



Nanoencapsulación de compuestos bioactivos de plantas medicinales infravaloradas: Una revisión narrativa con enfoque bibliométrico

Nanoencapsulation of bioactive compounds from undervalued herbs: A narrative review with a bibliometric approach

Lizeth Jacobo-Cruz¹; Jhon Chilon-Neyra²; Gabriela Barraza-Jauregui^{3*}

¹ Facultad de Ciencias Agropecuarias, Universidad Nacional de Trujillo. Av. Juan Pablo II s/n, Ciudad Universitaria, Trujillo, Perú.

ORCID de los autores:

J. Jacobo-Cruz: <https://orcid.org/0009-0005-6357-4970>

J. Chilon-Neyra: <https://orcid.org/0009-0001-4883-0164>

G. Barraza-Jauregui: <https://orcid.org/0000-0002-0376-2751>

RESUMEN

Este estudio revisa la nanoencapsulación de compuestos bioactivos provenientes de plantas medicinales poco valoradas y productos naturales, combinando un enfoque narrativo y bibliométrico. La nanoencapsulación protege estos compuestos sensibles de factores ambientales, mejorando su estabilidad, biodisponibilidad y liberación controlada. Diferentes nanomateriales, como liposomas y nanotransportadores lipídicos, permiten su inclusión en alimentos funcionales sin afectar las propiedades sensoriales. El análisis bibliométrico identificó tendencias actuales en formulación, caracterización, compuestos naturales y vegetales, además de técnicas analíticas avanzadas. Las plantas nativas y plantas tradicionales surgen como fuentes importantes de bioactivos, aunque presentan retos técnicos como baja solubilidad y estabilidad. La nanoencapsulación se consolida como una estrategia innovadora para incrementar la estabilidad, biodisponibilidad y funcionalidad de compuestos bioactivos, favoreciendo su incorporación en matrices alimentarias orientadas al desarrollo de productos funcionales y sostenibles. Si bien la evidencia disponible destaca su elevado potencial tecnológico, su implementación a nivel industrial aún exige avances en métodos de producción, optimización de costos y validación de procesos a escala piloto y comercial.

Palabras clave: Nanoencapsulación; compuestos bioactivos; plantas medicinales infravaloradas; alimentos funcionales; estabilidad.

ABSTRACT

This study reviews the nanoencapsulation of bioactive compounds derived from underutilized herbs and natural products, combining a narrative and bibliometric approach. Nanoencapsulation protects these sensitive compounds from environmental factors, improving their stability, bioavailability, and controlled release. Different nanomaterials, such as liposomes and lipid-based nanocarriers, enable their incorporation into functional foods without affecting sensory properties. The bibliometric analysis identified current trends in formulation, characterization, natural and plant-based compounds, as well as advanced analytical techniques. Native herbs and traditional plants emerge as important sources of bioactive, although they present technical challenges such as low solubility and stability. Nanoencapsulation has become an innovative strategy to increase the stability, bioavailability, and functionality of bioactive compounds, supporting their incorporation into food matrices aimed at the development of functional and sustainable products. Although available evidence highlights its high technological potential, its implementation at an industrial level still requires progress in production methods, cost optimization, and process validation at pilot and commercial scales.

Keywords: Nanoencapsulation; bioactive compounds; undervalued herbs; functional foods; stability.

1. Introducción

La nanoencapsulación es una tecnología emergente que permite la incorporación de compuestos bioactivos en sistemas de liberación a escala nanométrica, empleando materiales poliméricos o lipídicos. Esta técnica no solo ofrece protección a los compuestos sensibles frente a factores ambientales adversos, sino que también incrementa su biodisponibilidad y posibilita una liberación controlada y dirigida (Torres, 2023). Gracias a estas propiedades, la nanoencapsulación ha revolucionado el diseño de alimentos funcionales en la industria alimentaria, facilitando la incorporación eficaz de ingredientes con propiedades fisiológicas beneficiosas (Robayo, 2024). En este marco, los compuestos bioactivos de origen vegetal, como los flavonoides, compuestos fenólicos, carotenoides y vitaminas, han despertado un interés creciente debido a su capacidad para contribuir a la prevención de enfermedades crónicas relacionadas con el estrés oxidativo (Jia et al., 2024). Estos compuestos han adquirido relevancia en la nutrición moderna por su potencial para mejorar la salud de las poblaciones que siguen dietas basadas en alimentos vegetales, los cuales los contienen de forma natural (Urrialde et al., 2022).

Particularmente, las plantas medicinales tradicionalmente infravaluadas representan una fuente rica y diversa de estos compuestos bioactivos, muchas veces aún no suficientemente explorados ni aprovechados a nivel industrial. A pesar de su potencial, varios de estos ingredientes presentan limitaciones como baja solubilidad, escasa estabilidad o baja biodisponibilidad, obstáculos que dificultan su incorporación directa en productos alimentarios o nutracéuticos. En este contexto, la nanoencapsulación surge como una estrategia prometedora para superar dichas barreras tecnológicas y promover un uso más sostenible e innovador de plantas medicinales infravaloradas.

El objetivo de esta revisión es explorar el estado del arte en la nanoencapsulación de compuestos bioactivos derivados de plantas poco valorizadas, mediante un enfoque narrativo y bibliométrico. Se analizaron tanto los avances científicos como las tendencias actuales de investigación, con el fin de identificar oportunidades, desafíos y perspectivas futuras en este campo emergente.

2. Fundamentos de la Nanoencapsulación

La nanoencapsulación es una tecnología emergente que permite incorporar compuestos bioac-

tivos dentro de una matriz o cubierta diseñada a escala nanométrica, con el fin de protegerlos, estabilizarlos y optimizar su acción biológica. Este sistema se basa en la formación de un núcleo que contiene el principio activo y una pared o matriz que lo rodea, cuyos diámetros pueden oscilar entre 1 y 1000 nm; sin embargo, para aplicaciones alimentarias y biomédicas, los tamaños más eficientes suelen situarse entre 50 y 300 nm, rango que favorece la estabilidad coloidal, la difusión controlada y la interacción celular (McClements, 2015). Este confinamiento nanométrico permite resguardar los compuestos sensibles frente a condiciones ambientales adversas como la exposición a la luz, el oxígeno, la humedad o variaciones extremas de pH mejorando así su estabilidad durante el procesamiento y almacenamiento. De igual forma, el tamaño reducido incrementa la solubilidad en medios acuosos y posibilita una liberación dirigida, lo que se traduce en una mayor biodisponibilidad del bioactivo encapsulado.

