

RESSALVA

Atendendo solicitação do autor, o texto completo desta **TESE** será disponibilizado somente a partir de 04/03/2024.

Universidade Estadual Paulista
“Júlio de Mesquita Filho”

Faculdade de Ciências Farmacêuticas

**Plant-based nanoemulsions with essential oils
as edible coatings: A novel approach for
strawberry preservation**

Josemar Gonçalves de Oliveira Filho

Tese de Doutorado apresentada à Pós-Graduação em Alimentos e Nutrição para obtenção do título de Doutor em Alimentação e Nutrição.

Área de concentração: Ciência de Alimentos

Orientador: Prof. Dr. Marcos David Ferreira

Araraquara

2022

Plant-based nanoemulsions with essential oils as edible coatings: A new approach for strawberry preservation

Josemar Gonçalves de Oliveira Filho

Tese de Doutorado apresentada à Pós-Graduação em Alimentos e Nutrição para obtenção do título de Doutor em Alimentação e Nutrição.

Área de concentração: Ciência de Alimentos

Orientador: Prof. Dr. Marcos David Ferreira

Araraquara

2022

O486p

Oliveira Filho, Josemar Gonçalves de.

Plant-based nanoemulsions with essential oils as edible coatings: A new approach for strawberry preservation / Josemar Gonçalves de Oliveira Filho. – Araraquara: [S.n.], 2022. 175 f. : il.

Tese (Doutorado) – Universidade Estadual Paulista. “Júlio de Mesquita Filho”. Faculdade de Ciências Farmacêuticas. Programa de Pós Graduação em Alimentos e Nutrição. Área de Concentração em Ciência de Alimentos.

Orientador: Marcos David Ferreira.

1. Óleo essencial. 2. Nanoemulsão. 3. Cera de carnaúba. 4. Amido de aratura. 5. Nanocristais de celulose. I. Ferreira, Marcos David, orient. II. Título.



UNIVERSIDADE ESTADUAL PAULISTA

Câmpus de Araraquara



CERTIFICADO DE APROVAÇÃO

TÍTULO DA TESE:

Plant-based nanoemulsions with essential oils as edible coatings: A novel approach for strawberry preservation

AUTOR: JOSEMAR GONÇALVES

DE OLIVEIRA FILHO

ORIENTADOR: MARCOS DAVID

FERREIRA

Aprovado como parte das exigências para obtenção do Título de Doutor em ALIMENTOS ENUTRIÇÃO, área: Ciência dos Alimentos pela Comissão Examinadora:

Prof. Dr. MARCOS DAVID FERREIRA
(Participação Virtual) EMBRAPA
Instrumentação Agropecuária

Profa. Dra. MARIANA BURANELO EGEA (Participação Virtual)
Departamento de Ciência e Tecnologia de Alimentos / Instituto Federal Goiano - Câmpus Rio Verde

Profa. Dra. ELAINE CRISTINA PARIS (Participação Virtual)
Embrapa Instrumentação / Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária

Profa. Dra. KATIA SIVIERI (Participação Virtual)
Departamento de Alimentos e Nutrição / Faculdade de Ciências Farmacêuticas - UNESP- Araraquara

Araraquara, 04 de março de 2022

Dedico-o à minha família, professores, amigos e a todos que cruzaram meu caminho durante o doutorado.

Agradecimentos

À Fundação Amparo à Pesquisa do Estado de São Paulo – FAPESP, pela bolsa no país, processo 2018/24612-9.

À Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior – CAPES, pela bolsa no país Código de Financiamento 001

Ao professor Dr. Marcos David Ferreira pela orientação ao longo de todo o doutorado.

À Dra. Henriette Cordeiro Monteiro de Azeredo pela confiança e colaboração com essa pesquisa.

Aos analistas, bolsistas e estagiários da Embrapa Instrumentação pelo apoio durante a realização dos experimentos. Em especial: Joana, Silviane, Adriana, Viviane, Milene, Ítalo, Beatriz.

À Faculdade de Ciências Farmacêuticas - UNESP.

À Embrapa Instrumentação pela estrutura laboratorial.

Obrigado!

Resumo

Objetivo: O objetivo deste estudo foi avaliar o potencial de óleos essenciais (OEs) como fungicidas naturais e sua presença em revestimentos bio-nanocompositos baseados em amido de araruta, nanoemulsão de cera de carnaúba e nanocristais de celulose para aplicação na manutenção da qualidade e conservação pós-colheita de morangos durante o armazenamento.

