

Micro y nanoencapsulación de aceites esenciales con actividad antimicrobiana y su aplicación en la conservación de alimentos: Una revisión sistemática

Micro and nanoencapsulation of essential oils with antimicrobial activity and their application in food preservation: A systematic review

Laumer Tocto-Yajahuanca^{1*}; Lesly Edith Yata-Franco¹; Rafael Julián Malpartida-Yapias

¹ Escuela Profesional de Ingeniería Agroindustrial, Universidad Nacional Autónoma Altoandina de Tarma. Ciudad Universitaria, Carretera La Florida – Cochayoc Km 2, Huancucro N° 2092 Acobamba, Tarma, Perú.

* Autor correspondiente: 75422522@unaat.edu.pe (L. Tocto-Yajahuanca).

ORCID de los autores:

L. Tocto-Yajahuanca: <https://orcid.org/0000-0001-7973-8320>

L. E. Yata-Franco: <https://orcid.org/0000-0002-8633-3097>

R. J. Malpartida-Yapias: <https://orcid.org/0000-0002-2222-4879>

RESUMEN

Debido a su actividad antimicrobiana, los aceites esenciales (AE) están siendo utilizados en la conservación de alimentos, sin embargo, su aplicación se ve afectada por su volatilidad y sensibilidad a factores ambientales. La aplicación de técnicas como la microencapsulación y nanoencapsulación han demostrado ser capaces de superar estas limitaciones. Por ello, el objetivo de esta revisión es analizar de manera sistemática los avances en la microencapsulación y nanoencapsulación de aceites esenciales con actividad antimicrobiana para la conservación de alimentos. La presente revisión se desarrolló bajo la metodología para revisiones sistemáticas PRISMA. Mediante las palabras microencapsulation, nanoencapsulation, essential oil, antimicrobial en las bases de datos de Science Direct y Scopus, se identificaron 756 artículos, de los cuales 33 fueron seleccionados según los criterios de inclusión y exclusión. Los estudios in vitro e in situ evidencian que la micro y nanoencapsulación mejora significativamente la actividad antimicrobiana de los AE. Su aplicación en la conservación de productos cárnicos, frutas, semillas, legumbres y cereales ha demostrado ser efectiva, inhibiendo bacterias patógenas y mohos, logrando ser una alternativa prometedora y segura en la conservación de los alimentos.

Palabras clave: secado por aspersión; encapsulación; aceites volátiles; antimicrobiano; alimentos.

ABSTRACT

Due to their antimicrobial activity, essential oils (EO) are being used in food preservation, however, their application is affected by their volatility and sensitivity to environmental factors. The application of techniques such as microencapsulation and nanoencapsulation have proven to be able to overcome these limitations. Therefore, the objective of this review is to systematically analyze the advances in microencapsulation and nanoencapsulation of essential oils with antimicrobial activity for food preservation. The present review was developed under the PRISMA systematic review methodology. Using the words microencapsulation, nanoencapsulation, essential oil, antimicrobial in the Science Direct and Scopus databases, 746 articles were identified, of which 33 were selected according to inclusion and exclusion criteria. In vitro and in situ studies show that micro and nanoencapsulation significantly improve the antimicrobial activity of EOs. Its application in the preservation of meat products, fruits, seeds, legumes and cereals has proven to be effective, inhibiting pathogenic bacteria and molds, making it a promising and safe alternative in food preservation.

Keywords: spray drying; encapsulation; volatile oils; antimicrobial; foods.

Recibido: 13-09-2024.

Aceptado: 11-12-2024.



Esta obra está publicada bajo la licencia [CC BY 4.0](https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/)

INTRODUCCIÓN

Los aceites esenciales son compuestos volátiles y aromáticos que se encuentran y extraen de diversas partes de las plantas (Al-Mijalli et al., 2023), incluyendo flores, hojas, raíces, tallos, así como de frutas, semillas y cáscaras (Taheri et al., 2023). Su diversidad de propiedades biológicas (antiinflamatoria, antitumoral, antidiabéticas, antiviral, anticancerígenas y antimicrobiana) han motivado numerosas investigaciones y aplicaciones, principalmente en los sectores farmacéutico, alimentario y agroindustrial (Afrokh et al., 2024; Kalaskar et al., 2024; Vuković et al., 2024).

Debido a su actividad antimicrobiana, los AE están siendo utilizados en la conservación de alimentos ya que presentan un potencial para inhibir bacterias patógenas y mohos (Mahmud et al., 2024). Dentro de las aplicaciones con mayor relevancia, los AE se han utilizado en la conservación de productos cárnicos, frutas frescas y granos de maíz, en donde se han logrado inhibir a bacterias y mohos como *E. coli*, *Staphylococcus aureus*, *L. monocytogenes* y ciertos tipos de *Salmonella* (Gottardo et al., 2022; Lim et al., 2023; Lotfy et al., 2023).

Sin embargo, su aplicación se encuentra limitada por su aroma intenso, naturaleza volátil y sensibilidad a factores ambientales como la luz, el pH, oxígeno y la temperatura (Chen et al., 2024; Napiórkowska et al., 2024). Estas limitaciones han impulsado las investigaciones para mejorar no solo su sensibilidad ambiental sino también su baja solubilidad, deficiente bioaccesibilidad y limitada biodisponibilidad (Napiórkowska et al., 2024; Sridhar et al., 2024).

La aplicación de técnicas como la microencapsulación y nanoencapsulación han demostrado ser capaces para superar estas limitaciones, además de potenciar la funcionalidad antimicrobiana de los AE (Tu et al., 2020; Laala et

al., 2023; Wang et al., 2023). Estas técnicas consisten en crear una membrana externa o recubrimiento a nivel micro y nano alrededor de un material de interés, proporcionando protección de condiciones ambientales, además de enmascarar sabores y aromas deseables (Prieto et al., 2023).

Existen diferentes métodos para la micro y nanoencapsular aceites esenciales, siendo los más utilizados el secado por aspersión, la liofilización, gelación iónica, coacervación compleja y nanoemulsiones (Ojeda et al., 2022; Kazlauskaitė et al., 2023; Zhao et al., 2023). Estos métodos logran encapsular mediante agentes encapsulantes, como goma arábiga, maltodextrina, alginato de sodio, gelatina, quitosano y proteína de suero aislada, entre otros (Khatibi et al., 2021; Sánchez et al., 2023).

Por lo antes mencionado, se considera relevante realizar esta revisión para dar respuesta a la pregunta: ¿Cuáles son los avances en la micro y nanoencapsulación de aceites esenciales con actividad antimicrobiana para la conservación de alimentos?

La revisión se justifica al proporcionar información sintetizada sobre los principales avances en producción científica relacionado con micro y nanoencapsulación de los AE con actividad antimicrobiana. Además, dado que los AE tienen potencial antimicrobiano para la conservación de los alimentos, la revisión ofrecerá una perspectiva general para futuras investigaciones en el sector agroindustrial que buscan desarrollar conservantes naturales y sostenibles a base de AE. Por ello, el objetivo de esta revisión es analizar sistemáticamente los avances en microencapsulación y nanoencapsulación de aceites esenciales con actividad antimicrobiana, destacando su aplicación en la conservación de alimentos.

