

Chromobacterium subtsugae: metabólitos bioativos e aplicações na agricultura sustentável - uma revisão sistemática

Chromobacterium subtsugae: bioactive metabolites and applications in sustainable agriculture - a systematic review

Vinícius de Souza¹, Adailson Feitoza de Jesus Santos¹

¹Universidade do Estado da Bahia, Bahia, Brasil

Contato: adailsonmicrobiologia@gmail.com

Keyword

inseticida
bioinsumos
controle biológico
cromamida A
violaceína

RESUMO

O mercado de bioinsumos agrícolas desempenha um papel crucial na produção de alimentos e desenvolvimento sustentável, visto que a construção de tecnologias pautadas em agentes microbianos pode assegurar resiliência aos sistemas de cultivo e reduzir os impactos antrópicos sobre o planeta. Neste estudo, foi realizado um levantamento sistemático do potencial para agricultura de *Chromobacterium subtsugae*, incluindo o aparato gênico e funcional associado às suas atribuições no setor agrícola. Buscas foram conduzidas em bases de dados conforme o protocolo PRISMA e a triagem foi realizada conforme critérios de elegibilidade com produções entre 2007 e 2024. As buscas identificaram 3.896 referências, das quais 25 foram incluídas pelos critérios estabelecidos. Uma patente foi adicionada à revisão, totalizando 26 referências. Os estudos revelam a síntese de violaceína, cianeto de hidrogênio, quitinases e toxinas por cepas da espécie. Mecanismos inexplorados na espécie foram evidenciados neste estudo, como a produção de sideróforos associada à promoção de crescimento vegetal, além de dados escassos acerca da cromamida A, principal metabólito associado à ação inseticida da espécie. Cepas da espécie possuem atividade nematicida, acaricida e potencial inseticida contra espécies das ordens Coleoptera, Hemiptera, Diptera e Lepidoptera. Esses dados consolidam a espécie como uma ferramenta viável e sustentável para o setor agrícola, capaz de contribuir com a segurança alimentar global.

Palavras-Chave

insecticide
bioinputs
biological control
chromamide A
violacein

ABSTRACT

*The agricultural bioinput market plays a crucial role in crop production, once these technologies can ensure resilience in crop systems and reduce the anthropogenic impacts on the planet. In this study, a systematic review was conducted to assess the potential of *Chromobacterium subtsugae* for agriculture, evaluating its genetic and functional apparatus associated with its roles in the agricultural sector. Searches were performed in databases following the PRISMA protocol and screening was conducted based on eligibility criteria for studies published between 2007 and 2024. The searches identified 3,896 references, of which 25 were included. One patent was added to the review, totaling 26 references. These studies reveal the synthesis of violacein, hydrogen cyanide, chitinases and toxins by strains of this species. Unexplored mechanisms in the species were highlighted in this study, such as siderophore production associated with plant growth promotion, as well as data on chromamide A, the main metabolite linked to the insecticidal action of the species. Strains of this species exhibit nematicidal, acaricidal, and insecticidal potential against species from the orders Coleoptera, Hemiptera, Diptera, and Lepidoptera. These findings establish the species or its strains as a viable tool for the agricultural sector, which is capable of contributing to food security and global sustainability.*

Informações do artigo

Recebido: 29 de abril, 2025

Aceito: 13 de dezembro, 2025

Publicado: 30 de dezembro, 2025

Introdução

A agricultura desempenha um papel crucial para o desenvolvimento mundial, promovendo a segurança alimentar e contribuindo significativamente para o crescimento econômico das nações (Pathmudi et al., 2023). Todavia, a produção agrícola enfrenta crescentes desafios associados à aceleração da crise climática, gestão inadequada dos recursos hídricos e manejo de pragas e doenças. Esse cenário ameaça a produção de alimentos e compromete de forma significativa a saúde humana e os ecossistemas, demandando o desenvolvimento de iniciativas promissoras para o segmento (Seppelt et al., 2022).

Nesse contexto, microrganismos eficientes têm emergido como soluções inovadoras para o setor agrícola (Ajijah et al., 2023; Dias et al., 2024; Mal; Panchal, 2024; Poveda; Eugui, 2022). A construção de tecnologias sustentáveis baseadas em microrganismos destaca-se como uma ferramenta viável e complementar à agricultura convencional, assegurando maior produtividade e resiliência às culturas agrícolas, além de reduzir significativamente os impactos antrópicos sobre o planeta (Ayan et al., 2021; Basja et al., 2023). Esses agentes microbianos podem promover maior rendimento aos sistemas produtivos, atuando como biofertilizantes, biorremediadores, agentes na degradação da matéria orgânica, indução de resistência a estresses, além de promoverem o controle biológico de pragas e doenças (Rocha et al., 2024).

Dentre os agentes microbianos utilizados na produção de bioinsumos agrícolas, cepas de *Chromobacterium subtsugae* destacam-se por seu potencial no

biocontrole de pragas e doenças. Seu perfil metabólico multifuncional inclui a síntese de uma gama de compostos bioativos com elevado potencial biotecnológico para a agricultura (Martin; Blackburn, 2008). A versatilidade desses metabólitos posiciona *C. subtsugae* como um agente promissor no mercado de bioinsumos, uma vez que cepas da espécie podem atuar na redução no uso de pesticidas químicos, assegurando resiliência e sustentabilidade aos sistemas agrícolas.

Assim, este estudo objetivou conduzir um levantamento sistemático do potencial biotecnológico para agricultura de *C. subtsugae*, evidenciando o arcabouço gênico e perfil metabólico associados às suas atribuições em sistemas agrícolas.

