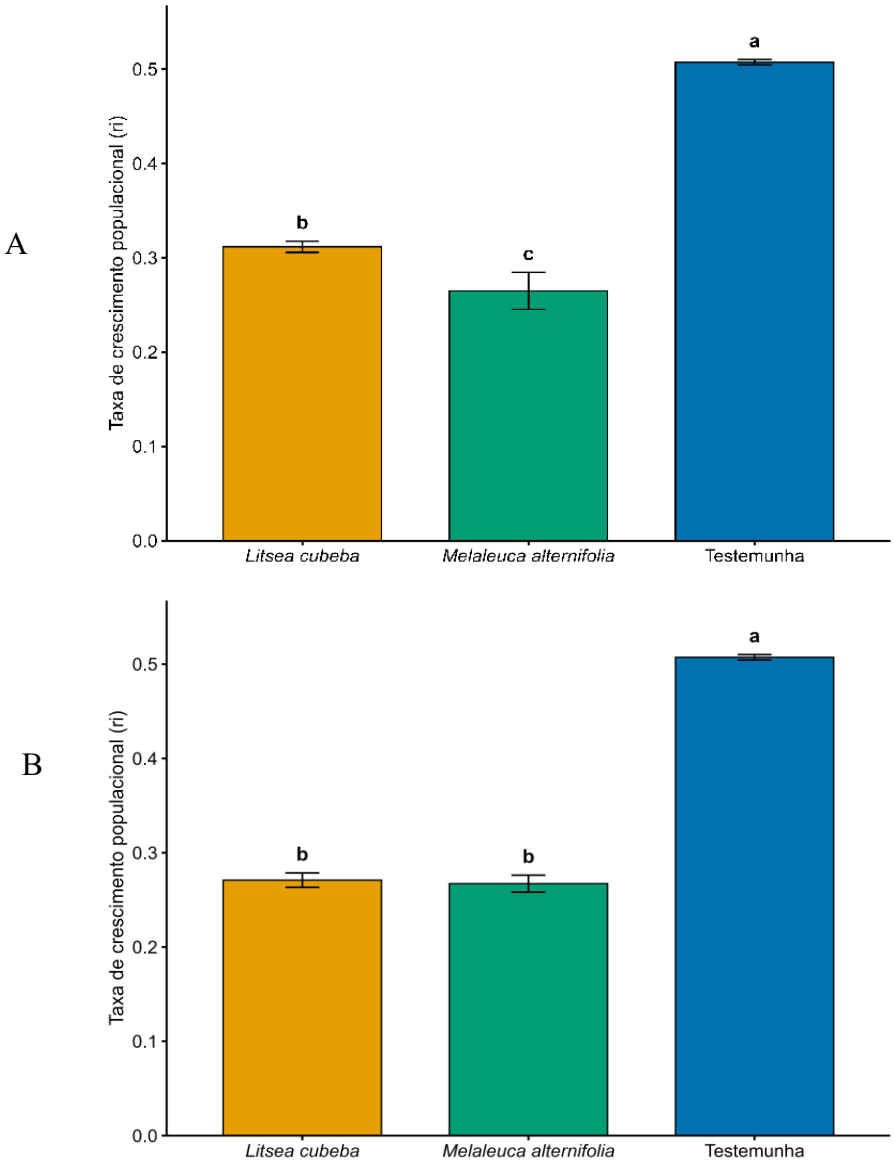


Figura 6. Taxa instantânea de crescimento populacional (ri) de *Oligonychus punicae* em discos foliares tratados com a CL_{20} (A) e CL_{30} (B) dos óleos essenciais de *Litsea cubeba* e *Melaleuca alternifolia*. *Médias seguidas pela mesma letra não diferem entre si pelo teste de Tukey a 5% de probabilidade; barras indicam média ± EP.

Esses resultados demonstram que, embora ainda ocorra crescimento populacional, ambos os óleos reduzem significativamente o potencial de aumento da população, com maior efeito supressivo de *M. alternifolia* na CL_{20}. Geralmente, os efeitos subletais no crescimento populacional são associados a mudanças em parâmetros reprodutivos como redução da viabilidade dos ovos e da oviposição, que de maneira direta influencia na r_i (Ferreira *et al.*, 2025). Alguns estudos indicam que parâmetros biológicos como desenvolvimento, fecundidade e taxa de crescimento populacional, nos tetraniquídeos, tendem a aumentar em temperaturas intermediárias ou elevadas, numa faixa entre 25°–30° (Hasanvand *et al*., 2020; Riahi *et al*., 2013). Assim, a elevada atividade acaricida em especial do óleo de *L. cubeba* justamente nessa faixa térmica, representa uma característica promissora para seu emprego em programas de manejo, uma vez que coincide com condições ambientais favoráveis ao crescimento populacional do ácaro.

4.6 Efeito repelente dos óleos essenciais

O índice de repelência (IR) dos óleos essenciais diferiu entre as concentrações letais avaliadas. Na CL_{20}, *L. cubeba* apresentou IR de 0,57 ± 0,13, sendo classificado como repelente, uma vez que o valor médio permaneceu abaixo do limite inferior do intervalo de neutralidade ($IR < 1 - DP$) (Figura 7A). Em contraste, *M. alternifolia* apresentou IR de 1,00 ± 0,43, sendo classificado como neutro, por permanecer dentro do intervalo de neutralidade ($1 - DP < IR < 1 + DP$). Na CL_{30}, ambos os óleos foram classificados como repelente, com IR de 0,42 ± 0,21 para *L. cubeba* e 0,52 ± 0,25 para *M. alternifolia*, ambos inferiores ao limite de neutralidade (Figura 7B). Esses resultados indicam que o aumento da concentração intensificou a resposta repelente de *M. alternifolia*, enquanto *L. cubeba* apresentou efeito repelente em ambas as concentrações avaliadas, sendo ligeiramente mais intenso na CL_{30}.

A intensificação da repelência em concentrações mais elevadas é consistente com o caráter dependente da concentração frequentemente observado para óleos essenciais. O aumento da quantidade de compostos voláteis disponíveis na superfície tratada pode ampliar a estimulação dos sistemas quimiossensoriais dos artrópodes, tornando o substrato menos adequado para permanência, alimentação ou oviposição. Em estudo com quatro óleos essenciais contra *Culex pipiens*, Farag *et al*. (2024) verificaram aumento gradual da repelência com a concentração.