METODOLOGÍA

Estrategia de búsqueda

La presente revisión se desarrolló bajo la metodología para revisiones sistemáticas PRISMA (Quispe et al., 2021). Para la selección de artículos relevantes se realizaron búsquedas en las bases de datos de Science Direct y Scopus, además la obtención de artículos se realizó en único día (27 de junio del 2024) utilizando la siguiente ecuación de búsqueda: (nanoencapsulation AND essential AND oil AND antimicrobial) OR (microencapsulation AND essential AND oil AND antimicrobial).

Criterios de inclusión y exclusión

Se incluyeron estudios originales publicados entre 2020 y 2024, que estuvieran directamente relacionados con la pregunta y el objetivo de la investigación.

Se excluyeron artículos de revisión, libros, capítulos de libro, y aquellos que no trataran sobre aceites esenciales con actividad antimicrobiana. Además, se descartaron publicaciones anteriores a 2020 o cuyo resumen no estuviera alineado con el objetivo de la investigación.

Extracción de datos

Este proceso fue llevado a cabo de forma independiente por dos revisores, quienes realizaron una revisión exhaustiva de los artículos seleccionados, cualquier discrepancia se consultó con un tercer revisor experimentado. La selección y extracción de datos se realizó mediante el uso de la plataforma en línea Rayyan y Microsoft Excel. Todos los estudios incluidos fueron almacenados utilizando el software Mendeley para la SR, tal como se detalla en la Figura 1.

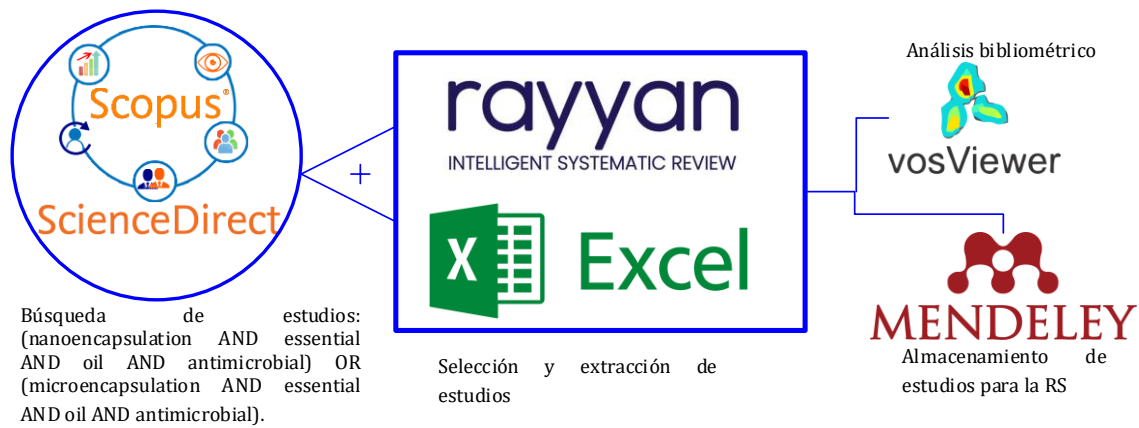


Figura 1. Esquema del proceso de búsqueda, selección y extracción de estudios

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

Selección de estudios

Mediante la ecuación de búsqueda, se identificaron 756 artículos distribuidos en Scopus (147) y Science Direct (609). Después de excluir 42 duplicados mediante Rayyan, se redujeron a 714. Una evaluación inicial basada en títulos descartó 635 artículos porque no tenían relación con las palabras claves. Al revisar los resúmenes, se descartaron 27 artículos por no alinearse con el objetivo de la investigación. Finalmente, tras una lectura completa, se excluyeron 19 artículos que trataban de AE con actividad microbiana pero no estaban relacionados con la conservación de

alimentos. Como resultado, se seleccionaron 33 artículos para la revisión sistemática.

La Figura 2 detalla el proceso de selección de artículos según los lineamientos de la metodología PRISMA. Los artículos incluidos (Tabla 1) se clasificaron en categorías (título, año, tipo de alimento o medio utilizado para identificar la actividad microbiana de los AE micro y nanoencapsulados, resultados, y la referencia correspondiente a cada artículo.

Además, debido al número significativo de artículos incluidos, estos fueron ordenados de manera cronológica.

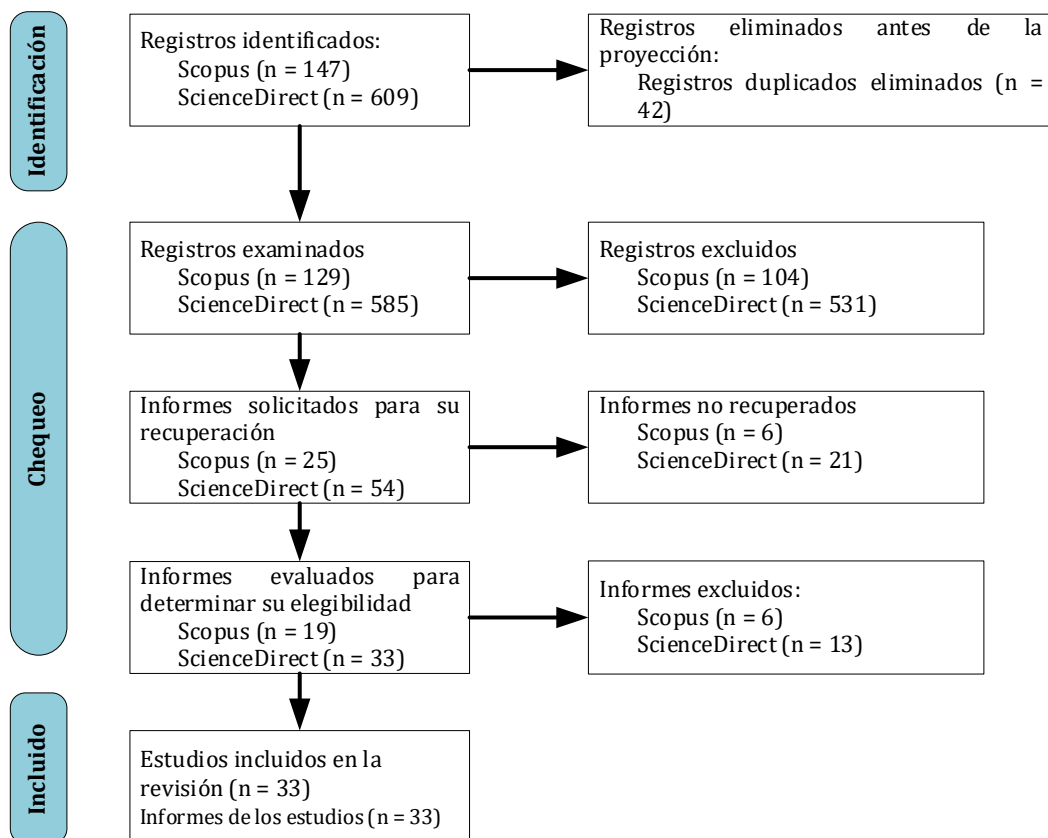


Figura 2. Diagrama de Flujo PRISMA para selección de artículos para la SR.

