

Electrohilado: Una alternativa para la preservación de nutrientes

Electrospinning: An alternative for nutrient preservation

Tania M. Martínez Domínguez ^a, José A. Pescador Rojas ^b, José A. Ariza Ortega ^c, Aldo C. Jardínez Vera ^d, Emmanuel Martínez Ramírez ^e

Abstract:

Electrospinning is an emerging encapsulation technique in which a high-potential electric field is applied to a polymer solution, producing nanofibers that migrate toward a collector. This article presents a comprehensive review of the theoretical foundations of electrospinning, the factors influencing its efficiency (solution viscosity, solvent type, applied voltage, flow rate, and environmental conditions), as well as the different process configurations (uniaxial, coaxial, and emulsion electrospinning). Furthermore, it analyzes the wall materials commonly used for the encapsulation of bioactive compounds, which provide protection against environmental conditions. The application of electrospinning in the food industry is discussed as an alternative to conventional functional food manufacturing techniques, with the final goal of potentially applying this technique to improve human nutrition.

Keywords:

Electrospinning, nanofibers, encapsulation, bioactive agents

Resumen:

El electrohilado es una técnica emergente de encapsulación en la que un campo eléctrico de alto potencial es aplicado a una solución de un polímero, formando nanofibras que migran a un colector. El presente artículo expone una revisión integral sobre los fundamentos teóricos del electrohilado, los factores que influyen en su eficiencia (viscosidad de la solución, el tipo de disolvente, el voltaje aplicado, el caudal y las condiciones ambientales), así como las diferentes configuraciones del proceso (electrohilado uniaxial, coaxial y de emulsión). Además, se analizan los materiales de pared mayormente utilizados para la encapsulación de compuestos bioactivos, que brindan una protección frente a condiciones ambientales. De igual manera, se discute el uso del electrohilado en la industria alimentaria como alternativa a las técnicas convencionales de fabricación de alimentos funcionales, con la finalidad de una posible aplicación a la mejora de la nutrición humana.

Palabras Clave:

Electrohilado, nanofibra, encapsulación, agentes bioactivos

^a Universidad Autónoma del Estado de Hidalgo | Instituto de Ciencias de la Salud | San Agustín Tlaxiaca -Hidalgo | México, <https://orcid.org/0009-0005-4682-2645>, Email: ma383142@uaeh.edu.mx

^b Universidad Autónoma del Estado de Hidalgo | Escuela Superior de Apan| Apan-Hidalgo| México, <https://orcid.org/0000-0003-1928-8342>, Email: josealfredo_pescador@uaeh.edu.mx

^c Universidad Autónoma del Estado de Hidalgo | Instituto de Ciencias de la Salud | San Agustín Tlaxiaca -Hidalgo | México, <https://orcid.org/0000-0002-2163-4593>, Email: jose_ariza@uaeh.edu.mx

^d Universidad Autónoma del Estado de Hidalgo | Escuela Superior de Apan| Apan-Hidalgo| México, <https://orcid.org/0000-0002-9676-6777>, Email: aldo_jardinez@uaeh.edu.mx

^e Autor de Correspondencia, Universidad Autónoma del Estado de Hidalgo | Instituto de Ciencias de la Salud | San Agustín Tlaxiaca -Hidalgo | México, <https://orcid.org/0000-0002-2729-0509>, Email: emmanuel_martinez@uaeh.edu.mx

Introducción

La técnica de encapsulación implica proteger un material funcionalmente activo (núcleo) dentro de una matriz inerte (material recubrimiento).¹

En un sentido más amplio, esta tecnología permite la adición directa de moléculas bioactivas (por ejemplo, antioxidantes, minerales, vitaminas, fitoesteroles, ácidos grasos) y células vivas (como probióticos) a los alimentos sin comprometer su calidad final.²

En la industria alimentaria, la microencapsulación y macro recubrimiento permiten la protección de partículas de ingredientes, por ejemplo, acidulantes, grasas y sabores, e ingredientes enteros (pasas, nueces y productos de confitería), mediante sus respectivas técnicas.³

Por otro lado, la microencapsulación permite el confinamiento de sólidos, líquidos o gases dentro de cápsulas selladas de forma arbitraria con dimensiones sub-micrométricas y milimétricas, en función de los materiales y procedimientos empleados en su elaboración.³ Lo que permite la incorporación de compuestos benéficos para la salud en alimentos, contribuyendo así a la creación de productos funcionales.⁴

La microencapsulación es un proceso empleado frecuentemente en la industria alimentaria. Se aplica para la reducción de la reactividad del núcleo con el entorno exterior (luz, oxígeno y agua); en la disminución de la tasa de transferencia del material del núcleo hacia el exterior; para la liberación controlada del compuesto activo; e inclusive, para enmascarar el sabor del compuesto activo, en caso de que presente un sabor desagradable.³

Los métodos de microencapsulación se clasifican como físicos, químicos y fisicoquímicos.⁵ La selección del método adecuado depende del tamaño promedio de la partícula requerida, de las propiedades físicas del núcleo, del agente de pared, de las aplicaciones del material encapsulado, del mecanismo de liberación deseado y del costo de producción.⁶

Dentro de los métodos físicos destacan el secado por aspersión y extrusión. La primera técnica consiste en preparar una emulsión del material del núcleo e inducir su secado mediante atomización en una corriente de aire caliente de la unidad de pulverización, sin embargo, la distribución del tamaño de partícula no es homogénea.^{7,8} Por otro lado, la microencapsulación por extrusión involucra el paso de la emulsión del material activo y el

material pared a través de un dado a alta presión, no obstante, tiene la desventaja de alcanzar un bajo rendimiento.^{8,9}

En contraste, los métodos químicos incluyen la polimerización interfacial y la inclusión molecular. El primer proceso involucra una polimerización ocasionada por la interacción entre un monómero liposoluble con uno hidrosoluble, formando micropartículas poliméricas.¹⁰ En el caso de la inclusión molecular, existe una interacción entre el material encapsulado y el agente encapsulante (usualmente biopolímeros), ya sea por enlaces de hidrogeno o por fuerzas de van der Waals. Esta técnica es ideal para la protección de compuestos termosensibles, sin embargo, el material de pared requiere tener aproximadamente el mismo diámetro que el núcleo, lo que resulta en un bajo contenido de la sustancia activa.^{5,8}

Por otra parte, la coacervación es un método fisicoquímico de separación de fases en el que hay un coacervado (soluto polimérico en gotas) y una solución de equilibrio (fase sin polímero), las microcápsulas finales se crean por la gelificación de las cápsulas formadas cuando el coacervado se deposita alrededor de partículas insolubles dispersas en un líquido.^{5,11} El atrapamiento en liposomas es otra técnica fisicoquímica, en la que se forman vesículas cuando películas de fosfolípidos son dispersadas en un medio acuoso; dichas vesículas son selectivamente permeables a iones y se pueden formar cuando se mezcla una solución acuosa de sustancia activa con la película del lípido; a pesar de ello, esta técnica presenta desventajas como una difícil eliminación de disolventes orgánicos y surfactantes sintéticos.^{5,8,12}

El encapsulamiento por electrohilado permite recubrir compuestos bioactivos dentro de micro y nanofibras poliméricas¹³; lo cual brinda protección a compuestos termosensibles frente a efectos ambientales, lo que es de gran importancia para preservar la estructura y mejorar la estabilidad durante el procesamiento y almacenamiento de compuestos activos presentes en alimentos.¹⁴ El presente artículo tiene como objetivo describir la naturaleza e implicaciones del proceso de electrohilado, así como destacar su aplicación en el sector alimentario.