Material e métodos

Bases de dados e estratégias de busca

O estudo foi conduzido conforme as recomendações do protocolo *Preferred Reporting Items for Systematic Review and Meta-Analysis* (PRISMA) (Page et al., 2021) com busca nas bases de dados *Scholar Google*, *Scientific Electronic Library Online (SciELO)*, *Scopus*, *PubMed*, *ScienceDirect* e *Web of Science*. A estratégia adotada, evidenciada na Tabela 1, consistiu na combinação dos vocábulos “*Chromobacterium subtsugae*”, “*Grandeveo*”, “agricultura”, “controle biológico”, “biocontrole”, “violaceína”, “inseticida” e “bioinseticida”. Os vocábulos foram combinados em inglês, português e espanhol, com auxílio dos operadores booleanos OR e AND.

Tabela 1. Estratégias de busca adotadas na revisão sistemática

Estratégia	Combinação dos vocábulos
1	" <i>Chromobacterium subtsugae</i> " AND "agriculture"
2	" <i>Chromobacterium subtsugae</i> " AND "agricultura"
3	" <i>Chromobacterium subtsugae</i> " AND ("biological control" OR "biocontrol")
4	" <i>Chromobacterium subtsugae</i> " AND ("controle biológico" OR "biocontrole")
5	" <i>Chromobacterium subtsugae</i> " AND ("control biológico" OR "biocontrol")
6	" <i>Chromobacterium subtsugae</i> " AND "Grandeveo"
7	" <i>Chromobacterium subtsugae</i> " AND "violacein"
8	" <i>Chromobacterium subtsugae</i> " AND "violaceína"
9	" <i>Chromobacterium subtsugae</i> " AND ("inseticida" OR "bioinseticida")
10	" <i>Chromobacterium subtsugae</i> " AND ("insecticida" OR "bioinsecticida")
11	" <i>Chromobacterium subtsugae</i> " AND ("insecticide" OR "insecticidal" OR "bioinsecticide" OR "bioinsecticidal")
12	" <i>Grandeveo</i> " AND "agriculture"
13	" <i>Grandeveo</i> " AND "agricultura"
14	" <i>Grandeveo</i> " AND ("biological control" OR "biocontrol")
15	" <i>Grandeveo</i> " AND ("controle biológico" OR "biocontrole")
16	" <i>Grandeveo</i> " AND ("control biológico" OR "biocontrol")
17	" <i>Grandeveo</i> " AND "violacein"
18	" <i>Grandeveo</i> " AND "violaceína"
19	" <i>Grandeveo</i> " AND ("inseticida" OR "bioinseticida")
20	" <i>Grandeveo</i> " AND ("insecticida" OR "bioinsecticida")
21z	" <i>Grandeveo</i> " AND ("insecticide" OR "insecticidal" OR "bioinsecticide" OR "bioinsecticidal")

Critérios de elegibilidade e exclusão

Foram selecionados estudos revisados por pares, redigidos em inglês, português ou espanhol, publicados entre 2007 e outubro de 2024. Dentre as categorias de estudos elegíveis, considerou-se: I) estudos de caracterização do microrganismo e seus metabólitos; II) estudos com dados genômicos da espécie, incluindo análises funcionais; III) estudos experimentais que demonstrassem as aplicações de *C. subtsugae* no setor agrícola. Foram excluídos estudos não condizentes com o escopo da revisão, livros, capítulos de livros, patentes, dissertações, teses e afins. Além disso, notas, relatórios, editoriais, textos de divulgação científica, trabalhos publicados em anais de eventos, revisões de literatura e estudos em outros idiomas foram desconsiderados.

Extração dos dados e seleção dos estudos

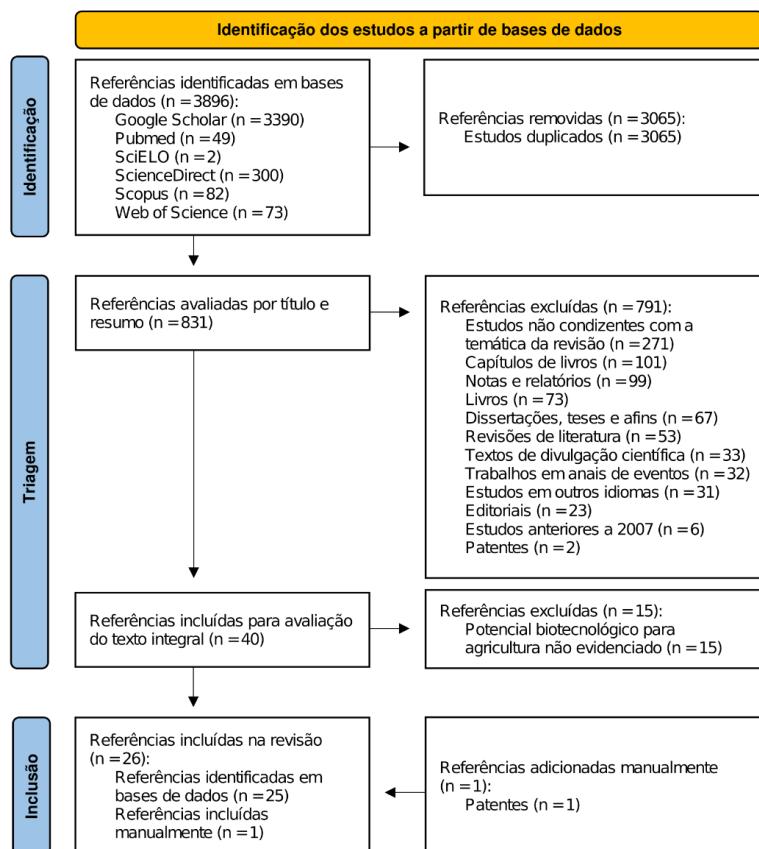
Os resultados obtidos através das buscas em bases de dados foram categorizados com o auxílio do software Rayyan (Ouzzani et al., 2016) para seleção dos estudos. Inicialmente, os dados foram analisados para detecção e remoção de referências duplicadas. As referências filtradas foram avaliadas por título e resumo e os estudos incluídos

foram submetidos à avaliação do texto integral. Os estudos condizentes com os critérios de elegibilidade delimitados foram integrados à revisão. Referências identificadas em revisão de escopo foram adicionadas manualmente à revisão.