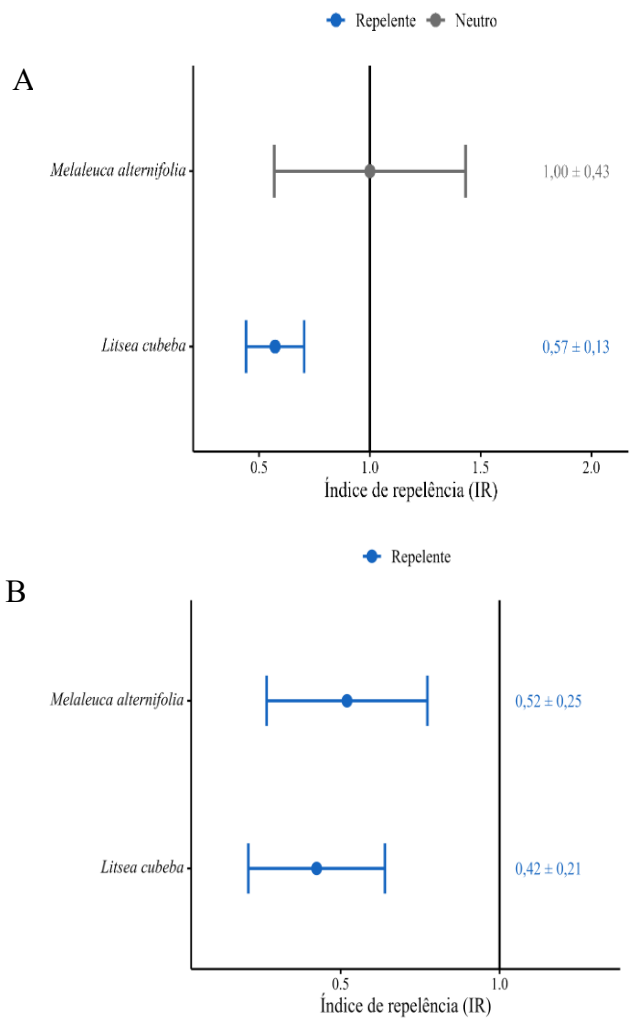


Figura 7. Índice de repelência (IR) de *Oligonychus punicae* em relação aos óleos essenciais de *Litsea cubeba* e *Melaleuca alternifolia* nas concentrações letais CL_{20} (A) e CL_{30} (B).

A distribuição dos ácaros entre os lados tratado e não tratado variou de acordo com o óleo essencial e a concentração letal avaliada (Figura 8). Na CL_{20} *L. cubeba* promoveu repelência significativa ($p < 0,001$), sendo observados, em média, 2,6 ± 0,2 ácaros no lado tratado e 6,5 ± 0,3 no lado não tratado (Figura 8A). Já *M. alternifolia* não alterou significativamente a distribuição dos indivíduos ($p > 0,05$), com média de 5,0 ± 0,7 ácaros tanto no lado tratado quanto no não tratado. Na CL_{30}, ambos os óleos apresentaram efeito repelente significativo ($p < 0,001$) (Figura 8B). Para *L. cubeba*, foram observados, em média, 2,0 ± 0,3 ácaros no lado tratado e 7,5 ± 0,4 no lado não tratado, enquanto para *M. alternifolia* as médias foram de 2,6 ± 0,4 e 7,4 ± 0,4 ácaros nos lados tratado e não tratado, respectivamente. Assim, os resultados demonstram que o aumento da concentração intensificou o afastamento dos ácaros

a *M. alternifolia*, enquanto *L. cubeba* apresentou repelência significativa em ambas as concentrações avaliadas, sendo esse efeito ainda mais pronunciado na CL_{30}.

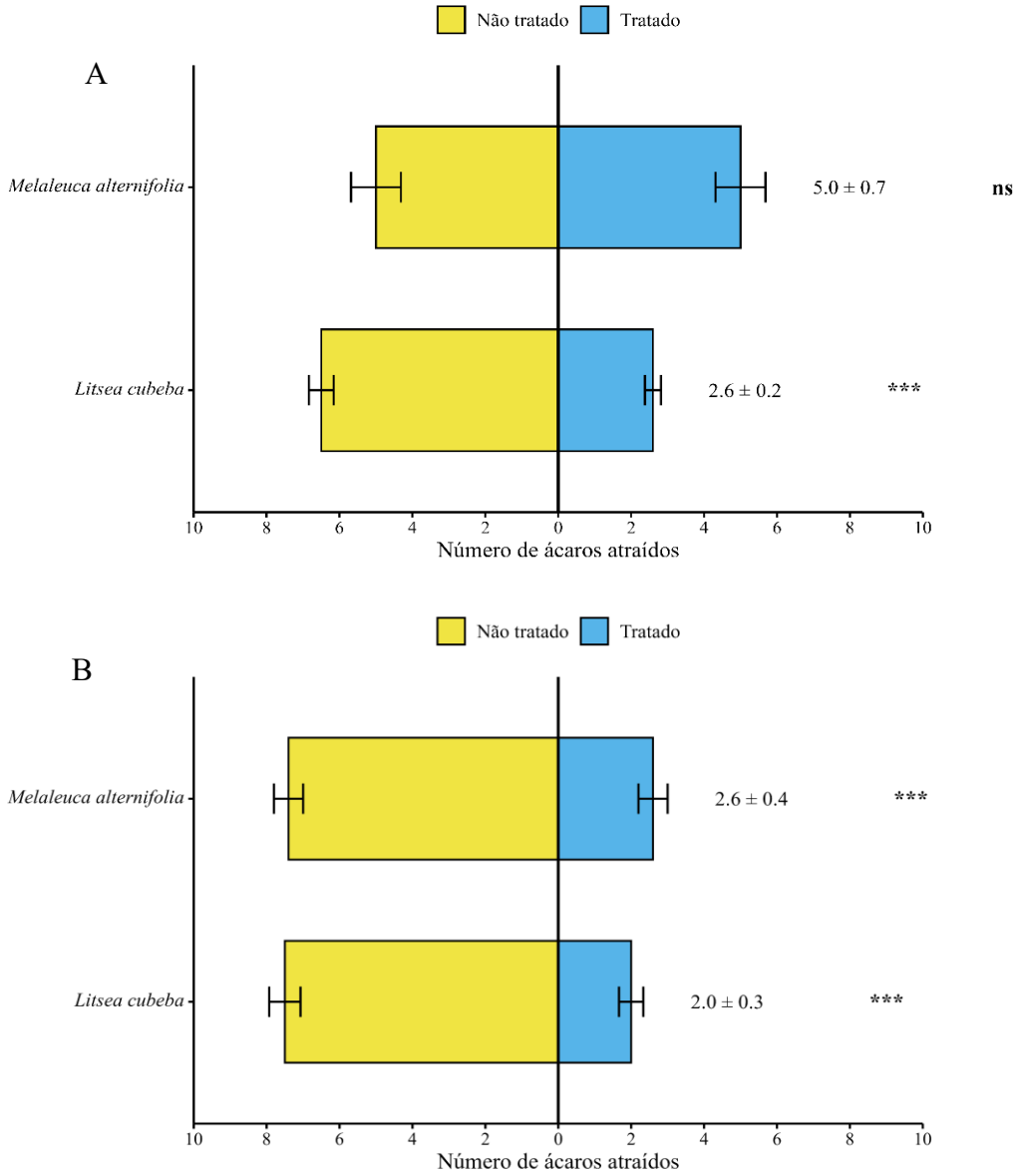


Figura 8. Número de ácaros *Oligonychus punicae* atraídos (média ± EP) após a aplicação dos óleos essenciais de *Litsea cubeba* e *Melaleuca alternifolia* nas concentrações letais CL_{20} (A) e CL_{30} (B). ns – Não significativo (p>0,05); *** significativo (p<0,0001).