De acuerdo con Pateiro et al. (2021), la nanoencapsulación no solo prolonga la vida útil y estabilidad química de los compuestos bioactivos, sino que también permite modular su liberación en regiones fisiológicas específicas. Este comportamiento se logra mediante el diseño de nanopartículas con respuestas controladas ante estímulos ambientales o biológicos, tales como variaciones de pH, temperatura o la presencia de enzimas propias del sitio de acción. La reducción del tamaño de partícula a la nanoescala también mejora la interacción con las membranas celulares, promoviendo una absorción más eficiente y, en consecuencia, una mayor efectividad funcional.

Asimismo, Kamble et al. (2025) destacan que el confinamiento de los bioactivos dentro de matrices nanoestructuradas actúa como una barrera física que limita la exposición a factores degradativos durante el procesamiento y almacenamiento de alimentos. Esta protección estructural contribuye a preservar la integridad química del compuesto, mejorar su retención y, en muchos casos, potenciar su biodisponibilidad gracias a su capacidad para atravesar la membrana celular mediante procesos de transporte pasivo o mecanismos de absorción especializados. En conjunto, estos aspectos convierten a la nanoencapsulación en una estrategia altamente eficiente para la entrega controlada y protección de compuestos funcionales en sistemas alimentarios y biomédicos.

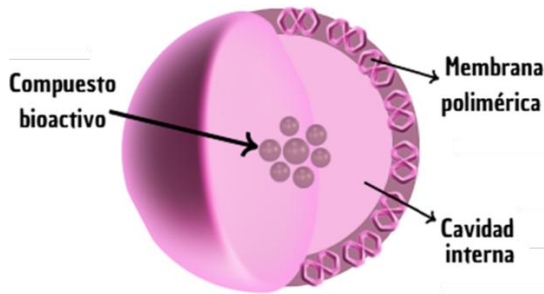


Figura 1. Esquema simplificado de un sistema núcleo-capa.
Figure 1. Simplified diagram of a kernel-shell system.

2.1. Tipo de Nano-vehículos

Para lograr una nanoencapsulación eficaz, se emplean distintos tipos de nanovehículos, cuya selección depende tanto de la naturaleza del compuesto bioactivo como del objetivo funcional y del entorno de aplicación (Norkaew et al., 2019). Entre los sistemas más utilizados destacan los lipídicos, poliméricos (naturales y sintéticos) y metálicos, cada uno con características que los hacen especialmente adecuados para aplicaciones concretas. Por ello, la Tabla 1 presenta las principales familias de sistemas nanoencapsulados, junto con los materiales más empleados. Este análisis evidencia la diversidad de alternativas disponibles, cada una con ventajas específicas en términos de estabilidad, funcionalidad y biocompatibilidad.

2.2. Técnicas de preparación

La producción de estos sistemas de nanoencapsulación puede llevarse a cabo mediante

diversas técnicas, las cuales pueden ser organizadas en categorías como los métodos químicos, fisicoquímicos y físico-mecánicos, según el principio que utilizan para formar las nanoestructuras.

La técnica seleccionada influye de manera decisiva en aspectos clave como la eficiencia del encapsulado, el tamaño de partícula y el perfil de liberación controlada del principio activo. En este sentido, la Tabla 2 presenta las principales técnicas empleadas, agrupadas según su método y destacando el principio de funcionamiento de cada una. De esta forma, la elección combinada de nanovehículos y técnicas de preparación permite diseñar sistemas de liberación dirigidos que responden de manera específica a las características del compuesto encapsulado y a su aplicación industrial.

Estas características convierten a la nanoencapsulación en una herramienta versátil y eficaz, aplicable en campos tan diversos como la industria alimentaria, farmacéutica y cosmética. En este sentido, la Figura 2 sintetiza las principales aplicaciones industriales de los sistemas nanoencapsulados, destacando su potencial para enriquecer alimentos funcionales, mejorar la eficacia de fármacos y potenciar las propiedades de productos cosméticos. Este esquema ayuda a visualizar cómo el desarrollo de sistemas de liberación controlada impacta directamente en el diseño de productos de consumo con mayor valor añadido y funcionalidad.

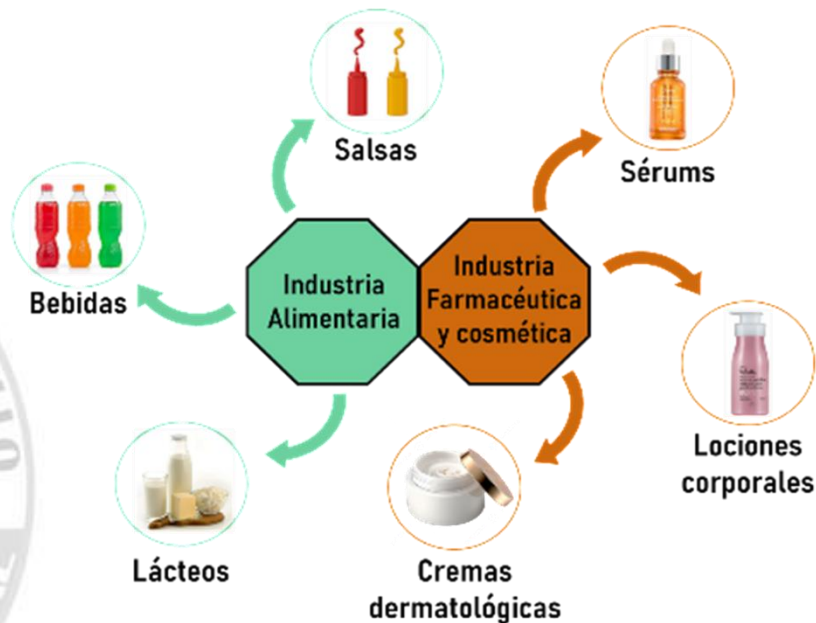


Figura 2. Aplicaciones de la nanoencapsulación en la industria.

Figure 2. Applications of nanoencapsulation in industry.