Resultados e Discussão

Um total de 3.896 referências foram identificadas em bases de dados, das quais 3.065 foram removidas após detecção das duplicatas. Os 831 estudos restantes foram submetidos à avaliação de título e resumo, dentre os quais 791 (95,18%) foram desconsiderados pelos critérios de exclusão pré-estabelecidos e 40 (4,82%) foram avaliados por leitura completa. Todos os estudos desconsiderados por leitura integral ao fim da revisão ($n = 15$) não demonstraram potencial e atribuições da espécie no setor agrícola. Como resultado, 25 estudos foram identificados em bases de dados. A patente EP2632272B1 (Asolkar et al., 2019) evidenciada em revisões de escopo apresentou informações complementares aos dados obtidos nos estudos elegíveis, sendo adicionada manualmente ao presente estudo, totalizando 26 referências. O diagrama na Figura 1 ilustra as etapas de seleção conduzidas.

Figura 1. Fluxograma de seleção dos estudos baseado no protocolo PRISMA



Os estudos identificados em bases de dados foram publicados entre os anos de 2007 e 2024. A maioria das referências elegíveis foi redigida em inglês ($n = 24$), com

mínima parcela de referências em espanhol ($n = 1$) e ausência de fontes em português. Os estudos selecionados foram classificados em todas as categorias de estudos elegíveis, os quais podem ser observados na Tabela 2.

Tabela 2. Estudos encontrados conforme os critérios de elegibilidade delimitados na revisão

Título	Referência	Idioma	Categoria		
			i	ii	iii
Alternative Management Strategies and Impact of the Northern Root-Knot Nematode in Daylily Production	Howland et al. (2023)	Inglês			X
Bioensayos de insecticidas biológicos y orgánicos sintéticos en larvas del gusano de la mazorca del maíz [Helicoverpazea (Boddie) (Lepidoptera: Noctuidae)]	Sarmiento et al. (2021)	Espanhol			X
Can Insects Assess Environmental Risk? Movement Responses and Nymph Emergence in Response to Insecticides	Gyawali et al. (2023)	Inglês			X
Characterization of the insecticidal activity of <i>Chromobacterium subtsugae</i>	Martin e Blackburn (2008)	Inglês	X		X
<i>Chromobacterium subtsugae</i> sp. nov., a betaproteobacterium toxic to Colorado potato beetle and other insect pests	Martin et al. (2007a)	Inglês	X	X	X
Comparative effects of two novel Betaproteobacteria-based insecticides on <i>Myzus persicae</i> (Hemiptera: Aphididae) and <i>Phenacoccus madeirensis</i> (Hemiptera: Pseudococcidae)	Shannag e Capinera (2018)	Inglês			X
Comparative Insecticide Application Techniques (MicroSprinkler) Against <i>Drosophila suzukii</i> Matsumura (Diptera: Drosophilidae) in Highbush Blueberry	Mermer et al. (2022)	Inglês			X
Control of Key Pecan Insect Pests using Biorational Pesticides	Shapiro-Ilan et al. (2013)	Inglês			X
Control of Pecan Weevil With Microbial Biopesticides	Shapiro-Ilan et al. (2017)	Inglês			X
Cross-species activation of hydrogen cyanide production by a promiscuous quorum-sensing receptor promotes <i>Chromobacterium subtsugae</i> competition in a dual-species model	Loo et al. (2023)	Inglês	X	X	
Draft Genome Sequence of <i>Chromobacterium subtsugae</i> MWU12-2387 Isolated from a Wild Cranberry Bog in Truro, Massachusetts	Vöing et al. (2017)	Inglês			X
Draft Genome Sequences of Three <i>Chromobacterium subtsugae</i> Isolates from Wild and Cultivated Cranberry Bogs in Southeastern Massachusetts	Vöing et al. (2015)	Inglês			X
Effect of biopesticides on different <i>Tetranychus urticae</i> Koch (Acari: Tetranychidae) life stages	Golec et al. (2020)	Inglês			X
Effects of biological insecticides on the sugarcane aphid, <i>Melanaphis sacchari</i> (Zehntner) (Hemiptera: Aphididae), in sorghum	Calvin et al. (2021)	Inglês			X
Effects of Reduced-Risk Insecticides on Three Orchid Pests and Two Predacious Natural Enemies	Ray e Hoy (2014)	Inglês			X
Efficacy of biopesticides on spotted wing drosophila, <i>Drosophila suzukii</i> Matsumura in fall red raspberries	Fanning et al. (2017)	Inglês			X
Evaluation of organic insecticides for management of spotted-wing drosophila (<i>Drosophila suzukii</i>) in berry crops	Sial et al. (2019)	Inglês			X
Evaluation of organically acceptable insecticides as stand-alone treatments and in rotation for managing yellowmargined leaf beetle, <i>Microtheca ochroloma</i> (Coleoptera: Chrysomelidae), in organic crucifer production	Balusu e Fadamiro (2012)	Inglês			X
Impact of a biorational pesticide on the pecan aphid complex and its natural enemies	Oliveira-Hofman et al. (2021)	Inglês			X
Impact of organic insecticides on the survivorship and mobility of <i>Halyomorpha halys</i> (Stål) (Hemiptera: Pentatomidae) in the laboratory	Lee et al. (2014)	Inglês			X

Susceptibility of <i>Microtheca ochroloma</i> (Coleoptera: Chrysomelidae) to botanical and microbial formulations	Balusu e Fadamiro (2013)	Inglês	X
The genome of the insecticidal <i>Chromobacterium subtsugae</i> PRAA4-1 and its comparison with that of <i>Chromobacterium violaceum</i> ATCC 12472	Blackburn et al. (2016)	Inglês	X
Toxicity and efficacy of novel biopesticides for organic management of cucumber beetles on <i>Galia</i> muskmelons	Rogers et al. (2016)	Inglês	X
Toxicity of <i>Chromobacterium subtsugae</i> to Southern Green Stink Bug (Heteroptera: Pentatomidae) and Corn Rootworm (Coleoptera: Chrysomelidae)	Martin et al. (2007b)	Inglês	X
Whole-genome sequencing of <i>Chromobacterium subtsugae</i> strains exhibiting toxicity to <i>Drosophila melanogaster</i>	Clark e Broderik (2024)	Inglês	X

