

UNIVERSIDADE FEDERAL DO RIO GRANDE DO SUL
FACULDADE DE MEDICINA
CURSO DE NUTRIÇÃO

Maria Luísa Serrano Beltran Borges

Uso de timol para o controle de fungos de preocupação em uvas

Porto Alegre

2024

Maria Luísa Serrano Beltran

Uso de timol para o controle de fungos de preocupação em uvas

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado ao Curso de Nutrição da Faculdade de Medicina da Universidade Federal do Rio Grande do Sul como requisito parcial para a obtenção do título de bacharela em Nutrição.

Orientadora: Prof.^a Dr.^a Juliane Elisa Welke

Coorientador: Dr. Flávio Fonseca Veras

Porto Alegre, 2024

Maria Luísa Serrano Beltran

CIP - Catalogação na Publicação

Serrano Beltran Borges, Maria Luísa
Uso de timol para o controle de fungos de
preocupação em uvas / Maria Luísa Serrano Beltran
Borges. -- 2024.
44 f.
Orientadora: Juliane Elisa Welke.

Coorientadora: Flavio Fonseca Veras.

Trabalho de conclusão de curso (Graduação) --
Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Faculdade
de Medicina, Curso de Nutrição, Porto Alegre, BR-RS,
2024.

1. antifúngico. 2. timol. 3. mucilagem de chia. 4.
fungos deteriorantes. 5. fungos toxigênicos. I. Elisa
Welke, Juliane, orient. II. Fonseca Veras, Flavio,
coorient. III. Título.

Elaborada pelo Sistema de Geração Automática de Ficha Catalográfica da UFRGS com os dados fornecidos pelo(a) autor(a).

Uso de timol para o controle de fungos de preocupação para a viticultura

Trabalho de conclusão do curso de graduação apresentado ao Curso de Nutrição da Universidade Federal do Rio Grande do Sul, como requisito parcial para a obtenção do grau de Bacharel(a) em Nutrição.

BANCA EXAMINADORA

Prof.^a Dr.^a Patricia da Silva Malheiros
Doutora em Microbiologia Agrícola e do Ambiente – UFRGS

Rafaela Diogo Silveira
Mestre em Ciência e Tecnologia de Alimentos – UFRGS

Orientadora – Prof.^a Dr.^a Juliane Elisa Welke
Doutora em Química – UFRGS

Coorientador – Dr. Flávio Fonseca Veras
Doutor em Ciência e Tecnologia de Alimentos – UFRGS

AGRADECIMENTOS

Gostaria de expressar minha imensa gratidão à minha família, que sempre me apoiou incondicionalmente nesta troca radical de carreira, que, mesmo eles não falando, tenho certeza de que me achavam louca. No entanto, sempre demonstram muito orgulho de mim. Aos meus pais, que me criaram com valores de independência, trabalho árduo e determinação, inspirando-me a seguir os seus passos de batalhadores incansáveis.

Agradeço também à minha amiga/irmã Francine Alves, que me deu o pontapé inicial para mergulhar no mundo da nutrição. Sua confiança em mim foi essencial para que eu tivesse a coragem de iniciar essa jornada.

À Natalia Paludo, minha auxiliar na pesquisa e amiga que compartilha tantos valores comigo, especialmente no que se refere à nutrição.

Um agradecimento especial ao meu coorientador Flávio Veras, que me ensinou microbiologia desde o princípio, desenhando em folhas de ofício no laboratório 118, com sua didática e paciência absurda ao compartilhar todo o seu conhecimento.

À minha orientadora, Juliane Welke, que fala que eu sou aceleradíssima, mas é tanto quanto eu. Tenho uma imensa admiração pela profissional que és, pela sua grandeza, capacidade em gerir muitas funções e, mesmo assim, sempre demonstrando muita humildade e disponibilidade. Espero continuar trabalhando ao seu lado, aprendendo e crescendo.

Agradecer ao Adriano Brandelli pela disponibilização do Nanotrak, a Profa Simone H. Flores e Alessandro O. Rios pela disponibilização da estufa com circulação de ar e agitador mecânico,

E por último, mas de forma alguma menos importante, ao meu noivo Carlos Alexandre. Acompanhou-me na fase final e mais impactante desta trajetória. Ele é meu maior fã e incentivador, sempre me encorajando a crescer e a superar meus limites. Sem ele ao meu lado, este momento não seria possível agora.

A todos vocês, meu profundo agradecimento e amor. Este trabalho é uma realização coletiva, fruto do apoio, da paciência e do incentivo de cada um de vocês.

RESUMO

O cultivo de uvas enfrenta desafios significativos devido à contaminação por fungos como *Botrytis cinerea*, espécies de *Colletotrichum* e *Aspergillus*, que comprometem a qualidade dos frutos e dos produtos derivados, além de representar riscos à saúde humana por conta da capacidade de algumas espécies em produzir micotoxinas. Embora os fungicidas sintéticos sejam amplamente utilizados para combater esses fungos, tais produtos podem levar ao desenvolvimento de resistência fúngica, impactos ambientais negativos e riscos à saúde humana. Como alternativa sustentável, o uso de timol, um composto fenólico com propriedades antifúngicas, poderia substituir ou reduzir a aplicação de fungicidas sintéticos na viticultura. No entanto, a aplicação direta do timol é limitada por sua baixa solubilidade em água e alta volatilidade. Para superar essas limitações, a nanoencapsulação do timol utilizando mucilagem de chia como material de encapsulamento pode ser uma estratégia promissora. O objetivo do estudo foi produzir e caracterizar nanocápsulas de mucilagem de chia contendo timol, bem como testar a eficácia das nanocápsulas de timol no controle de fungos comuns em uvas comparando a forma não encapsulada deste composto. As nanocápsulas de mucilagem de chia contendo diferentes concentrações de timol (NCs Chia-Tim) foram produzidas através da técnica de nanoemulsão com alta energia. Nanocápsulas de mucilagem de chia sem timol (NCs Chia) também foram preparadas como controle. As nanocápsulas obtidas foram caracterizadas quanto ao diâmetro médio e a distribuição de tamanho das partículas em suspensão. Além disso, a determinação da Concentração Inibitória Mínima (CIM) e da Concentração Mínima Fungicida (CMF) das nanocápsulas e do timol não encapsulado foi realizada para os seguintes fungos comuns em uvas: *Botrytis cinerea*, *A. carbonarius* e *Colletotrichum acutatum*. A mucilagem de chia foi um material de parede adequado para o encapsulamento do timol uma vez que favoreceu a obtenção de partículas com tamanho nanométrico, as quais apresentaram diâmetro médio variando de 119,1 a 144,7 nm. Todos os fungos foram sensíveis ao tratamento com timol não encapsulado. Além disso, sua forma encapsulada manteve a ação antifúngica contra *B. cinerea*, *A. carbonarius* e *C. acutatum*, espécies de maior preocupação para a viticultura. A nanoencapsulação de timol em mucilagem de chia mostrou-se uma abordagem promissora para o controle de fungos na viticultura. Esta tecnologia pode representar uma alternativa sustentável aos fungicidas sintéticos, contribuindo para uma produção vitivinícola mais segura e de alta qualidade, além de reduzir os impactos ambientais e os riscos à saúde humana. Portanto, este trabalho apresenta uma inovação significativa no campo da nutrição e proteção de culturas, propondo uma solução sustentável e eficaz para um problema relevante na agricultura.

Palavras-chave: antifúngico, timol, mucilagem de chia, fungos deteriorantes, fungos toxigênicos.