Tabla 1

Clasificación de los principales nanovehículos empleados en nanoencapsulación

Table 1

Classification of the main nano-vehicles used in nanoencapsulation

| Sistema | Tipo/Familia | Descripción | Materiales comunes | Referencias |
|-------------------------------------|----------------------------|--|--|---|
| Liposoma | Lipídico | Vesículas esféricas con bicapas lipídicas que encapsulan compuestos tanto hidrosolubles como liposolubles. | Fosfolípidos naturales | (Eskandari et al., 2021); (Yu et al., 2021); (Sriwidodo et al., 2022) |
| Micela | Lipídico | Estructura esférica autoensamblada en medio acuoso formada por lípidos anfífilicos. | Ácidos grasos, glicolípidos, fosfolípidos | (Perumal et al., 2022); (Benitez et al., 2022) |
| Nanopartícula lipídica sólida (SLN) | Lipídico | Nanopartículas con núcleo lipídico sólido y recubrimiento emulsionante. | Palmitoestearato, monoestearato, tripalmitina, ceras | (Blanco-Llamero et al., 2022); (Madkhali, 2022) |
| Alginato | Polimérico natural | Polisacárido de algas pardas que forma geles por interacción iónica con cationes. | Alginato de sodio, calcio | (Abka-khajouei et al., 2022); (Abdul Khalil et al., 2017) |
| Carragenina | Polimérico natural | Polisacárido sulfatado extraído de algas rojas con propiedades gelificantes. | κ -carragenano, ι -y λ -carragenano | (Dong et al., 2021); (Álvarez-Viñas et al., 2021) |
| Quitosano | Polimérico natural | Polisacárido cargado positivamente derivado de la quitina. | Quitosano (de crustáceos) | (Khajavian et al., 2022) |
| Ciclodextrina | Polimérico (oligosacárido) | Oligosacáridos cíclicos capaces de formar complejos de inclusión con compuestos activos. | α -CD, β -CD, γ -CD | (Liu et al., 2021) |
| Pectina | Polimérico natural | Polisacárido vegetal con zonas ramificadas y cadenas de ácido galacturónico. | Pectina con grupos éster metílicos o amónicos | (Chandel et al., 2022); (Rohasmizah & Azizah, 2022) |
| Polietilenglicol (PEG) | Polimérico sintético | Polímero hidrofílico sintético ampliamente utilizado para modificar compuestos bioactivos. | PEG de diferentes pesos moleculares | (Mundel et al., 2022) |
| Ácido poliláctico (PLA) | Polimérico sintético | Poliéster biodegradable obtenido de ácido láctico. | PLA, PLLA, PDLA, PDLLA | (Ranakoti et al., 2022) |
| Proteínas | Polimérico natural | Macromoléculas con capacidad de autoensamblaje mediante interacciones no covalentes. | Colágeno, gelatina, caseína, etc. | (Tang, 2021) |
| Nanopartículas metálicas (MNP) | Metálico | Nanopartículas con propiedades antimicrobianas útiles en conservación y sensores alimentarios. | AgNP, CuNP, AuNP, ZnO NP, TiO ₂ NP | Ahmed et al., 2019) |

Nota. Los datos presentados en esta tabla fueron extraídos y consolidados de diversas fuentes bibliográficas.

Tabla 2

Técnicas de preparación de sistemas nanoencapsulados

Table 2

Techniques for preparing nanoencapsulated systems

| Técnica | Método | Principio | Referencia |
|---------|----------------|--|----------------------|
| Químico | Emulsificación | Se forma una emulsión del núcleo en una fase continua mediante agitación, homogeneización o pulverización. Luego se crea una cubierta mediante polimerización; la emulsión se homogeneiza o atomiza para permitir la evaporación del disolvente. | (Håkansson, 2019) |
| | Sol-gel | Se prepara un sol coloidal que se gelatiniza para formar una red inorgánica (gel). Se solidifican moléculas orgánicas e inorgánicas para formar la cápsula. | (Bokov et al., 2021) |
| | Hidrotérmico | Reacciones químicas en agua a altas temperaturas y presiones que permiten formar las cápsulas. | (Zhang et al., 2021) |

| | | | |
|-----------------|-------------------------------------|--|--------------------------|
| Físico-química | Coacervación simple | Se agrega un agente de desolvatación (gelatina o etilcelulosa) para inducir la separación de fases en un medio acuoso u orgánico. | (Kizilay et al., 2011) |
| | Coacervación compleja | Interacción entre dos polímeros de carga opuesta solubles en agua para formar una fase separada que encapsula el núcleo. | (Kizilay et al., 2011) |
| | Complejos de inclusión | Encapsulación basada en interacciones supramoleculares (Van der Waals, puentes de hidrógeno, efecto hidrófobo) entre el material núcleo y el caparazón con cavidades. | (Tahir et al., 2021) |
| | Fluidos supercríticos | El constituyente principal se disuelve en CO ₂ supercrítico y se dispersa en un material de matriz. Al eliminar el CO ₂ , el núcleo queda encapsulado. | (Park et al., 2021) |
| Físico-mecánica | Secado por aspersión | El núcleo se atomiza en una solución polimérica y se seca por calor. El solvente se evapora, formando cápsulas con partículas pequeñas (hasta 100 nm). | (Bušić et al., 2018) |
| | Evaporación/extracción de solventes | El núcleo y el polímero se disuelven en un solvente orgánico inmisible en agua. Luego, se agrega a una fase acuosa y se elimina el disolvente por evaporación o extracción. | De Gaetano et al. (2021) |
| | Electropulverización | Atomización de líquidos mediante fuerzas eléctricas. Se regula el tamaño de gotas ajustando el voltaje y flujo. | De Moraes et al., (2022) |

Nota. Los datos presentados en esta tabla fueron extraídos y consolidados de diversas fuentes bibliográficas.

3. Plantas medicinales con potencial bioactivo

Las plantas medicinales constituyen una fuente invaluable de compuestos bioactivos con propiedades terapéuticas que han sido utilizadas para el tratamiento de trastornos del sistema digestivo a lo largo de la historia. Diversas especies vegetales han sido tradicionalmente empleadas para aliviar afecciones digestivas, y numerosos estudios recientes han identificado metabolitos con efectos antiinflamatorios (Tabla 3), antibacterianos, antivirales, antiparasitarios, antidiarreicos, antioxidantes e incluso anticancerígenos (Julián-Flores et al., 2025). Este conocimiento, lejos de ser reciente, forma una parte esencial de las medicinas tradicionales e indígenas, que han basado su sistema de salud en el uso intensivo de productos naturales y sus

derivados. De hecho, se estima que más de la mitad de los medicamentos utilizados actualmente alrededor del mundo tienen un origen directo o indirecto en estos saberes ancestrales y en los recursos naturales que los sustentan, demostrando la relevancia y el valor de las aplicaciones tradicionales en el desarrollo de la farmacología moderna (Cano Cáceres et al., 2022).

En la Figura 3 se ilustran algunas de las principales plantas medicinales con potencial medicinal, mientras que en la Tabla 3 se detallan sus compuestos bioactivos, propiedades funcionales y limitaciones de uso directo. Estas especies, muchas de ellas conocidas, pero poco valoradas, representan una valiosa alternativa terapéutica y preventiva en el contexto de la salud.