Metodologia: Os OEs das espécies Hortelã-verde (*Mentha spicata*), Hortelã-pimenta (*Mentha x piperita*), Palmarosa (*Cymbopogon martinii*) e Ho wood (*Cinnamomum camphora*) foram caracterizados por CG-SM e CG-FID, e a atividade antifúngica foi avaliada por diferentes métodos *in vitro*, e *in vivo* contra os principais fungos pós-colheita de morango. O efeito da incorporação da cera de carnaúba (0-15% em peso) utilizando a tecnologia de emulsão – micro- e nanoemulsão – nas características (físicas, tecnológicas e ópticas) de filmes/revestimentos de amido de araruta foi investigado. Em seguida, foram desenvolvidos filmes/revestimentos à base de amido de araruta com nanoemulsão de cera de carnaúba, nanocristais de celulose e óleos essenciais de *Mentha spicata* e *Cymbopogon martinii* foram produzidos usando a técnica de *casting*. Os filmes foram caracterizados quanto às propriedades de barreira à água, tração, térmica, ótica e microestrutura, bem como atividade antifúngica *in vitro* contra *Rhizopus stolonifer* e *Botrytis cinerea*. Morangos foram recobertos com os revestimentos desenvolvidos e foram avaliados durante o armazenamento (0, 3, 6, 9, e 12 dias) em relação ao teor de sólidos solúveis, pH, acidez titulável, perda de massa, firmeza, taxa de respiração, coloração, contagem de fungos totais, bactérias mesófilas aeróbias, deterioração fúngica visual, teor de antocianinas, ácido ascórbico, fenóis totais e atividade antioxidante.

Resultados: Os principais componentes dos óleos essenciais foram mentol (45,37%), mentona (20,13%), isomentona (16,94%), acetato de mentila (3,81%), pulegona (1,89%), α -terpineno (1,88%), isopulegol (1,83%), neoisomentol (1,19%), e α -terpineol (1,08%) para óleo essencial de *M. piperita*, linalol (98,39%) para óleo essencial de *C. camphora* e geraniol (83,82%), acetato de geranila (7,49%), linalol (2,48%) e cariofileno (1,33%) para o óleo essencial de *C. martinii*. A maior atividade antifúngica foi promovida por *M. spicata* e *C. martinii* nos métodos de contato direto e contato de vapor, diluição em micro-poços e ensaio de germinação de esporos, e *in vivo* na fase de vapor em morangos inoculados artificialmente com *R. stolonifer* e *B. cinerea*. A presença da cera de carnaúba nos filmes aumentou suas características hidrofóbicas, reduzindo a solubilidade em água, a umidade, a permeabilidade ao vapor de água e a estabilidade térmica, além de melhorar as propriedades de barreira à luz. Os filmes com nanoemulsão apresentaram menor permeabilidade ao vapor de água e propriedades de barreira à luz, bem como melhor resistência à tração e microestrutura mais lisa do que os filmes realizados com microemulsão. Enquanto a incorporação dos nanocristais de celulose diminuiu o teor de umidade e a permeabilidade ao vapor de água dos filmes, os nanocristais de celulose e o óleos essenciais diminuíram a transparência e afetaram a microestrutura dos filmes. A incorporação dos óleos essenciais de *M. spicata* e *C. martinii* melhorou a estabilidade térmica e conferiu excelente atividade contra fungos que

deterioram a fruta. Os filmes demonstraram uma excelente barreira contra o crescimento de fungos, permeabilidade ao vapor de água e luz UV/vis. Os revestimentos carregados com óleos essenciais de *M. spicata* e *C. martinii* foram capazes reduzir significativamente a severidade de *B. cinerea* e *R. stolonifer* em morangos artificialmente inoculados. Os revestimentos bio-nanocompósitos melhoraram a estabilidade dos morangos durante o armazenamento, minimizando a perda de massa, e alterações na cor, textura (exceto os revestimentos com óleo essencial de *C. martinii*), sólidos solúveis, pH, acidez titulável, teor compostos fenólicos, antocianinas, ácido ascórbico e atividade antioxidante em comparação com os morangos sem revestimentos (controle). Além disso, os revestimentos com óleos essenciais de *M. spicata* e *C. martinii* apresentaram atividade antimicrobiana, reduzindo a deterioração visual por fungos e as contagens de bactérias aeróbicas mesófilas e fungos e leveduras durante o armazenamento. **Conclusão:** Pode-se concluir que os revestimentos bio-nanocompósitos, principalmente os carregados com óleo essencial de *M. spicata*, podem ser usados como materiais de revestimentos antimicrobianos para preservar morangos frescos durante a pós-colheita.