ABSTRACT

The cultivation of grapes faces significant challenges due to contamination by fungi such as *Botrytis cinerea*, *Colletotrichum* species, and *Aspergillus*, which compromise the quality of the fruit and derived products, as well as pose health risks due to the ability of some species to produce mycotoxins. Although synthetic fungicides are widely used to combat these fungi, these products have disadvantages, such as the development of fungal resistance, negative environmental impacts, and risks to human health. As a sustainable alternative, the use of thymol, a phenolic compound with antifungal properties, could replace or reduce the application of synthetic fungicides in viticulture. However, the direct application of thymol is limited by its low solubility in water and high volatility. To overcome these limitations, the nanoencapsulation of thymol using chia mucilage as an encapsulation material may be a promising strategy. The objective of the study was to produce chia mucilage nanocapsules containing thymol, as well as to test the effectiveness of thymol nanocapsules in controlling common fungi in grapes compared to the non-encapsulated form of this compound. Chia mucilage nanocapsules containing different concentrations of thymol (Chia-Tim NCs) were produced through the high-energy nanoemulsion technique. Chia mucilage nanocapsules without thymol (Chia NCs) were also prepared as a control. The obtained nanocapsules were characterized according to the average diameter and size distribution of the particles in suspension. Furthermore, Minimum Inhibitory Concentration (MIC) and Minimum Fungicidal Concentration (MFC) determination of the nanocapsules and unencapsulated thymol was performed for the following common fungi in grapes: *Botrytis cinerea*, *A. carbonarius* and *Colletotrichum acutatum*. Chia mucilage was a suitable wall material for the encapsulation of thymol since it favored the production of nanometric-sized particles, which presented an average diameter ranging from 119.1 to 144.7 nm. All fungi were sensible to unencapsulated thymol treatment. Furthermore, its encapsulated form maintained antifungal action against *B. cinerea*, *A. carbonarius* and *C. acutatum*, species of greatest concern for viticulture. The nanoencapsulation of thymol in chia mucilage proved to be a promising approach for controlling fungi in viticulture. This technology could represent a sustainable alternative to synthetic fungicides, contributing to safer and higher quality wine production, as well as reducing environmental impacts and human health risks. Therefore, this work presents a significant innovation in the field of crop nutrition and protection, proposing a sustainable and effective solution to a relevant problem in agriculture.

Key words: antifungal, thymol, chia mucilage, spoilage fungi, toxigenic fungi

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 – Possível mecanismo de ação antifúngica do timol.....	25
--	----

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 – Estudos sobre óleos essenciais e compostos naturais utilizados como agentes antifúngicos em frutas.....	18
Tabela 2 – Diâmetro Médio e Índice de Polidispersividade (PDI) de nanocápsulas de mucilagem de chia carregadas com timol (Chia-Tim NCs) em diferentes concentrações e sem o composto ativo (Chia NCs).....	34
Tabela 3 - Concentrações Inibitórias Mínimas (CIM) e Concentrações Fungicidas Mínimas (CFM) de timol não encapsulado e timol encapsulado em mucilagem de chia (NCs Chia-Tim) contra diferentes espécies de fungos.....	36

SUMÁRIO

1. INTRODUÇÃO	10
2. JUSTIFICATIVA	13
3. OBJETIVOS	14
3.1 Objetivo geral	14
3.2 Objetivos específicos.....	14
4. REVISÃO DE LITERATURA	15
4.1 Ocorrência de fungos em uvas	15
4.2 Métodos de controle de fungos na viticultura	15
4.3 Alternativas naturais para o controle de fungos	17
4.4 Nanoencapsulação de compostos naturais	26
4.5 Mucilagem de chia como material de parede para encapsular compostos antifúngicos ou compostos bioativos	27
5. MATERIAIS E MÉTODOS	29
5.1 Reagentes e produtos químicos	29
5.2 Preparação da solução de Timol	29
5.3 Obtenção da mucilagem de chia.....	29
5.4 Preparação das nanocápsulas de mucilagem de chia	30
5.5 Avaliação do tamanho médio de partícula e Índice de Polidispersividade (PDI) das nanocápsulas	31
5.6 Avaliação da atividade antifúngica do timol não encapsulado e carregado em nanocápsulas	31
5.6.1 Fungos	31
5.6.2 Determinação da Concentração Inibitória Mínima (CIM)	32
5.6.3 Concentração mínima fungicida (CMF)	32
5.6.4 Análise estatística.....	33
6. RESULTADOS E DISCUSSÃO	34
6.1 Avaliação do diâmetro médio e Índice de polidispersividade (PDI) das nanocápsulas	34
6.2 Atividade antifúngica do timol não encapsulado e carregado em nanocápsulas de e chia	36
7. CONCLUSÃO	38
8. REFERÊNCIAS	39

1. INTRODUÇÃO

A presença de fungos em uvas representa uma preocupação considerável para a viticultura devido aos possíveis impactos causados. Fungos como *Botrytis cinerea* e espécies do gênero *Colletotrichum*, causadores da podridão cinza e antracnose, respectivamente, podem afetar os vinhedos comprometendo a integridade dos frutos e resultando em perdas econômicas substanciais. A presença desses fungos não só reduz a produtividade no vinhedo, mas também pode afetar a qualidade dos vinhos produzidos, uma vez que as uvas contaminadas podem resultar em sabor e aroma indesejáveis (WELKE, 2019). Da mesma forma, a ocorrência de fungos do gênero *Aspergillus* também é motivo de preocupação para a qualidade das uvas, principalmente ao considerar a capacidade de algumas espécies em produzir micotoxinas, representando possíveis riscos à saúde humana (DACHERY *et al.*, 2016; WELKE, 2019).

Várias estratégias têm sido utilizadas para prevenir a contaminação das uvas por fungos. Por muitos anos, fungicidas sintéticos foram amplamente utilizados para combater doenças causadas por fungos fitopatogênicos, apesar das críticas por vários motivos. O uso contínuo de fungicidas sintéticos leva ao desenvolvimento de resistência fúngica, enquanto o uso excessivo e a mistura desses produtos químicos podem ser prejudiciais à saúde humana, ao meio ambiente e aos organismos não-alvo, afetando a biodiversidade. Devido à baixa biodegradabilidade e tendência de acumulação no ambiente, os fungicidas sintéticos têm sido associados a doenças crônicas em humanos e contribuem para a destruição da camada de ozônio (BHANDARI; YADAV; SARHAN, 2021; MAKHUELE *et al.*, 2020; SANTRA; BANERJEE, 2020).

Para enfrentar os problemas associados aos fungicidas sintéticos, alternativas baseadas em compostos naturais, especialmente óleos essenciais, surgem como uma opção viável e sustentável. Diversos estudos mostram que fitoquímicos derivados de plantas possuem propriedades fungicidas (BHANDARI; YADAV; SARHAN, 2021). Entre os vários compostos bioativos naturais, destacam-se os metabólitos secundários das plantas, como os

compostos fenólicos. No grupo dos compostos voláteis, encontram-se os derivados fenólicos de terpenos, como o timol (NABAVI *et al.*, 2015).

O timol tem sido estudado devido à sua capacidade de inibir a proliferação de fungos em alimentos, agentes decompositores de madeira, pragas agrícolas e insetos (ABBASZADEH *et al.*, 2014). No entanto, o uso do timol em aplicações agroalimentares é limitado devido à sua baixa solubilidade em água, o que reduz sua biodisponibilidade e propriedades antimicrobianas. Além disso, sua bioatividade é comprometida por sua suscetibilidade ao calor e volatilidade (MARCHESE *et al.*, 2016).

A encapsulação pode ser uma alternativa promissora para aumentar a estabilidade e a biodisponibilidade do timol. Os materiais utilizados como invólucros protetores das cápsulas permitem interações significativas com as células-alvo e uma liberação gradual do composto ativo contido nelas (ZIKELI *et al.*, 2020). O polímero empregado como material de parede pode ser de origem sintética ou natural; contudo, os polímeros naturais têm sido cada vez mais usados (FERREIRA; NUNES, 2019).

Os polissacarídeos são os polímeros naturais mais comumente utilizados, incluindo quitosana, alginato, amidos, pectina, gomas e mucilagens. As mucilagens se destacam por suas propriedades desejáveis, como alta capacidade de hidratação, estabilidade, não toxicidade e baixo custo em comparação com outros polímeros naturais (TAHERI; JAFARI, 2019; TER HORST; MOIEMEN; GROVER, 2019). Atualmente, diversas mucilagens extraídas de vegetais comestíveis estão sendo investigadas para uso como material de parede em nanopartículas. Exemplos incluem mucilagens de quiabo (PRASAD *et al.*, 2019), manjeriço (KURD; FATHI; SHEKARCHIZADEH, 2019), linhaça (NIKBAKHT NASRABADI *et al.*, 2019) e semente de chia (DA SILVA STEFANI *et al.*, 2019; DE CAMPO *et al.*, 2017). As notáveis propriedades tecnológicas da mucilagem de chia são atribuídas à sua composição e estrutura química, conferindo-lhe um grande potencial de aplicação nas indústrias alimentícia, farmacêutica e de embalagens (GOKSEN *et al.*, 2023). Pode ser utilizada como material de parede em técnicas de microencapsulação (HERNÁNDEZ-NAVA *et al.*, 2020) e nanoencapsulação (DEHGHANI *et al.*, 2020).