Para a atividade repelente do óleo essencial de *L. cubeba*, os resultados obtidos no presente estudo podem ser sustentados pelos achados de Gao *et al*. (2024) que estudando a atividade repelente contra diferentes grupos de insetos, demonstraram que esse óleo essencial e seu principal constituinte, o citral, apresentaram repelência contra *D. suzukii*, sendo a maior resposta registrada na concentração de 1,0 μL cm^{-2}. Pan *et al*. (2022) também observaram correlação positiva entre a concentração do óleo de *L. cubeba* e sua porcentagem de repelência contra *D. suzukii*.

Alimi *et al*. (2024) verificaram que o óleo essencial de *M. alternifolia* apresentou 100% de repelência contra adultos do carrapato *H. scupense* na concentração de 1 mg mL^{-1}. O óleo empregado naquele estudo continha principalmente terpinen-4-ol e γ-terpinene, compostos também característicos do óleo avaliado no presente trabalho. Além da repelência, os autores observaram inibição da acetilcolinesterase, indicando que o óleo pode afetar tanto o comportamento quanto processos neurofisiológicos dos ácaros. A classificação neutra de *M. alternifolia* na CL_{20} não significa, portanto, ausência de potencial repelente, mas indica que, nessa concentração, a quantidade de voláteis liberada não foi suficiente para provocar uma resposta de afastamento consistente em *O. punicae*. A mudança para a classificação repelente na CL_{30} demonstra a existência de um limiar de resposta comportamental. Abaixo desse limiar, a percepção dos constituintes pode não gerar estímulo suficientemente intenso para alterar a distribuição dos ácaros na arena; acima dele, o aumento da pressão de vapor e da quantidade de moléculas disponíveis para percepção pode estimular o deslocamento para a área não tratada.

Do ponto de vista aplicado, a repelência observada para os óleos essenciais testados pode complementar a atividade acaricida dos óleos. Ao reduzir a permanência das fêmeas nas superfícies tratadas, esses óleos podem causar deterrência de alimentação ou de oviposição, consequentemente diminuindo a formação de novos focos de infestação.

Nesse contexto, com vistas à aplicação prática, embora os resultados laboratoriais confirmem a eficácia biológica desses óleos essenciais, torna-se imprescindível a realização de estudos complementares em condições de campo e em escala comercial. Além disso, o desenvolvimento de formulações de libertação controlada, como a nanoencapsulação, surge como uma linha de investigação necessária para otimizar a estabilidade térmica e prolongar o período residual destes óleos essenciais no manejo de *O. punicae*.

A Análise de Componentes Principais (PCA) sintetizou a resposta conjunta dos parâmetros biológicos e comportamentais avaliados para os dois óleos essenciais (Figura 9). Os dois primeiros componentes principais explicaram 81,8% da variabilidade total dos dados, sendo 59,4% representados pelo PC1 e 22,4% pelo PC2. O PC1 foi fortemente associado aos parâmetros relacionados à repelência, apresentando correlação positiva com o número de ácaros no lado não tratado e correlação negativa com o número de ácaros no lado tratado e com o índice de repelência, caracterizando um gradiente comportamental de afastamento dos indivíduos em relação aos tratamentos. Já o PC2 foi predominantemente influenciado pelos parâmetros biológicos, apresentando associação positiva com a viabilidade dos ovos e negativa

com a taxa instantânea de crescimento populacional (r_i), refletindo diferenças nos efeitos subletais promovidos pelos óleos essenciais.

No espaço fatorial, a CL_{20} de *M. alternifolia* destacou-se dos demais tratamentos por apresentar forte associação com o vetor "ácaros no lado tratado", refletindo a ausência de repelência observada nessa concentração. Por outro lado, a CL_{20} de *L. cubeba* posicionou-se na região oposta do PC1, próximo ao vetor do índice de repelência, confirmando seu efeito repelente mesmo na menor concentração avaliada. As concentrações CL_{30}, CL_{50} e CL_{90} de ambos os óleos se agruparam próximas à região central do gráfico, indicando respostas intermediárias e maior similaridade quanto aos efeitos combinados sobre os parâmetros avaliados.