Palavras-chave: óleo essencial; nanoemulsão; cera de carnaúba; amido de aratura, nanocristais de celulose.

Abstract

Objective: The aim of this study was to evaluate the potential of essential oils (EOs) as natural fungicides and their presence in bio-nanocomposite coatings based on arrowroot starch, carnauba wax nanoemulsion, and cellulose nanocrystals for application in quality maintenance and postharvest conservation of strawberries during storage. **Methodology:** The EOs of the species Green Mint (*Mentha spicata*), Peppermint (*Mentha x piperita*), Palmarosa (*Cymbopogon martinii*) and Howood (*Cinnamomum camphora*) were characterized by GC-MS and GC-FID, and the antifungal activity was evaluated by different methods *in vitro*, and *in vivo* against the main strawberry postharvest fungi. The effect of incorporating carnauba wax (0-15% by weight) using emulsion technology — micro- and nanoemulsion — on the characteristics (physical, technological and optical) of arrowroot starch films/coatings was investigated. After that, films/coatings were developed based on arrowroot starch with carnauba wax nanoemulsion, cellulose nanocrystals and essential oils of *M. spicata* and *C. martinii* were produced using the casting technique. The films were characterized for water barrier, tensile, thermal, optical and microstructure properties, as well as *in vitro* antifungal activity against *Rhizopus stolonifer* and *Botrytis cinerea*. Strawberries were coated with the developed coatings and were evaluated during storage (0, 3, 6, 9, and 12 days) for soluble solids content, pH, titratable acidity, mass loss, firmness, respiration rate, color, total fungi count and aerobic mesophilic bacteria counts, visual fungal deterioration, anthocyanin, ascorbic acid, and total phenols contents, and antioxidant activity. **Results:** The main components of essential oils were menthol (45.37%), menthone (20.13%), isomentone (16.94%), menthyl acetate (3.81%), pulegone (1.89%), α -terpinene (1.88%), isopulegol (1.83%), neoisomenthol (1.19%), and α -terpineol (1.08%) for essential oil of *M. piperita*, linalool (98.39 %) for essential oil of *C. camphora* and geraniol (83.82%), geranyl acetate (7.49%), linalool (2.48%) and caryophyllene (1.33%) for the essential oil of *C. Martini*. The greatest antifungal activity was promoted by *M. spicata* and *C. martinii* in the direct contact and steam contact methods, micro-well dilution and spore germination assay, and *in vivo* in the vapor phase in strawberries inoculated artificially with *R. stolonifer* and *B. cinerea*. The presence of carnauba wax in the films increased their hydrophobic characteristics, reducing water solubility, moisture, water vapor permeability and thermal stability, in addition to improving light barrier properties. Films with nanoemulsion showed lower permeability to water vapor and light barrier properties, as well as better tensile strength and smoother microstructure than films made with microemulsion. While the incorporation of cellulose nanocrystals decreased the moisture content and water vapor permeability of the films, the cellulose nanocrystals and essential oils decreased the transparency and affected the microstructure of the films. The incorporation of essential oils from *M. spicata* and *C. martinii* improved thermal stability and provided excellent activity against fungi that spoil the fruit. The films demonstrated an excellent barrier against mold growth, permeability to water vapor and UV/vis light. Coatings loaded with essential oils of *M. spicata* and *C. martinii* were able to significantly reduce the severity of *B. cinerea* and *R. stolonifer* in artificially inoculated strawberries. Bio-nanocomposite coatings improved the stability of strawberries during storage, minimizing mass loss, and changes in color, texture (except coatings with *C. martinii* essential oil), soluble

solids, pH, titratable acidity, phenolic, anthocyanins, and ascorbic acid contents, and antioxidant activity compared to uncoated strawberries (control). Furthermore, coatings with essential oils from *M. spicata* and *C. martinii* showed antimicrobial activity, reducing visual deterioration by fungi and the counts of aerobic mesophilic bacteria and fungi and yeasts during storage. **Conclusion:** It can be concluded that bio-nanocomposite coatings, mainly those loaded with *M. spicata* essential oil, can be used as antimicrobial coating materials to preserve fresh strawberries during post-harvest.