Desarrollo

1. Fundamento

El electrohilado es una técnica sencilla, de bajo costo para producir fibras o cápsulas a nivel nanométrico mediante la aplicación de alto voltaje a un caudal continuo de soluciones poliméricas, ver la Figura 1.¹⁴ Para el

proceso de electrohilado se requiere una fuente de alto voltaje (1 a 30 kV), una jeringa que contiene la solución polimérica, opcionalmente conectada a un infusor, su aguja o capilar de acero inoxidable es conectado a la terminal negativa de la fuente y un colector (placa o tambor giratorio) conectado a tierra.¹³ Inicialmente, la solución de polímero (SP) se bombea a través del capilar de la aguja bajo la influencia del campo eléctrico producido por la fuente de alto voltaje. La superficie de la gota ubicada en la punta del capilar, es alterada por las fuerzas de repulsión y de Coulomb, transformándola en una forma cónica conocida como cono de Taylor. Cuando la fuerza electrostática contrarresta la tensión superficial, se expulsa un caudal de polímero cargado desde la punta del cono de Taylor. A medida que el caudal se dirige hacia el colector, las cargas distribuidas aleatoriamente provocan que este sufra un movimiento de flexión o de latigazo. En consecuencia, se produce un estiramiento del chorro y la rápida evaporación del disolvente, transformándose en una fibra delgada que se deposita en el colector.^{13,15}

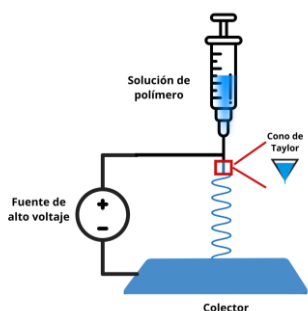


Figura 1. Proceso de electrohilado convencional.

Nota. Adaptado de "Electrospinning of nanofibers: Potentials and perspectives for active food packaging" (p.3), por C. Zhang, Y. Li, P. Wang y H. Zhang. 2019, Food Packaging and Shelf Life, 41 (3).

La morfología de la fibra está influenciada por diversos parámetros de procesamiento, entre los que se encuentran las propiedades de las soluciones poliméricas: tipo de polímero encapsulante y su concentración, viscosidad de la solución, conductividad y tensión superficial. Por otro lado, también se consideran las condiciones del proceso: caudal, voltaje aplicado y distancia al colector. Por último, las condiciones ambientales, como la temperatura y humedad, influyen en la calidad del encapsulamiento.¹⁴

2. Factores que influyen en el electrohilado

Dentro de los parámetros que influyen en el proceso de electrohilado se encuentran las variables de la solución,

de las condiciones del proceso y del ambiente circundante.¹⁶

2.1 Variables de la solución

Respecto a las variables de la solución, la viscosidad es un parámetro clave en la obtención de fibras y cápsulas con consistencia homogénea. Esta propiedad depende de la molaridad de la SP, el peso molecular, la estructura y conformación de las cadenas de los polímeros que se utilizan en el proceso, así como del tipo de disolvente.¹⁶ De forma general, se prefiere una alta viscosidad ya que aumenta la uniformidad de la fibra.² Lo que concuerda con el estudio de Neo *et al.*¹⁷ que reporta que al usar soluciones de zeína con viscosidad alta ($\eta > 100$ mPa/s) se forman nanofibras bien definidas y estables; ya que, a partir de una solución de zeína con una viscosidad de 142.49 ± 26.4 mPa/s se obtuvo una fibra con diámetro de 283 nm de diámetro y sin perlas, este comportamiento en la morfología de las fibras también se presentó a viscosidades de 188.75 mPa/s, 252.25 mPa/s, y 358.08 mPa/s. Mientras que a concentraciones menores se formaban perlas o fibras con perlas. Estos resultados implican que el número de entrelazamientos moleculares aumenta de manera proporcional con la viscosidad, facilitando así el proceso de formación de fibras sin microsferas. De la misma manera, Haider *et al.*¹⁸ obtuvieron nanofibras estables de quitosano a partir de una viscosidad de 243 mPa/s.

La uniformidad de las fibras se ve mejorada por la adición de sustancias surfactantes que llevan a la reducción de la tensión superficial, entendida como la fuerza que actúa en la superficie de un líquido y que tiende a minimizar el área superficial.² El estudio realizado por Zeng *et al.*¹⁹ demostró que la adición de surfactantes (catiónicos, aniónicos o no iónicos) aumenta la uniformidad de las fibras electrohiladas de ácido poliláctico (PALL); el diámetro promedio de las fibras obtenidas a partir del electrohilado de la solución PALL/cloroformo/acetona fue de 1690 nm, con una variabilidad en tamaño muy amplia que iba de los 340 a 4200 nm. La incorporación de cloruro de trietilbencilamonio (TEBAC) mejoró este aspecto, reduciendo el diámetro promedio de la fibra a 430 nm y disminuyendo la distribución de tamaño a un intervalo de 360 a 500 nm, es decir, se obtuvo una mayor homogeneidad en el grosor de las fibras. De manera similar, la adición del surfactante éter de polioxietileno de alcohol graso (AEO10) resultó en fibras con un diámetro promedio de 800 nm y un menor intervalo de tamaño (340 a 1350 nm). Por su parte, el surfactante no iónico dodecilsulfato sódico (SDS) produjo fibras promedio de 740 nm y además facilitó el proceso haciendo que la

longitud del caudal se redujera y que la velocidad del proceso fuera mayor.

De igual manera, el proceso de electrohilado se favorece cuando se utiliza un disolvente volátil en la elaboración de la SP, ya que propicia la evaporación del compuesto durante su trayectoria desde la punta de la aguja hacia el colector.²⁰ Algunos de los disolventes más utilizados son la acetona, ácido acético, cloroformo, diclorometano, dimetilacetamida y etanol.²¹ En el estudio de Rodríguez *et al.*²² se usaron diversas concentraciones de etanol (60%, 70%, 80% y 90% v/v) para el electrohilado de zeína al 5% p/v; se encontró que a las concentraciones del 60% y 70% se formaron partículas esféricas de diferentes tamaños, mientras que a un 80% se logró obtener un tamaño homogéneo y finalmente al 90% se obtuvieron esferas morfológicamente irregulares. Mientras que, Megelski *et al.*²³ trabajaron con disulfuro de carbono (disolvente altamente volátil) que, debido a su elevada presión de vapor, favoreció la rápida formación de una película del polímero en la superficie de la aguja, obteniendo fibras de 4 a 25 μm de diámetro. Sin embargo, se tiene que considerar que el uso de los disolventes antes mencionados puede presentar alta toxicidad e inflamabilidad, además de que no son amigables con el medio ambiente. Por esa razón se busca el uso de disolventes más afines con el agua. Vrieze *et al.*²⁴ reportaron una mezcla de acetona con N,N-dimetilacetamida (DMAc) y agua como disolventes para la producción de fibras de acetato de celulosa, donde la adición de agua produjo una precipitación rápida del polímero y evitó la elongación del caudal, lo que provocó un mayor diámetro de fibra. De manera similar, Megelski *et al.*²³ mencionan que al hilar fibras de polietileno a partir de acetona y agua se obtuvo un diámetro promedio de 800 nm, además de una superficie lisa en las fibras.