A revisão evidenciou uma gama de estudos que exploram características da espécie, abrangendo informações relevantes e cruciais associadas a aspectos funcionais, genéticos e metabólicos. Esta revisão explorou ainda diversos estudos com possíveis aplicações direta de cepas de *C. subtsugae* no setor agrícola, destacando o potencial para o desenvolvimento de bioinsumos, manejo sustentável de culturas e controle biológico de pragas e doenças.

Chromobacterium subtsugae: potencial biotecnológico para a agricultura

Frente à elevada demanda por tecnologias sustentáveis pautadas em recursos naturais, a elucidação do mecanismo de ação de ferramentas biológicas é importante para garantir avanços e determinar o melhor manejo nos sistemas agrícolas.

A consolidação de tecnologias pautadas em sistemas biológicos se mostra uma alternativa promissora aos padrões de produção agrícola atuais. Microrganismos eficientes emergem no cenário agrícola atual.

Nesse estudo, foi realizado um levantamento sistemático do potencial biotecnológico de *C. subtsugae* para agricultura. Esta espécie é um bastonete Gram-negativo com mobilidade flagelar, isolado primeiramente em solo florestal da região de Catoctin Mountain, Maryland, EUA (Martin et al., 2007a).

C. subtsugae é anaeróbica facultativa e apresenta crescimento ótimo entre 25 °C e 28 °C e em pH entre 6,5-8,0. A espécie possui tolerância a temperaturas de até 40 °C e concentrações de NaCl de até 2%. Suas colônias regulares e elevadas inicialmente apresentam coloração creme, com desenvolvimento da pigmentação violeta característica nas 24 horas subsequentes ao crescimento (Martin et al., 2007a).

A espécie é amplamente distribuída, com presença reportada em diferentes tipos de solos, incluindo amostras de solo florestal, pantanoso e rizosfera de plantas de arando-vermelho (*Vaccinium macrocarpon* Aiton) (Vöing et al., 2017; Vöing et al., 2015; Clark; Broderick, 2024).

Arcabouço gênico de *C. subtsugae* revela um genoma especializado em metabólitos secundários

O aparato gênico das cepas PRAA4-1, ATCC 31532, ΔvioS, MWU3525, MWU2576, MWU2920 e MWU12-2387 revela propriedades e mecanismos de interesse agronômico da espécie. Análises genômicas conduzidas por Blackburn et al. (2016), Clark e Broderick (2024), Vöing et al. (2015) e Vöing et al. (2017) indicam um genoma circular altamente especializado na síntese de metabólitos secundários com tamanho médio de 4.7 Mb e conteúdo médio de G + C equivalente a 64,8%. O intrincado conjunto de rotas metabólicas evidenciado no arcabouço gênico reflete o potencial do microrganismo através da síntese de violaceína, cianeto de hidrogênio, sideróforos, enzimas, além de toxinas com ação inseticida.

Metabólitos bioativos e potencial para agricultura

A síntese de violaceína pela espécie é reportada como o principal mecanismo que confere ao microrganismo potencial uso para agricultura. O pigmento violeta é responsável pela coloração característica de suas colônias, sendo sintetizado através da condensação e rearranjo de duas moléculas de L-triptofano. A molécula é caracterizada por expressiva atividade inseticida e antibacteriana, consolidando importantes mecanismos de interesse agronômico (Martin; Blackburn, 2008). No entanto, apesar de possuir ação bactericida, referências que descrevam a aplicação de *C. subtsugae* no controle de fitopatógenos bacterianos não foram identificadas.

Adicionalmente, o cianeto de hidrogênio (HCN) sintetizado por cepas de *C. subtsugae* pode representar um mecanismo eficiente de biocontrole. O composto, sintetizado através da conversão da glicina por enzimas codificadas pelo agrupamento gênico *hcnABC*, estabelece toxicidade atuante contra organismos aeróbicos, inibindo a ação de complexos enzimáticos envolvidos em processos respiratórios (Loo et al., 2023).

A diminuição do aporte de oxigênio em pragas de interesse agrícola, mediada pelo metabólito, reflete a diversidade de mecanismos de ação de *C. subtsugae*, visto que compostos distintos atuam em conjunto na atividade antagonista, consolidando o potencial evidenciado no presente estudo (Fanning et al., 2017; Golec et al., 2020; Howland et al., 2023).

A expressão gênica desses compostos é regulada pelo *quorum sensing*, um sistema de sinalização dependente da densidade populacional caracterizado pela ação autoindutora de acil-homoserinas lactonas (AHL). A interação dessas moléculas sinalizadoras com fatores de transcrição citoplasmáticos confere à *C. subtsugae* a capacidade de coordenar sua expressão gênica a nível populacional, além de ativar a transcrição de genes associados à sobrevivência e adaptação (Loo et al., 2023).

A presença de genes associados à produção de sideróforos evidenciada por Vöing et al. (2015) e Vöing et al. (2017) representa um mecanismo ainda inexplorado na espécie. Esses compostos possuem elevado interesse biotecnológico, desempenhando papel crucial na promoção de crescimento vegetal, auxiliando na disponibilidade de ferro às culturas e diminuindo a incidência de fungos fitopatogênicos no solo. Todavia, a eficiência de *C. subtsugae* em promover crescimento vegetal e inibir patógenos fúngicos não foi evidenciada nesse estudo. O aparato bioquímico da espécie sugere ainda a produção de enzimas relacionadas à atividade antagonista. A anotação genômica das cepas MWU3525, MWU2576 e MWU2920 conduzida por Vöing et al. (2015) revela a produção de uma gama de quitinases extracelulares, cuja atividade hidrolítica pode representar um mecanismo eficaz com ação inseticida.