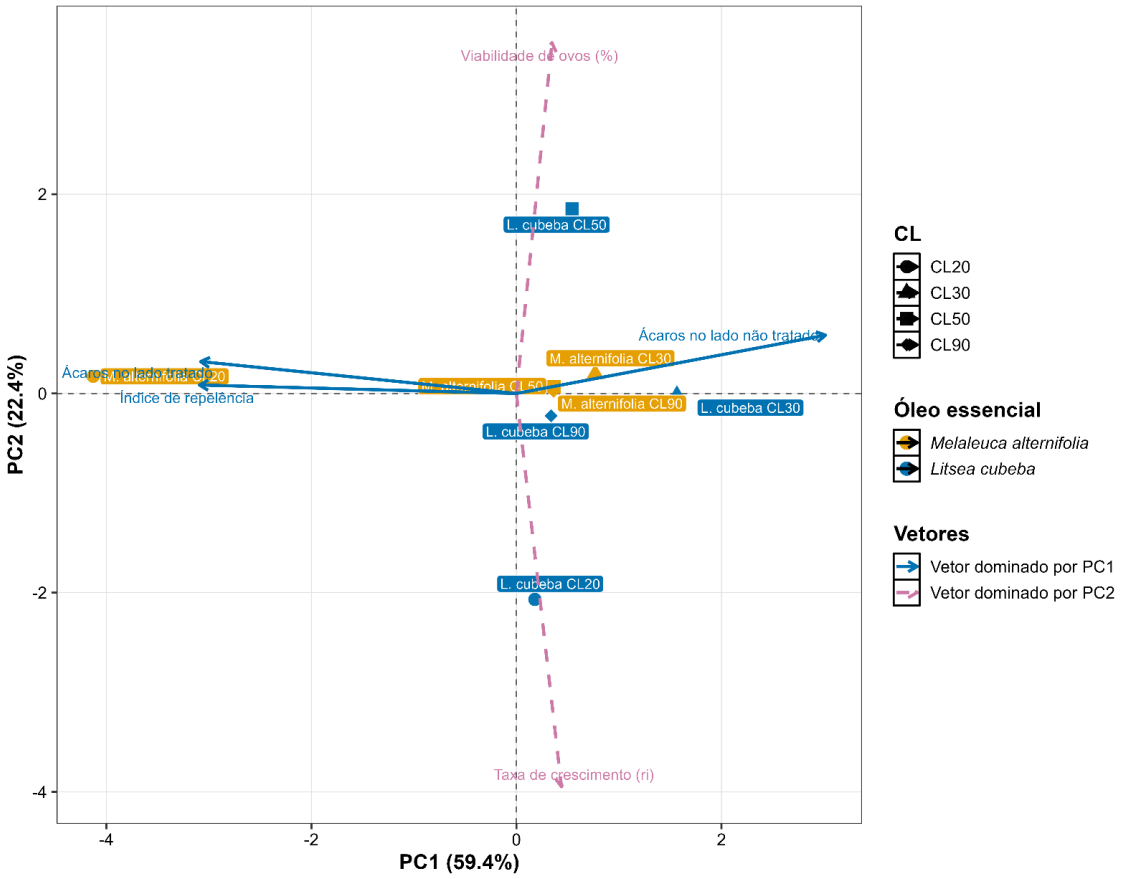


Figura 9. Análise de Componentes Principais (PCA) mostrando relações entre tratamentos e variáveis avaliadas

No presente estudo, a PCA demonstrou que a discriminação dos tratamentos foi determinada principalmente pelas respostas comportamentais relacionadas à repelência, enquanto os efeitos sobre a viabilidade dos ovos e a taxa instantânea de crescimento populacional contribuíram de forma complementar para a separação dos tratamentos. De forma

semelhante, Martins *et al*. (2025) observaram que a maior contribuição para o primeiro componente principal foi exercida pela concentração letal e pela repelência, ao passo que a viabilidade dos ovos e o crescimento populacional estiveram também associados ao segundo componente principal. Nesse sentido, ambos os estudos evidenciaram que a PCA permitiu integrar respostas letais e subletais em uma única abordagem, facilitando a identificação dos parâmetros que mais contribuíram para a diferenciação dos tratamentos e proporcionando uma interpretação mais abrangente da atividade acaricida dos óleos essenciais.

5 CONCLUSÕES

Os óleos essenciais de *Melaleuca alternifolia* e *Litsea cubeba* apresentam expressivo potencial acaricida, ovicida e de repelência sobre o ácaro-praga *Oligonychus punica*e, consolidando-se como bioacaricidas viáveis para manejo do ácaro. A bioatividade desses óleos essenciais são determinadas por seus perfis químicos, indicando que os monoterpenos majoritários terpinen-4-ol (no óleo de *M. alternifolia*) e os isômeros geranial e neral (no óleo de *L. cubeba*) atuam como os principais agentes biocidas responsáveis pela mortalidade e repelência.

A eficiência biológica de ambos os óleos essenciais é significativamente modulada pelas condições térmicas, evidenciando que as flutuações de temperatura alteram de forma diferencial a toxicidade por contato residual, a velocidade de volatilização dos constituintes químicos e a persistência desses óleos nos discos foliares. As concentrações subletais de ambos os óleos essenciais reduzem o crescimento populacional de *O. punicae*, sendo capazes ainda de afetar o comportamento desse ácaro, por induzir a repelência de fêmeas adultas.

REFERÊNCIAS

ADAMS, R.P. 2009. **Identification of essential oil components by Gas Chromatography Quadupole Mass Spectroscopy**. Allured Publishing Corporation. Carol Stream, Illinois, 804p.

ALIMI, D.; TRABELSI, N.; HAJRI, A.; BEN AMOR, M.; MEJRI, A.; JALLOULI, S.; SEBAI, H. Laboratory assessment of the acaricidal, repellent and anti-cholinesterase effects of *Melaleuca alternifolia* and *Chamaemelum nobile* essential oils against *Hyalomma scupense* ticks. **Veterinary Research Communications**, v. 48, n. 3, p. 1379–1391, 2024. DOI: https://doi.org/10.1007/s11259-024-10313-3

ALVES, J. J. A.; MATOS, C. H. C.; OLIVEIRA, C. R. F.; PEREIRA, V. L. C.; BEZERRA, C. W. F.; FONSECA, K. S. Are vegetable adjuvants increasing the efficiency of the aqueous extract of Sarcomphalus joazeiro on *Tetranychus ludeni*?. **Bulletin of Insectology**, v. 76, n. 1, p. 9-19, 2023.

ATTIA, S; GRISSA, K; L; LOGNAY, G.; BITUME, E.; HANCE, T.; MAILLEUX, A. C. A review of the major biological approaches to control the worldwide pest *Tetranychus urticae* (Acari: Tetranychidae) with special reference to natural pesticides, **Journal of Pest Science**, v. 86, n. 3, 361-386, 2013. https://doi.org/10.1007/s10340-013-0503-0.

BARBOSA D. R. S (2025) **ProbitCalc** (v1.1.0) [software]. Zenodo. Disponível em: https://doi.org/10.5281/zenodo.17401641.

BAKKALI, F.; AVERBECK, S.; AVERBECK, D.; IDAOMAR, M. Biological effects of essential oils – A review. **Food and Chemical Toxicology**, v. 46, n. 2, p. 446-475, 2008. https://doi.org/10.1016/j.fct.2007.09.106.

BOROTOVÁ, P.; GALOVIČOVÁ, L.; VUKOVIC, N.L.; VUKIC, M.; TVRDÁ, E.; KAČÁNIOVÁ, M. Chemical and Biological Characterization of *Melaleuca alternifolia* Essential Oil. **Plants**, v. *11*, p. 1-17, 2022. DOI: https://doi.org/10.3390/plants11040558.

BRASIL. Ministério da Agricultura, Pecuária e Abastecimento. **AGROFIT:** sistema de agrotóxicos fitossanitários. 2026. Disponível em: https://agrofit.agricultura.gov.br/agrofit_cons/principal_agrofit_cons. Acessado em: 08 ago. 2026.

CAMILO, C. J.; NONATO, C. de F. A.; GALVÃO-RODRIGUES, F. F.; COSTA, W. D.; CLEMENTE, G. G.; MACEDO, M. A. C. S.; RODRIGUES, F. F. G.; COSTA, J. G. M. Acaricidal activity of essential oils. **Trends in Phytochemical Research**, v. 1, n. 4, ´p.183-198, 2017.

CROOKER, A. Embryonic and postembryonic development. In: HELLE, W.; SABELIS, M. W. (ed.). **Spider mites: their biology, natural enemies and control**. Amsterdam: Elsevier, 1985. v. 1A, p. 149-160. ISBN 978-0444424341.

DANNA, C.; MALASPINA, P.; CORNARA, SMERIGLIO, A.; TROMBETTA, D.; FEO, V.; VANIN, S. Eucalyptus essential oils in pest control: a review of chemical composition and applications against insects and mites. **Crop Protection**, v. 176, 2024.