2.2 Condiciones del proceso

La implementación de una cantidad específica de sales inorgánicas, entre los que destacan el cloruro de sodio (NaCl) y el nitrato de níquel $\text{Ni}(\text{NO}_3)_2$, o polielectrolito en la solución de polímero puede aumentar la conductividad de la solución, facilitando la progresión suave del electrohilado. No obstante, si la conductividad de la solución es excesivamente alta se puede llegar a acortar el tiempo de movimiento del chorro de hilado en el campo eléctrico, lo que provoca una evaporación inadecuada del disolvente y por lo tanto una inadecuada formación de fibras o esferas.²⁵ Por ejemplo, en el estudio de Zhang *et al.*²⁶ al añadir concentraciones crecientes de cloruro de sodio (NaCl) (0.05 a 0.2 % p/v) a una solución de alcohol polivinílico/agua, fue posible reducir el diámetro de la fibra de 214 nm a 159 nm; también se determinó que la

conductividad de la solución aumentó de 1.53 a 10.5 mS/cm al aumentar el contenido de NaCl.

El aumentar los valores del voltaje aplicado a la SP provoca una aceleración y estiramiento en el chorro de solución, conduciendo a la reducción del diámetro de las fibras obtenidas.²⁷ En la investigación de Neo *et al.*¹⁷ se emplearon voltajes entre 12 a 18 kV para la obtención de fibras de zeína observándose que a voltajes moderados, como 13 kV, se formaron fibras uniformes con diámetro de 250-300 nm, mientras que a mayores voltajes, como 18 kV, el diámetro se volvió más variable; por otra parte, en el estudio de Sencadas *et al.*²⁷ se observó que el aumento del voltaje de 18 a 30 kV permitió disminuir el diámetro promedio de las nanofibras de quitosano (de 520 a 250 nm). Lo cual concuerda con Megelski *et al.*²³, quienes reportaron una reducción del 50% en el tamaño del hilo pasando de 5 a 12 kV.

Es posible controlar la porosidad, tamaño y forma de la fibra optimizando el caudal de la SP expulsada por la jeringa.²⁸ Según lo reportado por Megelski *et al.*²³, a caudales por arriba de 0.10 mL/min aumentó el diámetro de los hilos de poliestireno/tetrahidrofurano (THF), además presentaron diversos defectos morfológicos, por ejemplo, formación de perlas y poros en el hilo. De manera similar, los hilos de gelatina fabricados por Okutan *et al.*²⁹ mostraron diámetros grandes debido a formación de perlas inducidas al aumentar el caudal de 0.0001 mL/min a 0.1 mL/min.

Por último, la distancia entre la jeringa y colector (distancia de trabajo, DT) afecta el tamaño del hilado. En el estudio de Sencadas *et al.*²⁷ se varió la DT de 5 a 20 cm lo que condujo al aumento en el diámetro de las fibras de quitosano de 260 nm a 500 nm, debido a la reducción del voltaje efectivo.³⁰ Por otra parte, Megelski *et al.*²³ variaron la DT entre 35 y 15 cm en múltiplos de 5 y a pesar de que el tamaño de la fibra no cambió significativamente, se formaron perlas alargadas al reducir la distancia.

2.3 Condiciones del ambiente

Las características ambientales como la humedad y la temperatura son factores que influyen en la morfología y el diámetro de las fibras electrohiladas.^{16,20} Respecto a la humedad relativa, Tripatanasuwan *et al.*³¹ reportaron que el diámetro promedio de nanofibras de polióxido de etileno (PEO) disminuyó gradualmente al aumentar la humedad: de 253 nm (a 5.1% de humedad relativa) a 144 nm (electrohilado a 48.7% de humedad relativa); sin embargo, empezaron a observarse gránulos en las fibras a partir de 52.6% de humedad. Por otro lado, Vrieze *et al.*²⁴ encontraron que en acetato de celulosa la

temperatura produce dos efectos que influyen en el diámetro de las nanofibras: incrementa la velocidad de evaporación del disolvente y reduce la viscosidad de la solución. Por lo que el control de humedad en el ambiente debe de considerarse.

3. Clasificaciones comunes de electrohilado

Existen tres técnicas principales de electrohilado, uniaxial, coaxial y de emulsión, las cuales se utilizan en función de la solución que se pretenda electrohilar (Figura 2).

3.1 Electrohilado uniaxial

Es la técnica más utilizada, consiste en hilar una solución homogénea del material de capa con el material activo a través de una única aguja, como lo muestra la Figura 2(A).²¹ Permite una liberación controlada del compuesto activo, siempre y cuando este se disuelva completamente en la solución del polímero y que la polaridad coincida.³²

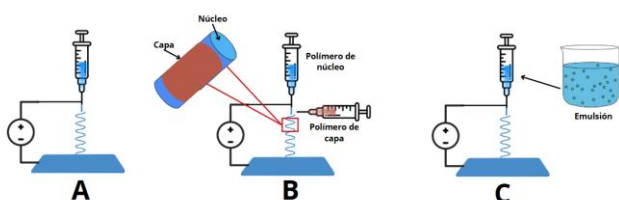


Figura 2. Diagramas esquemáticos de la clasificación del electrohilado. (A) Electrohilado uniaxial. (B) Electrohilado coaxial. (C) Electrohilado en emulsión.

Nota. Adaptado de "Electrospinning meets food packaging: A promising pathway towards novel opportunities in food preservation" (p.4), por T. Wang y E. Su, 2024, Food Packaging and Shelf Life, 41 (3).

3.2 Electrohilado coaxial

Este método requiere de dos agujas dispuestas concéntricamente, donde en una de ellas se bombea el polímero de núcleo y en la otra el polímero de capa para así formar nanofibras con una estructura "núcleo-capa", la cual se refiere a una capa de polímero que protege al componente bioactivo en el centro de la nanofibra, como se presenta en la Figura 2(B). Se emplea para encapsular diversos componentes alimentarios como polifenoles, péptidos y probióticos.¹⁴

A pesar de la estabilidad del hilado producido con esta técnica, presenta ciertas limitaciones como lo es su diseño complicado y requiere un control altamente preciso en las variables de procesamiento.³³

3.3 Electrohilado de emulsión

Representado en la Figura 2(C), permite fabricar nanofibras con una estructura "núcleo-capa", pero a diferencia del electrohilado coaxial, este método usa una aguja. En esta técnica se busca hilar directamente emulsiones estables (ya sea emulsiones de agua en aceite o de aceite en agua).³² En el proceso la fase continua se vuelve la capa y la fase dispersa forma el núcleo.¹⁴

La aplicación del electrohilado por emulsión se ve limitado en el sector alimentario por la baja productividad y dificultades del procesamiento de los polímeros naturales.³²

4. Materiales de pared

Diversos materiales pueden intervenir en la estructura de la pared de las fibras, incluyendo biopolímeros (como proteínas animales y vegetales, carbohidratos), polímeros biocompatibles (PEO, alcohol polivinílico (PVA) y policaprolactona (PCL)).¹⁶

Los biopolímeros naturales (proteínas y polisacáridos) poseen una adecuada biodegradación, sin embargo, su carácter hidrofílico y malas propiedades mecánicas afectan negativamente el uso de fibras electrohiladas en sistemas de envasado de alimentos. Por el contrario, los polímeros biocompatibles, como PEO, el PCL y PVA, tienen hidrofobicidad y buenas propiedades mecánicas, por lo que al combinarse con biopolímeros naturales mejora la capacidad de formación de fibras de la solución de mezcla.^{14,34} Dentro de los biopolímeros frecuentemente utilizados se encuentran: proteínas y polisacáridos.