Tabla 3

Plantas medicinales con compuestos bioactivos, propiedades funcionales y limitaciones de uso directo

Table 3

Medicinal plants with bioactive compounds, functional properties, and limitations of direct use

| Plantas medicinales | Compuestos bioactivos | Propiedades funcionales | Limitaciones de uso directo | Referencia |
|--|--|---|--|-------------------------|
| Muña (<i>Minthostachys mollis</i>) | Isomentona, pulegona, mentona, noementol | Antimicrobiana y digestiva | La pulegona en altas dosis puede ser hepatotóxica. | (Linares-Otoya, 2020) |
| Llantén (<i>Plantago major</i>) | Flavonoides, polisacáridos, terpenoides, lípidos, glucósidos iridoides | Antiinflamatoria, cicatrizante, expectorante | Puede causar efectos laxantes en dosis altas. | (Najafian et al., 2018) |
| Matico (<i>Piper aduncum</i>) | Flavonoides, taninos, aceites esenciales | Antiséptico, cicatrizante, antiinflamatorio | Potencial alergénico en piel sensible. | (Taher et al., 2020) |
| Uña de gato (<i>Uncaria tomentosa</i>) | Alcaloides, oxindólicos, flavonoides, triterpenos, polifenoles | Inmunoestimulante, antiinflamatorio, antioxidante | Puede interferir con medicamentos inmunosupresores. | (Arado et al., 2024) |
| Sangre de grado (<i>Croton lechleri</i>) | Proantocianidinas, taninos, lignanos, taspina | Cicatrizante, antiulcerosa, antimicrobiana | Posible irritación gastrointestinal si se consume en exceso. | (Peres et al., 2023) |



Figura 3. Plantas medicinales con potencial medicinal.
Figure 3. Medicinal plants with medicinal potential.

4. Aplicación de nanoencapsulados en alimentos

4.1. Mejoras en la estabilidad y biodisponibilidad

La nanoencapsulación se ha consolidado como una herramienta para la fortificación de alimentos funcionales, permitiendo incorporar compuestos bioactivos sin alterar negativamente las características sensoriales del producto final. Micronutrientes como Fe y Ca, asociados con sabores metálicos, cambios de color y modificaciones no deseadas de la textura, pueden ser eficientemente encapsulados en sistemas nanométricos lipídicos o en matrices poliméricas biocompatibles, lo que contribuye a minimizar su impacto organoléptico (Delshadi et al., 2020). Además, esta estrategia favorece una mayor biodisponibilidad, ya que los nanovehículos protegen a los nutrientes de interacciones inhibitorias dentro de la matriz alimentaria y facilitan su paso a través del tracto gastrointestinal, optimizando su absorción (Assadpour & Mahdi, 2019). Este efecto es valioso en el diseño de alimentos destinados a poblaciones vulnerables como niños, adultos mayores o pacientes con requerimientos específicos donde la aceptabilidad sensorial constituye un factor crítico para asegurar un adecuado consumo.

Además de aislar sabores, la nanoencapsulación provee una protección robusta frente a las condiciones adversas del procesamiento y el almacenamiento. Diversos compuestos de elevada susceptibilidad a la oxidación o desnaturalización, como la curcumina, las vitaminas liposolubles (A, D, E) o los probióticos, muestran una mejora significativa en su estabilidad cuando son incorporados en nanopartículas de quitosano o en sistemas lipídicos nanoestructurados (NLC) (Ojeda et al., 2019).

4.2. Sistemas de liberación controlada en matrices alimentarias

La nanoencapsulación también ha impulsado el desarrollo de sistemas de liberación controlada, cuyo propósito es regular el momento y el lugar en que los compuestos bioactivos se liberan dentro del organismo. Estas tecnologías emplean nanomateriales como liposomas, nanoemulsiones, nanopartículas poliméricas o biopolímeros naturales, capaces de responder a estímulos específicos como variaciones de pH, presencia de enzimas digestivas o incluso estímulos térmicos propios del cocinado (Boostani & Jafari, 2021). Al diseñar las nanopartículas para activarse únicamente bajo determinadas condiciones gastrointestinales, se logra que los compuestos bioactivos como, vitaminas, antioxidantes, minerales o probióticos alcancen su sitio de absorción con mínima degradación previa. Esta precisión en la liberación maximiza la eficacia biológica de los ingredientes funcionales y permite desarrollar alimentos con efectos fisiológicos más predecibles y consistentes. La Figura 4 muestra sistemas de liberación controlada basados en nanoestructuras (liposomas, nanoemulsiones y polímeros). Estos sistemas responden a estímulos digestivos (pH, enzimas, temperatura), protegiendo compuestos bioactivos y mejorando su biodisponibilidad.

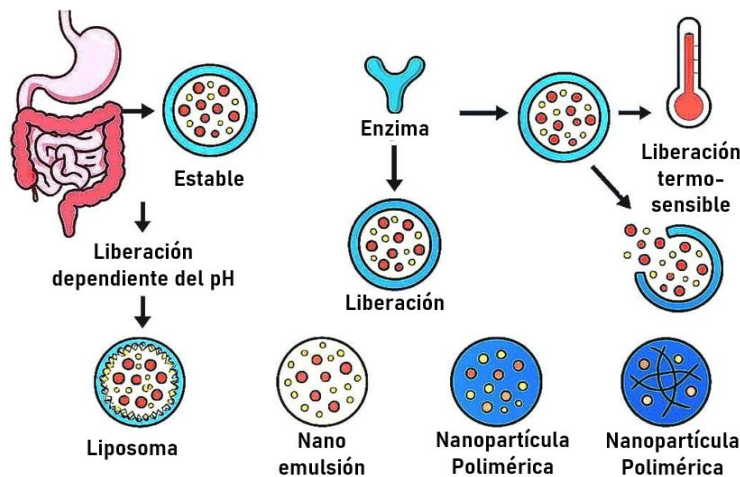


Figura 4. Funcionamiento del sistema de liberación controlada / Figure 4. Operation of the controlled release system.

5. Desafíos y perspectivas futuras

5.1. Desafíos tecnológicos y científicos

La nanotecnología ha adquirido un creciente protagonismo en la ciencia de los alimentos, especialmente mediante la nanoencapsulación de compuestos bioactivos, los cuales suelen presentar baja absorción en el organismo. Los sistemas nanoestructurados contribuyen a mejorar su protección, solubilidad, estabilidad y biodisponibilidad. No obstante, su desarrollo implica retos importantes, como seleccionar el método de obtención adecuado y el nanomaterial más compatible. También es fundamental evaluar su seguridad, por lo que se promueve la regulación toxicológica y el uso de métodos sostenibles como la síntesis ecológica (Bazana et al., 2019).

