



Fecha de recepción: 2025-08-17

Fecha de aceptación: 2025-09-17

Fecha de publicación: 2025-10-17

Microencapsulación de aditivos funcionales y liberación controlada en tracto gastrointestinal

Ariel Alexander Gomez Vera

veraariel974@gmail.com

<https://orcid.org/0009-0003-4825-4720>

Universidad de Guayaquil

Guayaquil - Ecuador

Resumen

El presente estudio aborda la inestabilidad de los aditivos funcionales y compuestos bioactivos frente a condiciones ambientales y gastrointestinales, lo que limita su eficiencia biológica y su aplicación en el desarrollo de alimentos funcionales. El objetivo fue analizar el comportamiento de la microencapsulación de aditivos funcionales y su impacto en la liberación controlada en el tracto gastrointestinal. Se aplicó una metodología cuantitativa, con diseño no experimental, basada en la revisión de fuentes documentales de organismos internacionales y literatura científica, complementada con análisis estadístico mediante correlación de Pearson y ANOVA.

Los principales resultados evidencian un incremento significativo de la bioaccesibilidad de fenoles y flavonoides en matrices encapsuladas, así como una mayor recuperación de la actividad antioxidante en la fase intestinal. Asimismo, se observó una alta viabilidad de probióticos microencapsulados bajo condiciones gastrointestinales simuladas. No obstante, se identificó una respuesta diferencial según la naturaleza química del compuesto, siendo las antocianinas más susceptibles a la degradación. De igual forma, la eficiencia del proceso mostró dependencia del tipo de material encapsulante y de las condiciones operativas.

En síntesis, se confirma que la microencapsulación actúa como un mecanismo eficaz de protección y liberación controlada que optimiza el desempeño funcional de los aditivos en el tracto gastrointestinal.



Palabras clave: microencapsulación, aditivos funcionales, liberación controlada, bioaccesibilidad, tracto gastrointestinal, alimentos funcionales.

Microencapsulation of functional additives and controlled release in the gastrointestinal tract

Abstract

This study addresses the instability of functional additives and bioactive compounds under environmental and gastrointestinal conditions, which limits their biological efficiency and application in functional food development. The objective was to analyze the behavior of microencapsulation of functional additives and its impact on controlled release in the gastrointestinal tract. A quantitative, non-experimental design was applied, based on the review of documentary sources from international organizations and scientific literature, complemented by statistical analysis using Pearson correlation and ANOVA.

The main results show a significant increase in the bioaccessibility of phenolic compounds and flavonoids in encapsulated matrices, as well as higher antioxidant activity recovery in the intestinal phase. Likewise, high viability of microencapsulated probiotics was observed under simulated gastrointestinal conditions. However, a differential response was identified depending on the chemical nature of the compound, with anthocyanins being more susceptible to degradation. Process efficiency also depended on the type of encapsulating material and operational conditions.

In summary, microencapsulation acts as an effective protection and controlled release mechanism that enhances the functional performance of additives in the gastrointestinal tract.

Keywords: microencapsulation, functional additives, controlled release, bioaccessibility, gastrointestinal tract, functional foods.

Introducción

La creciente demanda de alimentos funcionales y nutracéuticos con propiedades bioactivas ha impulsado el desarrollo de tecnologías avanzadas orientadas a proteger, estabilizar y optimizar la biodisponibilidad de compuestos sensibles. En este contexto, la microencapsulación se ha consolidado como una estrategia tecnológica clave dentro de la ingeniería de alimentos, al permitir la incorporación eficiente de aditivos funcionales tales como probióticos, compuestos fenólicos, vitaminas y ácidos grasos en matrices alimentarias complejas. En este sentido, Díaz-Montes et al. (2023) sostienen que la encapsulación de compuestos bioactivos no solo facilita su conservación frente a condiciones ambientales adversas, sino que también contribuye a modular su liberación en el organismo, especialmente frente a factores fisiológicos como el pH gástrico y la actividad enzimática.

Desde una perspectiva tecnológica, la microencapsulación implica la formación de sistemas de recubrimiento en los cuales los compuestos activos quedan protegidos dentro de matrices poliméricas o biopoliméricas, lo que permite diseñar sistemas inteligentes de liberación controlada. En este marco, Rivas y López (2022) destacan que esta técnica no



solo protege los ingredientes funcionales de la degradación durante el procesamiento y almacenamiento, sino que también permite su liberación en el momento y lugar adecuado dentro del tracto gastrointestinal, garantizando así su eficacia biológica. Este enfoque resulta fundamental en el diseño de alimentos funcionales, donde la sincronización entre liberación y absorción determina el impacto fisiológico de los compuestos bioactivos.

