NANOENCAPSULAÇÃO DO ÓLEO ESSENCIAL DE AROEIRA-VERMELHA (*SCHINUS TEREBINTHIFOLIA)*: OBTENÇÃO E CARACTERIZAÇÃO FÍSICO-QUÍMICA

Ana Carolina Cassiano Couto[1], Carla Araújo Souza[2], Wagner Luiz da Costa Freitas[2], André Lazarin Gallina[3]; Fernanda Oliveira Lima[2], Letiére Cabreira Soares[2]

[1]Universidade Federal da Fronteira Sul (UFFS), Realeza, Paraná, Brasil (ana.couto@estudante.uffs.edu.br)
[2]Universidade Federal da Fronteira Sul (UFFS), Realeza, Paraná, Brasil
[3]Universidade Estadual do Centro-Oeste (UNICENTRO), Guarapuava, Paraná, Brasil

Resumo: Óleos essenciais apresentam potencial biológico, porém possuem baixa estabilidade físico-química. Este estudo desenvolveu nanocápsulas de poli(ε-caprolactona) contendo óleo essencial de *Schinus terebinthifolia*, avaliando tamanho de partícula, PDI, potencial zeta e pH durante 30 dias. As formulações apresentaram estabilidade coloidal e tamanho nanométrico, destacando o potencial da nanoencapsulação para aplicações biológicas e terapêuticas.

Palavras-chave: Encapsulamento polimérico; aroeira-da-praia; aroeira-pimenteira; policaprolactona; estabilidade.

INTRODUÇÃO

Os óleos essenciais têm despertado crescente interesse devido às suas diversas atividades biológicas, especialmente antimicrobianas e anti-inflamatórias. Produzidos como metabólitos secundários de plantas aromáticas, esses compostos desempenham funções de proteção contra microrganismos e fatores ambientais, sendo geralmente obtidos por hidrodestilação (Battisti et al., 2021; Cole et al., 2014; Miri, 2025).

Entre as espécies vegetais de interesse destaca-se a aroeira-vermelha, *Schinus terebinthifolia*, planta nativa da América do Sul amplamente encontrada no Brasil. Seu óleo essencial, concentrado principalmente nos frutos, apresenta compostos terpenoides e fenólicos, como α-pineno, mirceno, limoneno e terpineno, associados a atividades antimicrobianas, anti-inflamatórias e cicatrizantes (Cunha et al., 2024; Dannenberg et al., 2019.; Schimitberger et al., 2018). A ação antimicrobiana destes compostos está relacionada à desorganização da membrana celular dos microrganismos, aumento da permeabilidade celular e indução de estresse oxidativo (Dannenberg et al., 2019).

Apesar do potencial biológico, os óleos essenciais apresentam limitações como elevada volatilidade, baixa estabilidade térmica e sensibilidade à luz e ao oxigênio. Nesse contexto, as nanotecnologias surgem como alternativa para aumentar a estabilidade e eficiência desses compostos bioativos (Sharma et al., 2022). Dentre os sistemas nanoestruturados, as nanocápsulas poliméricas de poli(ε-caprolactona) (PCL) destacam-se por promoverem proteção dos compostos voláteis, maior solubilidade em meio aquoso e liberação controlada das substâncias ativas (Albuquerque et al., 2022; Giordani et al., 2014).

Assim, o presente trabalho teve como objetivo avaliar a caracterização e estabilidade de nanocápsulas contendo óleo essencial de Schinus terebinthifolia, por meio da análise de parâmetros como índice de polidispersão (PDI), potencial zeta, pH e tamanho de partículas, visando identificar a formulação com maior estabilidade ao longo do armazenamento.

MATERIAL E MÉTODOS

Obtenção do óleo essencial

As sementes de Aroeira-Vermelha (*Schinus terebinthifolia*) foram coletadas em março de 2026, na cidade de Realeza-Paraná-Brasil, e congeladas até o momento da extração. Para a extração, as sementes foram moídas em prensa mecânica à frio e colocadas no equipamento para hidrodestilação por Clevenger, durante 4 horas.