Tabla 1
Estudios incluidos para la revisión sistemática

Nº	AE derivadas de plantas	Alimento o medio utilizado	Resultados	Autor/año
1	<i>Pelargonium graveolens</i> L.	Granos de maíz	El aceite esencial nanoencapsulado (AEN) inhibió el crecimiento del <i>Aspergillus flavus</i> y la producción de aflatoxina B ₁ (A _{FB} ₁) a una concentración de 1 µL/mL ⁻¹	(Kujur et al., 2020)
2	Pimienta rosa	Leche entera y descremada	La microencapsulación mejoró la funcionalidad del AE inhibiendo a microorganismos como <i>S. aureus</i> , <i>Bacillus subtilis</i> , <i>L. monocytogenes</i> y <i>Listeria innocua</i> a una concentración de 1% (p/v)	(Locali et al., 2020)
3	Limoncillo	Manzanas	El estudio in vitro mostró que las manzanas tratadas con AEM en una CMI de 1% (p/v) experimentaron lesiones de podredumbre 3 veces menores que las tratadas con AE libre, inhibiendo a <i>Colletotrichum acutatum</i> y <i>Colletotrichum gloeosporioides</i>	(Antonoli et al., 2020)
4	<i>Allium sativum</i>	Carne picada	El estudio demostró que el AEM a una concentración del 20% tiene un efecto inhibidor contra <i>E. coli</i> , indicando su potencial en la conservación de carne a 4-8 °C	(Najjaa et al., 2020)
5	<i>Petroselinum crispum</i>	Semillas de chía	La investigación concluyó que el AEN inhibió por completo el crecimiento de <i>Aspergillus flavus</i> y la producción de A _{FB} ₁ a una concentración de 1 µL/mL y 0,75 µL/mL respectivamente	(Deepika et al., 2021)
6	<i>Citrus reticulata</i>	Agar papa dextrosa.	La eficacia antifúngica de las nanocápsulas del AE mejoró en 3,13, 1,24, 2,76 y 2,97 veces, y en 2,43, 1,24, 1,32 y 2,09 veces contra <i>Candida albicans</i> , <i>Zygosaccharomyces rouxii</i> , <i>Aspergillus niger</i> y <i>Penicillium roqueforti</i> mediante la adición de AE de <i>Cinnamomum verum</i> y <i>Syzygium aromaticum</i> respectivamente.	(Mahdi et al., 2021)
7	<i>Cananga odorata</i>	Maní	El AEN mostró una mayor eficacia en comparación al AE libre, inhibiendo completamente el crecimiento del <i>A. flavus</i> y la producción de A _{FB} ₁ a 1 µL/mL y 0,75 µL/mL, respectivamente	(Upadhyay et al., 2021)
8	<i>Ocimum basilicum</i>	Mayonesa	La mayonesa enriquecida con 0,9 % de AEM mostró mejor actividad antimicrobiana contra <i>E. coli</i> que la mayonesa con E202, aunque fueron menos efectivas contra <i>Salmonella Typhimurium</i> .	(Ozdemir et al., 2021)
9	<i>Cinnamomum verum</i>	Agar Luria-Bertani y agar de recuento de placa	Los valores de CMI (0,8 % a 0,125 % p/p) y diámetro de la zona de inhibición indicaron que los AEN presentan actividad antibacteriana más duradera y fuerte contra <i>S. aureus</i> , <i>E. coli</i> , <i>Pseudomonas fragi</i> , y <i>Shewanella putrefaciens</i> durante 10 días de almacenamiento	(Yang et al., 2021)
10	<i>Ocimum basilicum</i>	Jamón cocido	Se demostró que la película activa con AEM controló eficazmente el crecimiento bacteriano (<i>Enterococcus faecalis</i> , <i>C. maltaromaticum</i> , <i>S. salivarius</i> , <i>S. Saprophyticus</i> y <i>E. coli</i>), además de reducir significativamente el aumento del pH en el alimento envasado.	(Amor et al., 2021)
11	<i>Ziziphora clinopodioides</i> y <i>Rosmarinus officinalis</i>	Hamburguesas de cordero crudas	Los AEN al 0,28% disminuyeron notablemente el crecimiento de <i>E. coli</i> y <i>S. aureus</i> inoculadas, y retrasaron la oxidación lipídica de las hamburguesas en comparación con las muestras con AE libre	(Karimifar et al., 2022)
12	<i>Cinnamomum verum</i>	Carne de pollo picada	Las microcápsulas de AE inhibieron eficazmente el crecimiento bacteriano en muestras de carne de pollo picada refrigeradas durante 12 días	(Kean et al., 2022)
13	<i>Syzygium aromaticum</i> L.	Leche y zumos de fruta	Tanto las microcápsulas libres como las cargadas con AE inhibieron el crecimiento de bacterias Gram-positivas, a excepción de <i>Bacillus cereus</i>	(Koc y Colakdalci, 2022)
14	<i>Origanum vulgare</i> y <i>Cinnamomum verum</i>	Salami italiano	El uso de microcápsulas de AE al 2% tuvo una reducción significativa de <i>L. monocytogenes</i> respecto a la muestra control	(Gottardo et al., 2022)
15	<i>Toddalia asiatica</i> (L.) Lam.	Maíz	El AEN mostró fuerte actividad antifúngica e inhibidora contra la A _{FB} ₁ a una concentración de 2,0 µg/mL ⁻¹ , sin alterar las propiedades nutricionales del maíz	(Roshan et al., 2022)
16	Limoncillo (<i>Cymbopogon flexuosus</i>)	Agar Müller-Hinton	Las micropartículas de AE con goma arábiga mostraron un efecto antimicrobiano con una CMI que varió entre 10,1 µg/mL para <i>Bacillus cereus</i> y <i>Listeria innocua</i> , 20,41 µg/mL para <i>S. aureus</i> y <i>Campylobacter jejuni</i> , 30,92 µg/mL para <i>E. coli</i> y <i>Clostridium perfringens</i> y 41,67 µg/mL para <i>Salmonella enterica</i> serotipo <i>Typhimurium</i>	(de Melo et al., 2022)
17	<i>Cinnamomum verum</i>	Salchichas fermentadas secas	Los tratamientos combinados demostraron efectos sinérgicos, inhibiendo <i>E. coli</i> , <i>L. monocytogenes</i> , mohos, levaduras, bacterias ácido-lácticas (BAL) y bacterias mesófilas totales (TMF) a una concentración de 4 µg/mL	(Ji et al., 2022)
18	<i>Coreopsis tinctoria</i> Nutt.	Embutidos de carne de caballo ahumada	El AEM, logró inhibir eficazmente la reproducción de enterobacterias indeseables y la acumulación de aminas biogénicas	(Li et al., 2023)
19	Anís estrellado	Albóndigas de cangrejo	La aplicación de las microcápsulas de AE, lograron controlar eficazmente el crecimiento de <i>E. coli</i> y <i>S. aureus</i> en las albóndigas de cangrejo	(L. Zhang et al., 2023)
20	<i>Cinnamomum verum</i> y <i>Litsea cubeba</i>	Grano de maní	Las microcápsulas cargadas con 0,20% (p/p) de AE lograron inhibir el crecimiento de <i>Aspergillus flavus</i> y <i>Aspergillus niger</i> aislados de granos de maní mohosos, disminuyendo así el número total de colonias fúngicas (A _{FB} ₁)	(Lv et al., 2023)
21	<i>Pistacia lentiscus</i>	Agar nutritivo	La nanoencapsulación mejoró la solubilidad acuosa, estabilidad y capacidad de penetración de los AE de <i>Pistacia lentiscus</i> , mejorando su actividad antimicrobiana contra <i>Pseudomonas aeruginosa</i> , <i>S. aureus</i> y <i>E. coli</i> en comparación con los AE libres	(Alabrahim and Azzazy, 2023)