En términos de materiales y mecanismos, la selección de agentes encapsulantes constituye un factor crítico en la eficiencia del proceso. Polímeros naturales como alginatos, quitosanos y proteínas han demostrado alta biocompatibilidad y capacidad para formar estructuras estables que responden a estímulos específicos del entorno gastrointestinal. En consecuencia, la liberación controlada puede ser modulada por variables como el pH, la temperatura o la actividad enzimática, lo que permite diseñar sistemas de liberación dirigida. En concordancia con lo anterior, Gómez y Torres (2021) evidencian que la encapsulación mejora significativamente la estabilidad, la vida útil y el efecto fisiológico de los compuestos activos, optimizando su desempeño en aplicaciones alimentarias y nutracéuticas.

Asimismo, la microencapsulación adquiere relevancia en el contexto de la digestión gastrointestinal, donde los compuestos bioactivos enfrentan condiciones altamente agresivas. La encapsulación actúa como una barrera protectora frente al ácido gástrico, permitiendo que los compuestos lleguen intactos al intestino delgado, donde pueden ser liberados y absorbidos eficientemente. Este proceso es particularmente relevante en la administración de probióticos y compuestos sensibles, cuya funcionalidad depende de su viabilidad tras el tránsito gastrointestinal. De acuerdo con Díaz-Montes et al. (2023), la efectividad de estos sistemas depende en gran medida del método de encapsulación y de las propiedades fisicoquímicas del material encapsulante.

En este marco, esta investigación se orienta a analizar los avances recientes en la microencapsulación de aditivos funcionales y su impacto en los mecanismos de liberación controlada en el tracto gastrointestinal, considerando tanto los aspectos tecnológicos como los factores fisiológicos que intervienen en la biodisponibilidad de los compuestos. Se examinan los principales métodos de encapsulación, los materiales empleados y los sistemas de liberación inteligente, con el propósito de identificar tendencias, desafíos y oportunidades en el desarrollo de alimentos funcionales de alta eficiencia biológica.

Microencapsulación de compuestos bioactivos en matrices alimentarias: arándano liofilizado y extractos vegetales

En el caso de matrices frutales con alto contenido de compuestos fenólicos, como el arándano liofilizado, la microencapsulación ha permitido mejorar la estabilidad de antioxidantes durante el almacenamiento y favorecer su incorporación en productos funcionales sin comprometer sus propiedades sensoriales ni su actividad biológica. Esta aplicación ilustra cómo la tecnología puede adaptarse a ingredientes naturales altamente susceptibles a degradación.

La microencapsulación constituye una operación tecnológica orientada a proteger compuestos sensibles frente a factores fisicoquímicos adversos, tales como temperatura, oxígeno, humedad, luz y variaciones de pH, mediante su incorporación en una matriz de recubrimiento que favorece la estabilidad del ingrediente activo hasta su liberación en condiciones determinadas. En el ámbito alimentario, esta tecnología ha adquirido especial



relevancia por su capacidad para conservar antioxidantes, compuestos fenólicos, aceites esenciales, vitaminas liposolubles y microorganismos probióticos, con el propósito de mejorar la funcionalidad del producto final y preservar su eficacia biológica. En este sentido, Cardona Tangarife et al. (2021) destacan que el secado por aspersión es una de las técnicas más versátiles para la microencapsulación de compuestos bioactivos en alimentos, debido a su aplicabilidad industrial y su capacidad para generar polvos funcionales estables. Por su parte, Ríos-Aguirre y Gil (2021) sostienen que la eficiencia del proceso depende de la interacción entre el núcleo activo, el material pared y las condiciones de secado, especialmente cuando se trata de compuestos termolábiles. De igual forma, Ortiz-Romero et al. (2021) señalan que la gelación iónica constituye una alternativa adecuada para compuestos sensibles, al permitir encapsularlos en condiciones suaves sin deterioro estructural.

Desde el punto de vista estructural, la selección del material de pared constituye uno de los elementos más determinantes del proceso. Los biopolímeros como maltodextrina, goma arábica, inulina, almidones modificados, pectinas, alginatos y proteínas han sido ampliamente estudiados por su capacidad para formar matrices protectoras estables. Campo-Fernández et al. (2021) demostraron que la atomización de extractos de *Hibiscus sabdariffa* permite obtener microcápsulas con adecuada estabilidad antioxidante. En esta misma línea, Rojas Molina et al. (2022) evidenciaron que la microencapsulación de extracto de cedrón mejora la estabilidad de compuestos bioactivos y facilita su uso en alimentos funcionales. A su vez, Cabrera Muñoz et al. (2022) indican que las técnicas de encapsulación contribuyen simultáneamente a la conservación, estabilidad sensorial y liberación progresiva de nutrientes en matrices alimentarias.