Key-words: essential oil; nanoemulsion; carnauba wax; aratura starch, cellulose nanocrystals.

SUMÁRIO

	Pagina
Resumo	iv
Abstract	vi
Introdução	9
Capítulo 1. Nanoemulsions as edible coatings: A potential strategy for fresh fruits and vegetables preservation	12
Introduction	14
Edible coatings – an overview	16
Methods to apply edible coatings	19
Nanomaterials in edible coatings	21
Fundamentals of nanoemulsions	22
Plant-based nanoemulsions as edible coatings on fruits and vegetables postharvest	25
Trends in materials based on nanoemulsions with potential for application in the preservation of fruits and vegetables	33
Potential toxicity, limitations, and regulatory aspects of nanoemulsions	35
Conclusion	36
Reference	37
Capítulo 2. Chemical composition and antifungal activity of essential oils and their combinations against <i>Rhizopus stolonifer</i> and <i>Botrytis cinerea</i> in strawberries	45
Introduction	47
Material and methods	48
Results and discussion	52

Conclusion	68
Reference	68
Capítulo 3. New approach in the development of edible films: The use of carnauba wax micro- or nanoemulsions in arrowroot starch-based films.	73
Introduction	75
Material and methods	76
Results and discussion	80
Conclusion	93
Reference	93
Capítulo 4. Arrowroot starch-based films incorporated with a carnauba wax nanoemulsion, cellulose nanocrystals, and essential oils: A new functional material for food packaging applications	103
Introduction	105
Material and methods	106
Results and discussion	110
Conclusion	122
Reference	123
Capítulo 5. Bio-nanocomposite edible coatings loaded with essential oils to preserve quality and improve shelf life of strawberry cv. 'Oso Grande'	130
Introduction	132
Material and methods	133
Results and discussion	134
Conclusion	139
Reference	155
Considerações finais	162
Referências	164

Introdução

O morango é uma fruta não climatérica caracterizada por apresentar sabor único, ser altamente desejável e ser uma fonte relevante de compostos bioativos devido aos altos níveis de vitamina C, vitamina E e compostos fenólicos, assim como antocianinas, pigmentos que conferem cor vermelha ao morango e estão relacionadas a benefícios para a saúde (1). Devido à sua alta taxa de respiração, textura macia e sensibilidade à temperatura, choques mecânicos e vibrações, os morangos possuem vida pós-colheita curta. Isso pode resultar em um alto grau de deterioração por vários agentes patogênicos, o que, por sua vez, impacta em mudanças no pH, acidez titulável, teor de sólidos solúveis totais, perda de cor, firmeza e massa, resultando em deterioração e reduzindo a vida útil (2).

Os morangos são tradicionalmente tratados com diferentes fungicidas para controlar a deterioração pós-colheita. Entretanto, estes deixam resíduos que apresentam riscos para os seres humanos e o meio ambiente, e os consumidores têm exigido cada vez mais uma produção de alimentos com alta qualidade e vida útil prolongada, com o mínimo de conservantes químicos sintéticos. Assim, medidas eficazes para o aumento da vida útil devem ser exploradas em relação aos mercados distantes, mantendo a qualidade nutricional da fruta (3).

Existe, portanto, uma enorme demanda por tecnologias alternativas pós-colheita que devem oferecer proteção contra doenças pós-colheita e distúrbios fisiológicos, além de retardar a senescência, e, com isso, melhorar o manuseio e manutenção da qualidade de frutas, como o morango, durante a pós-colheita (4). Um dos métodos propostos é a aplicação de revestimentos comestíveis incorporados com agentes antimicrobianos naturais como os óleos essenciais (OEs). Resultados promissores para preservar a qualidade dos produtos hortícolas frescos, controlando a deterioração pós-colheita e ampliando a vida útil têm sido encontrados (5, 6, 7).

Os revestimentos comestíveis são geralmente baseados em polissacarídeos, proteínas e lipídeos, isolados ou em combinação. Nas frutas e vegetais, esses revestimentos compostos baseados em polissacarídeos ou proteínas associados a lipídeos são usualmente utilizados para atingir boas características de barreira a gases e à umidade proporcionadas pelos componentes polimérico e lipídico, respectivamente (8). As propriedades desses revestimentos, como a adesão e propriedades mecânicas, ainda, podem ser melhoradas incorporando nanoestruturas de reforço, como os nanocristais de celulose (9,10). Os nanocristais de celulose têm atraído grande atenção por serem renováveis e ambientalmente benignos, naturalmente abundantes, biodegradáveis, biocompatíveis e com excelentes propriedades mecânicas (11).