Investigar e avaliar novas técnicas que sejam simples de desenvolver, custo-efetivas e que permitam um encapsulamento eficiente do timol, utilizando novos polímeros, como a mucilagem de chia, é de extrema importância (PEREA-FLORES *et al.*, 2023). Portanto, esse estudo teve como objetivo avaliar a atividade antifúngica do timol na forma livre e encapsulado com mucilagem de chia.

2. JUSTIFICATIVA

O cultivo de uvas é uma atividade de grande importância econômica, tanto para a indústria vitivinícola quanto para a produção de sucos e outros produtos derivados. No entanto, um dos principais desafios enfrentados pelos viticultores é o controle eficaz do desenvolvimento de fungos nas uvas, que podem causar doenças devastadoras, como oídio, mofo e podridão dos cachos. O uso de fungicidas sintéticos tem sido amplamente adotado para combater essas infecções fúngicas. Entretanto, a utilização desses produtos apresenta diversos problemas, incluindo o desenvolvimento de resistência por parte dos fungos-alvo, contaminação ambiental e riscos à saúde humana. Além disso, a persistência desses produtos químicos no ambiente agrícola pode ter efeitos adversos na biodiversidade e nos ecossistemas naturais.

Diante desse cenário, a busca por alternativas para o controle fúngico torna-se crucial. Uma solução possível é o uso do timol encapsulado como agente antifúngico nas uvas. O timol é um composto natural presente em várias plantas, sendo conhecido por suas propriedades antifúngicas. A encapsulação do timol oferece benefícios, como a proteção do composto ativo, garantindo sua estabilidade durante o armazenamento e a liberação controlada no momento ideal.

Esta pesquisa propõe explorar o potencial do timol encapsulado em mucilagem de chia como uma alternativa promissora e sustentável para o controle do desenvolvimento de fungos de preocupação na viticultura. Espera-se que o uso dessa abordagem iniba o crescimento fúngico, garantindo a produtividade, qualidade e segurança adequadas dos produtos vitivinícolas. Além disso, a adoção de soluções focadas no uso de compostos naturais e técnicas de encapsulamento pode contribuir para a redução do impacto ambiental e promover uma agricultura mais sustentável, bem como manter a qualidade das uvas durante o armazenamento e comercialização na forma *in natura*.

3. OBJETIVOS

3.1 Objetivo geral

Avaliar o potencial do timol nas formas não encapsulada e encapsulada em mucilagem de chia para controlar o desenvolvimento de fungos que prejudicam a qualidade de uvas.

3.2 Objetivos específicos

- Avaliar a atividade antifúngica do timol contra fungos que são encontrados em uvas;
- Produzir nanocápsulas de mucilagem de chia contendo timol e caracterizá-las quanto ao tamanho das partículas;
- Determinar a Concentração Inibitória Mínima (CIM) e a Concentração Mínima Fungicida (CFM) do timol não encapsulado e encapsulado.

4. REVISÃO DE LITERATURA

4.1 Ocorrência de fungos em uvas

A presença de fungos nas uvas é uma grande preocupação para a viticultura devido aos impactos potenciais que podem causar. Fungos como *Botrytis cinerea* e espécies do gênero *Colletotrichum*, responsáveis pela podridão cinza e antracnose, respectivamente, podem comprometer a integridade dos frutos, resultando em perdas econômicas significativas. Esses fungos não apenas reduzem a produtividade dos vinhedos, mas também afetam a qualidade dos vinhos produzidos, pois uvas contaminadas podem gerar sabores e aromas indesejáveis (WELKE, 2019). Além disso, a presença de fungos do gênero *Aspergillus* é igualmente preocupante para a qualidade das uvas, especialmente devido à capacidade de algumas espécies de produzir micotoxinas, que representam riscos potenciais à saúde humana (DACHERY *et al.*, 2016; WELKE, 2019). Tais fungos são comumente encontrados no solo e nos cachos de uva ao longo do ciclo de produção da cultura. No entanto, possuem dificuldade em penetrar nas uvas saudáveis durante as fases iniciais do crescimento. Sua entrada nos frutos é facilitada por danos na casca, causados por pragas de insetos ou outros fatores que podem resultar em rachaduras nas uvas, como chuva ou infecções fúngicas, como o oídio (JIANG; SHI; ZHU, 2013).

Portanto, é crucial implementar estratégias eficazes que garantam que essas medidas de controle não comprometam os rendimentos, a qualidade e a segurança da uva (MONDANI *et al.*, 2020).

4.2 Métodos de controle de fungos na viticultura

Embora tenham sido feitos esforços contínuos para desenvolver práticas agrônômicas e culturais que visam o manejo e controle de fungos, como a rotação de culturas e o manejo adequado dos resíduos de colheitas, juntamente com a utilização de variedades resistentes sempre que possível, ainda há desafios a serem enfrentados (GHANNEY, 2017). O uso de fungicidas sintéticos tem sido a estratégia mais comumente utilizada pelos agricultores e

continua a ser amplamente empregada na agricultura (LEANNEC-RIALLAND *et al.*, 2022).

O uso extensivo de fungicidas sintéticos acarreta riscos adicionais relacionados aos resíduos desses produtos, que podem ser ingeridos por seres humanos. Estudos demonstraram que o uso intensivo de fungicidas sintéticos pode sustentar o rápido desenvolvimento de resistência aos mesmos (DELMAS *et al.*, 2017; MCDONALD *et al.*, 2019). Além disso, os fungos presentes no meio ambiente podem desenvolver resistência sem serem alvo direto de ações antifúngicas. Um exemplo importante disso é o uso excessivo de fungicidas em ambientes agrícolas, que tem sido associado ao aumento da resistência a medicamentos antifúngicos em patógenos que infectam humanos (RIAT *et al.*, 2018; VERWEIJ *et al.*, 2009).

Estudos também evidenciaram que o uso de fungicidas sintéticos pode acarretar em efeitos adversos sobre a biodiversidade do ambiente (GEIGER *et al.*, 2010). Por exemplo, a aplicação do fungicida azólico tebuconazol, amplamente utilizado na agricultura, foi associada à redução da biomassa e da atividade microbiana do solo (MUÑOZ-LEOZ *et al.*, 2011). Outro estudo de longa duração realizado em um vinhedo revelou que essa classe de fungicidas tem um efeito significativamente negativo sobre a biodiversidade, afetando particularmente as leveduras presentes nos cachos de uva (CORDERO-BUESO; ARROYO; VALERO, 2014).

Durante muito tempo, os fungicidas sintéticos foram amplamente utilizados para combater doenças de plantas causadas por fungos fitopatogênicos, embora essa prática tenha recebido críticas por diversos motivos. Devido à sua baixa biodegradabilidade e à sua tendência de transmissão e acumulação no ambiente, os fungicidas sintéticos têm sido associados a doenças crônicas em seres humanos quando ingeridas ou expostas, além de contribuídas para a destruição da camada de ozônio (BHANDARI; YADAV; SARHAN, 2021; MAKHUYELE *et al.*, 2020; SANTRA; BANERJEE, 2020).

Além do uso de produtos sintéticos, é importante mencionar a aplicação da calda bordalesa (uma mistura de sulfato de cobre, cal e água) como fungicida na viticultura. A aplicação intensiva e repetida deste produto ao longo do ano tem causado o acúmulo de cobre nos solos dos vinhedos

mundialmente, prejudicando a qualidade do solo, tanto do ponto de vista da sua produtividade como nos aspectos ambientais (BORTOLUZZI *et al.*, 2019).

4.3 Alternativas naturais para o controle de fungos

Para enfrentar as questões relacionadas aos fungicidas sintéticos, abordagens alternativas baseadas no uso de óleos essenciais surgem como uma opção viável e sustentável em substituição aos fungicidas sintéticos. Inúmeros estudos têm demonstrado que fitoquímicos derivados de plantas possuem propriedades fungicidas (BHANDARI; YADAV; SARHAN, 2021).