5.2. Barreras regulatorias y de seguridad

La ausencia de normativas claras sobre nanotecnología ha impulsado el uso de mecanismos voluntarios o regulación blanda, como registros, etiquetado, códigos de conducta, guías y normas técnicas. Estos buscan orientar el uso seguro de nanomateriales mientras se avanza hacia una armonización normativa. Organismos como la ISO, a través del comité ISO/TC-229, y la OCDE, mediante el WPMN, han desempeñado un papel clave en el desarrollo de estándares internacionales. Sin embargo, aún persiste el debate sobre cuál es el enfoque regulatorio más adecuado para una tecnología emergente con múltiples aplicaciones y riesgos aún inciertos (Saldívar Tanaka, 2020).

5.3. Aceptación del consumidor y percepción pública

A pesar del potencial de la nanotecnología, su aceptación por parte del consumidor enfrenta barreras significativas debido al limitado conocimiento que existe sobre ella, lo que puede provocar percepciones divididas en cuanto a su seguridad.

Este desconocimiento puede influir negativamente en la disposición del público a aceptar productos que incorporen nanotecnología. Por ello, es esencial promover el diálogo entre la sociedad, los científicos, las autoridades y la industria para fortalecer la confianza y facilitar una adopción informada. Aunque se ha iniciado el debate sobre la percepción pública tanto en países desarrollados como en desarrollo, aún no se han realizado análisis comparativos entre

ambos contextos, lo cual limita el diseño de estrategias efectivas de comunicación y educación adaptadas a distintas realidades socioeconómicas (Rathore & Mahesh, 2021).

5.4. Sostenibilidad e innovación futura

La impresión 3D, como técnica de fabricación aditiva, permite construir objetos capa por capa, ofreciendo un control preciso sobre la estructura y propiedades de los materiales. Su aplicación en el ámbito de los nanocompuestos abre nuevas posibilidades para fabricar sistemas de liberación controlada personalizados y con estructuras específicas que optimicen la funcionalidad de los compuestos bioactivos encapsulados (Tzounis & Bangeas, 2022).

Este enfoque no solo puede mejorar la eficiencia de los nanoencapsulados, sino también reducir el desperdicio de materiales y facilitar la fabricación descentralizada de ingredientes funcionales o componentes activos para alimentos.

6. Análisis bibliométrico basado en Nanoencapsulación

Se realizó una búsqueda en la base de datos Scopus el 6 de mayo de 2023, utilizando como palabras clave "Nanoencapsulación", "Compuestos bioactivos" y "plantas medicinales". Como resultado, se obtuvieron 141 documentos, los cuales fueron analizados posteriormente mediante los softwares VosViewer (versión 1.6.20) y Bibliometrix (Biblioshiny).

Con VosViewer se generó un mapa de coocurrencias que permite visualizar las relaciones entre las palabras clave más relevantes en el campo (Figura 5a). En dicho mapa se identificó un clúster principal donde se agrupan los términos más importantes, además de que los colores reflejan la relación entre los años y la frecuencia de aparición de dichas palabras. Se observan los términos más comunes vinculados a la nanoencapsulación y sus agrupaciones temáticas, destacando conceptos como *nanoencapsulation*, *particle size*, *drug delivery system*, *antioxidant*, *zeta potential* y *bioactive compounds*, los cuales representan los núcleos principales en las áreas de investigación. Asimismo, los colores indican el año promedio de publicación asociado a cada término, permitiendo apreciar la evolución temática a lo largo del tiempo. Como ejemplo, términos como *drug delivery system* y *zeta potential* se relacionan con investigaciones más recientes, mientras que otros como *encapsulation* o *plant extract* predominan en estudios anteriores.

Por otra parte, con Bibliometrix se obtuvo una nube de palabras (wordcloud) (Figura 5b). En esta visualización, las palabras clave más frecuentes en el conjunto de datos aparecen en un esquema en forma de estrella, donde el tamaño de cada término indica la cantidad de veces que fue mencionado. La presencia destacada de términos como nanoencapsulation, particle size, bioactive compounds y chemistry subraya su relevancia en la literatura científica reciente. Esta representación facilita una comprensión rápida y visual de los temas predominantes en las investigaciones sobre nanoencapsulación a través del tiempo.

El dendrograma jerárquico (Figura 5c) organiza las palabras clave en torno a su similitud temática, confirmando y complementando las agrupaciones del MCA. Se identifican cinco clústeres principales: **Clúster 1 (rojo)**: Bioactive compounds, actuando como un nodo central que conecta con diversos enfoques investigativos. **Clúster 2 (azul)**: Técnicas de caracterización instrumental, destacando *zeta potential*, *controlled study* y *Fourier transform infrared spectroscopy*. **Clúster 3 (verde)**: Propiedades funcionales y formulación, incluyendo *chemistry*, *antioxidant*, *drug formulation* y *emulsion*. **Clúster 4 (morado)**: Técnicas de encapsulación, con los términos *nanoencapsulation* y *encapsulation*. **Clúster 5 (naranja)**: Sistemas de liberación y fuentes naturales, agrupando *particle*

size, *unassigned drug*, *drug delivery system*, *plant extract* y *nanoparticle*.

Estas agrupaciones reflejan la diversidad de enfoques en la investigación sobre nanoencapsulación, desde técnicas y formulaciones hasta fuentes naturales y compuestos bioactivos emergentes.

En el mapa conceptual (Figura 5d), generado mediante análisis de correspondencias múltiples (MCA), se ilustran las principales dimensiones semánticas que organizan el campo investigativo. Se distinguen cinco agrupaciones temáticas. (a) Formulación y caracterización fisicoquímica: agrupa términos como *zeta potential*, *controlled study* y *Fourier transform infrared spectroscopy*, reflejando el enfoque técnico y analítico dominante en las etapas iniciales de investigación. (b) Compuestos naturales y bioactivos: Representado por palabras como *antioxidant*, *chemistry*, *emulsion* y *drug formulation*, lo que indica un interés creciente en utilizar materiales de origen natural en la nanoencapsulación. (c) Técnicas analíticas: Incluye términos como *Fourier transform infrared spectroscopy* y *zeta potential*, esenciales para la caracterización de los sistemas nanoestructurados. (Esta agrupación se superpone con el grupo anterior en el mapa, lo cual sugiere una conexión entre análisis instrumental y formulación).