DOU, Y., AN, J., YAN, X., DANG, Z., GUO, J., GAO, Z., LIU, X., WANG, Q., ZHANG, Y. Influence of pre-exposure time on the toxicities of different temperature effect insecticides to *Apolygus lucorum*. **PLoS ONE**, v. 17, p. 1-8, 2022. DOI: https://doi.org/10.1371/journal.pone.0272429.

EMBRAPA FLORESTAS. Perguntas e respostas: eucalipto. Colombo: Embrapa Florestas, 2019. Disponível em: Portal Embrapa – Perguntas e respostas sobre eucalipto. Acesso em: 15 set. 2026.

ENAN, E. E. Molecular and pharmacological analysis of an octopamine receptor from American cockroach and fruit fly in response to plant essential oils. Archives of Insect Biochemistry and Physiology, v. 59, n. 3, p. 161-171, 2005. https://doi.org/10.1002/arch.20065.

FARAG, S. M.; MOUSTAFA, M. A. M.; FÓNAGY, A.; KAMEL, O. M. H. M.; ABDEL-HALEEM, D. R. Chemical composition of four essential oils and their adulticidal, repellence, and field oviposition deterrence activities against *Culex pipiens* L. (Diptera: Culicidae). **Parasitology Research,** v. 123, art. 110, 2024. DOI: https://doi.org/10.1007/s00436-024-08118-z

FERES, R. J. F.; LOFEGO, A. C.; OLIVEIRA, A. R. Ácaros plantícolas (Acari) da "Estação Ecológica do Noroeste Paulista", estado de São Paulo, Brasil. **Biota Neotropica**, v. 5, n. 1, 2005. https://doi.org/10.1590/S1676-06032005000100005.

FERRAZ, J. C. B.; SILVA, P. R. R.; AMARANES, M. P.; MELO, J. W. S.; DE LIMA, D. B.; FRANÇA, S. M. Biology and fertility life table of *Oligonychus punicae* Hirst (Acari: Tetranychidae) associated with eucalyptus in a clonal minigarden. **Systematic and Applied Acarology**, v. 25, n. 1, p. 103-112, 2020a. https://doi.org/10.11158/saa.25.1.8.

FERRAZ, J. C. B.; SILVA, P. R. R.; AMARANES, M. P.; SANTOS, M. F.; MELO, J. W. S.; DE LIMA, D. B.; FRANÇA, S. M. *Oligonychus punicae* as a pest of *Eucalyptus urophylla* in cultivation and potential new host species in Brazil. **International Journal of Acarology**, v. 45, n. 1–2, p. 75–78, 2019. https://doi.org/10.1080/01647954.2018.1543349.

FERRAZ, J. C. B.; SILVA, S. M.; FRANÇA, S. M.; SILVA, P. R. R.; MELO, J. W. S.; LIMA, D. B. Host preference, population dynamics, distribution, and injuries of *Oligonychus punicae* (Acari: Tetranychidae) in an eucalyptus clonal minigarden. **Systematic and Applied Acarology**, v. 25, n. 9, p. 1649-1660, 2020b. https://doi.org/10.11158/saa.25.9.10.

FERREIRA, A. C. *et al*. Chemical composition and acaricidal activity of essential oils from *Alpinia zerumbet, Bixa orellana, Mesosphaerum suaveolens* and *Syzygium cumini* against *Oligonychus punicae* on clonal seedlings of *Eucalyptus grandis*. **Crop Protection**, v. 199, e107412, 2026. DOI: http://dx.doi.org/10.1016/j.cropro.2025.107412.

FLECHTMANN, C. A. H. **Dois ácaros novos para o eucalipto, com uma lista daqueles já assinalados para esta planta.** Piracicaba, SP: IPEF, v. 1, n. 23, p. 43-46, 1983.

FLECHTMANN, C. H. W.; BAKER, E. W. A preliminary report on the Tetranychidae (Acarina) of Brazil. **Annals of the Entomological Society of America**, v. 63, n. 1, p. 156–163, 1970. DOI: https://doi.org/10.1093/aesa/63.1.156.

FU, Q.; ZENG, B.; XIAO, Q.; HE, B.; HUANG, C.; BAO, M. **Essential oils for the treatment of dust mites**. E3S Web of Conferences, v. 271, p. 04032, 2021. https://doi.org/10.1051/e3sconf/202127104032.

GAO, J.; WANG, L.; PAN, Z.; LIU, S.; GU, Q.; SONG, D. Insecticide activity of essential oil of *Litsea cubeba* (Lour.) Pers. and its major component citral against *Drosophila suzukii*: Histological and ultrastructural assessment. **Journal of Natural Pesticide Research**, v. 8, p. 100068, 2024. DOI: https://doi.org/10.1016/j.napere.2024.100068

GEORGE, D. R.; SPARAGANO, O. A. E.; PORT, G.; OKELLO, E.; SHIEL, R. S.; GUY, J. H. Environmental interactions with the toxicity of plant essential oils to the poultry red mite *Dermanyssus gallinae*. **Med. Vet. Entomol**, v. 24, p. 1–8, 2010. DOI: https://doi.org/10.1111/j.1365-2915.2009.00855.x.

GURUSUBRAMANIAN, G.; KRISHNA, S. S. The effects of exposing eggs of four cotton insect pests to volatiles of *Allium sativum* (Liliaceae). **Bulletin of Entomological Research**, v. 86, n. 1, p. 29–31, 1996. DOI: https://doi.org/10.1017/S0007485300052160

HAN, J.; KIM, S. I.; CHOI, B. R.; LEE, S. G.; AHN, Y. J. Fumigant toxicity of lemon eucalyptus oil constituents to acaricide-susceptible and resistant *Tetranychus urticae*. **Pest Management Science**, v. 67, p. 1583–1588, 2011. DOI: 10.1002/ps.2216.

HASANVAND, I.; JAFARI, S.; KHANJANI, M. Effect of temperature on development and reproduction of *Tetranychus kanzawai* (Tetranychidae) fed on apple leaves. **Int. J. Acarol**, v. 46, p. 31–40. DOI: https://doi.org/10.1080/01647954.2019.1694582.

HEINZ-CASTRO, R. T. Q.; ARREDONDO-VALDÉS, R.; ORDAZ-SILVA, S.; MÉNDEZ-CORTÉS, H.; HERNÁNDEZ-JUÁREZ, A.; CHACÓN-HERNÁNDEZ, J. C. Evaluation of ethanol extract of Moringa oleifera Lam. as acaricide against Oligonychus punicae Hirst (Trombidiformes: Tetranychidae). **Insects**, v. 12, n. 5, p. 476, 2021. https://doi.org/10.3390/insects12050476.

HOY, M. A. **Agricultural acarology: Introduction to integrated mite management**. Management. CRC Press, 1. ed., 2011. https://doi.org/10.1201/b10909.

IBGE (Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística). **Boletim Serviço Nacional de Informações Florestais**. 66 p., 2021.