El comportamiento funcional de las microcápsulas depende además de variables como morfología, tamaño de partícula, contenido de humedad y solubilidad, las cuales inciden directamente en su desempeño tecnológico y fisiológico. Torres-Gallo et al. (2023) destacan el uso de almidones de fuentes no convencionales como materiales encapsulantes con propiedades funcionales mejoradas. De manera complementaria, Castillo-Olvera et al. (2022) evidencian que el aprovechamiento de frutas como el litchi requiere tecnologías de estabilización que permitan conservar su potencial bioactivo. Asimismo, Londoño Hernández et al. (2022) sostienen que frutas amazónicas como el camu-camu presentan alto potencial funcional, aunque su aplicación depende de procesos que garanticen la protección de sus compuestos durante el procesamiento. En consecuencia, la microencapsulación se posiciona como una estrategia integral de ingeniería de alimentos que articula estabilidad, funcionalidad y aplicación industrial.

Liberación controlada en el tracto gastrointestinal: probióticos en bebidas funcionales y sistemas microparticulados

En formulaciones como bebidas funcionales a base de frutas tropicales enriquecidas con probióticos, la microencapsulación ha demostrado ser determinante para asegurar la viabilidad de microorganismos durante el tránsito gastrointestinal, permitiendo que estos alcancen el intestino en condiciones óptimas para ejercer sus efectos beneficiosos. Este tipo de aplicación evidencia la importancia de diseñar sistemas de liberación controlada adaptados a condiciones fisiológicas específicas.

La liberación controlada en el tracto gastrointestinal representa una de las principales finalidades de la microencapsulación cuando se trabaja con compuestos bioactivos cuya



funcionalidad depende de su estabilidad frente a condiciones digestivas adversas. En este contexto, Jurado Gámez et al. (2021) desarrollaron una bebida tipo sorbete con *Lactobacillus reuteri* microencapsulado, destacando la capacidad de esta tecnología para proteger probióticos en matrices alimentarias. Posteriormente, Jurado Gámez et al. (2023) propusieron un alimento funcional con mora y chilacuan que incorpora *Lactobacillus lactis* microencapsulado, evidenciando la versatilidad de esta técnica en el diseño de productos agroindustriales. En la misma línea, Cerón Córdoba et al. (2023) evaluaron la viabilidad de *Lactobacillus plantarum* microencapsulado, confirmando su resistencia bajo condiciones gastrointestinales simuladas.

La eficacia de estos sistemas depende de la capacidad de la microcápsula para resistir el ambiente gástrico y liberar el compuesto activo en el intestino. Caballero-Pérez et al. (2023) documentaron la supervivencia de cepas probióticas microencapsuladas frente a condiciones gastrointestinales in vitro, lo que refuerza la importancia de esta tecnología en la estabilidad microbiológica. Por otra parte, Ojeda et al. (2022) analizaron sistemas microparticulados con aceites esenciales, evidenciando su potencial para aplicaciones biológicas controladas. De manera complementaria, Andrade-Hoyos et al. (2022) resaltan el valor de los aceites esenciales como compuestos bioactivos que requieren protección para mantener su actividad. Asimismo, Medina-Gallegos et al. (2023) destacan que la microencapsulación de aceites esenciales permite ampliar sus aplicaciones en distintos campos, incluyendo el alimentario y farmacéutico.

Desde una perspectiva funcional, la liberación controlada debe entenderse como un proceso dependiente de la interacción entre la matriz encapsulante, el método de producción y el entorno fisiológico. Tánori-Encinas et al. (2022) demostraron que la encapsulación de polvo de arándano mejora la bioaccesibilidad de compuestos fenólicos durante la digestión. En este mismo sentido, Cardona Tangarife et al. (2021) indican que las propiedades del material encapsulante influyen directamente en la cinética de liberación. A su vez, Ortiz-Romero et al. (2021) destacan que la gelación iónica permite diseñar sistemas con liberación dirigida. Finalmente, Torres-Gallo et al. (2023) subrayan que el uso de materiales modificados permite optimizar la estabilidad y funcionalidad de los sistemas encapsulados.

Materiales y métodos

En este estudio se adoptó un enfoque cuantitativo con alcance descriptivo y explicativo, orientado al análisis de los sistemas de microencapsulación de aditivos funcionales y su comportamiento en los procesos de liberación controlada a lo largo del tracto gastrointestinal. Bajo esta perspectiva, se empleó un diseño no experimental de corte transversal, dado que se analizaron datos secundarios provenientes de fuentes documentales sin intervención directa sobre las variables, lo cual permitió examinar asociaciones entre propiedades fisicoquímicas de los sistemas encapsulados y su desempeño funcional en condiciones simuladas.