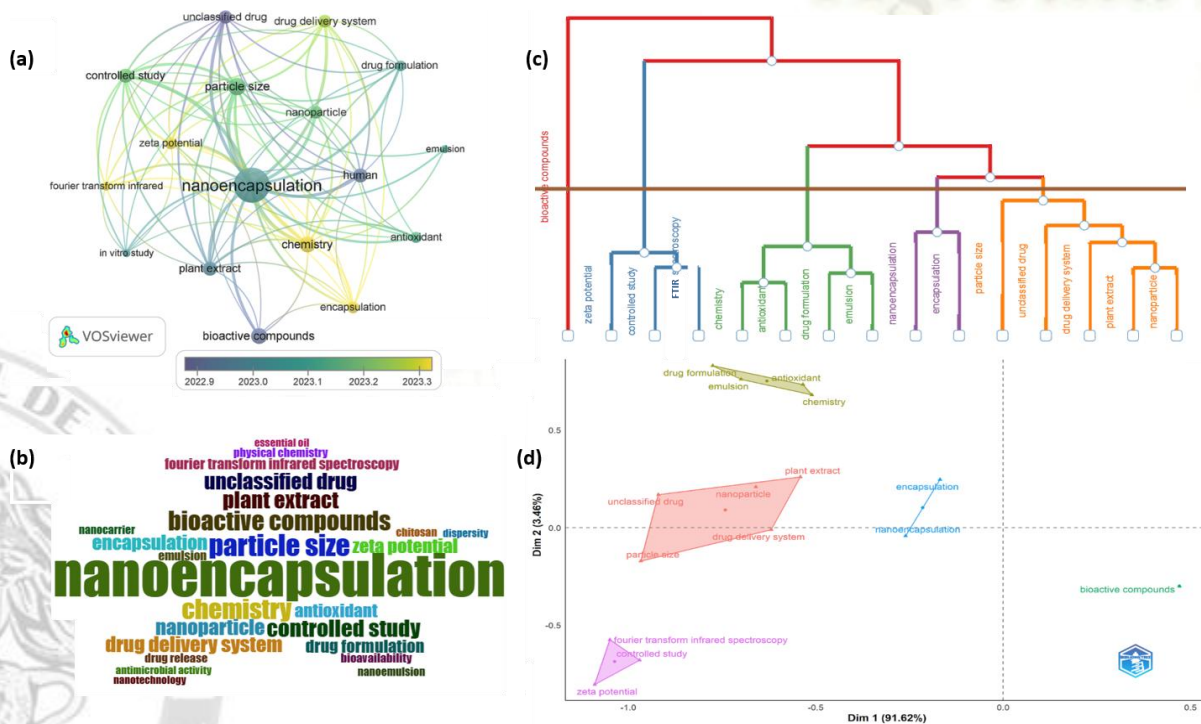


Figura 5. Mapeo bibliográfico sobre nanoencapsulación que relaciona ciertas palabras clave con los años de publicación de los artículos. a) Mapa de coocurrencia elaborado con VosViewer. b) Wordcloud generado en Bibliometrix en forma de estrella. c) dendrograma, y d) Mapa conceptual MCA. / **Figure 5.** Bibliographic mapping on nanoencapsulation relating certain keywords to the publication years of the articles. a) Co-occurrence map created with VosViewer. b) Word cloud generated in Bibliometrix in the shape of a star. c) Dendrogram, and d) MCA conceptual map.

(d) Extractos vegetales y sistemas de liberación: Se observa una agrupación centrada en *plant extract*, *nanoparticle*, *drug delivery system*, *unassigned drug* y *particle size*, lo que sugiere un enfoque en aplicaciones farmacéuticas y el uso de matrices vegetales como fuentes funcionales. (e) Encapsulación de compuestos funcionales: Ubicada en una zona intermedia del mapa, esta categoría incluye términos como *nanoencapsulation* y *encapsulation*, reflejando su rol como eje articulador de múltiples enfoques en el campo.

El posicionamiento de los términos en el mapa refleja su papel dentro del campo: los términos cercanos al centro representan temas transversales que articulan diferentes áreas, mientras que los términos periféricos corresponden a enfoques especializados o emergentes.

7. Conclusiones

La nanoencapsulación ha demostrado ser una herramienta eficaz para mejorar la estabilidad y biodisponibilidad de compuestos bioactivos extraídos de plantas medicinales infravaloradas, lo que facilita su incorporación en alimentos funcionales sin comprometer sus propiedades sensoriales y potencia sus beneficios terapéuticos.

Esta tecnología protege compuestos sensibles, como antioxidantes y principios activos de plantas medicinales, frente a condiciones adversas durante el procesamiento, almacenamiento y consumo, aumentando su efectividad biológica y abriendo nuevas posibilidades en aplicaciones nutraceuticas y farmacéuticas.

A pesar del avance tecnológico, persisten desafíos en cuanto a la escalabilidad, estabilidad a largo plazo y sostenibilidad de los sistemas de nanoencapsulación, aspectos que requieren mayor investigación para asegurar su viabilidad comercial e industrial.

El aprovechamiento de plantas medicinales tradicionales subutilizadas mediante nanoencapsulación representa una estrategia prometedora para superar limitaciones de solubilidad y estabilidad, promoviendo un uso más eficiente y sostenible de recursos naturales ancestrales, en sintonía con los principios de la economía verde y la medicina natural.

Los análisis bibliométricos y técnicos indican que las áreas de mayor desarrollo incluyen formulación, caracterización, técnicas analíticas y el uso de materiales naturales, lo que facilita la transferencia de conocimiento científico a la

industria y fomenta la innovación en la producción de alimentos funcionales y nutraceuticos.