IMBACHI-LÓPEZ, K.; ESTRADA-VENEGAS, E. G.; EQUIHUA-MARTÍNEZ, A. **Biología de *Oligonychus punicae* (Hirst, 1926) (Acari: Tetranychidae) en Persea americana cv. Hass en condiciones de laboratório.** Memorias del V Congreso Latinoamericano del Aguacate, 2017**.**

ISMAN, M. B. Commercial development of plant essential oils and their constituents as active ingredients in bioinsecticides. **Phytochemistry Reviews,** v. 19, p. 235–241, 2020. https://doi.org/10.1007/S11101-019-09653-9.

INAK, E.; ÇOBANOĞLU, S.; AUGER, P. Molecular identification and phylogenetic analysis of spider mites (Prostigmata: Tetranychidae) of Turkey. **Experimental and Applied Acarology**. v.87, p. 195–205, 2022. https://doi.org/10.1007/s10493-022-00728-5.

JEGEDE, O. O.; OWOJORI, O. J.; RÖMBKE, J. Temperature influences the toxicity of deltamethrin, chlorpyrifos and dimethoate to the predatory mite *Hypoaspis aculeifer* (Acari) and the springtail *Folsomia candida* (Collembola). **Ecotoxicology and Environmental Safety**, v. 140, p. 214-221, 2017. DOI: https://doi.org/10.1016/j.ecoenv.2017.02.046

JIANG, Z.L.; AKHTAR, Y.; ZHANG, X.; BRADBURY, R.; ISMAN, M.B. Insecticidal and feeding deterrent activities of essential oils in the cabbage looper, *Trichoplusia ni* (Lepidoptera: Noctuidae). **Journal of Applied Entomology**, v. 136, n. 3, p. 191 – 202, 2012.

JULIANO, S. A. 2001. **Nonlinear curve fitting:** predation and functional response curves, p. 159–182. In S. M. Scheiner and J. Gurevitch (eds.), Design and analysis of ecological experiments, 2nd ed. Chapman and Hall, New York.

KUMAR, P.; MISHRA, S.; MALIK, A.; SATYA, S. Compositional analysis and insecticidal activity of *Eucalyptus globulus* (family: Myrtaceae) essential oil against housefly (*Musca domestica*). **Acta Tropica**. v. 122, n. 2, p. 212-218, 2012. https://doi.org/10.1016/j.actatropica.2012.01.015.

LEEUWEN, T. V.; TIRRY, L.; YAMAMOTO, A.; NAUEN, R.; DERMAUW, W. The economic importance of acaricides in the control of phytophagous mites and an update on recent acaricide mode of action research. **Pesticide Biochemistry and Physiology**, v. 121, p. 12-21, 2015. https://doi.org/10.1016/j.pestbp.2014.12.009.

LI, Y. F.; DOU, Y. N.; AN, J. J.; TU, X. W.; LV, H. Y.; PAN, W. L.; ZHANG, K.; WANG, Z.; LIU, Y. Temperature-dependent variations in toxicity of diamide insecticides against three lepidopteran insects. **Ecotoxicology**, v. 29, p. 607-612, 2020. DOI: https://doi.org/10.1007/s10646-020-02181-9

LI, S.; LI, H.; ZHOU, Q.; ZHANG, F. DESNEUX, N.; WANG, S.; SHI, L. Essential oils from two aromatic plants repel the tobacco whitefly *Bemisia tabaci*. **Journal of Pest Science**, v. 95, p. 971–982, 2022. https://doi.org/10.1007/s10340-021-01412-0.

MAES, C.; BOUQUILLON, S.; FAUCONNIER, M. L. Encapsulation of essential oils for the development of biosourced pesticides with controlled release: A review. **Molecules**, v. 24, n. 14, p. 2539, 2019. https://doi.org/10.3390/molecules24142539.

MARTINS, H. P. F.; SILVA, G. L.; SILVA, E. P.; ROJAS, M. O. A. I.; GONÇALVES, F. J. T.; MARQUES, I. S.; NEGREIROS, M. V. S.; MORAIS, V. A. L. L.; SOUSA, F. C.; CANTANHEDE FILHO, A. J.; et al. Multitarget acaricidal activity of essential oils from *Alpinia zerumbet* and *Mesosphaerum suaveolens* against *Tetranychus urticae*. **Insects**, v. 16, p. 1119, 2025. DOI: 10.3390/insects16111119.

MATSUDA T, KOZAKI T, ISHII K, GOTOH T. Phylogeny of the spider mite sub-family Tetranychinae (Acari: Tetranychidae) inferred from RNA-Seq data. **PLoS One**, v. 13, n, 1-14, 2018. https://doi.org/10.1371/journal.pone.0203136

MIGEON A, DORKELD F. **Spider Mites Web:** a comprehensive database for the Tetranychidae. Disponível em: https://www1.montpellier.inrae.fr/CBGP/spmweb/public/. Acessado em 25 abr. 2026.

MORAES, G. J.; CASTILHO, R. C.; FLECHTMANN, C. H. W. **Manual de acarologia – Acarologia Básica e ácaros de plantas cultivadas no Brasil.** Piracicaba: FEALQ, 2024. v. 2, 485 p. ISBN 978-65-89722-58-8.

MORAES, G. J.; FLECHTMANN, C. H. W. **Manual de acarologia: ácaros de importância agrícola e ambiental**. Ribeirão Preto: Holos, 2008. 308 p. ISBN 978-8586699634.

MOTA, J.; BARBOSA, L.; MARCHIORO, C. Suitable areas for invasive insect pests in Brazil and the potential impacts for *Eucalyptus* forestry. **Pest management science**, v. 78, n. 6, p. 2596-2606, 2022. https://doi.org/10.1002/ps.6891.

MUSHTAQ, H. M. S.; KAMRAN, M.; SALEH, A. A.; ALATAWI, F. J. Evidence for reconsidering the taxonomic status of closely related *Oligonychus* species in *punicae* complex (Acari: Prostigmata: Tetranychidae). **Insects,** v. 14, n. 1, 2023. https://doi.org/10.3390/insects14010003.

NNAMDI, G. N.; LI, N. Insecticidal Activity of *Litsea cubeba* Essential Oil: A Short Review. **International Journal of Life Science and Agriculture Research**, v. 5, n. 6, p. 486-492, 2026.

PALERMO, D.; GIUNTI, G.; LAUDANI, F.; PALMERI, V.; CAMPOLO, O. Essential oil-based nano-biopesticides: formulation and bioactivity against the confused flour beetle *Tribolium confusum*. **Sustainability,** v. 13, 2021. https://doi.org/10.3390/SU13179746.