4.1 Proteínas

Las nanofibras basadas en proteínas se emplean preferentemente en la protección de nutrientes debido a sus buenas propiedades funcionales, biodegradabilidad y biocompatibilidad.³⁵ Sin embargo, estas no se pueden producir fácilmente debido a las complejas estructuras secundarias y terciarias de las proteínas.^{14,36} Por tal razón diversos estudios usan fuentes proteicas junto con polímeros compatibles (PVA, PEO, etc.). Las proteínas que se pueden utilizar pueden ser tanto de origen animal como vegetal.

4.1.1 Proteína de origen animal

Dentro de las proteínas de origen animal destaca el uso de la gelatina (biopolímero económico derivado del colágeno) que mejora la estabilidad, la elasticidad y la consistencia de los productos alimenticios. De igual forma se hace uso de la seda, la cual es una proteína fibrosa natural que contiene fibroína hidrofóbica y sericina hidrofílica; específicamente, la fibroína tiene un gran potencial como material de electrohilado.^{14,37} Sin embargo, el desarrollo de fibras de seda se ve afectado por su mala propiedad mecánica, pero la mezcla de fibroína de seda con algunos polímeros sintéticos en la solución de hilado puede mejorar la capacidad de formar fibras, así como las propiedades mecánicas del material producido, por ejemplo, Li et al.³⁸ fabricaron nanofibras de PCL/fibroína de seda, obteniendo fibras con excelente resistencia y mejor cristalinidad. Así mismo, el aislado de proteína de suero de leche provee una modificación en la textura, además presenta propiedades superiores de gelificación, emulsión y aspectos nutricionales. Además, la reutilización de un desperdicio del sector lácteo implica que sea un proceso sustentable. Un inconveniente que se presenta con la estructura globular de la proteína de suero, es que dificulta la capacidad de formar fibras debido a un impedimento espacial.¹⁴ Sin embargo, la capacidad de hilado del suero se puede mejorar mediante la mezcla con polímeros altamente hilables (como pululano, goma guar, PEO y PVA) en concentraciones específicas. Por ejemplo, Aman Mohammadi et al.³⁹ implementaron goma guar (0.8-0.9% p/p) en la preparación de nanofibras de suero de leche, este polisacárido modificó la viscosidad de la solución, logrando un mejor proceso de hilado y fibras sin defectos.

4.1.2 Proteínas de origen vegetal

Respecto a las proteínas de origen vegetal se destaca principalmente el uso de la zeína y proteína de soya.

La zeína es una prolamina hidrofóbica extraída del maíz, que posee excelentes propiedades formadoras de películas y alta resistencia térmica, además que apoya a la estabilización de componentes alimentarios sensibles a la luz y al oxígeno.^{2,14} En su estudio, Fernandez et al.⁴⁰ reportaron la encapsulación de β -caroteno en fibras electrohiladas de zeína, las cuales mostraron estabilidad del compuesto bioactivo y una amplia distribución de este dentro de las fibras.

De acuerdo con Zhang¹⁴, la proteína de soya pura no se puede electrohilar fácilmente por lo que requiere un polímero portador para asegurar una adecuada formación de fibras. Por ejemplo, Fabra et al.⁴¹ usaron

como materiales de pared aislado de proteína de suero de leche, zeína y aislado de proteína de soya para encapsular alfa-tocoferol; en este estudio se destacó que la actividad antioxidante del compuesto activo se conservó un 95% durante el proceso de electro encapsulación, además el material de recubrimiento protegió a este antioxidante de la degradación entre el 70-85% durante un proceso de esterilización.

4.2 Polisacáridos

De forma general, los polisacáridos brindan propiedades beneficiosas como su inocuidad, la biocompatibilidad, la biodegradabilidad, la solubilidad en agua y además proporcionan estabilidad térmica, lo que los hace óptimos para proteger compuestos encapsulados en procesos a altas temperaturas.^{2,42}

4.2.1 Quitosano

El quitosano es el segundo polímero natural más abundante (después de la celulosa) y se obtiene a partir de la desacetilación alcalina de la quitina.¹⁴ Este polímero presenta actividad antimicrobiana y antioxidante; de igual forma, su naturaleza mucoadhesiva aumenta el tiempo de liberación del encapsulante en el medio gastrointestinal, ya que cuando este compuesto se sitúa en la mucosa que recubre el epitelio intestinal y se difunde a través de esta hasta alcanzar el epitelio subyacente, logra permanecer por tiempos prolongados.^{42,43}

Sin embargo, la formación de fibras a partir de únicamente quitosano es complicada debido a su escasa solubilidad, su estructura química rígida y a su naturaleza policationica en solución, por lo que es necesario la adición de otro compuesto. Prueba de esto, Pakravan et al.⁴⁴ lograron electrohilar nanofibras sin presencia de perlas a partir de una solución de ácido acético al 50% mezclado con quitosano altamente desacetilado (97.5%) junto con PEO a una concentración del 10%, donde se observó que al aumentar la concentración de quitosano disminuyó el tamaño de la fibra, obteniendo fibras con un diámetro de 63 nm.

Por otra parte, Sencadas et al.²⁷ adicionaron una mezcla de ácido trifluoroacético y diclorometano (TFA/DCM) a una solución de quitosano. Se percibió que a mayores concentraciones de TFA ($\geq 80\%$) aumentaba la conductividad y por ende se causaban chispas en el proceso, por lo que al adicionar DCM se obtuvo un caudal estable y la ausencia de chispas. A una concentración de 70:30 v/v de TFA/DCM se consiguieron nanofibras sin defectos de un tamaño de 250 a 500 nm.

4.2.2 Alginato

El alginato se obtiene de algas pardas y es un polisacárido aniónico conformado por α -L-glucurónico y unidades de ácido β -D-manurónico con enlaces (1-4) en diversas secuencias y composiciones.⁴²

Los alginatos se han utilizado por ser agentes gelificantes, modificadores de la viscosidad y por su liberación controlada de compuestos bioactivos en el tracto gastrointestinal.⁴⁵ Entre sus limitaciones destaca una alta rigidez y la rápida disolución en el pH intestinal, por lo que es indispensable mezclarlo con otro polímero para mejorar el electrohilado.¹⁴

En el estudio de Alborzi *et al.*⁴⁵ se evaluó la capacidad del alginato de sodio, pectina y PEO para la encapsulación de ácido fólico. Se partió de una mezcla de alginato y pectina (70/30) la cual forma geles estables en medios ácidos, por lo que su uso puede ser de importancia para la protección de nutrientes sensibles al pH; para mejorar el proceso de hilado se añadió PEO al 30% p/p. Se obtuvieron fibras que retuvieron en un 97% el ácido fólico después de 41 días de resguardo en la oscuridad y a un pH de 3.