Os consumidores estão cada vez mais preocupados com a segurança e qualidade dos alimentos, impulsionando a demanda pelos chamados “revestimentos baseados em plantas”, ou seja, revestimentos à base de produtos naturais de origem vegetal que não apresentam nenhum dano à saúde do consumidor se consumidos. O uso de ceras e compostos de origem animal tem sido limitado por consumidores veganos e vegetarianos,

consumidores que são alérgicos a produtos de origem animal (como a quitosana) e crenças religiosas que não encorajam o consumo de animais (9).

Os OEs são compostos aromáticos derivados do metabolismo secundário das plantas (12) que exercem fortes atividades antibacterianas, antivirais e antifúngicas, estimulando sua aplicação como antimicrobianos naturais (13). A preocupação crescente dos consumidores com a segurança dos conservantes químicos sintéticos levou ao aumento da tendência à utilização de OEs como agentes bioativos naturais na indústria alimentícia (14). Eles apresentam baixa toxicidade em mamíferos, menor efeito ambiental e natureza volátil, o que facilita seu uso em baixas concentrações seguras para o consumo. Além disso, os consumidores aceitam os OEs mais prontamente porque são amplamente utilizados em práticas culinárias gerais. Eles também são ecologicamente corretos e são conhecidos como agroquímicos de “risco reduzido” (15).

A utilização de nanoemulsões como revestimentos incorporadas com agentes bioativos, como os OEs, tem emergido como uma ferramenta potencial para aplicação em frutas (16). A formulação de nanoemulsões pode melhorar as propriedades de barreira do revestimento devido ao tamanho reduzido das gotículas dispersas e maior homogeneidade em comparação com emulsões convencionais (18).

Neste contexto, o objetivo do presente trabalho foi avaliar o potencial de OEs como fungicidas naturais e sua presença em revestimentos nanoestruturados baseados em nanoemulsões para aplicação na manutenção da qualidade e conservação pós-colheita de morangos, como proposta de uso de agentes naturais de origem vegetal como materiais ativos para recobrimento de frutas.

Na Figura 1 está apresentado o esquema geral da organização dos capítulos.