As plantas possuem um imenso potencial para produzir uma ampla variedade de compostos orgânicos. Esses compostos podem ser classificados em duas categorias principais: metabólitos primários, como proteínas, carboidratos e suplementos, que desempenham funções de suporte no crescimento e desenvolvimento das plantas, e metabólitos secundários, como terpenos, esteroides, antocianinas, antraquinonas, fenois, alcaloides, entre outros. Os metabólitos secundários têm uma gama combinada de funções nas plantas, incluindo defesa contra patógenos, atração de polinizadores e adaptação ao ambiente. Essa variedade de compostos orgânicos produzidos por plantas oferece um vasto campo de estudo e aplicação em diversas áreas, como na indústria farmacêutica, cosmética e alimentícia (SUTEU *et al.*, 2020).

Os óleos essenciais e compostos naturais têm se destacado como alternativas promissoras aos fungicidas sintéticos no controle de fungos em frutas pós-colheita. Diversos estudos demonstraram a eficácia desses compostos em inibir o crescimento de fungos patogênicos, preservando a qualidade das frutas e reduzindo a incidência de doenças. A Tabela 1 revisa achados de pesquisas recentes que exploram o potencial antifúngico de óleos essenciais e compostos naturais encapsulados.

Tabela 1. Estudos sobre óleos essenciais e compostos naturais utilizados como agentes antifúngicos em frutas.

Composto Analisado	Fungos testados	Frutas testadas	Formas avaliadas	Resumo dos resultados	Referência
Óleos essenciais de Canela (<i>Cinnamomum zeylanicum</i>) (cinamaldeído 80,82%), Zatária (<i>Zataria multiflora</i>) (timol 32,68%, carvacrol 30,57%), Segurelha (<i>Satureja khuzestanica</i>) (carvacrol 38,43%)	<i>Botrytis cinerea</i> e <i>Rhizopus stolonifer</i>	Nectarinas	Aplicados na forma de óleo essencial.	Resultados <i>in vitro</i> : significativa inibição micelial. Resultados <i>in vivo</i> : redução dos danos causados pelos fungos, mas sem inibição completa.	(TAHMASEBI <i>et al.</i> , 2020)
Óleo essencial de Cravo-da-índia (<i>Eugenia caryophyllata</i>)	Fungos não especificado, análise geral de contaminação	Arilos de romã	Nanocápsulas de óleo essencial de Cravo-da-índia revestidas de quitosana.	A forma encapsulada prolongou a vida útil dos arilos de romã em 54 dias, mantendo a qualidade microbiana, peso, sólidos solúveis totais, acidez titulável, pH,	(HASHEMINEJAD; KHODAIYAN, 2020)

(eugenol 77,21%, acetato de eugenila 8,31%, β -cariofileno 7,19%) encapsulado em nanopartículas de quitosana	<i>microbiana</i>			conteúdo fenólico total, conteúdo de antocianinas totais, atividade antioxidante e qualidade sensorial significativamente melhor em comparação com arilos não revestidos.
Óleo essencial de Laranja doce (<i>Citrus sinensis</i>) (compostos bioativos: D- limoneno, linalol, citral, α -pineno, β - pineno, camfeno)	<i>Aspergillus niger</i> e <i>Penicillium</i> <i>citrinum</i>	Tomates	Óleo essencial revestido e revestimento de quitosana	não com de O óleo essencial mostrou inibição completa de <i>A. niger</i> e <i>P. citrinum</i> a 100 μ L/mL. O revestimento combinado de quitosana e óleo essencial controlou eficazmente a deterioração fúngica dos tomates por até 8 dias a 25 °C.
Óleos essenciais de Hortelã- pimenta (<i>Mentha</i> <i>piperita</i>) 25,19%, menthan-3-one	<i>Penicillium</i> <i>digitatum</i>	Limões	Fase vapor de óleos essenciais.	Os óleos essenciais mostraram efeito antifúngico em fase vapor, com doses mínimas fungistáticas e fungicidas de 150 μ L e 300 μ L para o óleo essencial de hortelã-pimenta, 150 μ L e 300 μ L para o óleo essencial de manjeriço, e 200 μ L e

<p>31%), Manjeriçã (<i>Ocimum basilicum</i>) (estragole 49,94%, linalol 41,49%), Lavanda (<i>Lavandula angustifolia</i>) (linalol 31,44%, linalyl acetato 31,78%)</p>				<p>350 µL para o óleo essencial de lavanda, respectivamente. Em condições <i>in vivo</i>, a concentração C1 do óleo essencial de lavanda apresentou melhor proteção antifúngica, seguido pela concentração C1 do óleo essencial de manjeriçã e pela concentração C1 do óleo essencial de hortelã-pimenta. A qualidade dos limões, incluindo perda de peso, firmeza e conteúdo de ácido ascórbico, foi preservada ou melhorada.</p>		
<p>Óleo essencial de <i>Cuminum cyminum</i></p>	<p><i>Aspergillus aculeatus</i></p>	<p>Uvas</p>	<p>Óleo essencial</p>	<p>O óleo essencial de <i>C.cyminum</i> mostrou inibição significativa do crescimento micelial e germinação de conídios de <i>Aspergillus aculeatus</i>. O óleo essencial foi eficaz em reduzir a severidade e incidência da doença em uvas após 10 dias de armazenamento, sem afetar negativamente a qualidade das uvas.</p>	<p>(TANAPICHATSAKUL; KHRUENGSAI; PRIPDEEVECH, 2020)</p>	
<p>Óleos essenciais de canela (<i>C.</i></p>	<p><i>Penicillium expansum</i> e <i>B.</i></p>	<p>Maçãs Delicious</p>	<p>Red</p>	<p>Óleos essenciais e óleos essenciais em emulsões</p>	<p>Os óleos essenciais de canela, zátaria e satureja foram testados <i>in vitro</i> e <i>in vivo</i>. O</p>	<p>(RAZAVI <i>et al.</i>, 2022)</p>

<p><i>zeylanicum</i>), zátaria (Z. <i>multiflora</i>) e satureja (S. <i>khuzestanica</i>).</p>	<p><i>cinerea</i></p>	<p>de nanocristais de celulose bacteriana e gelatina de peixe.</p>	<p>de óleo essencial de canela e o óleo essencial de zátaria exibiram as melhores performances contra <i>P. expansum</i> e <i>B.</i> <i>cinerea</i>, respectivamente. Emulsões de nanocristais de celulose bacteriana e gelatina de peixe com óleo essencial de canela mostraram uma redução significativa na propagação de lesões nas maçãs devido à liberação controlada do óleo essencial de canela ao longo de 21 dias.</p>	
<p>Óleos essenciais de Hortelã-verde (<i>Mentha spicata</i>), Hortelã-pimenta (<i>M. piperita</i>), Tomilho (<i>Thymus</i> <i>vulgaris</i> quimiotipo carvacrol) e Tomilho (<i>T.</i> <i>vulgaris</i> quimiotipo timol)</p>	<p><i>R. stolonifer</i></p>	<p>Morangos e pêssegos</p>	<p>Óleos essenciais</p>	<p>Os óleos essenciais de hortelã-verde, (YAN, J <i>et al.</i>, 2021) hortelã-pimenta, tomilho quimiotipo carvacrol e tomilho quimiotipo timol inibiram o crescimento de <i>R. stolonifer</i> e reduziram a podridão pós-colheita em morangos e pêssegos. Esses óleos aumentaram a permeabilidade da membrana plasmática do fungo, resultando no extravasamento de eletrólitos intracelulares, ácido nucleico, proteína e açúcar solúvel. O óleo essencial de hortelã-pimenta mostrou a maior eficiência na redução da podridão.</p>