Referencias bibliográficas

- Abdul Khalil, H. P. S., Saurabh, C. K., Tye, Y. Y., Lai, T. K., Easa, A. M., Rosamah, E., Fazita, M. R. N., Syakir, M. I., Adnan, A. S., Fizree, H. M., Aprilia, N. A. S., & Banerjee, A. (2017). Seaweed based sustainable films and composites for food and pharmaceutical applications: A review. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 77, 353-362. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2017.04.025>
- Abka-khajouei, R., Tounsi, L., Shahabi, N., Patel, A. K., Abdelkafi, S., & Michaud, P. (2022). Structures, Properties and Applications of Alginates. *Marine Drugs*, 20(6), 364. <https://doi.org/10.3390/md20060364>
- Ahmed, J., Mulla, M., Jacob, H., Luciano, G., T.b., B., & Almusallam, A. (2019). Polylactide/poly(ϵ -caprolactone)/zinc oxide/clove essential oil composite antimicrobial films for scrambled egg packaging. *Food Packaging and Shelf Life*, 21, 100355. <https://doi.org/10.1016/j.foodpack.2019.100355>
- Álvarez-Viñas, M., Souto, S., Flórez-Fernández, N., Torres, M. D., Bandín, I., & Domínguez, H. (2021). Antiviral Activity of Carrageenans and Processing Implications. *Marine Drugs*, 19(8), Article 8. <https://doi.org/10.3390/md19080437>
- Arado, G. M., Amatto, P. D. P. G., Marins, M., Rizzi, E. S., França, S. D. C., Coppede, J. D. S., Carmona, F., & Pereira, A. M. S. (2024). Anti-inflammatory and/or immunomodulatory activities of *Uncaria tomentosa* (cat's claw) extracts: A systematic review and meta-analysis of in vivo studies. *Frontiers in Pharmacology*, 15. <https://doi.org/10.3389/fphar.2024.1378408>
- Assadpour, E., & Mahdi, S. (2019). A systematic review on nanoencapsulation of food bioactive ingredients and nutraceuticals by various nanocarriers. *Critical Reviews in Food Science and Nutrition*, 59(19), 3129-3151. <https://doi.org/10.1080/10408398.2018.1484687>
- Bazana, M. T., Codevilla, C. F., & De Menezes, C. R. (2019). Nanoencapsulation of bioactive compounds: Challenges and perspectives. *Current Opinion in Food Science*, 26, 47-56. <https://doi.org/10.1016/j.cofs.2019.03.005>
- Benitez, A. R., Margalit, D., Ryskin, M., Dor, M., Shuali, U., Nir, S., Polubesova, T., Ben-Ari, J., Kertsus-Banchik, J., & Undabeytia, T. (2022). Modified Compositions of Micelle-Clay and Liposome-Clay Composites for Optimal Removal from Water of Bacteria and Hydrophobic Neutral Chemicals. *Applied Sciences*, 12(6), 3044. <https://doi.org/10.3390/app12063044>
- Blanco-Llamero, C., Fonseca, J., Durazzo, A., Lucarini, M., Santini, A., Señoráns, F. J., & Souto, E. B. (2022). Nutraceuticals and Food-Grade Lipid Nanoparticles: From Natural Sources to a Circular Bioeconomy Approach. *Foods*, 11(15), Article 15. <https://doi.org/10.3390/foods11152318>
- Bokov, D., Turki Jalil, A., Chupradit, S., Suktatan, W., Javed Ansari, M., Shewael, I. H., Valiev, G. H., & Kianfar, E. (2021). Nanomaterial by Sol-Gel Method: Synthesis and Application. *Advances in Materials Science and Engineering*, 2021(1), 5102014. <https://doi.org/10.1155/2021/5102014>
- Boostani, S., & Jafari, S. M. (2021). A comprehensive review on the controlled release of encapsulated food ingredients; fundamental concepts to design and applications. *Trends in Food Science & Technology*, 109, 303-321. <https://doi.org/10.1016/j.tifs.2021.01.040>
- Bušić, A., Komes, D., Vojvodić Cebin, A., Špoljarić, I., Mršić, G., & Miao, S. (2018). The Potential of Combined Emulsification and Spray Drying Techniques for Encapsulation of Polyphenols from Rosemary (*Rosmarinus officinalis* L.) Leaves. *Food Technology and Biotechnology*, 56(4). <https://doi.org/10.17113/ftb.56.04.18.5680>
- Chandel, V., Biswas, D., Roy, S., Vaidya, D., Verma, A., & Gupta, A. (2022). Current Advancements in Pectin: Extraction, Properties and Multifunctional Applications. *Foods*, 11(17), Article 17. <https://doi.org/10.3390/foods11172683>
- Dong, Y., Wei, Z., & Xue, C. (2021). Recent advances in carrageenan-based delivery systems for bioactive ingredients: A