Li *et al.*⁴⁶ desarrollaron nanofibras compuestas de PVA, alginato de sodio (ALG) y rectorita orgánica (OREC) mediante electrohilado, con el fin de mejorar tanto la estructura de hilado como la actividad antibacteriana. Las cadenas poliméricas de PVA y ALG fueron intercaladas en las capas de OREC. Las fibras presentaron morfología uniforme, estructura tridimensional porosa y buena estabilidad térmica. Además, mostraron una mayor eficiencia antibacteriana frente a *E. coli* y *S. aureus*, atribuida a la interacción sinérgica entre el ALG y el OREC, que actúan como barreras físicas.

4.2.3 Ciclodextrina

Es un oligosacárido no tóxico y biodegradable que se obtiene a partir de la degradación enzimática del almidón, consta de 6, 7 u 8 unidades de glucosa (α , β o γ , respectivamente). Las ciclodextrinas son comúnmente utilizadas para encapsular compuestos bioactivos poco solubles en agua como: antioxidantes, aceite de pescado, aceites esenciales y aromas.⁴² Por ejemplo, Aytac *et al.*⁴⁷ desarrollaron nanofibras de zeína en las que encapsularon un complejo de inclusión de timol y γ -ciclodextrina (γ -CD), con fines de aplicación en envases alimentarios antibacterianos. Los resultados mostraron que la proporción 2:1 de timol/ γ -CD no solo mejoró la estabilidad y la capacidad de preservación frente al timol

libre, sino que también incrementó significativamente su eficacia antibacteriana al ser incorporado en las fibras.

Por otra parte, Kayaci y Uyar⁴⁸ electrohilieron un complejo de vainillina y ciclodextrina en nanofibras de PVA, con el objetivo de mejorar la estabilidad térmica y prolongar la vida útil de la vainillina. Se evaluaron tres tipos de ciclodextrinas (α , β y γ), siendo la γ -ciclodextrina la más eficaz gracias a su mayor afinidad con la vainillina. Las fibras obtenidas presentaron diámetros entre 140 y 245 nm y morfología uniforme. Las pruebas térmicas y de almacenamiento revelaron que las nanofibras con γ -ciclodextrina conservaron hasta el 60 % del contenido inicial de vainillina después de 50 días.

4.2.4 Goma guar

La goma guar es un polisacárido soluble en agua procedente de las semillas de *Cyamopsis tetragonolobus*. Consiste en cadenas lineales de unidades β -D-(1 \rightarrow 4) manopiranosil con unidades α -D-galactopiranosil unidas por enlaces 1 \rightarrow 6. Al igual que otras fibras dietéticas, la goma guar es resistente a la degradación enzimática en la boca, el estómago y el intestino delgado, pero susceptible a la degradación microbiana en el colon.⁴²

Es una goma no iónica, soluble en agua fría con buena estabilidad térmica. Se utiliza en alimentos como espesante y aglutinante de agua libre, y a menudo se combina con otras gomas.⁴⁹

En la investigación de Pérez *et al.*⁵⁰ se evaluó la técnica de electrohilado para la encapsulación de ácido fólico. Como material de pared se utilizó concentrado de proteína de suero y almidón resistente (20 % p/v de almidón resistente en agua + 0.5 % p/v de goma guar + 5 % p/v de Span 20). Se observó que la goma guar aumentó la viscosidad y facilitó el entrelazamiento molecular entre cadenas de carbohidratos; además evitó la precipitación de ácido fólico durante el proceso de encapsulación. De manera similar, Ramazani *et al.*⁵¹ electrohilieron nanofibras de proteína de suero combinado con goma guar, donde se observó una transformación en la morfología de las fibras según la concentración de goma guar: al 8% p/p de goma guar se presentaban defectos, mientras que al 9% de concentración estos ya no se presentaron, lo anterior a una concentración fija de proteína de suero (7%p/p).

4.2.5 Goma arábica

La goma arábica (GA) se obtiene de los tallos y ramas de *Acacia senegal* y *Acacia seyal*. Es un polisacárido ramificado, compuesto por una estructura de D-

galactosa, ácido D-glucurónico, L-ramnosa y L-arabinosa; es soluble en agua fría y estable en condiciones ácidas; en solución es ligeramente ácida (pH 4.5-5.0), su viscosidad es menor que la de otras gomas y tiene una gran capacidad para actuar como emulsionante de aceites y aromas.^{49,52}

Por otro lado, Padil *et al.*⁵² lograron producir nanofibras a partir de goma arábiga combinándola con polímeros biodegradables en soluciones acuosas. Se determinó que el PVA es un mejor acompañante que el PEO, ya que permite una mejor disolución y control de la viscosidad, facilitando la formación de fibras uniformes. Las mejores propiedades se obtuvieron con proporciones de mezcla entre 70:30 y 90:10 de PVA:GA, lo que dio como resultado fibras con un diámetro promedio de aproximadamente 240 nm. Este resultado evidencia la viabilidad del uso de goma arábiga en sistemas de encapsulación alimentaria.

Por otra parte, Fareed *et al.*⁵³ encapsuló *Lactobacillus acidophilus* utilizando nanofibras mezcladas con goma arábiga y PVA mediante electrohilado. La fibra obtenida tuvo un tamaño promedio de 617 nm, además la apariencia superficial fue lisa. En condiciones simuladas del tracto gastrointestinal, se observó que las células de *Lactobacillus acidophilus* encapsuladas en las nanofibras mantuvieron su viabilidad por encima del umbral terapéutico, mientras que las células libres perdieron viabilidad rápidamente. Esto evidencia que la matriz protectora formada por goma arábiga y PVA actúa eficazmente frente a condiciones adversas como el pH ácido del estómago y las enzimas digestivas.

5. Encapsulación de agentes activos

La técnica de electrohilado ha sido utilizada en la industria alimentaria para encapsular ingredientes bioactivos.¹⁶ En cuanto a los agentes activos se puede encapsular agentes antimicrobianos, antioxidantes, secuestradores de oxígeno, probióticos, emisores de dióxido de carbono y secuestradores de etileno, los cuales permitirán desarrollar sistemas de envasado activo.¹⁴ Dichos componentes bioactivos presentan baja estabilidad y el electrohilado les confiere una protección contra las condiciones ambientales que existen en el tracto gastrointestinal.⁵⁴

5.1 Agentes antioxidantes

Algunos nutrientes presentes en alimentos frescos, como las proteínas, ácidos grasos poliinsaturados y pigmentos naturales se degradan debido a las reacciones oxidativas. Las reacciones de oxidación favorecen el desarrollo de

sabores desagradables a causa de la rancidez, acompañados de decoloración y, por lo tanto, afectan negativamente la apariencia, la calidad y el contenido nutricional de los alimentos; por lo que es necesario la presencia de antioxidantes para evitar dichas reacciones, ya que estando presentes en los alimentos inhiben los radicales libres o las reacciones químicas oxidativas.^{8,55}

Es posible electrohilar antioxidantes rompedores de cadena y preventivos. Los antioxidantes rompedores de cadena transforman los radicales libres reactivos a moléculas estables que no pueden iniciar reacciones, por ejemplo, tocoferoles, aceites esenciales y agentes sintéticos (como butilhidroxianisol [BHA] y terbutilhidroquinona [TBHQ]). Por otra parte, los antioxidantes preventivos ayudan a evitar o reducir las reacciones de oxidación, entre estos se encuentran los captadores de oxígeno (como ácido ascórbico, hierro y curcumina), los supresores de oxígeno singlete (como carotenoides, flavonoides y tocoferoles), los quelantes de metales (como lactoferrina y ácido cítrico) y los absorbentes de radiación ultravioleta (como benzotriazoles y pigmentos).^{14,21}

Entre los agentes antioxidantes más utilizados destacan los carotenoides, los cuales son una familia de pigmentos liposolubles presentes de forma natural en organismos fotosintéticos. Este grupo tiene propiedades antioxidantes, pero son sensibles a la exposición a la luz, la presencia de oxígeno y los tratamientos térmicos. Por su parte, Peinado *et al.*⁵⁶ reportaron una encapsulación efectiva de β -caroteno en nanofibras de polióxido de etileno, obteniendo fibras de aproximadamente 320 nm, además se observó que en 96 horas de almacenamiento únicamente se perdió el 20% del compuesto activo, en comparación con el 70% que se pierde del compuesto en su forma libre.