<p>Óleos essenciais de Capim-limão (<i>Cymbopogon citratus</i>) (α-citral 38,34%, β-citral 29,51%), Tomilho (<i>T. vulgaris</i>) (timol 22,71%, <i>p</i>-cimeno 20,43%, γ-terpineno 11,47%), e Orégano (<i>Origanum heracleoticum</i>) (carvacrol 37,47%, <i>p</i>-cimeno 21,51%).</p>	<p><i>B. cinerea</i></p>	<p>Morango</p>	<p>Óleos essenciais e fase vapor dos óleos essenciais.</p>	<p>Os óleos essenciais alteraram a morfologia das hifas e a sua ultraestrutura. Danificaram a membrana plasmática das células de <i>B. cinerea</i>, resultando em vazamento de ácidos nucleicos intracelulares, proteínas e açúcares solúveis. A exposição dos morangos aos vapores desses óleos essenciais reduziu o mofo cinzento, com <i>T. vulgaris</i> e <i>O. heracleoticum</i> exibindo forte eficiência e redução do índice de doenças em 53,85% e 57,69%, respectivamente. O óleo essencial de orégano também inibiu a deterioração pós-colheita e manteve a qualidade da fruta, prevenindo a perda de peso e a degradação de sólidos solúveis.</p>	<p>(YAN, Jiaqi <i>et al.</i>, 2021)</p>
<p>Carvacrol não encapsulado e nanoencapsulado em Eudragit® e mucilagem de</p>	<p><i>B. cinerea</i>, <i>Aspergillus flavus</i>, <i>A. niger</i> e <i>Aspergillus carbonarius</i></p>	<p>Uvas</p>	<p>Nanocápsulas de Eudragit® e mucilagem de chia contendo carvacrol</p>	<p>As nanocápsulas contendo carvacrol mostraram eficácia superior ao carvacrol não encapsulado na inibição de fungos. O carvacrol nanoencapsulado em Eudragit® e mucilagem de chia reduziu</p>	<p>(TÓPOR <i>et al.</i>, 2024)</p>

chia					significativamente o crescimento dos fungos e a produção de ocratoxinas em uvas. A encapsulação melhorou a estabilidade térmica e reduziu a volatilidade do carvacrol
Carvacrol e timol encapsulado em filme comestível de amido	<i>Colletotrichum gloeosporioides</i>	Manga e mamão	e Carvacrol e timol adicionados a filmes de amido comestíveis em diferentes valores de pH		A concentração mínima inibitória (MIC) para timol foi >4000 mg/L e para carvacrol foi 3000 mg/L a pH 7. As misturas binárias de carvacrol e timol incorporadas em filmes comestíveis a pH 5 apresentaram efeito aditivo. Frutas recobertas apresentaram atraso na firmeza, índice de maturidade e mudança de cor, além de redução das lesões. Em pH 7, o timol necessitou de uma concentração superior a 4000 mg/L para inibir o crescimento de <i>C. gloeosporioides</i> , enquanto o carvacrol necessitou de 3000 mg/L. (OCHOA-VELASCO <i>et al.</i> , 2021)

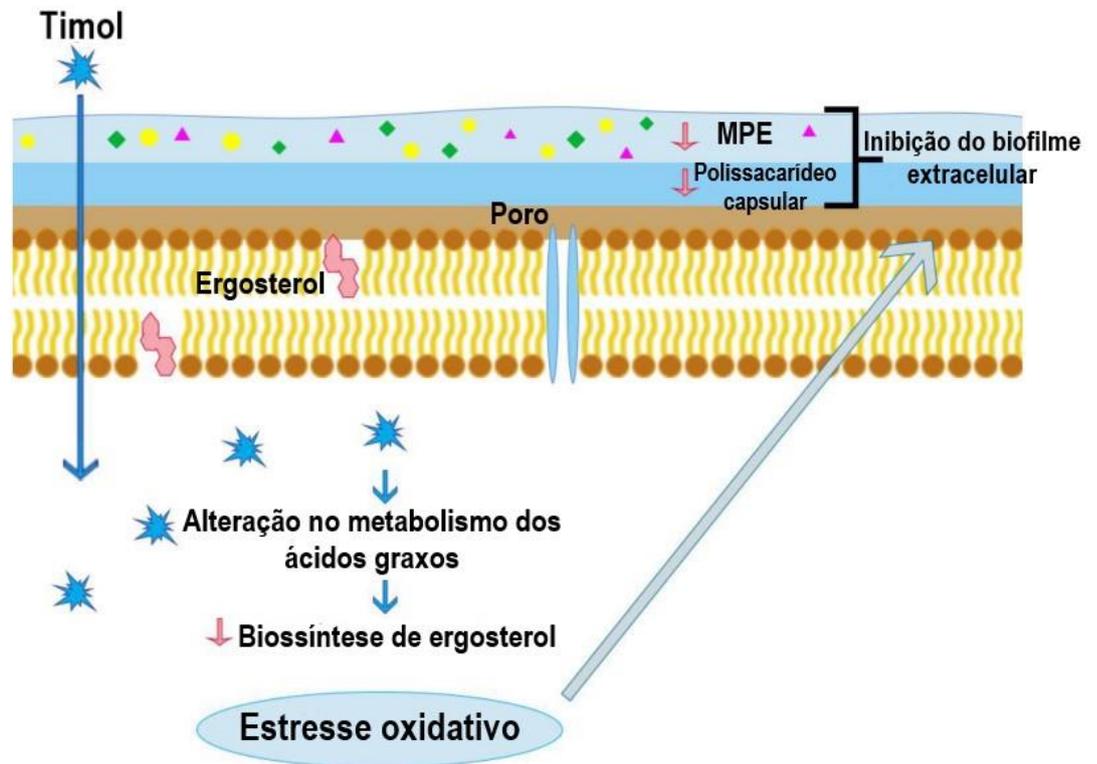
Dentre os diversos compostos bioativos naturais, destacam-se os metabólitos secundários de plantas, como os compostos fenólicos. No grupo dos compostos voláteis, encontram-se os derivados fenólicos de terpenos, como o timol e seu isômero carvacrol (NABAVI *et al.*, 2015).

Os principais componentes do óleo essencial de tomilho são os monoterpenos fenólicos isoméricos timol (2-isopropil-5-metilfenol) e carvacrol (2-metil-5-(propan-2-il)fenol) (TOHIDI *et al.*, 2020). O timol é um composto cristalino incolor, caracterizado por um odor forte e solubilidade em álcool e outros solventes orgânicos, mas é apenas ligeiramente solúvel em água (NCBI, 2024).

O timol tem sido amplamente estudado devido à sua capacidade de inibir o desenvolvimento de fungos em alimentos, agentes decompositores de madeira, mofo, pragas agrícolas e insetos (ABBASZADEH *et al.*, 2014). Além disso, seu potencial tem sido explorado para controlar a deterioração de alimentos e prolongar a vida útil de produtos alimentícios, servindo como uma alternativa aos conservantes sintéticos, graças à sua notável atividade antioxidante (HOSSAIN *et al.*, 2022).

O ergosterol é um esterol exclusivo encontrado na membrana celular dos fungos, essencial para seu crescimento e funcionamento. Portanto, compostos que alteram seus níveis podem exercer atividade antifúngica. O provável mecanismo antifúngico do timol envolve a interferência no metabolismo dos ácidos graxos, incluindo o ergosterol nas células fúngicas. Esse processo resulta, entre outros efeitos, em um aumento da concentração de espécies reativas de oxigênio e estresse oxidativo, levando a uma redução da matriz polimérica extracelular (MPE) e do polissacarídeo capsular (Figura 1). A redução do ergosterol foi observada nas membranas celulares de *Candida* e *Cryptococcus* tratados com timol, causando a ruptura da integridade da membrana, distúrbios enzimáticos relacionados à membrana, danos extensivos e, conseqüentemente, morte celular (DE LIRA MOTA *et al.*, 2012; KUMARI, *et al.*, 2019; SOKOVIĆ *et al.*, 2009).

Figura 1. Possível mecanismo de ação antifúngica do timol.



Fonte: adaptado de (KOWALCZYK *et al.*, 2020).

No entanto, o uso do timol em aplicações agroalimentares é limitado devido à sua baixa solubilidade em água, o que reduz sua biodisponibilidade e propriedades antimicrobianas. Além disso, sua bioatividade é afetada por sua suscetibilidade ao calor e por seu caráter volátil (MARCHESE *et al.*, 2016). Essas desvantagens têm limitado significativamente a pesquisa e aplicação efetiva do timol como biocida.

4.4 Nanoencapsulação de compostos naturais

A nanoencapsulação pode ser uma alternativa promissora para aumentar a sua estabilidade e a biodisponibilidade do timol. Os materiais utilizados como invólucros protetores das cápsulas permitem interações significativas com as células-alvo e uma liberação gradual do composto ativo contido nelas (ZIKELI *et al.*, 2020). Assim, nanogeis, nanopartículas e nanoemulsões podem possibilitar o uso eficiente do timol como biocida (HECKLER *et al.*, 2020; KUMARI, S. *et al.*, 2019; LI *et al.*, 2022; LIU *et al.*, 2022).