Cromamida A: um mecanismo inexplorado

O expressivo potencial inseticida da espécie está também correlacionado à produção de toxinas, conforme evidenciado nas análises genômicas (Blackburn et al., 2016). A patente EP2632272B1 relaciona a atividade inseticida de *C. subtsugae* à produção de cromamida A, um peptídeo cíclico constituído por três unidades dos aminoácidos leucina (Leu), valina (Val) e glutamina (Glm). A cromamida A apresentou uma taxa significativa ($> 60\%$) de mortalidade larval contra o lepidóptero *Trichoplusia ni* (Hubner, 1803), uma praga polífaga de espécies de interesse agrícola, como soja e algodão (Asolkar et al., 2019). Essas informações podem representar uma ferramenta sustentável para o manejo de pragas, embora dados acerca da funcionalidade e mecanismos de ação da molécula sejam escassos.

Perfil multifuncional de *C. subtsugae* e suas atribuições em sistemas de cultivo

A ação sinérgica desses compostos evidencia *C. subtsugae* como um microrganismo eficiente para uso agrícola focado na sustentabilidade do sistema de produção. Nesse contexto, o bioinseticida Grandevo®,

formulado com base em *C. subtsugae* PRAA4-1 pela empresa Marrone Bio Innovations (MBI), apresenta alto rendimento no cultivo de plantas ornamentais e culturas agrícolas, atuando na redução de fecundidade, ovoposição, alimentação e atividade metabólica de artrópodes praga (Sarmiento et al., 2021). Nesse estudo, foi evidenciada uma gama de aplicações de *C. subtsugae* no controle biológico de nematóides, ácaros e insetos.

C. subtsugae no manejo sustentável de nematóides

Cepas de *C. subtsugae* possuem potencial contra nematóides, cujas infestações causam prejuízos significativos às culturas agrícolas e ornamentais. O manejo dessas pragas é complexo e limitado, evidenciando a necessidade de novas abordagens de controle com foco em tecnologias mais sustentáveis. Nesse contexto, Howland et al. (2022) evidenciaram potencial significativo de *C. subtsugae* PRAA4-1 no controle de *Meloidogyne hapla* (Chitwood, 1949), responsável por atrofamento e podridão radicular em plantas ornamentais. O estudo revelou que o manejo baseado em *C. subtsugae* promoveu uma redução equivalente a 37% no nível populacional de *M. hapla*, além de redução na infestação radicular em *Hemerocallis* sp., quando comparado ao tratamento controle. Esses dados revelam que o uso de *C. subtsugae* pode configurar como uma importante ferramenta no manejo integrado do nematoide avaliado, reduzindo os impactos negativos causados pelo uso apenas de ferramentas químicas.

Atribuições de *C. subtsugae* no controle de ácaros

Dentre as atribuições de *C. subtsugae* para o setor agrícola, é possível destacar o potencial acaricida da espécie. O produto Grandevo® promoveu redução significativa no percentual de sobrevivência de fêmeas adultas de *Tenuipalpus pacificus* (Baker, 1945). A aplicação apresentou resultados satisfatórios de biocontrole da praga, com percentual de mortalidade de 70, 76 e 84% após 24, 48 e 72h, respectivamente (Ray; Hoy, 2014). Adicionalmente, Golec et al. (2020) evidenciaram redução de 72.5% na taxa de fecundidade e número de ovos de *Tetranychus urticae* (Koch, 1836), uma praga responsável por perdas em sistemas de cultivo, cujo manejo depende de pesticidas químicos.

C. subtsugae é um potente bioinseticida

O conjunto de metabólitos, toxinas e compostos bioativos reforça o potencial inseticida da espécie. Neste estudo, foi possível evidenciar uma gama de referências indicando a espécie como potencial agente de biocontrole sobre pragas das ordens Coleoptera, Hemiptera, Diptera e Lepidoptera. As cepas PRAA4-1 e PRAA4-1B estabelecem toxicidade sobre as pragas em diferentes estágios de desenvolvimento, conforme a Tabela 3.

Tabela 3. Eficiência de *C. subtsugae* no biocontrole de diferentes insetos praga

Ordem	Espécie	Estágio	Cepa	Referência
Coleoptera	<i>Leptinotarsa decemlineata</i> (Say, 1824)	Larva	PRAA4-1 e PRAA4-1B	Martin e Blackburn (2008)
			PRAA4-1	Martin et al. (2007a)
	<i>Diabrotica virgifera</i> (LeConte, 1868)	Adulto	PRAA4-1	Martin et al. (2007a) Martin et al. (2007b)
	<i>Diabrotica undecimpunctata</i> (Mannerheim, 1843)	Larva	PRAA4-1	Martin et al. (2007a)
		Adulto	PRAA4-1	Martin et al. (2007a) Martin et al. (2007b) Rogers et al. (2016)
	<i>Aethina tumida</i> (Murray, 1867)	Larva	PRAA4-1	Martin et al. (2007a)
	<i>Curculio caryae</i> (Horn, 1873)	Adulto	PRAA4-1	Shapiro-Ilan et al. (2017) Shapiro-Ilan et al. (2013)
	<i>Microtheca ochrolooma</i> (Stål, 1860)	Larva	PRAA4-1	Balusu e Fadamiro (2012) Balusu e Fadamiro (2013)
		Adulto	PRAA4-1	Balusu e Fadamiro (2012) Balusu e Fadamiro (2013)
Hemiptera	<i>Bemisia tabaci</i> (Gennadius, 1889)	Ninfa	PRAA4-1	Martin et al. (2007a)
		Adulto	PRAA4-1	Martin et al. (2007a)
	<i>Nezara viridula</i> (Linnaeus, 1758)	Adulto	PRAA4-1	Martin et al. (2007a)
	<i>Melanocallis caryaefoliae</i> (Davis, 1910)	Adulto	PRAA4-1	Oliveira-Hofman et al. (2021)
		Larva	PRAA4-1	Shapiro-Ilan et al. (2013)
	<i>Monellia caryella</i> (Fitch, 1855)	Adulto	PRAA4-1	Oliveira-Hofman et al. (2021)
	<i>Monelliopsis pecanis</i> (Bissell, 1983)	Adulto	PRAA4-1	Oliveira-Hofman et al. (2021)
	<i>Lygus hesperus</i> (Knight, 1917)	Ninfa	PRAA4-1	Gyawali et al. (2023)
	<i>Myzus persicae</i> (Sulzer, 1776)	Ninfa	PRAA4-1	Shannag e Capinera (2018)