Formulação

As suspensões de nanocápsulas foram preparadas pelo método de deposição interfacial de polímero pré-formado, adaptado de Giordani et al. (2014). Brevemente, uma solução orgânica composta pela fase oleosa - ácido caprílico, óleo essencial, Span 80® (0,191 g), polímero PCL (70.000–90.000) e acetona (66,7 mL) a 40 °C - foi adicionada sob agitação magnética moderada a uma solução aquosa (133,2 mL de água Milli-Q) contendo Tween 80® (0,192 g) a 40 °C. A agitação magnética foi mantida por 10 minutos. Em seguida, o sistema foi concentrado por evaporação sob pressão reduzida até um volume final de 135 mL, a 40 °C. Todas as formulações foram armazenadas protegidas da luz.

A pesquisa foi conduzida em delineamento experimental do tipo fatorial 2^2, com três pontos centrais, totalizando sete ensaios. Foram avaliados dois fatores independentes: massa de óleo essencial e massa de PCL, em dois níveis (baixo e alto). Os pontos centrais foram utilizados para avaliação da repetibilidade e estabilidade do sistema, como pode ser observado na Tabela 1.

Caracterização físico-química

A caracterização e a avaliação da estabilidade do nanoencapsulamento consistiu na avaliação do tamanho de partículas, o Índice de Polidispersão (PDI), o potencial Zeta e o pH.

Tabela 1. Delineamento experimental do estudo.

Ensaio	Massa de óleo essencial	Massa de PCL
Controle	0,776 g ácido caprílico	0,250 g
1	0,388 g ácido caprílico e 0,338 g óleo essencial	0,125 g
2	0,776 g óleo essencial	0,125 g
3	0,388 g ácido caprílico e 0,338 g óleo essencial	0,250 g
4	0,776 g óleo essencial	0,250 g
5 - 7	0,194 g ácido caprílico e 0,582 g óleo essencial	0,188 g

RESULTADOS E DISCUSSÃO

Os resultados da análise da estabilidade do óleo consistiu em quatro parâmetros analíticos, conforme Tabela 2, o tamanho de partícula, o Índice de Polidispersão (PDI), o Potencial Zeta e o pH, das diferentes amostras, ao longo de 30 dias. As amostras foram analisadas semanalmente em triplicata.

Tabela 2. Caracterização e avaliação da estabilidade em 30 dias.

Ensaio	Tamanho (nm)	PDI	Potencial Zeta (mV)	pH
Controle	284,8 ± 3,0	0,125 ± 0,008	-36,4 ± 1,7	7,79 ± 0,62
1	229,8 ± 4,6	0,103 ± 0,009	-37,1 ± 2,2	7,45 ± 0,93
2	318,5 ± 17,4	0,262 ± 0,017	-37,1 ± 6,1	7,23 ± 0,90
3	266,1 ± 7,3	0,080 ± 0,011	-35,4 ± 2,6	8,99 ± 0,70
4	276,0 ± 4,6	0,176 ± 0,041	-37,7 ± 1,3	7,20 ± 0,63
5 - 7	213,9 ± 10,8	0,090 ± 0,014	-37,7 ± 1,0	8,83 ± 0,52

Análise do Tamanho de partículas

As nanocápsulas foram obtidas pelo método de nanoprecipitação, no qual o polímero precipita de forma organizada na interface entre a gotícula de óleo e a fase aquosa, promovendo o encapsulamento do óleo essencial (Suthovski et al., 2023). O diâmetro final das nanopartículas depende diretamente do método de preparação empregado e da composição qualitativa e quantitativa da formulação. Além disso, o tipo de óleo utilizado no núcleo influencia significativamente o tamanho das partículas devido às diferenças de viscosidade, hidrofobicidade e tensão interfacial da substância (Schaffazick et al., 2003).

Os resultados demonstraram que o tamanho médio das nanopartículas variou entre 213,9 nm e 318,5 nm. O ensaio 1, formulado com menores concentrações de óleo essencial e PCL, apresentou tamanho médio reduzido (229,8 ± 4,6 nm), indicando formação de partículas menores e mais homogêneas. Esse comportamento sugere que menores concentrações dos componentes favoreceram maior eficiência no processo de nanoprecipitação, promovendo melhor organização estrutural das partículas.

A formulação central (ensaios 5–7) apresentou o menor tamanho médio dentre todas as formulações analisadas (213,9 ± 10,8 nm). Esse resultado demonstra que proporções intermediárias entre óleo essencial e polímero favoreceram o equilíbrio do sistema, contribuindo para maior estabilidade e redução da agregação das partículas.