A nanotecnologia envolve a manipulação da matéria em uma escala extremamente pequena. Os materiais em nanoescala são caracterizados por possuírem partícula com tamanho inferior a 1000 nanômetros, e exibem propriedades especiais quando comparados aos seus equivalentes em escala macroscópica, principalmente devido à relação entre a área de superfície passível de contato com os microrganismos (DELSHADI *et al.*, 2020; NIKMARAM *et al.*, 2017).

A encapsulação pode contribuir para a estabilidade de substâncias bioativas nos alimentos, permitindo um controle mais eficiente de sua liberação no local apropriado (GÓMEZ *et al.*, 2018; MALEKHOSSEINI *et al.*, 2019). Uma das principais vantagens do processo de nanoencapsulação é a obtenção de uma distribuição dos ingredientes, causando uma maior eficiência de encapsulação e propriedades físicas e químicas adequadas. Tanto o tamanho mínimo das partículas quanto a grande área de superfície conferem aos materiais nanoestruturados propriedades e habilidades instituídas para aplicações na indústria de alimentos (PATEIRO *et al.*, 2021).

Por meio do encapsulamento, um composto sensível (núcleo) é retido dentro de uma nanopartícula produzida a partir de uma matriz polimérica (material de parede) podendo proporcionar liberação progressiva do composto encapsulado (ASSADPOUR; MAHDI JAFARI, 2019). O material do núcleo pode ser protegido contra condições adversas de processamento de alimentos (alta temperatura, umidade, pH extremo e outros), mascarando odores

indesejáveis e melhorando a bioatividade, solubilidade e estabilidade dos compostos encapsulados (KAUR; KAUR, 2020).

4.5 Mucilagem de chia como material de parede para encapsular compostos antifúngicos ou compostos bioativos

A chia (*Salvia hispanica* L.), pertencente à família *Lamiaceae*, é originária do México e da Guatemala (IXTAINA; NOLASCO; TOMÁS, 2008). Desde 1996, essa planta é reconhecida pela Organização das Nações Unidas para a Alimentação e Agricultura (FAO) como uma fonte potencial de mucilagem, graças às suas excelentes propriedades de formação de gel em soluções aquosas, mesmo em baixas concentrações (MUÑOZ *et al.*, 2012). A mucilagem da chia é composta por cerca de 72% de fibra solúvel, além de conter monossacarídeos como arabinose e xilose em maior quantidade, seguidos por glicose, frutose, galactose, ramnose e manose (GOH *et al.*, 2016; LOMARTIRE; GONÇALVES, 2022). Este ingrediente funcional, rico em fibra alimentar, é principalmente extraído utilizando água (CHIANG *et al.*, 2021).

As propriedades de formação de gel fazem da mucilagem de chia um potencial emulsificante ou ingrediente para aplicações na indústria alimentícia (ZETTEL; HITZMANN, 2018), uma matéria-prima adequada para o desenvolvimento de filmes bioativos (DICK *et al.*, 2015; MUÑOZ *et al.*, 2012) e um material de revestimento para nanopartículas poliméricas (DE CAMPO *et al.*, 2017; TOSIF *et al.*, 2021). De Campo *et al.* (2017) investigaram a nanoencapsulação do óleo de chia utilizando mucilagem de chia como material de parede. O estudo demonstrou que as nanopartículas formadas apresentaram uma eficiência de encapsulamento de 82,8% e maior estabilidade oxidativa em comparação ao óleo não encapsulado, sugerindo que a mucilagem de chia é uma alternativa promissora para substituir polímeros sintéticos na nanoencapsulação.

Outro estudo demonstrou a eficiência da mucilagem de chia e de linhaça como materiais de parede na nanoencapsulação de carvacrol, um monoterpeno conhecido por suas propriedades antimicrobianas (CACCIATORE *et al.*, 2022). Foram produzidas nanopartículas de carvacrol utilizando mucilagem de chia e de linhaça, as quais apresentaram alta eficiência de encapsulação (>98%) e tamanho de partícula adequado para aplicação em

alimentos, além de apresentarem diâmetro médio de 179 e 165 nm, respectivamente. Essas nanopartículas mostraram eficácia antimicrobiana contra *Salmonella enterica* e *Listeria monocytogenes*, destacando seu potencial para aplicação na conservação de alimentos e controle de patógenos alimentares.

Recentemente, um estudo investigou a encapsulação de carvacrol em nanocápsulas de Eudragit® e mucilagem de chia, demonstrando a capacidade dessas nanocápsulas de controlar o crescimento de fungos importantes para a qualidade da uva, como *Aspergillus flavus* e *Botrytis cinerea*, além de inibir a síntese de ocratoxina (TÓPOR *et al.*, 2024).

8. REFERÊNCIAS

- ABBASZADEH, S *et al.* Antifungal efficacy of thymol, carvacrol, eugenol and menthol as alternative agents to control the growth of food-relevant fungi. **Journal de mycologie medicale**, France, v. 24, n. 2, p. e51-6, 2014.
- ABDOLMALEKI, Khadije *et al.* The effect of pH and salt on the stability and physicochemical properties of oil-in-water emulsions prepared with gum tragacanth. **Carbohydrate Polymers**, [s. l.], v. 140, p. 342–348, 2016. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S014486171501259X>.
- ASSADPOUR, Elham; MAHDI JAFARI, Seid. A systematic review on nanoencapsulation of food bioactive ingredients and nutraceuticals by various nanocarriers. **Critical reviews in food science and nutrition**, United States, v. 59, n. 19, p. 3129–3151, 2019.
- BHANDARI, Sagar; YADAV, Pankaj Kumar; SARHAN, A. Botanical fungicides; current status, fungicidal properties and challenges for wide scale adoption: a review. **Reviews in Food and Agriculture**, [s. l.], v. 2, p. 63–68, 2021.
- BORTOLUZZI, Edson *et al.* Accumulation and Precipitation of Cu and Zn in a Centenarian Vineyard. **Soil Science Society of America Journal**, [s. l.], v. 83, 2019.
- BRCast. Brazilian Committee on Antimicrobial Susceptibility Testing. Método para determinação de concentração inibitória mínima em caldo dos agentes antifúngicos para fungos filamentosos formadores de conídio. EUCAST – Documento Definitivo E.DEF. 9.4.
- CACCIATORE, Fabiola Ayres *et al.* Carvacrol encapsulation into nanoparticles produced from chia and flaxseed mucilage: Characterization, stability and antimicrobial activity against Salmonella and Listeria monocytogenes. **Food Microbiology**, [s. l.], v. 108, p. 104116, 2022. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S074000202200140X>.
- CHIANG, Jie Hong *et al.* Application of chia (*Salvia hispanica*) mucilage as an ingredient replacer in foods. **Trends in Food Science & Technology**, [s. l.], v. 115, 2021.
- CORDERO-BUESO, Gustavo; ARROYO, Teresa; VALERO, Eva. A long term field study of the effect of fungicides penconazole and sulfur on yeasts in the vineyard. **International journal of food microbiology**, Netherlands, v. 189, p. 189–194, 2014.
- CULAS, M S; POPOVICH, D G; RASHIDINEJAD, A. Recent advances in encapsulation techniques for cinnamon bioactive compounds: A review on stability, effectiveness, and potential applications. **Food Bioscience**, [s. l.], v. 57, p. 103470, 2024. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S2212429223011215>.
- DA SILVA STEFANI, Fernanda *et al.* Nanoencapsulation of linseed oil with chia mucilage as structuring material: Characterization, stability and enrichment of orange juice. **Food research international (Ottawa, Ont.)**, Canada, v. 120, p. 872–879, 2019.
- DACHERY, Bruna *et al.* **Occurrence of ochratoxin A in grapes, juices and wines and risk assessment related to this mycotoxin exposure.** [S. l.]: scielo, 2016.
- DANAEI, M *et al.* Impact of Particle Size and Polydispersity Index on the Clinical Applications of Lipidic Nanocarrier Systems. **Pharmaceutics**,

Switzerland, v. 10, n. 2, 2018.

DE CAMPO, Camila *et al.* Nanoencapsulation of chia seed oil with chia mucilage (*Salvia hispanica* L.) as wall material: Characterization and stability evaluation. **Food chemistry**, England, v. 234, p. 1–9, 2017.