PAN, Z.; LIU, S.; CHEN, Y. C.; WANG, Y. D.; GU, Q.; SONG, D. As natural phytocide: Biomarker assessment of *Litsea cubeba* (Lour.) Persoon essential oil against *Drosophila suzukii* Matsumura (Diptera: Drosophilidae). **Industrial Crops and Products**, v. 187, p. 115421, 2022. DOI: https://doi.org/10.1016/j.indcrop.2022.11542.

PARK, J.; LEE, H.; CHUNG, N. Acaricidal and repellent activities of *Litsea cubeba* (Lour.) oil and 3,7-dimethyl-2,6-octadienal against *Haemaphysalis longicornis* (Acari: Ixodidae). **Applied Biological Chemistry**, v. 64, n. 88, p. 1-9, 2021.

PAVELA, R. Essential oils for the development of eco-friendly mosquito larvicides: a review. **Industrial Crops and Products**, v. 76, p. 174-187, 2015. DOI: 10.1016/j.indcrop.2015.06.050.

PEREIRA, F. F.; ANJOS, N.; ALMADO, R. P.; RODRIGUES, L. A. L. Primeiro registro de Oligonychus yothersi (McGregor) (Acari: Tetranychidae) em Eucalyptus grandis Hill ex Maiden no Brasil. **Revista Árvore**, v. 29, n. 4, p. 657-659, 2005.

PINTO, R.; FERREIRA, J. A. M.; PIRES, E. M.; ZANUNCIO, J. C. New record and characteristics of damage caused by Oligonychus yothersi on *Eucalyptus urophylla*. **Phytoparasitica**, v. 40, p. 143–145, 2012.

QUEIROZ, D. L.; SOLIMAN, E. P.; BURCKHARDT, D. Principais pragas em viveiros de mudas de eucalipto. In: LEMES, P. G.; ZANUNCIO, J. C. (org.). **Novo Manual de Pragas Florestais Brasileiras.** Montes Claros: Instituto de Ciências Agrárias da UFMG, 2021. cap. 6, p. 144-167. ISBN 978-65-00-22108-4.

RAMÍREZ-DÁVILA, J. F.; FIGUEROA-FIGUEROA, D. K.; TAPIA-RODRÍGUEZ, A.; GONZÁLEZ-HUERTA, A. Spatial modeling of red spider mite Oligonychus punicae (Acari: Tetranychidae) in avocado crop. **Florida Entomologist**, v. 106, n. 4, p.211-219, 2023. https://doi.org/10.1653/024.106.0402.

REIS, P. R.; ZACARIAS, M. S. **Ácaros em cafeeiro.** Belo Horizonte: EPAMIG, 2007.

REYES-ZEPEDA, F.; HEINZ-CASTRO, R. T. Q.; OLAZARAN-SANTIBAÑEZ, F. E.; ORDAZ-SILVA, S.; PEDRO-MÉNDEZ, J. G.; CHACÓN-HERNÁNDEZ, J. C. Evaluation of ethanolic powdered extract of *Magnolia tamaulipana* Vazquez against O*ligonychus punicae* Hirst (Trombidiformes: Tetranychidae). **Plants**, v. 11, n. 13, 2022. https://doi.org/10.3390/plants11131711.

RIAHI, E.; SHISHEHBOR, P.; NEMATI, A. R.; SAEIDI, Z. Temperature effects on development and life table parameters of *Tetranychus urticae* (Acari: Tetranychidae). **J. Agric. Sci. Technol**, v. 15, p. 661–672, 2013.

RINCÓN, R. A.; RODRÍGUEZ, D.; COY-BARRERA, E. Botanicals Against *Tetranychus urticae* Koch under laboratory conditions: A survey of alternatives for controlling pest mites. **Plants**, v. 8, n. 8, p. 272, 2019. DOI: https://doi.org/10.3390/plants8080272.

RIOJA, C. et al. Spider mite feeding mediated by salivary proteins in Chelicerae. **Frontiers in Plant Science**, v. 8, e1425, p. 1-14, 2017. DOI: https://doi.org/10.3389/fpls.2017.01425.

ROBERTSON, J. L.; JONES, M. M.; OLGUIN, E.; ALBERTS, B**. Bioassays with Arthropods.** 3. ed. Boca Raton: CRC Press, 2017.

SATO, M. E.; VERONEZ, B.; STOCCO, R. S. M.; QUEIROZ, M. C. V.; GALLEGO, R. Spiromesifen resistance in *Tetranychus urticae* (Acari: Tetranychidae): Selection, stability, and monitoring. **Crop Protection**, v. 89, p. 278-283, 2016. DOI: https://doi.org/10.1016/j.cropro.2016.08.003.

SANTAROSA, E.; PINTO JÚNIOR, J. E.; GOULART, I. C. G. R.; PENTEADO JÚNIOR, J. F. Importância sócioeconômica e principais usos do eucalipto. In: SANTAROSA, E.; PENTEADO JÚNIOR, J. F; GOULART, I. C. G. R. **Cultivo de eucalipto em propriedades rurais: diversificação da produção e renda**. Brasília, DF: Embrapa, p. 13-22, 2014.

SILVA, R. B. G.; SIMÕES, D.; SILVA, C. R. R.; DELGADO, L. G. M.; SANTOS, R. L.; MUNIS, R. A. Produção de mudas clonais de Eucalyptus em viveiros florestais. In: SILVA, M. C. A. C. (Org.). **Tópicos especiais sobre a cultura do eucalipto.** Bauru: SP, Spessotto, 2022.

SILVA, O. D. V.; SILVA, P. R. R.; SILVA, L. R.; BRITO, R. C; DUTRA, K; NAVARRO, D; **BARBOSA, D. R. S.**; FRANCA, S. M. Toxicity of essential oils on Callosobruchus maculatus in grains of *Vigna unguiculata*. **Journal of Plant Diseases and Protection**, v. 132, 2025.

SILVA, W. SANTOS, R. S.; VASCONCELOS, A. da; **AZEVEDO, T. da S. Infestação de ácaro tetraniquídeo (Acari: Tetranychidae) em mamoeiro no estado do Acre**. Brasília, DF: Embrapa, 2018. Disponível em: https://www.embrapa.br/en/busca-de-publicacoes/-/publicacao/1089849/infestacao-de-acaro-tetraniquideo-acari-tetranychidae-em-mamoeiro-no-estado-do-acre. Acesso em: 29 jun. 2026.

SANTANA, M. F.; OLIVEIRA, V.; BREDA, M. O.; BARBOSA, S. Host preference, acaricides effects and population growth of *Polyphagotarsonemus latus* (Banks) (Acari: Tarsonemidae) on white and colored cotton cultivars. **Pest Management Science**, v. 77, p.217–223, 2020.

REIS, C. A. F.; MOREIRA, J. M. M. A. P.; SANTOS, A. M.; MORAES, A. C. **Diagnóstico da produção de eucalipto no Distrito Federal e em Goiás**. Colombo: Embrapa Florestas, 2024.