22	Semilla de zanahoria	No especifica	El AE de aceite de semilla de zanahoria encapsulado y no encapsulado mostraron una actividad antimicrobiana significativa contra <i>Staphylococcus aureus</i> , pero una acción mínima contra <i>Escherichia coli</i>	(Singh et al., 2023)
23	<i>Syzygium aromaticum</i> y timol	Manzanas cortadas y carne de vacuno	Las nanocápsulas cargadas de AE inhibieron de manera efectiva el crecimiento de bacterias grampositivas (<i>Staphylococcus aureus</i> y <i>Listeria monocytogenes</i>) y gramnegativas (<i>E. coli</i> y <i>Salmonella typhimurium</i>) en muestras de manzana recién cortada y carne picada	(Lim et al., 2023)
24	<i>Origanum vulgare</i>	Peras	El análisis microbiano mostró que el AEN al 2% fue efectivo para inhibir el crecimiento bacteriano, logrando una reducción logarítmica de 1.09 en el recuento bacteriano después de 28 días de almacenamiento en comparación con el AE libre	(Ebrahimi et al., 2023)
25	<i>Thymus vulgaris</i>	carne	Las membranas de fibras con 60% de AE encapsulado, inhibieron de crecimiento de coliformes termotolerantes, <i>E. coli</i> y <i>Staphylococcus coagulasa</i> positivos en envases de carne refrigerados a 4,5 °C durante 7 días	(Peixoto et al., 2023)
26	<i>Nepeta crispa</i>	Bebida de yogur (doogh)	Se logró un mayor efecto inhibitorio contra <i>E. coli</i> y <i>Staphylococcus aureus</i> cuando se adicionó AE nanoencapsulado en una concentración de 0,20 mg/mL	(Haseli et al., 2023)
27	<i>Cinnamomum verum</i> , <i>Mentha</i> y <i>Citrus limon</i>	Caldo luria y agar De Man-Rogosa-Sharpe	Se demostró que, a mayor tiempo de exposición a los AEM, las concentraciones de <i>E. coli</i> , <i>Salmonella</i> , <i>S. aureus</i> y <i>L. plantarum</i> se redujeron significativamente en 3, 3, 4 y 5 órdenes de magnitud, respectivamente	(Zhang et al., 2023)
28	<i>Allium sativum</i>	Maíz y maní	Los ensayos in vitro e in situ demostraron que el AEN inhibió el crecimiento de hongos y redujo la síntesis de la AFB1 y la oxidación de lípidos	(Sindhu et al., 2023)
29	<i>Eucalyptus globulus</i>	Melocotones	Los AEM en una concentración de 1,6 mg/mL-1, mostraron una actividad antifúngica significativa contra melocotones preinoculados con <i>P. chrysogenum</i> , reduciendo lesiones y prolongando su vida útil en más de 2 semanas, almacenados a temperatura ambiente	(Laala et al., 2023)
30	Cúrcuma longa	Maíz	Los ensayos in vitro demostraron que los AEN a una concentración de 100 µg/mL tienen una actividad antibacteriana significativa contra <i>Staphylococcus aureus</i> y <i>Pseudomonas aeruginosa</i> ; además de inhibir por completo el crecimiento y la producción de zearalenona y deoxinivalenol a una concentración de 0,75 µL/mL	(Sindhu et al., 2023)
31	Mostaza	Mayonesa	Los AEM y los AE libres tienen potencial para inhibir el crecimiento de <i>E. coli</i> y <i>Salmonella Enteritidis</i> a una concentración de 2048 y 4096 ppm en la mayonesa hasta 40 días.	(Goli et al., 2024)
32	<i>Ferula gummosa</i> Boiss y <i>Ziziphora clinopodioides</i> .	Champiñones	Los resultados demostraron que los recubrimientos con AEN a una concentración de 500 ppm lograron disminuir significativamente la tasa de respiración, la pérdida de peso, el grado de pardeamiento y la población microbiana en comparación con la muestra control durante el período de conservación	(Faraj y Nouri, 2024)
33	<i>Citrus latifolia</i>	Agar	Las microcápsulas de AE exhibieron una excelente actividad antibacteriana contra <i>S. aureus</i> , logrando una zona de inhibición de 2,57 ± 0,40 cm y 1,27 ± 0,25 cm para <i>E. Coli</i> en comparación a los AE libres que presentaron zona de inhibición de 1,27 ± 0,15 cm y 0,77 ± 0,12 cm respectivamente	(Van et al., 2024)

Nota. AEM (aceite esencial microencapsulado), AEN (Aceite esencial nanoencapsulado), CMI (concentración mínima inhibitoria), ppm (partes por millón) y AFB1 (Aflatoxina B1).

Efecto de la micro/nanoencapsulación sobre la actividad antimicrobiana de AE

Los estudios realizados tanto *in vitro* como *in situ* (Tabla 1) han demostrado que la microencapsulación y la nanoencapsulación mejora significativamente la actividad antimicrobiana de los aceites esenciales. Por ejemplo, el AE *Pistacia lentiscus* mejoró 6 veces su actividad antimicrobiana después de su nanoencapsulación contra *Escherichia coli*. (Alabraham y Azzazy, 2023). Esta mejora se debe al uso de agentes encapsulantes que permiten una liberación controlada durante su aplicación, manteniendo así su eficiencia antimicrobiana. Sin embargo, es importante considerar que ciertas combinaciones de estos agentes pueden reducir la actividad antimicrobiana de los AE. Un estudio demostró que las cepas de *Listeria innocua* y *Clostridium perfringens* no fueron inhibidas por el AE de *Cymbopogon flexuosus* microencapsulado con goma arábica y maltodextrina, mientras que sí fueron inhibidas cuando se microencapsuló solo

con goma arábica; esto se debió a que las combinaciones de agentes encapsulantes crearon barreras más densas, impidiendo la liberación y penetración de los AE en las membranas de los microorganismos (de Melo et al., 2022).

Aplicación de los AE micro/nanoencapsulación en la conservación de productos cárnicos

Los productos cárnicos son muy susceptibles al deterioro debido a la oxidación de lípidos y al crecimiento microbiano, afectando su sabor, color, textura, valor nutricional e inocuidad. Tradicionalmente, se emplean conservantes sintéticos para inhibir el crecimiento microbiano y prolongar su vida útil, sin embargo, sus efectos adversos en la salud han impulsado la búsqueda de alternativas naturales. Frente a ello, los AE, extraídos de diversas plantas, ofrecen una alternativa prometedora para la conservación de productos cárnicos (Zhang et al., 2023). Los resultados *in situ* han mostrado que los AEN de *Ziziphora*

clinopodioides y *Rosmarinus officinalis* han logrado inhibir por completo el crecimiento de bacterias como *Escherichia coli* y *Staphylococcus aureus* y reducir la oxidación lipídica a una concentración 0,28% en hamburguesas de cordero crudas (Karimifar et al., 2022); sin embargo, el olor y el sabor de algunas combinaciones de AE como *Origanum vulgare* y *Cinnamomum verum* pueden interferir sensorialmente de manera negativa en algunos productos cárnicos como salami italiano (Gottardo et al., 2022). Además, los AEM están siendo utilizados en el envasado activo de productos cárnicos. Un estudio ha demostrado que las membranas de fibras de zeína con un 60% de AE encapsulado de *Thymus vulgaris* inhibieron el crecimiento de coliformes termotolerantes, *Escherichia coli* y *Staphylococcus coagulasa* positiva en envases de carne refrigerados a 4,5 °C durante 7 días (Peixoto et al., 2023). De la misma forma, para potenciar la actividad antimicrobiana, se están realizando combinaciones de AE con otros métodos de conservación. En ese sentido, un estudio concluyó que la combinación de los AEM de *Cinnamomum verum* y la irradiación de gamma lograron inhibir el crecimiento de *E. coli*, *L. monocytogenes*, mohos, levaduras, bacterias ácido-lácticas y bacterias mesófilas totales a una concentración de 4 µg/mL en salchichas fermentadas (Ji et al., 2022).