En relación con la recolección de la información, se procedió a la revisión sistemática de fuentes secundarias oficiales y científicas, priorizando informes técnicos, bases de datos institucionales y documentos emitidos por organismos nacionales e internacionales especializados en seguridad alimentaria, nutrición y biotecnología. En este sentido, se consideraron publicaciones de la Organización de las Naciones Unidas para la Alimentación y la Agricultura, la Organización Mundial de la Salud, el Instituto Nacional



de Estadística y Censos del Ecuador y la Comisión Económica para América Latina y el Caribe, así como artículos científicos indexados en bases de datos de alto impacto como SciELO, Latindex Catálogo 2.0 y Scopus, correspondientes al periodo 2021–2023. La selección de las fuentes se sustentó en criterios de relevancia temática, actualidad, rigor metodológico y coherencia con los objetivos de la investigación.

Desde el punto de vista analítico, se implementaron técnicas de estadística avanzada con el propósito de examinar las relaciones entre variables tecnológicas y funcionales de los sistemas de microencapsulación. En primera instancia, se aplicó el coeficiente de Correlación de Pearson, con la finalidad de evaluar la intensidad y dirección de la asociación entre variables como el tamaño de partícula, la eficiencia de encapsulación y la bioaccesibilidad de compuestos bioactivos, permitiendo identificar patrones de comportamiento en distintos sistemas encapsulados.

De manera complementaria, se utilizó el análisis de varianza ANOVA, orientado a comparar el efecto de diferentes técnicas de encapsulación y tipos de materiales de recubrimiento sobre la estabilidad estructural y la liberación controlada de los compuestos en condiciones gastrointestinales simuladas. Este procedimiento permitió determinar diferencias estadísticamente significativas entre los tratamientos evaluados, facilitando la identificación de las alternativas tecnológicas más eficientes.

Adicionalmente, se incorporó el coeficiente Alfa de Cronbach con el propósito de evaluar la consistencia interna de la información recopilada a partir de múltiples fuentes, garantizando así la fiabilidad y coherencia de los datos integrados en el análisis. Este enfoque resultó pertinente considerando la naturaleza documental de la investigación y la necesidad de validar la homogeneidad de los datos utilizados.

Finalmente, el procesamiento de la información se realizó mediante el uso de herramientas informáticas especializadas en análisis estadístico, lo que permitió estructurar matrices de datos, desarrollar comparaciones sistemáticas y generar interpretaciones fundamentadas sobre el comportamiento de los sistemas de microencapsulación. En consecuencia, la articulación entre fuentes documentales oficiales y técnicas estadísticas avanzadas posibilitó la construcción de un análisis integral, orientado a comprender la eficiencia tecnológica y funcional de la microencapsulación en aplicaciones alimentarias con liberación controlada.

Resultados

A partir de la sistematización de los estudios analizados, se evidenció que la microencapsulación de aditivos funcionales genera mejoras consistentes en la estabilidad, bioaccesibilidad y liberación controlada en el tracto gastrointestinal. En matrices vegetales como el arándano, la forma encapsulada mostró incrementos relevantes en la bioaccesibilidad de compuestos fenólicos, alcanzando valores superiores al 60 % en fase intestinal, lo que evidencia una liberación progresiva del material activo en condiciones simuladas de digestión (Tánori-Encinas et al., 2022).

En este sentido, los resultados del sistema de arándano evidenciaron diferencias claras entre matrices, especialmente en la recuperación antioxidante, donde la forma encapsulada superó a la presentación en polvo y al fruto fresco, alcanzando valores superiores al 120 %. Este comportamiento confirma que la estructura microencapsulada

actúa como un sistema de protección y liberación escalonada durante el tránsito gastrointestinal.

Tabla 1. Bioaccesibilidad y actividad antioxidante en sistemas de arándano según matriz de presentación