O ensaio 2, contendo elevada concentração de óleo essencial e menor concentração de PCL, apresentou o maior tamanho médio de partículas (318,5 ± 17,4 nm). A menor proporção de polímero disponível para revestimento da fase oleosa pode ter dificultado a

estabilização adequada das partículas, favorecendo processos de coalescência e agregação. O elevado desvio padrão reforça a menor homogeneidade da formulação.

O ensaio 3, contendo menor concentração de óleo essencial e maior concentração de PCL, apresentou tamanho médio intermediário (266,1 ± 7,3 nm). O aumento da concentração do polímero possivelmente promoveu maior espessura da parede polimérica das nanocápsulas, refletindo no aumento do diâmetro das partículas.

Da mesma forma, o ensaio 4, formulado com elevadas concentrações de óleo essencial e PCL, apresentou tamanho médio de 276,0 ± 4,6 nm. Embora a maior quantidade de polímero tenha contribuído para estabilização do sistema, o aumento simultâneo da fase oleosa provavelmente elevou a viscosidade do meio e favoreceu a formação de partículas maiores.

O ensaio controle apresentou tamanho médio de 284,8 ± 3,0 nm, demonstrando comportamento intermediário em relação às demais formulações.

De forma geral, os resultados indicam que o equilíbrio entre as concentrações de óleo essencial e PCL exerce influência significativa sobre o tamanho das nanopartículas, sendo que formulações com proporções mais equilibradas apresentaram melhores características físico-químicas e maior estabilidade do sistema nanoencapsulado.

Índice de Polidispersão

O Índice de polidispersão (PDI) quantifica a homogeneidade da distribuição do tamanho das partículas em suspensão.

Os valores de PDI variaram entre 0,080 ± 0,011 e 0,262 ± 0,017. Todas as formulações apresentaram valores inferiores a 0,3, indicando sistemas homogêneos e adequados para aplicações nanoestruturadas.

O ensaio 3 apresentou o menor índice de polidispersão (0,080 ± 0,011), sugerindo elevada uniformidade no tamanho das partículas. A maior concentração de PCL presente nessa formulação provavelmente favoreceu maior estabilização interfacial durante a formação das nanocápsulas.

A formulação central também apresentou baixa polidispersão (0,090 ± 0,014), reforçando a hipótese de que proporções intermediárias entre óleo essencial e polímero promovem maior equilíbrio do sistema.

O ensaio 1 apresentou PDI de 0,103 ± 0,009, indicando boa homogeneidade, possivelmente devido às menores concentrações de óleo essencial e polímero, que favoreceram a formação uniforme das partículas.

Por outro lado, o ensaio 2 apresentou o maior valor de PDI (0,262 ± 0,017), demonstrando maior heterogeneidade da formulação. A elevada concentração de óleo essencial associada à menor quantidade de polímero pode ter dificultado a estabilização das gotículas oleosas durante o processo de nanoprecipitação.

O ensaio 4 apresentou valor intermediário de PDI (0,176 ± 0,041), sugerindo que, apesar da maior quantidade de PCL contribuir para a estabilização, o excesso simultâneo de óleo essencial pode ter comprometido parcialmente a uniformidade do sistema.

Análise Potencial Zeta

O potencial zeta está relacionado ao potencial elétrico da superfície das partículas, sendo diretamente influenciado pelas alterações na interface entre as nanopartículas e o meio dispersante. Esse parâmetro depende da constituição química do polímero, do agente estabilizante utilizado e do pH empregado no meio de dispersão (Giordani, 2012). Além disso, o potencial zeta é considerado um dos principais indicadores da estabilidade coloidal de sistemas nanoestruturados, uma vez que está associado às forças de repulsão eletrostática entre as partículas.

A PCL possui grupos carboxílicos terminais em sua estrutura química, os quais contribuem para os valores negativos observados nas análises de potencial zeta. Valores absolutos acima de 10 mV já são considerados adequados para promover estabilidade coloidal, devido à formação de uma barreira energética entre as partículas, reduzindo a ocorrência de agregação (Giordani, 2012). No presente estudo, todas as formulações apresentaram valores superiores a 30 mV em módulo, indicando elevada estabilidade físico-química dos sistemas nanoencapsulados.