Aplicación de los AE micro/nanoencapsulación en la conservación de frutas

De acuerdo con la Tabla 1, la aplicación de AEM y AEN ha demostrado resultados favorables en la conservación de frutas. En un estudio reciente, los AEM de *Eucalyptus* en una concentración de 1,6 mg mL⁻¹, mostraron una actividad antifúngica significativa contra melocotones preinoculados con *Penicillium chrysogenum*, reduciendo lesiones y prolongando su vida útil en más de 2 semanas, almacenados a temperatura ambiente (Laala et al.,

2023). Por otro lado, se encontró que la aplicación de AEN de *Origanum vulgare* al 2% inhibió significativamente el crecimiento bacteriano en peras, logrando una reducción logarítmica de 1,09 en el recuento bacteriano después de 28 días de almacenamiento. Además, se ha demostrado que los AE logran inhibir a microorganismos patógenos como *Staphylococcus aureus*, *Listeria monocytogenes*, *E. coli* y *Salmonella typhimurium*, incluso en presencia de azúcar, grasa y proteínas (Lim et al., 2023). Inhibir el crecimiento microbiano en las frutas es fundamental para reducir las pérdidas por pudrición durante el transporte, comercialización y almacenamiento.

Aplicación de los AE micro/nanoencapsulación en la conservación de semillas y cereales

Durante el almacenamiento, las semillas, legumbres y los cereales pueden verse afectados por la contaminación de mohos que producen micotoxinas, siendo la *AfB₁*, generada por *Aspergillus flavus* y *Aspergillus parasiticus*, la micotoxina que mayor implicancia tiene en la contaminación de cereales. Gracias a la actividad antifúngica, los AE están siendo utilizados como conservantes en el almacenamiento de estos productos. Estudios recientes han demostrado que los AEN de *Petroselinum crispum* y AEN de *Cananga odorata* inhibieron por completo el crecimiento de *Aspergillus flavus* y la producción de *AfB₁* en semillas de chífa y maní a una concentración de 1 µL/mL y 0,75 µL/mL respectivamente (Deepika et al., 2021; Upadhyay et al., 2021). Es importante destacar que la aplicación de los AE no afecta las propiedades nutricionales de los cereales; como se evidenció en un estudio donde el AEN de *Toddalia asiatica* (L.) Lam. exhibió una fuerte actividad antifúngica e inhibidora contra la *AfB₁* a una concentración de 2,0 µg/mL⁻¹, sin causar alteraciones en las propiedades nutricionales del maíz (Roshan et al., 2022).

Análisis bibliométrico

Análisis de co-ocurrencia de las palabras claves de los estudios incluidos

El software VOSviewer permitió identificar de manera automática las palabras clave más usadas en los 33 estudios incluidos mediante la visualización de nodos. Los nodos más grandes representan mayor frecuencia de las palabras, mientras que los vínculos entre ellos reflejan la fuerza de relación; una línea más gruesa indica un vínculo más fuerte entre las palabras.

Como se muestra en la Figura 3, existen dos clusters fundamentales; por un lado, el cluster verde agrupa términos relacionados con "essential oil", agrupando las palabras clave como "nanoencapsulation", "antifungal", "antibacterial" y "aflatoxin b", reflejando el enfoque en la nanoencapsulación de AE y sus propiedades antimicrobianas. En contraste, el cluster rojo incluye términos asociados con la microencapsulación y técnicas como el "spray drying", utilizadas para obtener y proteger las micro-

cápsulas de los AE mediante agentes encapsulantes, esto promueve su incorporación en matrices alimentarias, favoreciendo la conservación debido a su actividad antimicrobiana (de Melo et al., 2022). De acuerdo con la frecuencia de palabras, se identificó que el método más utilizado para la microencapsulación y nanoencapsulación de AE es el secado por aspersión, debido a que es un método sencillo, rápido, eficiente y económico, favoreciendo su aplicabilidad a escala industrial (Li et al., 2023).

Como se describe en la Figura 4, este proceso se inicia mezclando del AE con el agente encapsulante hasta formar una dispersión o emulsión, que luego se alimenta a la torre de secado, donde entra en contacto con una corriente de aire caliente, iniciando rápidamente la evaporación del agua y formando microcápsulas cubiertas por una fina capa del encapsulante. Las microcápsulas resultantes son recogidas en el colector (Sánchez et al., 2023).

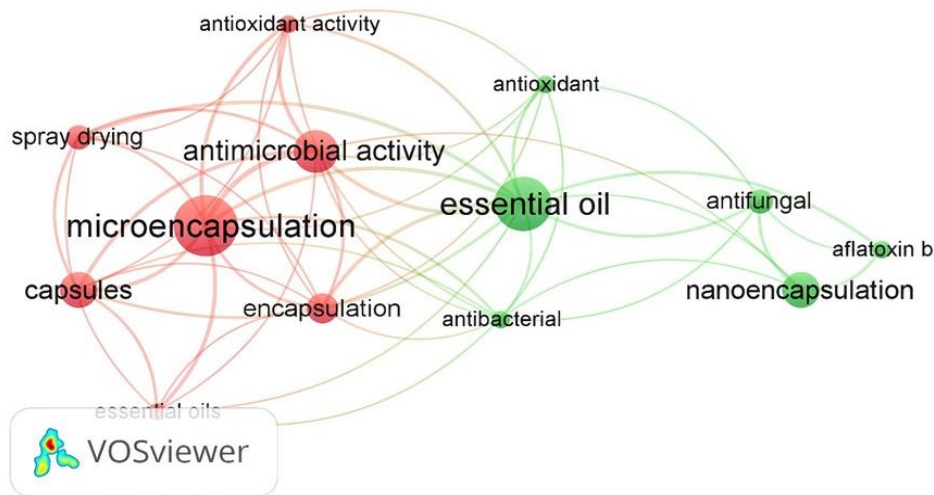


Figura 3. Mapa de co-ocurrencia de palabras clave en los 33 estudios incluidos.