	<i>Phenacoccus madeirensis</i> (Green, 1923)	Ninfa	PRAA4-1	Shannag e Capinera (2018)
	<i>Melanaphis sacchari</i> (Zehntner, 1897)	Ninfa	PRAA4-1	Calvin et al. (2021)
	<i>Halyomorpha halys</i> (Stål, 1855)	Adulto	PRAA4-1	Lee et al. (2014)
Diptera	<i>Drosophila suzukii</i> (Matsumura, 1931)	Adulto	PRAA4-1	Mermer et al. (2022) Sial et al. (2018)
		Larva	PRAA4-1	Fanning et al. (2017)
Lepidoptera	<i>Plutella xylostella</i> (Linnaeus, 1758)	Larva	PRAA4-1	Martin et al. (2007a)
	<i>Helicoverpa zea</i> (Boddie, 1850)	Larva	PRAA4-1	Sarmiento et al. (2021)

Os mecanismos de ação inseticida da espécie incluem inibição da alimentação (Martin et al., 2007a), redução de infestação e ovoposição (Calvin et al., 2020) e, consequentemente, mortalidade de larvas, ninhas e insetos adultos. Esse conjunto de características destaca *C. subtsugae* das demais espécies do gênero *Chromobacterium*, como *Chromobacterium violaceum*, espécie representante do gênero (Martin et al., 2007a). Em síntese, *C. subtsugae* apresenta elevado potencial para aplicação na agricultura.

Perspectivas futuras

Embora os resultados indiquem elevado potencial das cepas PRAA4-1 e PRAA4-1B, outras referências que demonstrem atividade inseticida de outras cepas de *C. subtsugae* não foram identificadas no presente estudo. Esses dados reforçam a necessidade do desenvolvimento de novos estudos que consolidem o antagonismo de demais cepas com potencial já evidenciado em estudos identificados nesta revisão (Clark e Vöing et al., 2015; Blackburn et al., 2016; Vöing et al., 2017; Broderick, 2024).

Conclusão

Este estudo consolidou informações relevantes relacionadas ao potencial genético e metabólico de cepas de *C. subtsugae*, oferecendo uma visão abrangente acerca de seu potencial biotecnológico para o setor agrícola com foco na sustentabilidade. O levantamento de informações conduzido no presente estudo elucida o potencial de aplicação da espécie na formulação de novas tecnologias sustentáveis pautadas em microrganismos.

C. subtsugae é uma ferramenta viável e promissora para uso na agricultura, fortalecendo a sustentabilidade no segmento e auxiliando na consolidação de sistemas de cultivos resilientes e alinhados à questões ambientais. Seu aparato gênico e o intrincado conjunto de rotas metabólicas conferem ao microrganismo elevado potencial para o manejo de pragas, sendo capaz de contribuir significativamente com a segurança alimentar global.

Referências

- AIJIAH, N.; FIODOR, A., PANDEY, A. K.; RANA, A.; PRANAW, K. Plant growth-promoting bacteria (PGPB) with biofilm-forming ability: a multifaceted agent for sustainable agriculture. *Diversity*, v. 15, n. 1, p. 112, 2023. <https://doi.org/10.3390/d15010112>
- ASOLKAR, R.; HUANG, H.; KOIVUNEN, M.; MARRONE, P. Chromamide A (1), compositions comprising chromamide A (1) with insecticidal activity. Depositante: Marrone Bio Innovations, Inc. EP n. 2632272B1. Depósito: 24 out. 2011. Concessão: 21 ago. 2019.
- AYAN, L. B.; COUTIÑO, P. M.; GONZÁLEZ, M. M.; VÁZQUEZ, R. L.; HERNÁNDEZ, F. G. Microorganismos del suelo y sus usos potenciales en la agricultura frente al escenario del cambio climático. *Magna Scientia UCEVA*, v. 1, n. 1, p. 104-117, 2021. DOI: <https://doi.org/10.54502/msuceva.v1n1a14>
- BAJSA, N.; FABIANO, E.; RIVAS-FRANCO, F. Biological control of phytopathogens and insect pests in agriculture: an overview of 25 years of research in Uruguay. *Environmental Sustainability*, v.6, n.2, p.121-133. 2023. DOI: <https://doi.org/10.1007/s42398-023-00275-8>
- BALUSU, R. R.; FADAMIRO, H. Y. Evaluation of organically acceptable insecticides as stand-alone treatments and in rotation for managing yellowmargined leaf beetle, *Microtheca ochrolooma* (Coleoptera: Chrysomelidae), in organic crucifer production. *Pest management science*, v.68, n.4, p.573-579. 2012. DOI: <https://doi.org/10.1002/ps.2297>

BALUSU, R.; FADAMIRO, H. Y. Susceptibility of *Microtheca ochroloma* (Coleoptera: Chrysomelidae) to botanical and microbial insecticide formulations. **Florida Entomologist**, v.96, n.3, p.914-921. 2013. DOI: <https://doi.org/10.1653/024.096.0327>