DE LIRA MOTA, Kelly Samara *et al.* Antifungal activity of *Thymus vulgaris* L. essential oil and its constituent phytochemicals against *Rhizopus oryzae*: interaction with ergosterol. **Molecules (Basel, Switzerland)**, Switzerland, v. 17, n. 12, p. 14418–14433, 2012.

DEHGHANI, Samira *et al.* Electrospun chia seed mucilage/PVA encapsulated with green cardamom essential oils: Antioxidant and antibacterial property. **International journal of biological macromolecules**, Netherlands, v. 161, p. 1–9, 2020.

DELMAS, Chloé E L *et al.* Soft selective sweeps in fungicide resistance evolution: recurrent mutations without fitness costs in grapevine downy mildew. **Molecular ecology**, England, v. 26, n. 7, p. 1936–1951, 2017.

DELSHADI, Rana *et al.* Micro and nano-encapsulation of vegetable and essential oils to develop functional food products with improved nutritional profiles. **Trends in Food Science & Technology**, [s. l.], v. 104, p. 72–83, 2020. Disponível em:

<https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0924224420305355>.

DICK, Melina *et al.* Edible film production from chia seed mucilage: Effect of glycerol concentration on its physicochemical and mechanical properties. **Carbohydrate polymers**, England, v. 130, p. 198–205, 2015.

EDITE BEZERRA DA ROCHA, Maria *et al.* Mycotoxins and their effects on human and animal health. **Food Control**, [s. l.], v. 36, n. 1, p. 159–165, 2014. Disponível em:

<https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0956713513004131>.

ESMAEILI, Akbar; RAHNAMOUN, Soraya; SHARIFNIA, Fariba. Effect of O/W process parameters on *Crataegus azarolus* L nanocapsule properties. **Journal of Nanobiotechnology**, [s. l.], v. 11, n. 1, p. 16, 2013. Disponível em: <https://doi.org/10.1186/1477-3155-11-16>.

FERREIRA, Camila Duarte; NUNES, Itaciara Larroza. Oil nanoencapsulation: development, application, and incorporation into the food market. **Nanoscale Research Letters**, [s. l.], v. 14, n. 1, p. 9, 2019. Disponível em: <https://doi.org/10.1186/s11671-018-2829-2>.

GEIGER, Flavia *et al.* Persistent negative effects of pesticides on biodiversity and biological control potential on European farmland. **Basic and Applied Ecology**, [s. l.], v. 11, n. 2, p. 97–105, 2010. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1439179109001388>.

GHANNEY, Nadia. Management of fungal plants diseases. **European Journal of Biological Research**, [s. l.], v. 7, n. 4, p. 309–314, 2017. Disponível em: <https://www.proquest.com/scholarly-journals/management-fungal-plants-diseases/docview/2056022923/se-2?accountid=31223>.

GOH, Kelvin Kim Tha *et al.* The physico-chemical properties of chia seed polysaccharide and its microgel dispersion rheology. **Carbohydrate polymers**, England, v. 149, p. 297–307, 2016.

GOKSEN, Gulden *et al.* Mucilage polysaccharide as a plant secretion: Potential trends in food and biomedical applications. **International journal of biological macromolecules**, Netherlands, v. 230, p. 123146, 2023.

GÓMEZ, Belén *et al.* Microencapsulation of antioxidant compounds through

innovative technologies and its specific application in meat processing. **Trends in Food Science & Technology**, [s. l.], v. 82, p. 135–147, 2018. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S092422441830102X>.

HASHEMINEJAD, Nayeresadat; KHODAIYAN, Faramarz. The effect of clove essential oil loaded chitosan nanoparticles on the shelf life and quality of pomegranate arils. **Food Chemistry**, [s. l.], v. 309, p. 125520, 2020. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0308814619316383>.

HAZNEDAR, S; DORTUNÇ, B. Preparation and *in vitro* evaluation of Eudragit microspheres containing acetazolamide. **International Journal of Pharmaceutics**, [s. l.], v. 269, n. 1, p. 131–140, 2004. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0378517303005167>.

HECKLER, Caroline *et al.* Thymol and carvacrol in nanoliposomes: Characterization and a comparison with free counterparts against planktonic and glass-adhered Salmonella. **Lwt**, [s. l.], v. 127, p. 109382, 2020.

HERNÁNDEZ-NAVA, Ruth *et al.* Encapsulation of oregano essential oil (*Origanum vulgare*) by complex coacervation between gelatin and chia mucilage and its properties after spray drying. **Food Hydrocolloids**, [s. l.], v. 109, p. 106077, 2020.

HOSSAIN, Md Iqbal *et al.* Antibiofilm effect of nisin alone and combined with food-grade oil components (thymol and eugenol) against *Listeria monocytogenes* cocktail culture on food and food-contact surfaces. **Food Control**, [s. l.], v. 135, p. 108796, 2022.

IXTAINA, Vanesa Y; NOLASCO, Susana M; TOMÁS, Mabel C. Physical properties of chia (*Salvia hispanica* L.) seeds. **Industrial Crops & Products**, [s. l.], v. 28, n. 3, p. 286–293, 2008.

JIANG, Chunmei; SHI, Junling; ZHU, Chengyong. Fruit spoilage and ochratoxin a production by *Aspergillus carbonarius* in the berries of different grape cultivars. **Food Control**, [s. l.], v. 30, n. 1, p. 93–100, 2013. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0956713512004355>.

KAUR, Ramandeep; KAUR, Lovedeep. Encapsulated natural antimicrobials: A promising way to reduce microbial growth in different food systems. **Food Control**, [s. l.], v. 123, p. 107678, 2020.

KOWALCZYK, Adam *et al.* Thymol and Thyme Essential Oil-New Insights into Selected Therapeutic Applications. **Molecules (Basel, Switzerland)**, Switzerland, v. 25, n. 18, 2020.

KUMARI, Poonam *et al.* Delineating the Biofilm Inhibition Mechanisms of Phenolic and Aldehydic Terpenes against *Cryptococcus neoformans*. **ACS omega**, United States, v. 4, n. 18, p. 17634–17648, 2019.

KUMARI, Sarita *et al.* Zinc-functionalized thymol nanoemulsion for promoting soybean yield. **Plant physiology and biochemistry : PPB**, France, v. 145, p. 64–74, 2019.

KURD, Forouzan; FATHI, Milad; SHEKARCHIZADEH, Hajar. Nanoencapsulation of hesperetin using basil seed mucilage nanofibers: Characterization and release modeling. **Food Bioscience**, [s. l.], v. 32, p. 100475, 2019. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S2212429217310301>.

LEANNEC-RIALLAND, Valentin *et al.* Use of Defensins to Develop Eco-Friendly Alternatives to Synthetic Fungicides to Control Phytopathogenic Fungi and Their Mycotoxins. **Journal of fungi (Basel, Switzerland)**, Switzerland, v. 8, n. 3, 2022.

LI, Zhicheng *et al.* Controlled Release of Thymol by Cyclodextrin Metal-Organic Frameworks for Preservation of Cherry Tomatoes. **Foods (Basel, Switzerland)**, Switzerland, v. 11, n. 23, 2022.

LIU, Yuhao *et al.* Preparation and Enhanced Antimicrobial Activity of Thymol Immobilized on Different Silica Nanoparticles with Application in Apple Juice. **Coatings**, [s. l.], v. 12, n. 5, p. 671, 2022.

LOMARTIRE, Silvia; GONÇALVES, Ana M M. Novel Technologies for Seaweed Polysaccharides Extraction and Their Use in Food with Therapeutically Applications-A Review. **Foods (Basel, Switzerland)**, Switzerland, v. 11, n. 17, 2022.

MAKHUVELE, Rhulani *et al.* The use of plant extracts and their phytochemicals for control of toxigenic fungi and mycotoxins. **Heliyon**, England, v. 6, n. 10, p. e05291, 2020.

MALEKHOSSEINI, Parisa *et al.* Development of casein-based nanoencapsulation systems for delivery of epigallocatechin gallate and folic acid. **Food Science & Nutrition**, [s. l.], v. 7, n. 2, p. 519–527, 2019. Disponível em: <https://doi.org/10.1002/fsn3.827>.

MARCHESE, Anna *et al.* Antibacterial and antifungal activities of thymol: A brief review of the literature. **Food chemistry**, England, v. 210, p. 402–414, 2016.