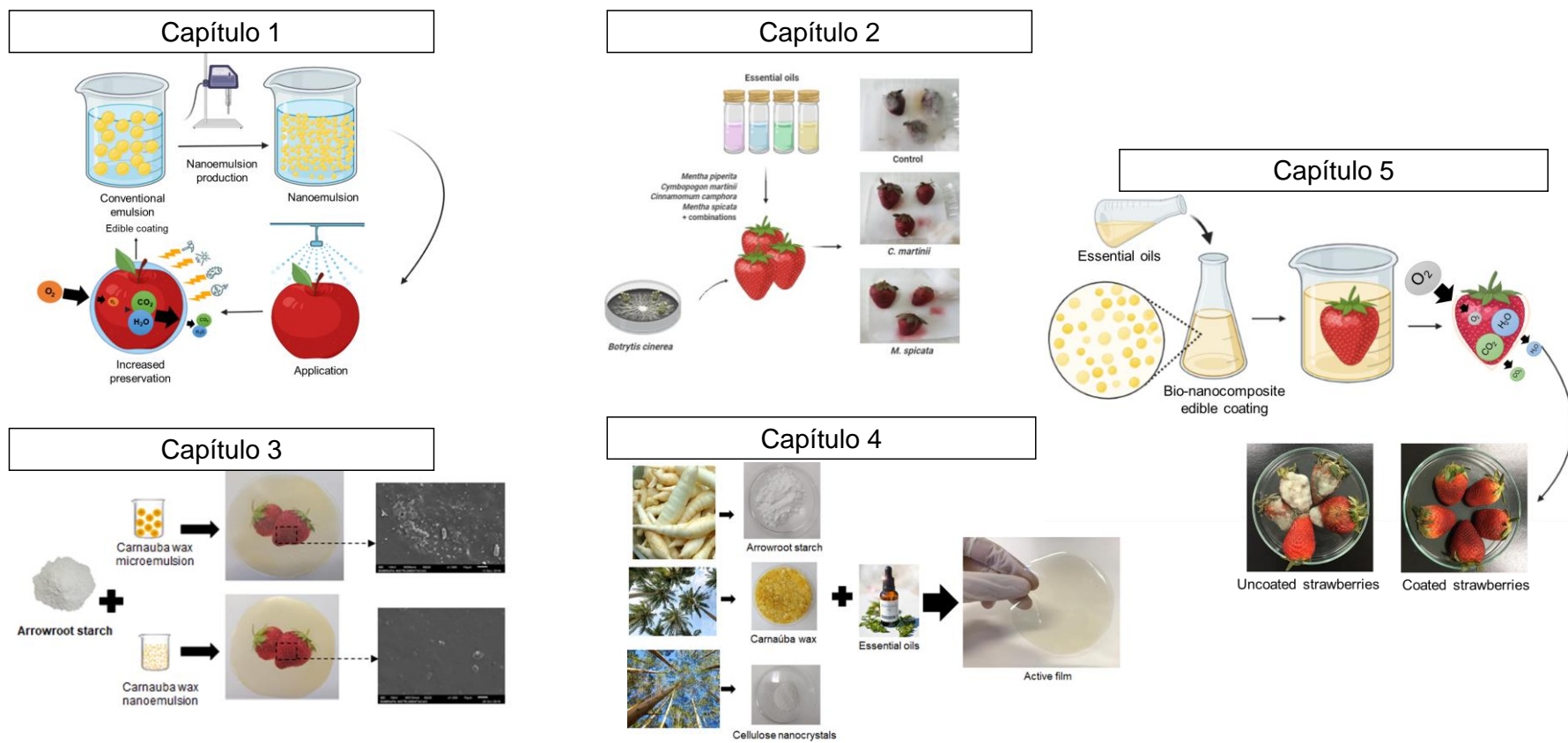


Figura 1. Esquema geral da composição dos capítulos.

Considerações Finais

Os óleos essenciais de *C. martinii* e *M. spicata* exibiram a maior atividade antifúngica *in vitro* e *in vivo* contra *R. stolonifer* e *B. cinerea*. Pode-se propor que esses óleos essenciais podem atuar efetivamente como fungicidas naturais, tornando-se uma alternativa aos fungicidas sintéticos para a preservação de morangos frescos.

Filmes do amido de araruta foram incorporados à cera de carnaúba (seja como microemulsão - ME - ou como nanoemulsão - NE) e formados pelo método de *casting*. A mudança da fase da cera de carnaúba de microemulsão para nanoemulsão foi a mais efetiva na redução da permeabilidade ao vapor de água e e opacidade dos filmes. Além disso, os filmes com nanoemulsão de cera promoveram menor alteração na resistência à tração e na microestrutura dos filmes. O filme incorporado com 15% de NE exibiu as melhores propriedades gerais para aplicações em embalagens de alimentos.

Filmes nanocompositos foram desenvolvidos por meio da combinação de amido de araruta (AA), nanoemulsão de cera de carnaúba (NEC), nanocristais de celulose (NCC) e óleos essenciais (OEs) de *C. martinii* (OEC) e *M. spicata* (OEM). Filmes compostos de AA, NEC, NCC e OEC ou OEM foram excelentes barreiras contra PVA, luz ultravioleta e crescimento de fungos. A adição de OEs forneceu aos filmes excelente atividade antifúngica contra fungos que deterioram frutas durante a pós-colheita. Assim, os filmes nanocompósitos AA/NEC/NCC/OEC e AA/NEC/NCC/OEM representam novos materiais com potencial aplicação como materiais de embalagem ativos ou revestimentos para frutas e vegetais frescos.

Os revestimentos bio-nanocompósitos mostraram-se capazes de controlar o desenvolvimento de doenças pós-colheita em morangos inoculados artificialmente. Os revestimentos bio-nanocompósitos também foram capazes de melhorar a estabilidade dos morangos durante o armazenamento, minimizando a perda de massa e mudanças na cor,

textura (exceto o revestimento com OEC), sólidos solúveis, pH, acidez titulável, conteúdo fenólico, antocianinas, ácido ascórbico, e atividade antioxidante em comparação com morangos de controle (não revestidos). Além disso, os revestimentos com OEC e OEM mostraram atividade antimicrobiana, reduzindo a deterioração visual por fungos e bactérias aeróbias mesofílicas e contagens de fungos e leveduras durante o armazenamento. Pode-se concluir que revestimentos bio-nancompósitos, principalmente aqueles carregados com OEM podem ser usados como materiais de revestimento antimicrobiano para preservar morangos frescos durante a pós-colheita.