BLACKBURN, M. B.; SPARKS, M. E.; GUNDERSEN-RINDAL, D. E. The genome of the insecticidal *Chromobacterium subtsugae* PRAA4-1 and its comparison with that of *Chromobacterium violaceum* ATCC 12472. **Genomics data**, v.10, n.1, p.1-3. 2016. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.gdata.2016.08.013>

CALVIN, W.; BEUZELIN, J. M.; LIBURD, O. E.; BRANHAM, M. A.; SIMON, L. J. Effects of biological insecticides on the sugarcane aphid, *Melanaphis sacchari* (Zehntner) (Hemiptera: Aphididae), in sorghum. **Crop Protection**, v.142, n.1, p.105528. 2021. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.cropro.2020.105528>

CLARK, M. M.; BRODERICK, N. A. Whole-genome sequencing of *Chromobacterium subtsugae* strains exhibiting toxicity to *Drosophila melanogaster*. **Microbiology Resource Announcements**, v.13, n.6, p.e00127-24. 2024. DOI: <https://doi.org/10.1128/mra.00127-24>

DIAS, K. C. F. P.; DA SILVA SOUZA, I. J.; BARROS, Y. C.; DA SILVA, E. P.; LEITE, J.; FEITOZA, A. F. A.; DE JESUS SANTOS, A. F. Native bacteria from the caatinga biome mitigate the effects of drought on melon (*Cucumis melo* L.). **Comunicata Scientiae**, v. 15, p. e4072-e4072, 2024. DOI: <https://doi.org/10.14295/cs.v15.4072>

FANNING, P. D.; GRIESHOP, M. J.; ISAACS, R. Efficacy of biopesticides on spotted wing drosophila, *Drosophila suzukii* Matsumura in fall red raspberries. **Journal of Applied Entomology**, v.142, n.1, p.26-32. 2018. DOI: <https://doi.org/10.1111/jen.12462>

GOLEC, J. R.; HOGE, B.; WALGENBACH, J. F. Effect of biopesticides on different *Tetranychus urticae* Koch (Acar: Tetranychidae) life stages. **Crop Protection**, v.128, n.1., p.105015. 2020. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.cropro.2019.105015>

GYAWALI, P.; KIM, H.; VANCE, D. R.; KHODAVERDI, H.; MANTRI, A.; NANSEN, C. Can Insects Assess Environmental Risk? Movement Responses and Nymph Emergence in Response to Insecticides. **Agriculture**, v.13, n.3, p.723. 2023. DOI: <https://doi.org/10.3390/agriculture13030723>

HOWLAND, A. D.; COLE, E.; POLEY, K.; QUINTANILLA, M. Alternative Management Strategies and Impact of the Northern Root-Knot Nematode in Daylily Production. **Plant Health Progress**, v.24, n.2, p.180-187. 2023. DOI: <https://doi.org/10.1094/PHP-08-22-0076-RS>

LEE, D. H.; SHORT, B. D.; NIELSEN, A. L.; LESKEY, T. C. Impact of organic insecticides on the survivorship and mobility of *Halymorpha halys* (Stål) (Hemiptera: Pentatomidae) in the laboratory. **Florida Entomologist**, v.97, n.2, p.414-421. 2014. DOI: <https://doi.org/10.1653/024.097.0211>

LOO, C.; KOIRALA, P.; SMITH, N. C.; EVANS, K. C., BENOMAR, S.; PARISI, I. R.; OLLER, A.; CHANDLER, J. R. Cross-species activation of hydrogen cyanide production by a promiscuous quorum-sensing receptor promotes *Chromobacterium subtsugae* competition in a dual-species model. **Microbiology**, v.169, n.2, p.001294. 2023. DOI: <https://doi.org/10.1099/mic.0.001294>

MAL, S.; PANCHAL, S. Drought and salt stress mitigation in crop plants using stress-tolerant auxin-producing endophytic bacteria: a futuristic approach towards sustainable agriculture. **Frontiers in Plant Science**, v. 15, p. 1422504, 2024. DOI: <https://doi.org/10.3389/fpls.2024.1422504>

MARTIN, P. A. W.; BLACKBURN, M. B. Characterization of the insecticidal activity of *Chromobacterium subtsugae*. **Biopesticides International**, v.4, n.2, p.102-109. 2008. DOI: <https://doi.org/10.1653/024.096.0327>

MARTIN, P. A.; GUNDERSEN-RINDAL, D.; BLACKBURN, M., BUYER, J. *Chromobacterium subtsugae* sp. nov., a betaproteobacterium toxic to Colorado potato beetle and other insect pests. **International Journal of Systematic and Evolutionary Microbiology**, v.57, n.5, p.993-999. 2007a. DOI: <https://doi.org/10.1099/ijs.0.64611-0>

MARTIN, P. A.; HIROSE, E.; ALDRICH, J. R. Toxicity of *Chromobacterium subtsugae* to southern green stink bug (Heteroptera: Pentatomidae) and corn rootworm (Coleoptera: Chrysomelidae). **Journal of Economic Entomology**, v.100, n.3, p.680-684. 2007b. DOI: <https://doi.org/10.1093/jee/100.3.680>

MERMER, S.; TAIT, G.; PFAB, F.; MIRANDOLA, E.; BOZARIC, A.; THOMAS, C. D.; MOELLER, M., OPPENHEIMER, K. G.; XUE, L.; WANG, L.; WALTON, V. M. Comparative insecticide application techniques (micro-sprinkler) against *Drosophila suzukii* Matsumura (Diptera: Drosophilidae) in highbush blueberry. **Environmental entomology**, v.51, n.2, p.413-420. 2022 DOI: <https://doi.org/10.1093/ee/nvac002>

OLIVEIRA-HOFMAN, C.; COTRELL, T. E.; BOCK, C.; MIZELL III, R. F.; WELLS, L.; SHAPIRO-ILAN, D. I. Impact of a biorational pesticide on the pecan aphid complex and its natural enemies. **Biological Control**, v.161, n.1, p.104709. 2021. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.bioc.2021.104709>