Os valores de potencial zeta variaram entre -35,4 ± 2,6 mV e -37,7 ± 1,0 mV. Os ensaios 4 e central apresentaram os maiores valores absolutos (-37,7 mV), sugerindo maior estabilidade eletrostática das partículas. Esse comportamento pode estar relacionado à maior disponibilidade de grupos ionizáveis da PCL na superfície das nanocápsulas, favorecendo o aumento da repulsão entre as partículas.

O ensaio 1 também apresentou elevada estabilidade coloidal, com potencial zeta de -37,1 ± 2,2 mV, demonstrando que mesmo menores concentrações de polímero foram suficientes para garantir adequada estabilização superficial das nanopartículas.

O ensaio 2 apresentou potencial zeta de -37,1 ± 6,1 mV, indicando boa estabilidade coloidal, embora os maiores valores de tamanho de partícula e PDI observados nessa formulação sugiram que a elevada concentração de óleo essencial associada à menor quantidade de PCL pode ter comprometido parcialmente a homogeneidade do sistema.

O ensaio 3 apresentou o menor valor absoluto de potencial zeta (-35,4 ± 2,6 mV), embora ainda dentro da faixa considerada adequada para sistemas estáveis. Esse comportamento pode estar relacionado às alterações promovidas pela maior concentração de PCL na organização interfacial das partículas e na distribuição das cargas superficiais.

De forma geral, os resultados demonstraram que todas as formulações apresentaram adequada estabilidade coloidal ao longo do período de armazenamento, evidenciando a eficiência da PCL como agente estabilizante no processo de nanoencapsulação do óleo essencial de *Schinus terebinthifolia*.

pH

Os valores de pH variaram entre 7,20 ± 0,63 e 8,99 ± 0,70, mantendo-se em faixa neutra a levemente alcalina durante os 30 dias de avaliação. A mensuração do pH contribui na avaliação da estabilidade, já que o nível de acidez ou neutralidade do meio afeta diretamente a integridade físico-química da formulação.

Os ensaios 3 e central apresentaram os maiores valores de pH, com médias de 8,99 ± 0,70 e 8,83 ± 0,52, respectivamente. Esse comportamento pode estar associado à maior concentração de PCL presente nessas formulações, uma vez que o polímero pode influenciar o equilíbrio iônico do meio dispersante.

Os ensaios 2 e 4 apresentaram menores valores médios de pH (7,23 ± 0,90 e 7,20 ± 0,63, respectivamente). A maior concentração de óleo essencial presente nessas formulações pode ter contribuído para a redução do pH do sistema devido à presença de compostos químicos com caráter levemente ácido.

Apesar das variações observadas, todas as formulações permaneceram dentro de uma faixa de pH considerada adequada para estabilidade físico-química das nanocápsulas.

CONCLUSÃO

De forma geral, os resultados demonstraram que as concentrações de óleo essencial e PCL influenciaram diretamente as propriedades físico-químicas das formulações nanoencapsuladas. Formulações com proporções equilibradas entre fase oleosa e polímero, especialmente a formulação central, apresentaram melhores características de estabilidade, menores tamanhos de partícula, baixa polidispersão e adequado potencial zeta, evidenciando maior homogeneidade e estabilidade coloidal do sistema.

Assim, a nanoencapsulação do óleo essencial de *Schinus terebinthifolia* representa uma alternativa promissora para aumentar a estabilidade e a eficiência biológica do óleo, ampliando suas possibilidades de aplicação tecnológica e terapêutica.

AGRADECIMENTOS

À Fundação Araucária de Apoio ao Desenvolvimento Científico e Tecnológico do Estado do Paraná.

REFERÊNCIAS

Albuquerque, P. M.; Azevedo, S. G.; de Andrade, C. P.; D'Ambros, N. C. S.; Pérez, M. T. M.; Manzato, L. Biotechnological Applications of Nanoencapsulated Essential Oils: A Review. **Polymers**, v. 14, n. 24, p. 5495, 2022.

Battisti, M. A.; Caon, T.; de Campos, A. M.A short review on the antimicrobial micro- and nanoparticles loaded with Melaleuca alternifolia essential oil. **Journal of Drug Delivery Science and Technology**, v. 63, p. 102283, 2021.

Ben Miri Y. Essential Oils: Chemical Composition and Diverse Biological Activities: A Comprehensive Review. **International Journal of Phytomedicine and Phytotherapy**, v. 11, n. 1, e1101, 2025.