Referências

1. Ariza M T, Reboledo-Rodríguez P, Mazzoni L, Forbes-Hernández TY, Giampieri F, Afrin S & Mezzetti B. Strawberry achenes are an important source of bioactive compounds for human health. *International Journal of Molecular Sciences*. 2016; 17(7):1103.
2. Dhital R, Joshi P, Becerra-Mora N, Umagiliyage A, Chai T, Kohli P & Choudhary R. Integrity of edible nano-coatings and its effects on quality of strawberries subjected to simulated in-transit vibrations. *LWT*. 2017; 80: 257-264.
3. Feliziani E & Romanazzi G. Postharvest decay of strawberry fruit: Etiology, epidemiology, and disease management. *Journal of Berry Research*. 2018; 6(1): 47-63.
4. Kuchi VS & Sharavani C S R. Fruit physiology and postharvest management of strawberry. *Strawberry-Pre-and Post-Harvest Management Techniques for Higher Fruit Quality*. 2019.
5. Quintana, SE, Llalla O, García-Risco, MR & Fornari T. Comparison between essential oils and supercritical extracts into chitosan-based edible coatings on strawberry quality during cold storage. *The Journal of Supercritical Fluids*. 2021;171: 105198.
6. Oyom W, Xu H, Liu Z, Long H, Li Y, Zhang Z & Prusky D. Effects of modified sweet potato starch edible coating incorporated with cumin essential oil on storage quality of 'early crisp'. *LWT*. 2022; 153: 112475.
7. Hashemi M, Dastjerdi AM, Mirdehghan SH, Shakerardekani A & Golding JB. Incorporation of *Zataria multiflora* boiss essential oil into gum Arabic edible coating to maintain the quality properties of fresh in-hull pistachio (*Pistacia vera* L.). *Food Packaging and Shelf life*. 2021; 30: 100724.
8. Hashemi M, Dastjerdi AM, Mirdehghan SH, Shakerardekani A & Golding JB. Incorporation of *Zataria multiflora* boiss essential oil into gum Arabic edible coating to maintain the quality properties of fresh in-hull pistachio (*Pistacia vera* L.). *Food Packaging and Shelf life*. 2021; 30: 100724.

9. Maringgal B, Hashim N, Tawakkal ISMA, & Mohamed, MTM. Recent advance in edible coating and its effect on fresh/fresh-cut fruits quality. *Trends in Food Science & Technology*. 2020; 96: 253-267.
10. Walters CM, Boott CE, Nguyen TD, Hamad WY & MacLachlan MJ. Iridescent cellulose nanocrystal films modified with hydroxypropyl cellulose. *Biomacromolecules*. 2020; 21(3): 1295-1302.
11. Santamaria-Echart A, Ugarte L, García-Astrain C, Arbelaiz A, Corcuera MA, & Eceiza A. Cellulose nanocrystals reinforced environmentally-friendly waterborne polyurethane nanocomposites. *Carbohydrate polymers*. 2016; 151: 1203-1209.
12. El Asbahani A, Miladi K, Badri W, Sala M, Addi EA, Casabianca H. & Elaissari A. Essential oils: From extraction to encapsulation. *International journal of pharmaceutics*. 2015; 483(1-2): 220-243.
13. Burt S. Essential oils: their antibacterial properties and potential applications in foods—a review. *International journal of food microbiology*. 2004; 94(3): 223-253.
14. Noori S, Zeynali F & Almasi H. Antimicrobial and antioxidant efficiency of nanoemulsion-based edible coating containing ginger (*Zingiber officinale*) essential oil and its effect on safety and quality attributes of chicken breast fillets. *Food control*. 2018; 84: 312-320.
15. Sivakumar D, & Bautista-Baños S. A review on the use of essential oils for postharvest decay control and maintenance of fruit quality during storage. *Crop Protection*. 2014; 64: 27-37.
16. de Oliveira Filho, J. G., Miranda, M., Ferreira, M. D., & Plotto, A. Nanoemulsions as Edible Coatings: A Potential Strategy for Fresh Fruits and Vegetables Preservation. *Foods*. 2021; 10(10): 2438.
17. Rao J & McClements DJ. Food-grade microemulsions and nanoemulsions: Role of oil phase composition on formation and stability. *Food hydrocolloids*. 2012; 29(2): 326-334.