Otro grupo relevante de antioxidantes son los polifenoles, específicamente las antocianinas. Estos compuestos son pigmentos vacuolares solubles en agua, se encuentran principalmente en frutas, lo que les brinda un color rojo-azul característico. Algunas propiedades de las antocianinas como el color y la estabilidad de estos pigmentos se ven influenciados por el pH, la luz y la temperatura. A pH ácido, las antocianinas son pigmentos rojos, mientras que cambian a azul en un entorno básico. Por otra parte, a pH básico, las antocianinas son inestables y tienden a degradarse a compuestos oxidados de color marrón oscuro.⁵⁷

Debido a estas propiedades, Wang *et al.*⁵⁸ desarrollaron nanofibras electrohiladas de zeína incorporadas con diferentes concentraciones de antocianinas (0-0.5%)

para crear etiquetas indicadoras de frescura más sostenibles y seguras. Las fibras obtenidas fueron lisas y sin perlas, con un diámetro de 582 a 690 nm, según la concentración de antocianinas. Además, las etiquetas con fibras a concentraciones de 0.2% y 0.5% de antocianinas mostraron cambios de color al exponerse al vapor del amoníaco, que es un vapor que se desprende en el proceso de deterioro de productos cárnicos y mariscos por lo que se utiliza como un indicador de frescura, por tanto, esta tecnología es prometedora como un marcador de calidad en este tipo de productos y así garantizar al consumidor alimentos inocuos que no atenten contra su salud.

Por otra parte, las betalaínas son compuestos nitrogenados solubles en agua que se sintetizan a partir del aminoácido tirosina y constan de dos grupos estructurales: las betacianinas (coloración roja) y las betaxantinas (coloración amarilla). Estas moléculas son estables en un intervalo de pH de 3.0 a 6.0. A pH > 6, presentan una degradación del color y con ello pérdida de su actividad antioxidante, por ello es importante protegerlos de diversos factores medioambientales. Canizales et al.⁵⁹ diseñaron nanofibras a partir de PLA (en concentraciones del 2-12% p/v) y extracto de betalaína (8-12%) para utilizarlo como indicador de frescura en empaques inteligentes. Las fibras resultantes fueron uniformes y su diámetro osciló entre 313 y 657 nm, dependiendo de la concentración de betalaínas; además presentaron una alta capacidad antioxidante y sensibilidad al amoníaco.

5.2 Probióticos

Los probióticos son microorganismos vivos que cuando se consumen en cantidades adecuadas confieren un beneficio al huésped, reflejado principalmente a nivel intestinal.⁶⁰ Por ello es importante que estos microorganismos lleguen intactos al intestino del huésped, de ahí que se han desarrollado diversas técnicas de encapsulación, donde se han utilizado diversos materiales de pared, incluyendo polisacáridos (como quitosano, alginato de sodio y almidón resistente), proteínas (como suero de leche, proteína y gelatina), gomas vegetales (como goma arábiga, carragenina, pectina y goma xantana) y materiales de pared compuestos.⁸

En concordancia, Zupančič et al.⁶¹ evaluaron la viabilidad de diez especies de bacterias ácido lácticas (nueve del género *Lactobacillus* y una del género *Lactococcus*) después de ser encapsuladas mediante la técnica de electrohilado junto con PEO. El procedimiento permitió incorporar con éxito todas las cepas bacterianas en las

nanofibras, sin necesidad de modificar los parámetros estándar del proceso. Las fibras obtenidas fueron uniformes, delgadas (con un diámetro promedio de 100 nm), y mostraron una distribución homogénea de las bacterias, las cuales se mantuvieron estructuralmente estables dentro de las fibras. Respecto a la viabilidad, todas las bacterias sobrevivieron al proceso de electrohilado aunque con variaciones según la especie. Se observó que las bacterias con superficies más hidrofóbicas presentaron mayores tasas de supervivencia, lo que sugiere que una superficie celular hidrofóbica puede ofrecer protección adicional frente al proceso. En contraste, las bacterias más hidrofílicas perdieron mayor viabilidad. Además, se detectó que las bacterias de gran tamaño como *Lactobacillus delbrueckii* ssp. *bulgaricus*, fueron más susceptibles a daños, mostrando las mayores pérdidas de viabilidad. Esta técnica de nanoencapsulación demostró ser adecuada para la encapsulación de múltiples cepas probióticas, conservando su viabilidad en niveles razonablemente altos y generando fibras homogéneas.

Por otra parte, los prebióticos son componentes alimentarios no digeribles (principalmente polisacáridos no digeribles) que estimulan el crecimiento selectivo y la actividad de los probióticos, contribuyendo así a la salud de la microbiota intestinal.⁶²

El uso de prebióticos en el electrohilado de probióticos le confiere una protección adicional a los microorganismos.⁶³ Por ejemplo, Feng⁶⁴ incorporó fructooligosacárido al sistema de electrohilado de PVA, lo que mejoró su proliferación y ayudó a mantener una alta supervivencia de los probióticos tras el tratamiento térmico (a 45 °C, 60 °C, 70 °C). De manera similar, Duman⁶⁵ encapsuló *Lactobacillus fermentum* mediante la técnica de electrohilado, utilizando una matriz de PVA, alginato de sodio y tres diferentes tipos de inulina. Las fibras obtenidas presentaron una estructura homogénea y un diámetro de 300 a 400 nm, además se observó la mejora en la supervivencia durante el almacenamiento a -18°C, 4°C y 25°C, con una variación según el grado de polimerización, la concentración y la disolución del prebiótico utilizado. Esta técnica ofrece una alternativa prometedora para desarrollar sistemas simbióticos en alimentos funcionales.

Conclusiones

El electrohilado representa una técnica prometedora y versátil en la encapsulación de compuestos bioactivos para la industria alimentaria, ofreciendo ventajas como la protección frente a condiciones adversas, liberación controlada y mejora en la estabilidad y funcionalidad de

los ingredientes. Su capacidad para generar fibras finas y estables lo convierte en una herramienta clave en el desarrollo de productos funcionales y empaques activos. Además, es una tecnología medioambientalmente amigable que permite una producción eficiente a bajo costo. Finalmente, su aplicación en la industria alimentaria no solo mejora la estabilidad de compuestos bioactivos, sino que también podría contribuir al valor nutricional de los productos finales, favoreciendo una alimentación más saludable.