Bilia, A. R., Guccione, C., Isacchi, B., Righeschi, C., Firenzuoli, F., Bergonzi, M. C. Essential Oils Loaded in Nanosystems: A Developing Strategy for a Successful Therapeutic Approach. **Evidence-Based Complementary and Alternative Medicine**, volume 2014, número das páginas 651594, 2014.

Cole, E. R.; dos Santos, R. B.; Lacerda Júnior, V.; Martins, J. D. L.; Greco, S. J.; Cunha Neto, A. Chemical composition of essential oil from ripe fruit of Schinus terebinthifolius Raddi and

evaluation of its activity against wild strains of hospital origin. **Brazilian Journal of Microbiology**, v. 45, n. 3, p. 821-828, 2014.

Cunha, L. O.; Silva, M. S.; Andrade, L. G. Potencial fitoterápico e benefícios da aroeira. **Revista Ibero-Americana de Humanidades, Ciências e Educação**, v. 10, n. 6, p. 2765-2785, 2024.

Dannenberg, G. S.; Funck, G. D.; Silva, W. P.; Fiorentini, Â. M. Essential oil from pink pepper (Schinus terebinthifolius Raddi): Chemical composition, antibacterial activity and mechanism of action. **Food Control**, v. 95, p.

Mora-Huertas, C. E., Fessi, H., & Elaissari, A. Influence of polymer and lipid composition on drug release from nanocapsules. **International Journal of Pharmaceutics**, volume 385, páginas 113-142, 2010.

Giordani, C. F. A. *et al*. Diphenyl Diselenide-Loaded Nanocapsules: Preparation and Biological Distribution. **Applied Biochemistry and Biotechnology**, v. 172, n. 2, p. 755–766, 2014.

Prigol, M., Nogueira, C. W., Zeni, G., Bronze, M. R., & Constantino, L. Bioavailability and oral pharmacokinetics of organoselenium compounds. **Applied Biochemistry and Biotechnology**, volume 169, páginas 885-893, 2013.

Schaffazick, S. R.; Guterres, S. S.; Freitas, L. L.; Pohlmann, A. R. Caracterização e estabilidade físico-química de sistemas poliméricos nanoparticulados para administração de fármacos. **Química Nova**, v. 26, n. 5, p. 726-737, 2003.

Sharma, N.; Roy, P. S. D.; Majeed, A.; Salaria, K. H.; Chalotra, R.; Padekar, S. K.; Guleria, S. Nanoencapsulation- A Novel Strategy for Enhancing the Bioactivity of Essential Oils: A Review. **Indian Journal of Agricultural Research**, v. 56, n. 3, p. 241-248, 2022.

Schimitberger, V. M. B.; Pratti, D. L. A.; Cavalcanti, L. C.; Ramalho, V. F.; Costa, A. P. F.; Scherer, R.; Kuster, R. M.; Ramos, A. C.; Silva, A. G. Volatile compounds profile changes from unripe to ripe fruits of Brazilian pepper (Schinus terebinthifolia Raddi). **Food Chemistry**, v. 257, p. 201-207, 2018.

Sousa, D. P., Damasceno, R. O. S., Amorati, R., Elshabrawy, H. A., De Castro, R. D., Bezerra, D. P., Nunes, V. R. V., Gomes, R. C., Lima, T. C. Essential Oils: Chemistry and Pharmacological Activities. **Biomolecules**, volume 13, número das páginas 1144, 2023.

Suthovski, G.; Santa Catarina, A.; Perin, D. P.; Mainardes, R. M.; Starikoff, K. R.; Gallina, A. L.; Azevedo, M. G. B.; Dalmolin, F.; Cervo, L. V. Effect of polycaprolactone nanocapsules loaded with essential oils on biofilm formation by Staphylococcus aureus strains isolated from bovine mastitis cases. **Brazilian Journal of Pharmaceutical Sciences**, v. 59, e23068, 2023.

Rocha, J. T., Gai, B. M., Pinton, S., Sampaio, T. B., Nogueira, C. W., & Zeni, G. Evaluation of mechanisms involved in the anti-hyperglycemic properties of diphenyl diselenide. **Psychopharmacology**, volume 222, páginas 709-719, 2012.