SANTOS, M. C.; TEODORO, A. V.; MENEZES, M. S.; PINTO-ZEVALLOS, D. M.; ARRIGONI-BLANK, M. F.; OLIVEIRA, E. M. C.; SAMPAIO, T. S.; FARIAS, A. P.; COELHO, C. R.; BLANK, A. F. Bioactivity of essential oil from Lippia gracilis Schauer

against two major coconut pest mites and toxicity to a non-target predator. **Crop Protection**, v. 125, 2019. https://doi.org/10.1016/j.cropro.2019.104913.

SANTOS, M. F.; SILVA, P. R. R.; AMARANES, M. P.; FERRAZ, J. C. B.; BRIOZO, M. E. O.; FRANÇA, M. S. Bioeficácia de produtos à base de nim (Azadirachta indica A. Juss.) no manejo de Oligonychus punicae (Acari: Tetranychidae) em eucalipto. **Ciência Florestal**, v. 32, n. 2, 2022. https://doi.org/10.5902/1980509855272.

SAS Institute**. User'sguide**, version 8.02, TS level 2MO. SAS Institute Inc., Cary, NC. 2001.

SEGOVIA, C. P.; CABRERA, C. C.; SILOS-ESPINO, H.; MURAIRA, I. G.E L.; SALCEDO, M. M.; MUNGUIA, A. M. G. **Evaluación de extractos etanólicos de plantas silvestres sobre *Oligonychus punicae* Hirst y *Oligonychus perseae* Tuttle, Baker y Abbatiello, 1976 (Trombidiformes: Tetranychidae), en el cultivo de aguacate en México.** Atena Editora, 2022.

SEO, S.-M.; KIM, S.-I.; SHIN, Y.-H.; YOUN, H.-J.; AHN, Y.-J. Acaricidal activity of *Litsea cubeba* fruit essential oil and its constituents against toxic and nontoxic *Tetranychus urticae*. **Journal of Economic Entomology**, v. 102, n. 6, p. 2101–2106, 2009. https://doi.org/10.1603/029.102.0612.

SHEASHA, A.; HOSNY, A. E.; KERATUM, A.; ABDELRHMAN, H.; AL-HARBI, N. A.; AL-QAHTANI, S. M.; ABDELAAL, K. Efficacy of Some Plant Essential Oils Against two Spotted Spider Mite *Tetranychus urticae* under Laboratory Conditions. **Polish Journal of Environmental Studies**, v. 32, n. 4, p. 3291-3298, 2023. DOI: http://dx.doi.org/10.15244/pjoes/162615.

SILVA, R. B. G. da; SIMÕES, D.; SILVA, C. R. R.; DELGADO, L. G. M. SANTOS, R. L. dos S.; MUNIS, R. A. **Produção de mudas clonais de *Eucalyptus* em viveiros florestais**. In: SILVA, M. C. A. C. Tópicos especiais sobre a cultura do eucalipto. Bauru: SP, Spessotto, p. 41-76, 2022.

SILVA, Y. N. M.; SILVA, P. R. R.; BARBOSA, D. R. S.; CANTANHEDE FILHO, A. J.; GOMES, B. A.; RODRIGUES FILHO, E.; GOMES-NETO, A. V.; FRANÇA, S. M. Acaricidal potential of essential oils, isolated compounds, and synthetic products against *Tetranychus neocaledonicus* André (1933) (Acari: Tetranychidae) on lima bean (*Phaseolus lunatus* L.). **Systematic & Applied Acarology**, v. 30, n. 10, p. 1824-1845, 2025. DOI: https://doi.org/10.11158/saa.30.10.9

SOUSA, A. C. S.; CABRAL, E. L. R.; SILVA, G. L.; ROJAS, M. O. A. I.; MARQUES, I. S.; VIANA, A. M. A.; SILVA, G. N.; FRANÇA, S. M.; SILVA, P. R. R.; FERREIRA, A. C.;

CARVALHO, A. L.; DUTRA, K. A.; NAVARRO, D. M. A. F.; BARBOSA, D. R. S. Sustainable control of *Tetranychus neocaledonicus* André (1933) (Acari: Tetranychidae) on lima bean through essential oils. **Crop Protection, v.** 195, 2025. DOI: https://doi.org/10.1016/j.cropro.2025.107266.

SUSURLUK, H. Potential use of essential oils from Origanum vulgare and Syzygium aromaticum to control *Tetranychus urticae* Koch (Acari: Tetranychidae) on two host plant species. **PeerJ**, v. 11, e14475, 2023. DOI: 10.7717/peerj.14475.

TEODORO, A. V.; SENA FILHO, J. G. de; FERREIRA, J. M. S.; COELHO, C. R.; BRITO, D. R. B. **Uso de óleos vegetais no controle de pragas em plantas de jardins, hortas e pomares domésticos**. Aracaju: Embrapa Tabuleiros, 17 p., 2019.

THIELMANN, J.; MURANYI, P. Review on the chemical composition of *Litsea cubeba* essential oils and the bioactivity of its major constituents citral and limonene. **Journal of Essential Oil Research,** v. 31, n. 5, p. 361–378, 2019.

TORRES, E.; ÁLVAREZ-ACOSTA, C.; FERRAGUT, F.; HERNÁNDEZ-SUÁREZ, E. M. *Oligonychus perseae* (Tetranychidae) invasion in the Canary Islands: History, management and current situation. **Agronomy**, v. 14, n. 5, p. 920, 2024. https://doi.org/10.3390/agronomy14050920.

VAN LEEUWEN, T.; TIRRY, L.; YAMAMOTO, A.; NAUEN, R.; DERMAUW, W. The economic importance of acaricides in the control of phytophagous mites and an update on recent acaricide mode of action research. **Pesticide Biochemistry and Physiology**, v. 121, p. 12-21, 2015. DOI: https://doi.org/10.1016/j.pestbp.2014.12.009.

VÁSQUEZ, C.; APONTE, O.; MORALES, J.; SANABRIA, M.; GARCÍA, G. Biological studies of *Oligonychus punicae (*Acari: Tetranychidae) on grapevine cultivars. **Experimental and Applied Acarology**, v. 45, p. 59–69, 2008. https://doi.org/10.1007/s10493-008-9154-x.

TSAGANOU, F. K.; VASSILAKOS, T. N.; ATHANASSIOU, C. G. Influence of temperature and relative humidity on the efficacy of thiamethoxam for the control of three stored product beetle species. **Journal of Stored Products Research**, v. 92, p. 101784, 2021. DOI: https://doi.org/10.1016/j.jspr.2021.101784

WALTHALL, W. K.; STARK, J. D. Comparison of two population-level ecotoxicological endpoints: The intrinsic (r_m) and instantaneous (r_i) rates of increase. **Environmental Toxicology and Chemistry**, v. 16, n. 5, p. 1068-1073, 1997. DOI: https://doi.org/10.1002/etc.5620160529