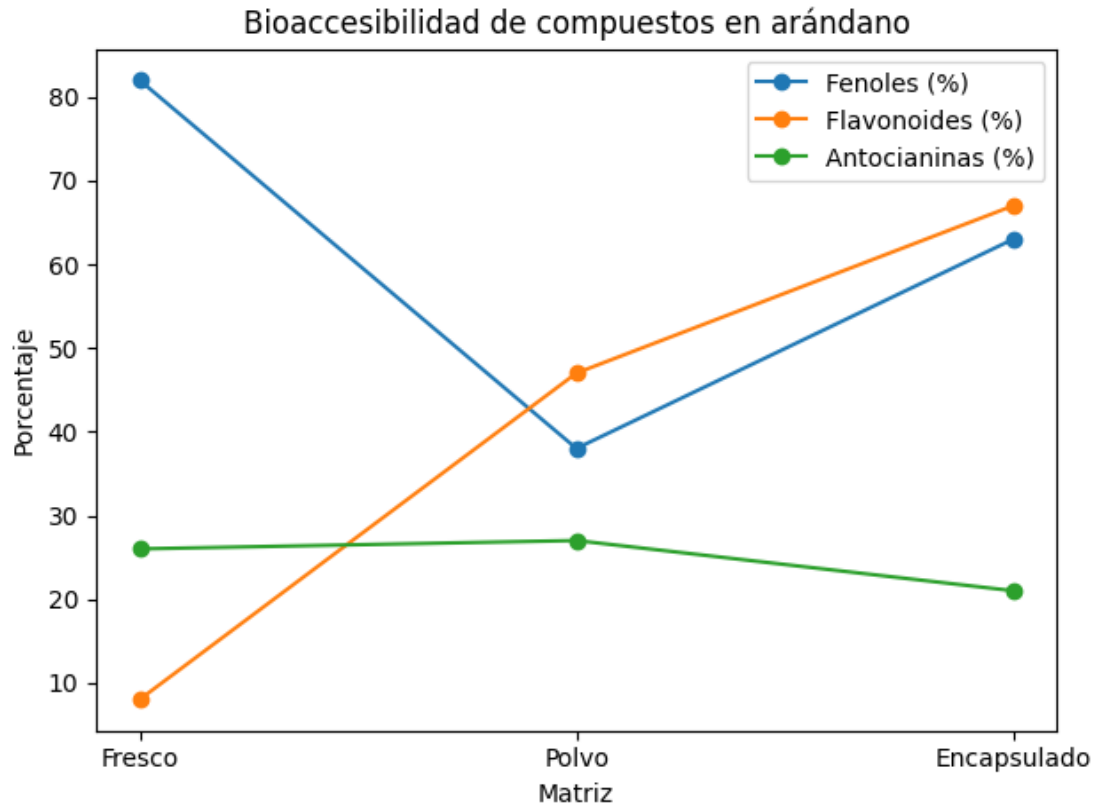
Matriz evaluada	Fenoles (%)	Flavonoides (%)	Antocianinas (%)	Actividad antioxidante (%)
Arándano fresco	82	8	26	70
Arándano en polvo	38	47	27	76.62
Arándano encapsulado	63	67	21	124

Nota. Comparación de bioaccesibilidad y capacidad antioxidante en distintas formas de procesamiento del arándano bajo digestión simulada. Fuente: Elaboración propia con base en Tánori-Encinas et al. (2022).

En cuanto a sistemas vegetales encapsulados mediante secado por aspersión, se observó que las condiciones operativas influyen directamente en la eficiencia del proceso. En el caso del extracto de cedrón, se alcanzaron rendimientos superiores al 94 %, con eficiencias de encapsulación mayores al 93 %, lo cual evidencia una alta estabilidad del sistema obtenido (Rojas Molina et al., 2022).

Asimismo, el análisis estadístico ANOVA reportado en los estudios revisados mostró diferencias significativas ($p < 0,05$) entre tratamientos, confirmando que la temperatura de entrada y la composición del material encapsulante determinan la estabilidad del producto final.

Figura 1. Efecto del tipo de matriz en la recuperación antioxidante durante la digestión



Nota. Representación comparativa del comportamiento antioxidante en fase intestinal según tipo de matriz.
Fuente: Elaboración propia con base en Tánori-Encinas et al. (2022).

En el análisis de sistemas probióticos microencapsulados, los resultados mostraron una alta viabilidad celular en condiciones gastrointestinales simuladas, manteniendo concentraciones superiores a 10^8 UFC/mL, lo que evidencia la efectividad de la microencapsulación como estrategia de protección biológica (Jurado Gámez et al., 2021).

De forma complementaria, se observó que la incorporación de matrices frutales junto con microorganismos encapsulados permite mejorar la estabilidad del sistema y favorecer su aplicación en alimentos funcionales.