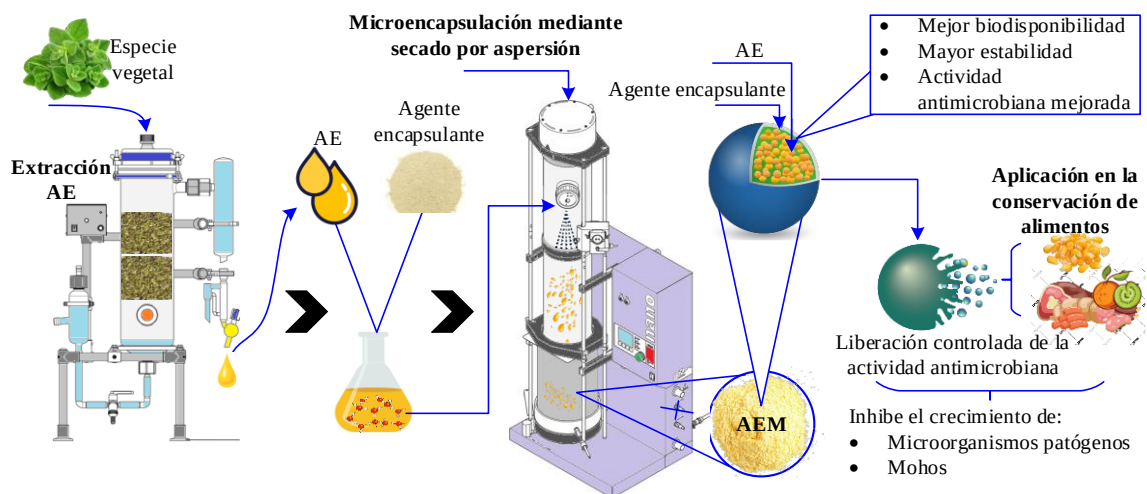


Figura 4. Microencapsulación de AE mediante secado por aspersión.

CONCLUSIONES

Estudios realizados tanto *in vitro* como *in situ* han demostrado que la micro y nanoencapsulación mejora significativamente la actividad antimicrobiana de los AE. Estas técnicas permiten aumentar la estabilidad y la disponibilidad de los AE mediante el uso de agentes encapsulantes, resultando en una mayor capacidad para inhibir el crecimiento microbiano. La aplicación de AE micro y nanoencapsulados en la conservación de productos cárnicos, frutas, semillas, legumbres y cereales ha demostrado ser efectiva, inhibiendo bacterias patógenas como *Escherichia coli*, *Listeria monocytogenes*, *Staphylococcus aureus* y *Clostridium perfringens*, así como mohos productores de micotoxinas como *Aspergillus flavus* y *Aspergillus*. Finalmente, cabe destacar que

la revisión sistemática puede contribuir científicamente a guiar la investigación hacia una nueva perspectiva con los AE micro y nanoencapsulados como una alternativa sostenible a los conservantes sintéticos. En este sentido, se sugiere que futuros estudios evalúen la efectividad de los AE micro y nanoencapsulados en la conservación de productos lácteos, un sector aún no suficientemente investigado. Su incorporación como agentes antimicrobianos en envases activos; también es necesario investigar su impacto en las propiedades sensoriales y nutricionales de los alimentos procesados para asegurar que su incorporación no afecte la calidad del producto e interfiera en la aceptación del consumidor.

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

Afrokh, M., El Mehrach, K., Chatoui, K., Ait Bihi, M., Sadki, H., Zarrouk, A., Tabyaoui, M., & Tahrouch, S. (2024). Quality criteria, chemical composition and antimicrobial activity of the

essential oil of *Mentha suaveolens* Ehrh. *Heliyon*, 10(7), e28125. <https://doi.org/10.1016/j.heliyon.2024.E28125>
Alabrahim, O. A. A., & Azzazy, H. M. E. (2023). Antimicrobial Activities of *Pistacia lentiscus* Essential Oils Nanoencapsulated