Referencias

- [1] Timilsena YP, Haque A, Adhikari B. Encapsulation in the food industry: a brief historical overview to recent developments. *Food Nutr. Sci.* 2020; 11(6): 481-508.
- [2] Drosou CG, Krokida MK, Biliaderis CG. Encapsulation of bioactive compounds through electrospinning/electrospraying and spray drying: a comparative assessment of food related applications. *Dry. Technol.* 2017; 35(2): 139-162.
- [3] Shahidi F, Han X. Encapsulation of food ingredients. *Crit. Rev. Food Sci. Nutr.* 1993; 33(6): 501-547.
- [4] Cardona T, Patiño A, Ormazá Z. Aspectos tecnológicos de la microencapsulación de compuestos bioactivos en alimentos mediante secado por aspersión. *Cienc. Tecnol. Agropecuaria* 2021; 22(1): 1-21.
- [5] Nava R, Michelena A, Iliná A, Martínez H. Microencapsulación de componentes bioactivos. *Investig. Cienc.* 2015; 23(66): 64-70.
- [6] Villena M, Morales H, Lara G, Martínez R. Técnicas de microencapsulación: una propuesta para microencapsular probióticos. *Ars Pharm.* 2009; 50(1): 43-50.
- [7] Wong JJ, Wong AI, Xu Y, Yuliarti O. Zein as a water insoluble excipient for spray dry encapsulation of hydrophilic bioactives. *J. Food Eng.* 2020; 283(17): 1-7.
- [8] Xu Y, Yan X, Zheng H, Li J, Wu X, Xu J, Zhen Z, Du C. The application of encapsulation technology in the food industry: classifications, recent advances, and perspectives. *Food Chem X.* 2024; 21: 1-14.
- [9] Parra A. Food microencapsulation: a review. *Rev.Fac.Nal.Agr.Medellín* 2011; 63(2): 5669-5684.
- [10] Pino A, Aragüez Y. Conocimientos actuales acerca de la encapsulación de aceites esenciales. *Rev. CENIC Cien. Quim.* 2021; 52(1):10-25.
- [11] Özonur Y. Microencapsulation of coco fatty acid mixture for thermal energy storage with phase change material. *Int. J. Energy Res.* 2006; 30(10): 741- 749.
- [12] Schrooyen P, Meer R, Kruij C. Microencapsulation: its application in nutrition. *Proc. Nutr. Soc.* 2001; 60(4): 475-479.
- [13] Bhushani AJ, Anandharamakrishnan C. Electrospinning and electrospraying techniques: potential food based applications. *Trends Food Sci. Technol.* 2014; 38(1), 21-33.
- [14] Zhang C, Li Y, Wang P, Zhang H. Electrospinning of nanofibers: potentials and perspectives for active food packaging. *Compr Rev Food Sci Food Saf* 2020; 19(2): 479-502.
- [15] Vilchez A, Acevedo F, Cea M, Seeger M, Navia R. Applications of electrospun nanofibers with antioxidant properties: a review. *Nanomaterials* 2020; 10(175): 1-25.
- [16] Coelho SC, Estevinho BN, Rocha F. Encapsulation in food industry with emerging electrohydrodynamic techniques: electrospinning and electrospraying – A review. *Food Chem.* 2021;339, 1-11.
- [17] Neo Y, Ray S, Eastael A, Nikolaidis M, Quek S. Influence of solution and processing parameters towards the fabrication of electrospun zein

- fibers with sub-micron diameter. *J. Food Eng.* 2012; 109(4): 645–651.
- [18] Haider S, Zeghayer Y, Ahmed A, Haider A, Mahmood A, Omer M, Imran M. Highly aligned narrow diameter chitosan electrospun nanofibers. *J Polym Res.* 2013; 20 (105), 1-11.
- [19] Zeng J, Xu X, Chen X, Liang Q, Bian X, Yang L. Biodegradable electrospun fibers for drug delivery. *J. Control. Release.* 2003; 92(3): 227–231.
- [20] Haider A, Haider S, Kang IK. A comprehensive review summarizing the effect of electrospinning parameters and potential applications of nanofibers in biomedical and biotechnology. *Arab. J. Chem.* 2018; 11(8), 1165–1188.
- [21] Wang T, Su E. Electrospinning meets food packaging: A promising pathway towards novel opportunities in food preservation. *Food Packag. Shelf Life.* 2024;41(3): 1-17.
- [22] Rodríguez F, Del Toro S, Cinco M, Juárez J, Ruíz C, López A, Carvajal M, Castro E, Barreras U, Tapia H. Preparation and characterization of quercetin-loaded zein nanoparticles by electrospinning and study of in vitro bioavailability. *J. Food Sci.* 2019; 84(10), 2883–2897.
- [23] Megelski S, Stephens JS, Chase DB, Rabolt JF. Micro- and nanostructured surface morphology on electrospun polymer fibers. *Macromolecules* 2002; 35(22): 8456-8466.
- [24] Vrieze S, Van Camp T, Nelvig A, Hagström B, Westbroek P, De Clerck K. The effect of temperature and humidity on electrospinning. *J. Mater. Sci.* 2009; 44: 1357-1362.
- [25] Inagaki M, Yang Y, Kang F. Carbon nanofibers prepared via electrospinning. *Adv. Mater.* 2012; 24(19): 2547-2566.
- [26] Zhang C, Yuan X, Wu L, Han Y, Sheng J. Study on morphology of electrospun poly (vinyl alcohol) mats. *Eur. Polym. J.* 2005; 41(3), 423-432.
- [27] Sencadas V, Correia D, Areias A, Botelho G, Fonseca M, Neves I. Determination of the parameters affecting electrospun chitosan fiber size distribution and morphology. *Carbohydr. Polym.* 2012; 87(2): 1295–1301.
- [28] Sill TJ, Von Recum H. Electrospinning: applications in drug delivery and tissue engineering. *Biomaterials* 2008; 29(13): 1989-2006.
- [29] Okutan N, Terzi P, Altay F. Affecting parameters on electrospinning process and characterization of electrospun gelatin nanofibers. *Food Hydrocoll.* 2014; 39: 19– 26.
- [30] Lee J, Choi K, Ghim H, Kim S, Chun D, Kim H. Role of molecular weight of atactic poly (vinyl alcohol) (PVA) in the structure and properties of PVA nanofabric prepared by electrospinning. *J. Appl. Polym. Sci.* 2004; 93(4): 1638–1646.
- [31] Tripatanasuwan S, Zhong Z, Reneker D. Effect of evaporation and solidification of the charged jet in electrospinning of poly (ethylene oxide) aqueous solution. *Polymer.* 2007; 48(19): 5742–5746.
- [32] Luraghi A, Peri F, Moroni L. Electrospinning for drug delivery applications: a review. *J. Controlled Release.* 2021; 334, 463-484.
- [33] Yang Y, Li X, Qi M, Zhou S, Weng J. Release pattern and structural integrity of lysozyme encapsulated in core–sheath structured poly (DL-lactide) ultrafine fibers prepared by emulsion electrospinning. *Eur. J. Pharm. Biopharm.* 2008; 69: 106–116.
- [34] Zhang C, Feng F, Zhang H. Emulsion electrospinning: Fundamentals, food applications and prospects. *Trends Food Sci. Technol.* 2018; 80, 175–186.
- [35] Nieuwland M, Geerdink P, Brier P, Eijnden P, Henket J, Langelaan P.