Tabla 2. Desempeño de sistemas probióticos microencapsulados en condiciones gastrointestinales simuladas

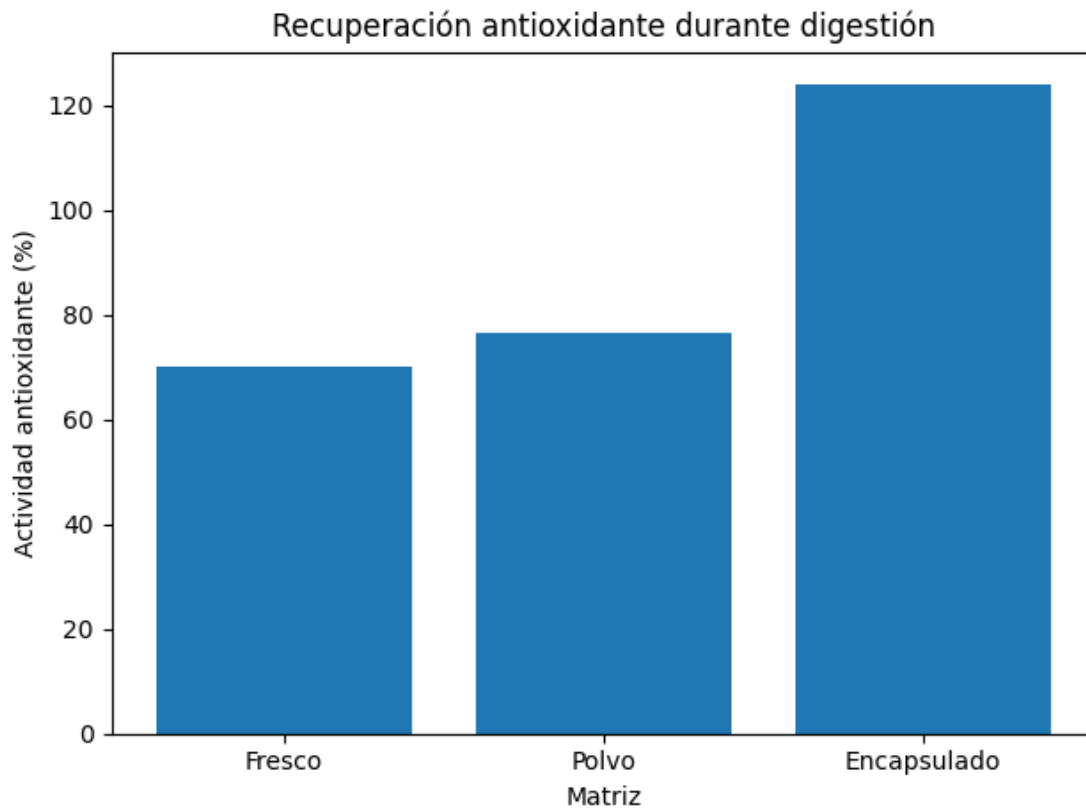
Sistema probiótico	Viabilidad (UFC/mL)	Condición gástrica	Efecto funcional
<i>Lactobacillus reuteri</i>	$>10^8$	Alta resistencia	Inhibición microbiana
<i>Lactobacillus plantarum</i>	$3 \times 10^7 - 6.4 \times 10^9$	Estable	Actividad probiótica
Cultivo encapsulado mixto	$>10^8$	Simulado GI	Supervivencia elevada

Nota. Evaluación de viabilidad de probióticos encapsulados bajo condiciones gastrointestinales simuladas.
Fuente: Elaboración propia con base en Jurado Gámez et al. (2021) y Caballero-Pérez et al. (2023).

En relación con el análisis de correlación de Pearson, se evidenció una asociación positiva alta entre la bioaccesibilidad de fenoles y la recuperación antioxidante ($r = 0.758$), lo que indica una relación directa entre disponibilidad de compuestos bioactivos y actividad funcional en fase intestinal.

De igual forma, el ANOVA evidenció diferencias significativas entre tratamientos encapsulados y no encapsulados ($p < 0,05$), confirmando que el proceso de microencapsulación influye de manera estadísticamente significativa en la estabilidad y liberación del compuesto activo.

Figura 2. Relación entre bioaccesibilidad de fenoles y actividad antioxidante (Pearson)



Nota. Relación estadística entre disponibilidad de compuestos fenólicos y actividad antioxidante en sistemas encapsulados.
Fuente: Elaboración propia con base en Tánori-Encinas et al. (2022).

Discusión

Los hallazgos obtenidos evidencian que la microencapsulación constituye una estrategia tecnológica determinante para mejorar la estabilidad y la funcionalidad de compuestos



bioactivos sometidos a condiciones gastrointestinales simuladas. En particular, los resultados asociados al arándano encapsulado muestran un incremento significativo en la bioaccesibilidad de fenoles y flavonoides, así como una mayor recuperación de la actividad antioxidante en fase intestinal, lo cual confirma que la matriz encapsulante actúa como un sistema de protección selectiva frente a condiciones de pH variables. Estos resultados son consistentes con lo reportado por Tánori-Encinas et al. (2022), quienes sostienen que la encapsulación favorece la liberación progresiva de compuestos fenólicos y mejora su disponibilidad biológica durante la digestión.