- into Hydroxypropyl-beta-cyclodextrins. *ACS Omega*. <https://doi.org/10.1021/acsomega.3c07413>
- Al-Mijalli, S. H., El Hachlafi, N., Abdallah, E. M., Jeddi, M., Assaggaf, H., Qasem, A., Alnasser, S. M., Attar, A., Naem, M. A., Lee, L. H., Bouyahya, A., & Mrabti, H. N. (2023). Exploring the antibacterial mechanisms of chemically characterized essential oils from leaves and buds of *Syzygium aromaticum* (L.) Merr. et Perry against *Staphylococcus aureus* and *Pseudomonas aeruginosa*. *Industrial Crops and Products*, 205, 117561. <https://doi.org/10.1016/j.indcrop.2023.117561>
- Amor, G., Sabbah, M., Caputo, L., Idbella, M., De Feo, V., Porta, R., Fechtali, T., & Mauriello, G. (2021). Basil essential oil: Composition, antimicrobial properties, and microencapsulation to produce active chitosan films for food packaging. *Foods*, 10(1), 121. <https://doi.org/10.3390/foods10010121>
- Antonoli, G., Fontanella, G., Echeverrigaray, S., Longaray Delamare, A. P., Fernandes Pauletti, G., & Barcellos, T. (2020). Poly(lactic acid) nanocapsules containing lemongrass essential oil for postharvest decay control: In vitro and in vivo evaluation against phytopathogenic fungi. *Food Chemistry*, 326, 126997. <https://doi.org/10.1016/j.foodchem.2020.126997>
- Cecilia Prieto, M., Matias Camacho, N., Dell Innocenti, F., Mignolli, F., Lucini, E., Palma, S., Bima, P., Rubén Grosso, N., & Mariana Asensio, C. (2023). Microencapsulation of *Thymus vulgaris* and *Tagetes minuta* essential oils: Volatile release behavior, antibacterial activity and effect on potato yield. *Journal of the Saudi Society of Agricultural Sciences*, 22(3), 195–204. <https://doi.org/10.1016/j.jssas.2022.10.003>
- Chen, K., Zhang, M., & Deng, D. (2024). The synergistic antimicrobial effects and mechanism of cinnamon essential oil and high voltage electrostatic field and their application in minced pork. *Food Control*, 163, 110475. <https://doi.org/10.1016/j.foodcont.2024.110475>
- de Melo, A. M., Barbi, R. C. T., Almeida, F. L. C., de Souza, W. F. C., Cavalcante, A. M. de M., de Souza, H. J. B., Botrel, D. A., Borges, S. V., Costa, R. G., Quirino, M. R., & de Sousa, S. (2022). Effect of Microencapsulation on Chemical Composition and Antimicrobial, Antioxidant and Cytotoxic Properties of Lemongrass (*Cymbopogon flexuosus*) Essential Oil. *Food Technology and Biotechnology*, 60(3), 386–395. <https://doi.org/10.17113/ftb.60.03.22.7470>
- Deepika, Chaudhari, A. K., Singh, A., Das, S., & Dubey, N. K. (2021). Nanoencapsulated *Petroselinum crispum* essential oil: Characterization and practical efficacy against fungal and aflatoxin contamination of stored chia seeds. *Food Bioscience*, 42, 101117. <https://doi.org/10.1016/j.fbio.2021.101117>
- Ebrahimi, R., Fathi, M., & Ghoddusi, H. B. (2023). Nanoencapsulation of oregano essential oil using cellulose nanocrystals extracted from hazelnut shell to enhance shelf life of fruits: Case study: Pears. *International Journal of Biological Macromolecules*, 242, 124704. <https://doi.org/10.1016/j.ijbiomac.2023.124704>
- Faraj, A. M., & Nouri, M. (2024). Development of a mucilage coating including nanoencapsulated essential oils for extending shelf life of button mushrooms (*Agaricus bisporus*). *Food Packaging and Shelf Life*, 41, 101232. <https://doi.org/10.1016/j.fpsl.2023.101232>
- Goli, S. A. H., Keramat, S., Soleimani-Zad, S., & Ghasemi Baghabrshami, R. (2024). Antioxidant and antimicrobial efficacy of microencapsulated mustard essential oil against *Escherichia coli* and *Salmonella Enteritidis* in mayonnaise. *International Journal of Food Microbiology*, 410. <https://doi.org/10.1016/j.ijfoodmicro.2023.110484>
- Gottardo, F. M., Biduski, B., Santos, L. F. dos, Santos, J. S. dos, Rodrigues, L. B., & Santos, L. R. dos. (2022). Microencapsulated oregano and cinnamon essential oils as a natural alternative to reduce *Listeria monocytogenes* in Italian salami. *Food Bioscience*, 50, 102146. <https://doi.org/10.1016/j.fbio.2022.102146>
- Haseli, A., Pourahmad, R., Eshaghi, M. R., Rajaei, P., & Akbari-Adergani, B. (2023). Application of nanoencapsulated Mofarrah (*Nepeta crispa*) essential oil as a natural preservative in yogurt drink (doogh). *LWT*, 186, 115256. <https://doi.org/10.1016/j.lwt.2023.115256>
- Ji, J., Allahdad, Z., Sarmast, E., Salmieri, S., & Lacroix, M. (2022). Combined effects of microencapsulated essential oils and irradiation from gamma and X-ray sources on microbiological and physicochemical properties of dry fermented sausages during storage. *LWT*, 159, 113180. <https://doi.org/10.1016/j.lwt.2022.113180>
- Kalaskar, M., Gavit, A., Prabhu, S., Gagrani, M., Ugale, V., Khadse, S., Ayyanar, M., Surana, S., Tatiya, A., & Gurav, S. (2024). Chemical composition, antioxidant, antimicrobial, and wound healing effects of *Trachyspermum roxburghianum* (DC.) H. Wolff essential oil: An in vivo and in silico approach. *Journal of Ethnopharmacology*, 327, 118055. <https://doi.org/10.1016/j.jep.2024.118055>
- Karimifar, P., Saei-Dehkordi, S. S., & Izadi, Z. (2022). Antibacterial, antioxidative and sensory properties of *Ziziphora clinopodioides*-*Rosmarinus officinalis* essential oil nanoencapsulated using sodium alginate in raw lamb burger patties. *Food Bioscience*, 47, 101698. <https://doi.org/10.1016/j.fbio.2022.101698>
- Kazlauskaitė, J. A., Matulyte, I., Marksa, M., & Bernatoniene, J. (2023). Nutmeg Essential Oil, Red Clover, and Liquorice Extracts Microencapsulation Method Selection for the Release of Active Compounds from Gel Tablets of Different Bases. *Pharmaceutics* 2023, Vol. 15, Page 949, 15(3), 949. <https://doi.org/10.3390/PHARMACEUTICS15030949>
- Kean, S., Trevanich, S., & Jittanit, W. (2022). Cinnamon essential oil microcapsules made using various methods: physical properties and antimicrobial ability. *Journal of the ASABE*, 65(1), 169–178. <https://doi.org/10.13031/ja.14796>
- Khatibi, S. A., Ehsani, A., Nemati, M., & Javadi, A. (2021). Microencapsulation of *Zataria multiflora* Boiss. essential oil by complex coacervation using gelatin and gum arabic: Characterization, release profile, antimicrobial and antioxidant activities. *Journal of Food Processing and Preservation*, 45(10), e15823. <https://doi.org/10.1111/jfpp.15823>
- Koc, T. B., & Colakdalcı, S. (2022). Improving the Antimicrobial and Antioxidant Activity of Clove (*Syzygium aromaticum* L.) Essential Oil by Microencapsulation. *Journal of Essential Oil-Bearing Plants*, 25(6), 1169–1184. <https://doi.org/10.1080/0972060X.2022.2158045>
- Kujur, A., Kumar, A., Yadav, A., & Prakash, B. (2020). Antifungal and aflatoxin B1 inhibitory efficacy of nanoencapsulated *Pelargonium graveolens* L. essential oil and its mode of action. *LWT*, 130, 109619. <https://doi.org/10.1016/j.lwt.2020.109619>
- Laala, G. E., Irshad, G., Naz, F., & Hafiz, A. A. (2023). Microencapsulation of *Eucalyptus globulus* essential oil anti-fungal sachet against blue mold on peaches. *Journal of Plant Protection Research*, 63(4), 428–439. <https://doi.org/10.24425/jppr.2023.147826>
- Li, Y., Geng, Y., Shi, D., Li, R., Tang, J., & Lu, S. (2023). Impact of *Coreopsis tinctoria* Nutt. Essential oil microcapsules on the formation of biogenic amines and quality of smoked horsemeat sausage during ripening. *Meat Science*, 195, 109020. <https://doi.org/10.1016/j.meatsci.2022.109020>
- Lim, D. Y., Lee, J.-S., & Lee, H. G. (2023). Nano-encapsulation of a combination of clove oil and thymol and their application in fresh-cut apples and raw minced beef. *Food Control*, 148, 109683. <https://doi.org/10.1016/j.foodcont.2023.109683>
- Locali-Pereira, A. R., Lopes, N. A., Menis-Henrique, M. E. C., Janzantti, N. S., & Nicoletti, V. R. (2020). Modulation of volatile release and antimicrobial properties of pink pepper essential oil by microencapsulation in single- and double-layer structured matrices. *International Journal of Food Microbiology*, 335. <https://doi.org/10.1016/j.ijfoodmicro.2020.108890>
- Lotfy, T. M. R., Shawir, S. M. S., & Badawy, M. E. I. (2023). The impacts of chitosan-essential oil nanoemulsions on the microbial diversity and chemical composition of refrigerated minced meat. *International Journal of Biological Macromolecules*, 239, 124237. <https://doi.org/10.1016/j.ijbiomac.2023.124237>
- Lv, H., Huo, S., Zhao, L., Zhang, H., Liu, Y., Liu, S., Tani, A., & Wang, R. (2023). Preparation and application of cinnamon-Litsea cubeba compound essential oil microcapsules for peanut kernel postharvest storage. *Food Chemistry*, 415, 135734. <https://doi.org/10.1016/j.foodchem.2023.135734>
- Mahdi, A. A., Al-Maqtari, Q. A., Mohammed, J. K., Al-Ansi, W., Cui, H., & Lin, L. (2021). Enhancement of antioxidant activity, antifungal activity, and oxidation stability of Citrus reticulata essential oil nanocapsules by clove and cinnamon essential oils. *Food Bioscience*, 43, 101226. <https://doi.org/10.1016/j.fbio.2021.101226>
- Mahmud, J., Muranyi, P., Shankar, S., Sarmast, E., Salmieri, S., & Lacroix, M. (2024). Physiological and antimicrobial properties of a novel nanoemulsion formulation containing mixed surfactant and essential oils: Optimization modeling by response surface methodology. *Colloids and Surfaces A: Physicochemical and Engineering Aspects*, 686, 133405. <https://doi.org/10.1016/j.colsurfa.2024.133405>
- Najjaa, H., Chekki, R., Elfalleh, W., Tlili, H., Jaballah, S., & Bouzouita, N. (2020). Freeze-dried, oven-dried, and microencapsulation of essential oil from *Allium sativum* as potential preservative