- review. *Trends in Food Science & Technology*, 112, 348-361. <https://doi.org/10.1016/j.tifs.2021.04.012>
- Delshadi, R., Bahrami, A., Tafti, A. G., Barba, F. J., & Williams, L. L. (2020). Micro and nano-encapsulation of vegetable and essential oils to develop functional food products with improved nutritional profiles. *Trends in Food Science & Technology*, 104, 72-83. <https://doi.org/10.1016/j.tifs.2020.07.004>
- Eskandari, V., Sadeghi, M., & Hadi, A. (2021). Physical and chemical properties of nano-liposome, application in nano medicine. *Journal of Computational Applied Mechanics*, 52(4). <https://doi.org/10.22059/jcamech.2021.336004.677>
- Håkansson, A. (2019). Emulsion Formation by Homogenization: Current Understanding and Future Perspectives. *Annual Review of Food Science and Technology*, 10(1), 239-258. <https://doi.org/10.1146/annurev-food-032818-121501>
- Hosseini, H., & Jafari, S. M. (2020). Introducing nano/microencapsulated bioactive ingredients for extending the shelf-life of food products. *Advances in Colloid and Interface Science*, 282, 102210. <https://doi.org/10.1016/j.cis.2020.102210>
- Kamble, M. G., Singh, A., Singh, S. V., Kamble, M. G., Sagar, N. A., & Rani, N. (2025). Nanotechnology for encapsulation of bioactive components: A review. *Discover Food*, 5(1), 116. <https://doi.org/10.1007/s44187-025-00386-7>
- Khajavian, M., Vatanpour, V., Castro-Muñoz, R., & Boczkaj, G. (2022). Chitin and derivative chitosan-based structures — Preparation strategies aided by deep eutectic solvents: A review. *Carbohydrate Polymers*, 275, 118702. <https://doi.org/10.1016/j.carbpol.2021.118702>
- Kizilay, E., Kayitmazer, A. B., & Dubin, P. L. (2011). Complexation and coacervation of polyelectrolytes with oppositely charged colloids. *Advances in Colloid and Interface Science*, 167(1-2), 24-37. <https://doi.org/10.1016/j.cis.2011.06.006>
- Linares-Otaya, V. (2020). Consideraciones para el uso y estudio de la "muña" peruana *Minthostachys mollis* (Benth.) Griseb y *Minthostachys setosa* (Briq.) Epling. *Ethnobotany Research and Applications*, 19. <https://doi.org/10.32859/era.19.29.1-9>
- Liu, Z., Ye, L., Xi, J., Wang, J., & Feng, Z. (2021). Cyclodextrin polymers: Structure, synthesis, and use as drug carriers. *Progress in Polymer Science*, 118, 101408. <https://doi.org/10.1016/j.progpolymsci.2021.101408>
- Madkhali, O. A. (2022). Perspectives and Prospective on Solid Lipid Nanoparticles as Drug Delivery Systems. *Molecules*, 27(5), 1543. <https://doi.org/10.3390/molecules27051543>
- Mundel, R., Thakur, T., & Chatterjee, M. (2022). Emerging uses of PLA-PEG copolymer in cancer drug delivery. *3 Biotech*, 12(2), 41. <https://doi.org/10.1007/s13205-021-03105-y>
- Najafian, Y., Hamed, S. S., Farshchi, M. K., & Feyzabadi, Z. (2018). *Plantago major* in Traditional Persian Medicine and modern phytotherapy: A narrative review. *Electronic Physician*, 10(2), 6390-6399. <https://doi.org/10.19082/6390>
- Norkaew, O., Thitisut, P., Mahatheeranon, S., Pawin, B., Sookwong, P., Yodpitak, S., & Lungkaphin, A. (2019). Effect of wall materials on some physicochemical properties and release characteristics of encapsulated black rice anthocyanin microcapsules. *Food Chemistry*, 294, 493-502. <https://doi.org/10.1016/j.foodchem.2019.05.086>
- Ojeda, G. A., Arias Gorman, A. M., & Sgroppo, S. C. (2019). La nanotecnología y su aplicación en alimentos. *Mundo Nano. Revista Interdisciplinaria en Nanociencias y Nanotecnología*, 12(23), 1e-14e. <https://doi.org/10.22201/ceiich.24485691e.2019.23.67747>
- Park, H., Kim, J.-S., Kim, S., Ha, E.-S., Kim, M.-S., & Hwang, S.-J. (2021). Pharmaceutical Applications of Supercritical Fluid Extraction of Emulsions for Micro-/Nanoparticle Formation. *Pharmaceutics*, 13(11), 1928. <https://doi.org/10.3390/pharmaceutics13111928>
- Pateiro, M., Gómez, B., Munekata, P. E. S., Barba, F. J., Putnik, P., Kovačević, D. B., & Lorenzo, J. M. (2021). Nanoencapsulation of Promising Bioactive Compounds to Improve Their Absorption, Stability, Functionality and the Appearance of the Final Food Products. *Molecules*, 26(6), 1547. <https://doi.org/10.3390/molecules26061547>
- Peres, I. S. A., Conceição, K. A. O., Silva, L. A. F., Khouri, N. G., Yoshida, C. M. P., Concha, V. O. C., Lucarini, M., Durazzo, A., Santini, A., Souto, E. B., & Severino, P. (2023). Dragon's Blood: Antioxidant properties for nutraceuticals and pharmaceuticals. *Rendiconti Lincei. Scienze Fisiche e Naturali*, 34(1), 131-142. <https://doi.org/10.1007/s12210-022-01122-4>
- Perumal, S., Atchudan, R., & Lee, W. (2022). A Review of Polymeric Micelles and Their Applications. *Polymers*, 14(12), Article 12. <https://doi.org/10.3390/polym14122510>
- Ranakoti, L., Gangil, B., Mishra, S. K., Singh, T., Sharma, S., Ilyas, R. A., & El-Khatib, S. (2022). Critical Review on Polylactic Acid: Properties, Structure, Processing, Biocomposites, and Nanocomposites. *Materials*, 15(12), Article 12. <https://doi.org/10.3390/ma15124312>
- Rathore, A., & Mahesh, G. (2021). Public perception of nanotechnology: A contrast between developed and developing countries. *Technology in Society*, 67, 101751. <https://doi.org/10.1016/j.techsoc.2021.101751>
- Rohasmizah, H., & Azizah, M. (2022). Pectin-based edible coatings and nanoemulsion for the preservation of fruits and vegetables: A review. *Applied Food Research*, 2(2), 100221. <https://doi.org/10.1016/j.afres.2022.100221>
- Rashidi, L. (2021). Different nano-delivery systems for delivery of nutraceuticals. *Food Bioscience*, 43, 101258. <https://doi.org/10.1016/j.fbio.2021.101258>
- Saldívar Tanaka, L. (2020). Regulación blanda, normas técnicas y armonización regulatoria internacional, para la nanotecnología. *Mundo nano. Revista interdisciplinaria en nanociencias y nanotecnología*, 13(24). <https://doi.org/10.22201/ceiich.24485691e.2020.24.69621>
- Sriwidodo, Umar, Abd. K., Wathoni, N., Zothantluanga, J. H., Das, S., & Luckanagul, J. A. (2022). Liposome-polymer complex for drug delivery system and vaccine stabilization. *Heliyon*, 8(2), e08934. <https://doi.org/10.1016/j.heliyon.2022.e08934>
- Taher, M., Amri, M. S., Susanti, D., Abdul Kudos, M. B., Md Nor, N. F. A., & Syukri, Y. (2020). Medicinal Uses, Phytochemistry and Pharmacological Properties of *Piper aduncum* L. *Sains Malaysiana*, 49(8), 1829-1851. <https://doi.org/10.17576/jsm-2020-4908-07>
- Tahir, A., Shabir Ahmad, R., Imran, M., Ahmad, M. H., Kamran Khan, M., Muhammad, N., Nisa, M. U., Tahir Nadeem, M., Yasmin, A., Tahir, H. S., Zulfiqar, A., & Javed, M. (2021). Recent approaches for utilization of food components as nano-encapsulation: A review. *International Journal of Food Properties*, 24(1), 1074-1096. <https://doi.org/10.1080/10942912.2021.1953067>
- Tang, C.-H. (2021). Assembly of food proteins for nano-encapsulation and delivery of nutraceuticals (a mini-review). *Food Hydrocolloids*, 117, 106710. <https://doi.org/10.1016/j.foodhyd.2021.106710>
- Taouzinet, L., Djaoudene, O., Fatmi, S., Bouiche, C., Amrane-Abider, M., Bougherra, H., Rezgui, F., & Madani, K. (2023). Trends of Nanoencapsulation Strategy for Natural Compounds in the Food Industry. *Processes*, 11(5), Article 5. <https://doi.org/10.3390/pr11051459>
- Tzounis, L., & Bangeas, P. (2022). Chapter 2—3D printing and nanotechnology. En V. N. Papadopoulos, V. Tsioukas, & J. S. Suri (Eds.), *3D Printing: Applications in Medicine and Surgery Volume 2* (pp. 7-26). Elsevier. <https://doi.org/10.1016/B978-0-323-66193-5.00002-2>
- Yu, J. Y., Chuesiang, P., Shin, G. H., & Park, H. J. (2021). Post-Processing Techniques for the Improvement of Liposome Stability. *Pharmaceutics*, 13(7), Article 7. <https://doi.org/10.3390/pharmaceutics13071023>
- Zhang, K., Xu, Y., Lu, L., Shi, C., Huang, Y., Mao, Z., Duan, C., Ren, X., Guo, Y., & Huang, C. (2021). Hydrodynamic cavitation: A feasible approach to intensify the emulsion cross-linking process for chitosan nanoparticle synthesis. *Ultrasonics Sonochemistry*, 74, 105551. <https://doi.org/10.1016/j.ultsonch.2021.105551>
- Umar, A. K., Wathoni, N., Zothantluanga, J. H., Das, S., & Luckanagul, J. A. (2022). Liposome-polymer complex for drug delivery system and vaccine stabilization. *Heliyon*, 8(2). <https://doi.org/10.1016/j.heliyon.2022.e08934>