OUZZANI, M.; HAMMADY, H.; FEDOROWICZ, Z.; ELMAGARMID, A. Rayyan—a web and mobile app for systematic reviews. **Systematic reviews**, v.5, n.1, p.1-10. 2016. DOI: <https://doi.org/10.1186/s13643-016-0384-4>

PAGE, M. J.; MCKENZIE, J. E.; BOSSUYT, P. M.; BOUTRON, I.; HOFFMANN, T. C.; MULROW, C. D., SHAMSEER, L.; TETZLAFF, J. M.; AKL, E. A.; BRENNAN, S. E.; CHOU, R.; GLANVILLE, J.; GRIMSHAW, J. M.; HRÓBJARTSSON, A.; LALU, M. M.; LI, T.; LODER, E. W.; MAYO-WILSON, E.; MCDONALD, S.; MCGUINNESS, L. A.; STEWART, L. A.; THOMAS, L.; TRICCO, A. C.; WELCH, V. A.; WHITING, P.; MOHER, D. The PRISMA 2020 statement: an updated guideline for reporting systematic reviews. **bmj**, v.372, n.72. 2021. DOI: <https://doi.org/10.1186/s13643-016-0384-4>

PATHMUDI, V. R.; KHATRI, N.; KUMAR, S.; ABDUL-QAWY, A. S. H.; VYAS, A. K. A systematic review of IoT technologies and their constituents for smart and sustainable agriculture applications. **Scientific African**, v.19, n.1, p.e01577. 2023. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.sciaf.2023.e01577>

POVEDA, J.; EUGUI, D.. Combined use of Trichoderma and beneficial bacteria (mainly *Bacillus* and *Pseudomonas*): Development of microbial synergistic bio-inoculants in sustainable agriculture. **Biological Control**, v. 176, p. 105100, 2022.

RAY, H. A.; HOY, M. A. Effects of reduced-risk insecticides on three orchid pests and two predacious natural enemies. **Florida Entomologist**, v.97, n.3, p.972-978. 2014. DOI: <https://doi.org/10.1653/024.097.0355>

ROCHA, T. M.; MARCELINO, P. R. F.; DA COSTA, R. A. M.; RUBIO-RIBEAUX, D.; BARBOSA, F. G.; DA SILVA, S. S. Agricultural Bioinputs Obtained by Solid-State Fermentation: From Production in Biorefineries to Sustainable Agriculture. **Sustainability**, v.16, n.3, p.1076. 2024. DOI: <https://doi.org/10.3390/su16031076>

ROGERS, M. A.; OWNLEY, B. H.; AVERY, P. B.; WSZELAKI, A. L. Toxicity and efficacy of novel biopesticides for organic management of cucumber beetles on Galia muskmelons. **Organic Agriculture**, v.7, n.1, p.365-377. 2017. DOI: <https://doi.org/10.1007/s13165-016-0161-7>

SARMIENTO, L.; VITERI, D. M.; LINARES, A. M.; CABRERA, I. Bio-ensayos de insecticidas biológicos y orgánicos sintéticos en larvas del gusano de la mazorca del maíz [*Helicoverpa zea* (Boddie) (Lepidoptera: Noctuidae)]. **J. Agric. Univ. PR**, v.105, n.1. 2021. DOI: <https://doi.org/10.46429/jaupr.v105i2.20081>

SEPPELT, R.; KLOTZ, S.; PEITER, E.; VOLK, M. Agriculture and food security under a changing climate: An underestimated challenge. **Iscience**, v.25, n.12, p.105551. 2022. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.isci.2022.105551>

SHANNAG, H. K.; CAPINERA, J. L. Comparative effects of two novel betaproteobacteria based insecticides on *Myzus persicae* (Hemiptera: Aphididae) and *Phenacoccus madeirensis* (Hemiptera: Pseudococcidae). **Florida Entomologist**, v.101, n.2, p.212-218. 2018. DOI: <https://doi.org/10.1653/024.101.0209>

SHAPIRO-ILAN, D. I.; COTTRELL, T. E.; BOCK, C.; MAI, K.; BOYKIN, D.; WELLS, L.; HUDSON, W. G; MIZELL III, R. F. Control of pecan weevil with microbial biopesticides. **Environmental entomology**, v.46, n.6, p.1299-1304. 2017. DOI: <https://doi.org/10.1093/ee/nvx144>

SHAPIRO-ILAN, D. I.; COTTRELL, T. E.; JACKSON, M. A.; WOOD, B. W. Control of key pecan insect pests using biorational pesticides. **Journal of Economic Entomology**, v.106, n.1, p.257-266. 2013. DOI: <https://doi.org/10.1603/ee12302>

SIAL, A. A.; ROUBOS, C. R.; GAUTAM, B. K.; FANNING, P. D.; VAN TIMMEREN, S.; SPIES, J.; PETRAN, A.; ROGERS, M. A.; LIBURD, O. E.; LITTLE, B. A.; CURRY, S.; ISAACS, R. Evaluation of organic insecticides for management of spotted-wing drosophila (*Drosophila suzukii*) in berry crops. **Journal of applied entomology**, v.143, n.6, p.593-608. 2019. DOI: <https://doi.org/10.1111/jen.12629>

VÖING, K.; HARRISON, A.; SOBY, S. D. Draft genome sequences of three *Chromobacterium subtsugae* isolates from wild and cultivated cranberry bogs in southeastern Massachusetts. **Genome Announcements**, v.3, n.5, p. e00998-15. 2015. DOI: <https://doi.org/10.1128/genomeA.00998-15>

VÖING, K.; HARRISON, A.; SOBY, S. D. Draft genome sequence of *Chromobacterium subtsugae* MWU12-2387 isolated from a wild cranberry bog in Truro, Massachusetts. **Genome announcements**, v.5, n.12, p. e01633-16. 2017. DOI: <https://doi.org/10.1128/genomea.01633-16>