- agents of minced meat. *Food Science and Nutrition*, 8(4), 1995–2003. <https://doi.org/10.1002/fsn3.1487>
- Napiórkowska, A., Szpicer, A., Górski-Horczyzak, E., & Kurek, M. A. (2024). Microencapsulation of Essential Oils Using Faba Bean Protein and Chia Seed Polysaccharides via Complex Coacervation Method. *Molecules*, 29(9), 2019. <https://doi.org/10.3390/molecules29092019>
- Ojeda-Piedra, S. A., Zambrano-Zaragoza, M. L., González-Reza, R. M., García-Betanzos, C. I., Real-Sandoval, S. A., & Quintanar-Guerrero, D. (2022). Nano-Encapsulated Essential Oils as a Preservation Strategy for Meat and Meat Products Storage. *Molecules*, 27, 8187. <https://doi.org/10.3390/molecules27238187>
- Ozdemir, N., Bayrak, A., Tat, T., Yanik, Z. N., Altay, F., & Halkman, A. K. (2021). Fabrication and characterization of basil essential oil microcapsule-enriched mayonnaise and its antimicrobial properties against *Escherichia coli* and *Salmonella Typhimurium*. *Food Chemistry*, 359, 129940. <https://doi.org/10.1016/j.foodchem.2021.129940>
- Peixoto, E. C., Fonseca, L. M., Zavareze, E. da R., & Gandra, E. A. (2023). Antimicrobial active packaging for meat using thyme essential oil (*Thymus vulgaris*) encapsulated on zein ultrafine fibers membranes. *Biocatalysis and Agricultural Biotechnology*, 51, 102778. <https://doi.org/10.1016/j.bcab.2023.102778>
- Quispe, A. M., Hinojosa-Ticona, Y., Miranda, H. A., & Sedano, C. A. (2021). Scientific writing series: Systematic review. In *Revista del Cuerpo Medico Hospital Nacional Almanzor Aguinaga Asenjo* (Vol. 14, Issue 1, pp. 94–99). Medical Body of the Almanzor Aguinaga Asenjo National Hospital. <https://doi.org/10.35434/rcmhnaaa.2021.141.906>
- Roshan, A. B., Venkatesh, H. N., Dubey, N. K., & Mohana, D. C. (2022). Chitosan-based nanoencapsulation of *Toddalia asiatica* (L.) Lam. essential oil to enhance antifungal and aflatoxin B1 inhibitory activities for safe storage of maize. *International Journal of Biological Macromolecules*, 204, 476–484. <https://doi.org/10.1016/j.ijbiomac.2022.02.026>
- Sánchez-Osorno, D. M., López-Jaramillo, M. C., Caicedo Paz, A. V., Villa, A. L., Peresin, M. S., & Martínez-Galán, J. P. (2023). Recent Advances in the Microencapsulation of Essential Oils, Lipids, and Compound Lipids through Spray Drying: A Review. *Pharmaceutics* 2023, Vol. 15, Page 1490, 15(5), 1490. <https://doi.org/10.3390/PHARMACEUTICS15051490>
- Sindhu, M., Rajkumar, V., Annappoorani, C. A., Gunasekaran, C., & Kannan, M. (2023). Nanoencapsulation of garlic essential oil using chitosan nanopolymer and its antifungal and anti-aflatoxin B1 efficacy in vitro and in situ. *International Journal of Biological Macromolecules*, 243, 125160. <https://doi.org/10.1016/j.ijbiomac.2023.125160>
- Singh, A., Bhardwaj, U., Kaur, R., & Vyas, P. (2023). Chemical Composition, Microencapsulation and Comparative Antimicrobial Studies of Unencapsulated and Encapsulated Carrot Seed Essential Oil. *Journal of Essential Oil-Bearing Plants*, 26(1), 232–243. <https://doi.org/10.1080/0972060X.2023.2182712>
- Sridhar, K., Hamon, P., Ossemond, J., Bouhallab, S., Croguennec, T., Renard, D., & Lechevalier, V. (2024). Plant and animal protein mixed systems as wall material for microencapsulation of Mānuka essential Oil: Characterization and in vitro release kinetics. *Food Research International*, 114419. <https://doi.org/10.1016/j.FOODRES.2024.114419>
- Taheri, P., Soweizy, M., & Tarighi, S. (2023). Application of essential oils to control some important fungi and bacteria pathogenic on cereals. *Journal of Natural Pesticide Research*, 6, 100052. <https://doi.org/10.1016/j.NAPER.2023.100052>
- Tu, Q. B., Wang, P. Y., Sheng, S., Xu, Y., Wang, J. Z., You, S., Zhu, A. H., Wang, J., & Wu, F. A. (2020). Microencapsulation and Antimicrobial Activity of Plant Essential Oil Against *Ralstonia solanacearum*. *Waste and Biomass Valorization*, 11(10), 5273–5282. <https://doi.org/10.1007/s12649-020-00987-6>
- Upadhyay, N., Singh, V. K., Dwivedy, A. K., Chaudhari, A. K., & Dubey, N. K. (2021). Assessment of nanoencapsulated *Cananga odorata* essential oil in chitosan nanopolymer as a green approach to boost the antifungal, antioxidant and in situ efficacy. *International Journal of Biological Macromolecules*, 171, 480–490. <https://doi.org/10.1016/j.ijbiomac.2021.01.024>
- Van, C. K., Nguyen, P. T. N., Nguyen, T. T. T., & Bach, L. G. (2024). Microencapsulation of Citrus latifolia peel essential oil by spray-drying using maltodextrin: Characterization, antimicrobial activities, and release profile. *LWT*, 197, 115825. <https://doi.org/10.1016/j.lwt.2024.115825>
- Vuković, N. L., Vukić, M., Branković, J., Petrović, V., Galovičova, L., Čmikova, N., & Kačaniova, M. (2024). The antimicrobial and antibiofilm potential of the Piper nigrum L. essential oil: in vitro, in situ, and in silico study. *Industrial Crops and Products*, 209, 118075. <https://doi.org/10.1016/j.INDCROP.2024.118075>
- Wang, Y., Du, Y.-T., Xue, W.-Y., Wang, L., Li, R., Jiang, Z.-T., Tang, S.-H., & Tan, J. (2023). Enhanced preservation effects of clove (*Syzygium aromaticum*) essential oil on the processing of Chinese bacon (preserved meat products) by beta cyclodextrin metal organic frameworks (β-CD-MOFs). *Meat Science*, 195, 108998. <https://doi.org/10.1016/j.meatsci.2022.108998>
- Yang, K., Liu, A., Hu, A., Li, J., Zen, Z., Liu, Y., Tang, S., & Li, C. (2021). Preparation and characterization of cinnamon essential oil nanocapsules and comparison of volatile components and antibacterial ability of cinnamon essential oil before and after encapsulation. *Food Control*, 123, 107783. <https://doi.org/10.1016/j.foodcont.2020.107783>
- Zhang, L., Zhang, M., Ju, R., Bhandari, B., & Liu, K. (2023). Antibacterial mechanisms of star anise essential oil microcapsules encapsulated by rice protein-depolymerized pectin electrostatic complexation and its application in crab meatballs. *International Journal of Food Microbiology*, 384, 109963. <https://doi.org/10.1016/j.ijfoodmicro.2022.109963>
- Zhang, Y., Yang, S., Hardie, W. J., Li, X., Xiao, M., Huang, T., Xiong, T., & Xie, M. (2023). Microcapsules of a cinnamon, peppermint, and lemon essential oil mix by spray drying: Preparation, characterization and antibacterial functions. *Food Hydrocolloids*, 145, 109103. <https://doi.org/10.1016/j.foodhyd.2023.109103>
- Zhao, Y., Wang, Y., Zhang, Z., & Li, H. (2023). Advances in Controllable Release Essential Oil Microcapsules and Their Promising Applications. *Molecules* 2023, Vol. 28, Page 4979, 28(13), 4979. <https://doi.org/10.3390/molecules28134979>