- Food-grade electrospinning of proteins. *Innov. Food Sci. Emerg. Technol.* 2013; 20: 269–275.
- [36] Pitkowski A, Durand D, Nicolai T. Structure and dynamical mechanical properties of suspensions of sodium caseinate. *J. Colloid Interface Sci.* 2008; 326, 96–102.
- [37] Kim J, Park J, Joo K, Wada M, Kaplan D. Three-dimensional aqueous-derived biomaterial scaffolds from silk fibroin. *Biomaterials* 2005; 26, 2775–2785.
- [38] Li L, Li H, Qian Y, Li X, Singh GK, Zhong L, Yang L. Electrospun poly (ϵ -caprolactone)/silk fibroin core-sheath nanofibers and their potential applications in tissue engineering and drug release. *Int. J. Biol. Macromol.* 2011; 49: 223-232
- [39] Aman mohammadi M, Ramazani S, Rostami M, Raeisi M, Tabibiazar M, Ghorbani M. Fabrication of food-grade nanofibers of whey protein Isolate–Guar gum using the electrospinning method. *Food Hydrocoll.* 2019; 90: 94-104.
- [40] Fernandez A, Torres S, Lagaron J. Novel route to stabilization of bioactive antioxidants by encapsulation in electrospun fibers of zein prolamine. *Food Hydrocoll.* 2009; 23(5): 1427–1432.
- [41] Fabra MJ, López A, Lagaron JM. Use of the electrohydrodynamic process to develop active/bioactive bilayer films for food packaging applications. *Food Hydrocoll.* 2016; 55: 11–18.
- [42] Fathi M, Martin A, McClements D. Nanoencapsulation of food ingredients using carbohydrate-based delivery systems. *Trends Food Sci. Technol.* 2014; 39, 18–39.
- [43] Prego C, Fabre M, Torres D, Alonso MJ. Efficacy and mechanism of action of chitosan nanocapsules for oral peptide delivery. *Pharm. Res.* 2006; 23(3): 549-556.
- [44] Pakravan M, Heuzey MC, Aji A. A fundamental study of chitosan/PEO electrospinning. *Polymer* 2011; 52: 4813–4824.
- [45] Alborzi S, Lim L, Kakuda Y. Encapsulation of folic acid and its stability in sodium alginatepectin-poly (ethylene oxide) electrospun fibres. *J. Microencapsul.* 2013; 30(1): 64–71
- [46] Li W, Li X, Chen Y, Li X, Deng H, Wang T, Huang R, Fan G. Poly (vinyl alcohol)/sodium alginate/layered silicate based nanofibrous mats for bacterial inhibition. *Carbohydr. Polym.* 2013; 92(2): 2232-2238.
- [47] Aytac Z, Ipek S, Durgun E, Tekinay T, Uyar T. Antibacterial electrospun zein nanofibrous web encapsulating thymol/cyclodextrin-inclusion complex for food packaging. *Food Chem.* 2017; 233, 117–124.
- [48] Kayaci F, Uyar T. Encapsulation of vanillin/cyclodextrin inclusion complex in electrospun polyvinyl alcohol (PVA) nanowebs: Prolonged shelf-life and high temperature stability of vanillin. *Food Chem.* 2012; 133(2): 641–649.
- [49] Taheri A, Jafari SM. Gum-based nanocarriers for the protection and delivery of food bioactive compounds. *Adv Colloid Interface Sci.* 2019; 269: 277-295.
- [50] Pérez MR, López NR, Periago MJ, Ros G, Lagaron JM, López RA. Encapsulation of folic acid in food hydrocolloids through nanospray drying and electrospraying for nutraceutical applications. *Food Chem.* 2015; 1(168): 124-133.
- [51] Ramazani S, Rostami M, Raeisi M, Tabibiazar M, Ghorbani M. Fabrication of food-grade nanofibers of whey protein Isolate–Guar gum using the electrospinning method. *Food Hydrocoll.* 2019; 90, 99-104.
- [52] Padil VV, Senan C, Waclawek S, Černík M. Electrospun fibers based

- on Arabic, karaya and kondagogu gums. *Int J Biol Macromol.* 2016; 91: 299-309.
- [53] Fareed F, Saeed F, Afzaal M, Imran A, Ahmad A, Mahmood K, Shah YA, Hussain M, Ateeq H. Fabrication of electrospun gum Arabic-polyvinyl alcohol blend nanofibers for improved viability of the probiotic. *J Food Sci Technol.* 2022; 59(12): 4812-4821.
- [54] Wen P, Zong H, Linhardt J, Feng K, Wu H. Electrospinning: A novel nano-encapsulation approach for bioactive compounds. *Trends Food Sci. Technol.* 2017; 70: 56-68.
- [55] Bhargava N, Sharanagat V, Mor S, Kumar K. Active and intelligent biodegradable packaging films using food and food waste-derived bioactive compounds: A review. *Trends Food Sci. Technol.* 2020; 105: 385-401.
- [56] Peinado I, Mason M, Romano A, Biasioli F, Scampicchio M. Stability of β -carotene in polyethylene oxide electrospun nanofibers. *Appl. Surf. Sci.* 2016; 370: 111-116.
- [57] Mattioli R, Francioso A, Mosca L, Silva P. Anthocyanins: a comprehensive review of their chemical properties and health effects on cardiovascular and neurodegenerative diseases. *Molecules* 2020; 25(17).
- [58] Wang J, Zhao W, Qin D, Shan H, Zhu X, Chen L, Li S. Incorporation of anthocyanin into zein nanofibrous films by electrospinning: Structural characterization, functional properties, and ammonia color-responsiveness. *Food Chem.X* 2025; 25, 1-8.
- [59] Canizales RD, Rodríguez FF, Tapia HJ, Ruíz CS, Aubourg SP, Álvarez MM. Poly (lactic acid) fibrous film with betalains from pitaya (*Stenocereus thurberi*) by electrospinning for potential use as smart food packaging. *Coatings* 2024; 14(12).
- [60] Hill C, Guarner F, Reid G, Gibson G, Merenstein J, Pot B, Morelli L, Canani R, Flint H, Salminen S. Expert consensus document: The international scientific association for probiotics and prebiotics consensus statement on the scope and appropriate use of the term probiotic. *Nat. Rev. Gastro. Hepat.* 2014; 11, 506-514.
- [61] Zupančič Š, Škrlec K, Kocbek P, Kristl J, Berlec A. Effects of electrospinning on the viability of ten species of Lactic acid bacteria in poly(ethylene oxide) nanofibers. *Pharmaceutics* 2019; 11, 483.
- [62] Castañeda GC. Actualización en prebióticos. *Rev. Cuban. Pediatr.* 2018; 90(4).
- [63] Feng K, Huangfu L, Liu C, Bonfili L, Xiang Q, Wu H, Bai Y. Electrospinning and electrospraying: emerging techniques for probiotic stabilization and application. *Polymers* 2023; 15.
- [64] Feng K, Huang RM, Wu RQ, Wei YS, Zong MH, Linhardt RJ, Wu H. A novel route for double-layered encapsulation of probiotics with improved viability under adverse conditions. *Food Chem.* 2020; 1-30.
- [65] Duman D, Karadag A. Inulin added electrospun composite nanofibres by electrospinning for the encapsulation of probiotics: characterization and assessment of viability during storage and simulated gastrointestinal digestion. *Int. J. Food Sci. Technol.* 2021; 56(2), 927-935.