MCDONALD, Megan C *et al.* Rapid Parallel Evolution of Azole Fungicide Resistance in Australian Populations of the Wheat Pathogen *Zymoseptoria tritici*. **Applied and environmental microbiology**, United States, v. 85, n. 4, 2019.

MUÑOZ-LEOZ, Borja *et al.* Tebuconazole application decreases soil microbial biomass and activity. **Soil Biology and Biochemistry**, [s. l.], v. 43, n. 10, p. 2176–2183, 2011. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0038071711002513>.

MUÑOZ, Loreto *et al.* Characterization and microstructure of films made from mucilage of *Salvia hispanica* and whey protein concentrate. **Journal of Food Engineering**, [s. l.], v. 111, p. 511–518, 2012.

NABAVI, Seyed Mohammad *et al.* Plants belonging to the genus *Thymus* as antibacterial agents: From farm to pharmacy. **Food Chemistry**, [s. l.], v. 173, p. 339–347, 2015. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0308814614016045>.

NCBI. National Center for Biotechnology Information, 2024. PubChem Compound Summary for CID 6989, Thymol. Available from: <https://pubchem.ncbi.nlm.nih.gov/compound/6989>.

NIKBAKHT NASRABADI, Maryam *et al.* Plant based Pickering stabilization of emulsions using soluble flaxseed protein and mucilage nano-assemblies. **Colloids and Surfaces A: Physicochemical and Engineering Aspects**, [s. l.], v. 563, p. 170–182, 2019. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0927775718316030>.

NIKMARAM, Nooshin *et al.* Emulsion-based systems for fabrication of electrospun nanofibers: food, pharmaceutical and biomedical applications. **RSC Advances**, [s. l.], v. 7, n. 46, p. 28951–28964, 2017. Disponível em: <http://dx.doi.org/10.1039/C7RA00179G>.

OCHOA-VELASCO, Carlos Enrique *et al.* Starch Edible Films/Coatings Added with Carvacrol and Thymol: *In Vitro* and *In Vivo* Evaluation against *Colletotrichum gloeosporioides*. **Foods (Basel, Switzerland)**, Switzerland, v. 10, n. 1, 2021.

PATEIRO, Mirian *et al.* **Nanoencapsulation of Promising Bioactive Compounds to Improve Their Absorption, Stability, Functionality and the Appearance of the Final Food Products.** [*S. l.: s. n.*], 2021.

PEREA-FLORES, M J *et al.* Entrapment Efficiency (EE) and Release Mechanism of Rhodamine B Encapsulated in a Mixture of Chia Seed Mucilage and Sodium Alginate. **Applied Sciences**, [*s. l.*], v. 13, p. 1213, 2023.

PRASAD, R. *et al.* Bio-inspired green synthesis of zinc oxide nanoparticles using *Abelmoschus esculentus* mucilage and selective degradation of cationic dye pollutants. **Journal of Physics and Chemistry of Solids**, [*s. l.*], v. 127, 2019.

RAZAVI, Mahsa *et al.* Production of Innovative Essential Oil-Based Emulsion Coatings for Fungal Growth Control on Postharvest Fruits. **Foods**, [*s. l.*], v. 11, p. 1602, 2022.

RIAT, Arnaud *et al.* Azole Resistance of Environmental and Clinical *Aspergillus fumigatus* Isolates from Switzerland. **Antimicrobial agents and chemotherapy**, United States, v. 62, n. 4, 2018.

SANTRA, Hiran Kanti; BANERJEE, Debdulal. Natural Products as Fungicide and Their Role in Crop Protection BT - Natural Bioactive Products in Sustainable Agriculture. *In*: SINGH, Joginder; YADAV, Ajar Nath (org.). Singapore: Springer Singapore, 2020. p. 131–219. *E-book*. Disponível em: https://doi.org/10.1007/978-981-15-3024-1_9.

SHEIKH, Mehrunisa; MEHNAZ, Samina; SADIQ, Muhammad Bilal. Prevalence of fungi in fresh tomatoes and their control by chitosan and sweet orange (*Citrus sinensis*) peel essential oil coating. **Journal of the science of food and agriculture**, England, v. 101, n. 15, p. 6248–6257, 2021.

SOKOVIĆ, Marina D *et al.* Chemical composition of essential oils of *Thymus* and *Mentha* species and their antifungal activities. **Molecules (Basel, Switzerland)**, Switzerland, v. 14, n. 1, p. 238–249, 2009.

SUMALAN, Renata M *et al.* Assessment of Mint, Basil, and Lavender Essential Oil Vapor-Phase in Antifungal Protection and Lemon Fruit Quality. **Molecules (Basel, Switzerland)**, Switzerland, v. 25, n. 8, 2020.

SUNDAR, S K; PARIKH, Jigisha K. Advances and trends in encapsulation of essential oils. **International journal of pharmaceuticals**, Netherlands, v. 635, p. 122668, 2023.

SUTEU, Daniela *et al.* Challenge of utilization vegetal extracts as natural plant protection products. **Applied Sciences**, [*s. l.*], v. 10, n. 24, p. 8913, 2020.

TAHERI, Afsaneh; JAFARI, Seid Mahdi. Gum-based nanocarriers for the protection and delivery of food bioactive compounds. **Advances in colloid and interface science**, Netherlands, v. 269, p. 277–295, 2019.

TAHMASEBI, Mohammad *et al.* Control of nectarine fruits postharvest fungal rots caused by *Botrytis Cinerea* and *Rhizopus Stolonifer* via some essential oils. **Journal of food science and technology**, India, v. 57, n. 5, p. 1647–1655, 2020.

TANAPICHATSAKUL, Chutima; KHRUENGSAI, Sarunpron; PRIPDEEVECH, Patcharee. *In vitro* and *in vivo* antifungal activity of *Cuminum cyminum* essential oil against *Aspergillus aculeatus* causing bunch rot of postharvest grapes. **PLoS one**, United States, v. 15, n. 11, p. e0242862, 2020.

TER HORST, Britt; MOIEMEN, Naiem; GROVER, Liam. Natural polymers. *In*: [*S. l.: s. n.*], 2019. p. 151–192.

TOHIDI, Behnaz *et al.* Sequencing and variation of terpene synthase gene

(TPS2) as the major gene in biosynthesis of thymol in different *Thymus* species. **Phytochemistry**, England, v. 169, p. 112126, 2020.

TÓPOR, Athos *et al.* Carvacrol nanocapsules as a new antifungal strategy: Characterization and evaluation against fungi important for grape quality and to control the synthesis of ochratoxins. **International journal of food microbiology**, Netherlands, v. 416, p. 110659, 2024.

TOSIF, Mansuri M *et al.* **A Comprehensive Review on Plant-Derived Mucilage: Characterization, Functional Properties, Applications, and Its Utilization for Nanocarrier Fabrication.** [S. l.: s. n.], 2021.

VERWEIJ, Paul E *et al.* Azole resistance in *Aspergillus fumigatus*: a side-effect of environmental fungicide use?. **The Lancet. Infectious diseases**, United States, v. 9, n. 12, p. 789–795, 2009.

WELKE, Juliane Elisa. Fungal and mycotoxin problems in grape juice and wine industries. **Current Opinion in Food Science**, [S. l.], v. 29, 2019.

YAN, Jiaqi *et al.* Antifungal Activities and Mode of Action of *Cymbopogon citratus*, *Thymus vulgaris*, and *Origanum heracleoticum* Essential Oil Vapors against *Botrytis cinerea* and Their Potential Application to Control Postharvest Strawberry Gray Mold. **Foods (Basel, Switzerland)**, Switzerland, v. 10, n. 10, 2021.

YAN, J *et al.* Antifungal activity screening for mint and thyme essential oils against *Rhizopus stolonifer* and their application in postharvest preservation of strawberry and peach fruits. **Journal of applied microbiology**, England, v. 130, n. 6, p. 1993–2007, 2021.

ZETTEL, Viktoria; HITZMANN, Bernd. Applications of chia (*Salvia hispanica* L.) in food products. **Trends in Food Science & Technology**, [s. l.], v. 80, p. 43–50, 2018.

ZIKELI, Florian *et al.* Preparation of Lignin Nanoparticles with Entrapped Essential Oil as a Bio-Based Biocide Delivery System. **ACS omega**, United States, v. 5, n. 1, p. 358–368, 2020.