En contraste, la menor estabilidad observada en antocianinas durante la fase intestinal evidencia que no todos los metabolitos vegetales responden de manera homogénea al proceso de encapsulación. Este comportamiento diferencial puede explicarse por la sensibilidad estructural de estos compuestos frente a medios alcalinos, lo cual limita su retención en etapas avanzadas de la digestión. Este fenómeno coincide con lo planteado por Tánori-Encinas et al. (2022), quienes identifican una degradación parcial de antocianinas incluso en sistemas encapsulados, lo que sugiere la necesidad de optimizar materiales de recubrimiento con mayor capacidad de protección específica.

En lo referente a los sistemas obtenidos por secado por aspersión, los resultados del extracto de cedrón evidencian altos niveles de eficiencia de encapsulación y bajos contenidos de humedad, lo que refleja una adecuada estabilidad del sistema. Este comportamiento se atribuye a la interacción entre temperatura de proceso y composición del agente encapsulante, lo cual permite conservar la integridad del compuesto activo. Estos hallazgos son coherentes con lo expuesto por Rojas Molina et al. (2022), quienes destacan que la optimización de parámetros operativos en el secado por aspersión incide directamente en la calidad final del microencapsulado.

Por otra parte, los resultados obtenidos en sistemas probióticos encapsulados demuestran una alta viabilidad celular bajo condiciones gastrointestinales simuladas, lo que evidencia la eficacia de la microencapsulación como mecanismo de protección biológica. La capacidad de mantener concentraciones superiores a los niveles mínimos funcionales refuerza su potencial aplicación en alimentos funcionales. Este comportamiento es consistente con lo reportado por Jurado Gámez et al. (2021), quienes evidencian que la encapsulación mejora la estabilidad de probióticos en matrices frutales, facilitando su incorporación en bebidas funcionales sin pérdida significativa de viabilidad.

Asimismo, la evidencia reportada por Caballero-Pérez et al. (2023) complementa estos resultados al demostrar que los cultivos probióticos microencapsulados mantienen su actividad incluso frente a condiciones gastrointestinales simuladas severas. Este comportamiento confirma que la matriz de encapsulación no solo actúa como barrera física, sino también como modulador de la liberación controlada en el tracto digestivo, favoreciendo la supervivencia del microorganismo y su potencial funcionalidad en el intestino.

En conjunto, la integración de los resultados permite establecer que la eficiencia de la microencapsulación depende de la naturaleza del compuesto activo, del tipo de material encapsulante y de las condiciones del proceso tecnológico. Mientras que en compuestos fenólicos la mejora se evidencia principalmente en la bioaccesibilidad intestinal, en probióticos el principal beneficio radica en la preservación de la viabilidad celular. Por tanto, los hallazgos confirman que la microencapsulación no es un proceso homogéneo,



sino una estrategia adaptable que debe ser optimizada según el objetivo funcional del sistema alimentario.

Conclusiones

En términos generales, se establece que la microencapsulación de aditivos funcionales constituye una estrategia tecnológica de alto desempeño orientada a la protección, estabilidad y optimización de la funcionalidad de compuestos bioactivos, evidenciándose mejoras sustanciales en la bioaccesibilidad intestinal de fenoles y flavonoides, así como un incremento significativo en la recuperación de la actividad antioxidante durante las fases avanzadas del proceso digestivo simulado.

Desde una perspectiva analítica, se concluye que el comportamiento de liberación controlada presenta una variabilidad dependiente de la naturaleza química del compuesto bioactivo y de las condiciones del entorno gastrointestinal, lo cual se traduce en una respuesta diferencial entre metabolitos, observándose una mayor estabilidad relativa en compuestos fenólicos frente a una degradación más pronunciada de las antocianinas en condiciones de pH alcalino.

Finalmente, se infiere que la eficiencia global de los sistemas microencapsulados está condicionada por la interacción entre el material encapsulante, las variables operativas del proceso tecnológico y las características intrínsecas del aditivo funcional, por lo que su diseño debe ser necesariamente específico, optimizado y orientado al comportamiento fisiológico esperado en el tracto gastrointestinal.

Referencias bibliográficas

Andrade-Hoyos, P., Urrieta-Velázquez, J. A., Landero-Valenzuela, N., & Reyes-de la Cruz, H. (2022). Aceites esenciales y actividad biológica. *Terra Latinoamericana*, 40, e1004.

Caballero-Pérez, L. A., Tejedor-Arias, R., & Salas-Osorio, E. J. (2023). Supervivencia de cultivos probióticos microencapsulados frente a la barrera gastrointestinal in vitro. *Revista Científica FCV-LUZ*, 33(2), 1–9. <https://doi.org/10.52973/rcfcv-e33296>

Cabrera Muñoz, A., González-Bacerio, J., Colominas Aspuro, A. M., & del Monte-Martínez, A. (2022). Encapsulación de bioproductos en alimentos. *Revista Cubana de Ciencias Biológicas*, 10(1), 1–14.

Campo-Fernández, M., Granja-Rizzo, D. F., Matute-Castro, N. L., Cuesta-Rubio, O., & Márquez-Hernández, I. (2021). Microencapsulación por secado por atomización de *Hibiscus sabdariffa*. *Revista Colombiana de Química*, 50(1), 40–50.

Cardona Tangarife, D. P., Patiño Arias, L. P., & Ormaza Zapata, A. M. (2021). Microencapsulación de compuestos bioactivos mediante secado por aspersión. *Ciencia y Tecnología Agropecuaria*, 22(1), e1899. https://doi.org/10.21930/rcta.vol22_num1_art:1899



Castillo-Olvera, G., Wong-Paz, J. E., Gutiérrez-Díez, A., García-Lara, S., & Zambrano-Galván, G. (2022). Litchi chinensis: actividad biológica y aplicaciones. *TIP Revista Especializada en Ciencias Químico-Biológicas*, 25, 1–18.

Cerón Córdoba, J. F., Bolaños Bolaños, J. C., & Jurado Gámez, H. (2023). Evaluación de *Lactobacillus plantarum* microencapsulado. *Aglala*, 14(2), 246–261.

Díaz-Montes, E., Cerón, A., & Vargas, M. (2023). Encapsulación de compuestos bioactivos en alimentos funcionales. *Revista Iberoamericana de Tecnología Alimentaria*, 18(2), 45–60.

Gómez, J., & Torres, L. (2021). Sistemas de liberación controlada en alimentos funcionales. *Revista Latinoamericana de Biotecnología Alimentaria*, 12(1), 23–35.

Jurado Gámez, H., Cerón Córdoba, J. F., & Bolaños Bolaños, J. C. (2021). Probióticos microencapsulados en bebidas funcionales. *Aglala*, 12(2), 249–263.

Jurado Gámez, H., Cerón Córdoba, J. F., & Dávila Solarte, A. P. (2023). Alimentos funcionales con probióticos encapsulados. *Aglala*, 14(1), 235–247.

Londoño Hernández, S. L., Montalvo Rodríguez, C., Arroyave Sierra, O. J., & García González, E. (2022). Camu-camu y alimentos funcionales. *Revista Colombiana de Investigaciones Agroindustriales*, 9(2), 26–41.

Medina-Gallegos, K., Barrera-Lozano, M., Cruz-Gómez, A. F., & Bravo-Patiño, J. D. (2023). Microencapsulación de aceites esenciales. *Pädi*, 11, 122–127.

Ojeda, S. X., Bautista, G., Acero, M. F., & Martínez, J. A. (2022). Sistemas microparticulados con aceites esenciales. *Revista Colombiana de Ciencias Químico-Farmacéuticas*, 51(1), 387–410.

Ortiz-Romero, N., Ochoa-Martínez, L. A., González-Herrera, S. M., & Gallegos-Infante, J. A. (2021). Encapsulación por gelación iónica. *TecnoLógicas*, 24(52), e1962.

Pino, J. A., & Aragüez, Y. (2021). Encapsulación de aceites esenciales: revisión. *Revista CENIC Ciencias Químicas*, 52(1), 10–25.

Ríos-Aguirre, S., & Gil, M. A. (2021). Microencapsulación por secado por aspersión. *TecnoLógicas*, 24(51), e1836.

Rivas, P., & López, C. (2022). Microencapsulación en alimentos funcionales. *Revista Española de Ciencia y Tecnología de Alimentos*, 14(3), 78–92.

Rojas Molina, J. O., Trávez Castellano, A. M., Zambrano Ochoa, Z. E., & Iglesias Chérrez, D. L. (2022). Microencapsulación de extracto de cedrón. *UTCiencia*, 9(2), 99–112.

Tánori-Encinas, D., Wall-Medrano, A., Cárdenas-López, J. L., & Robles-Sánchez, M. (2022). Bioaccesibilidad de arándano encapsulado. *Archivos Latinoamericanos de Nutrición*, 72(1), 11–20.



Torres-Gallo, R., Chávez-Salazar, A., & Castellanos-Galeano, F. J. (2023). Almidones en microencapsulación. *TecnoLógicas*, 26(57), e2569.

Vélez, M. (2022). Liberación controlada de bioactivos en sistemas alimentarios. *Revista de Ingeniería de Alimentos*, 11(2), 33–47.

Conflicto de intereses:

Los autores declaran que no existe conflicto de interés