

Artículo de investigación científica y tecnológica

Aspectos tecnológicos de la microencapsulación de compuestos bioactivos en alimentos mediante secado por aspersión

 Diana Paola Cardona Tangarife^{1*},  Lina Paola Patiño Arias¹,  Angela María Ormaza Zapata¹

¹ Universidad de Caldas. Manizales, Caldas

* Autor de correspondencia: Universidad de Caldas. Programa de Ingeniería de Alimentos. Manizales, Caldas. Sede Principal Calle 65 No 26 - 10. Apartado aéreo 275. dianapct.03@gmail.com

Recibido: 31 de marzo de 2020

Aceptado: 27 de julio de 2020

Publicado: 08 de enero de 2021

Editor temático: Jader Rodríguez Cortina (Corporación Colombiana de Investigación Agropecuaria [AGROSAVIA])

Para citar este artículo: Cardona, D. P., Patiño Arias, L. P., & Ormaza-Zapata (2021). Aspectos tecnológicos de la microencapsulación de compuestos bioactivos en alimentos mediante secado por aspersión. *Ciencia y Tecnología Agropecuaria*, 22(1), e1899. https://doi.org/10.21930/rcta.vol22_num1_art:1899

Resumen

El secado por aspersión es una técnica de amplio uso en la industria de alimentos para la obtención de productos en polvo a partir de la formación de gotas pequeñas dentro de una cámara de secado a temperatura elevada. Esta técnica de secado se ha aplicado a la formación de microcápsulas que albergan compuestos funcionales con el objetivo de suplementar un alimento mediante la adición de uno o varios ingredientes esenciales que pueden proporcionar beneficios para la salud humana. En esta revisión, se recopiló información sobre el proceso de microencapsulación de secado por aspersión: el principio y las condiciones de operación, los materiales pared utilizados, su influencia sobre las propiedades fisicoquímicas y funcionales de las microcápsulas obtenidas, los problemas de calidad en las microcápsulas, los aspectos de liberación de los compuestos bioactivos y los estudios relacionados con la microencapsulación de vitaminas, minerales, sustancias oleosas, antioxidantes y microorganismos probióticos. En total, se consultaron 78 estudios publicados entre los años 2010 y 2020 en bases de datos de alto impacto en la comunidad científica. Se observó que algunas combinaciones de compuestos bioactivos, con propiedades fisicoquímicas y funcionales definidas, dan origen a nuevos alimentos funcionales que mejoran en alto grado la salud de quienes los consumen con frecuencia. Los adelantos en el área de la microencapsulación mediante secado por aspersión son numerosos y coinciden con las nuevas tendencias de desarrollo e innovación en el ámbito alimentario.

Palabras clave: biocompuestos, encapsulación, estabilidad, secado, tecnología de alimentos

Technological aspects of the microencapsulation bioactive food compounds by spray-drying

Abstract

Spray-drying is widely used in the food industry for obtaining powdered products from the formation of small droplets inside a drying chamber at a high temperature. This drying technique has been applied to the formation of microcapsules with functional compounds to supplement food by adding one or more essential ingredients that can benefit human health. This review collects information on the principle and operating conditions involved in microencapsulation by spray-drying: the wall materials used, its influence on the physicochemical and functional properties of the microcapsules obtained, quality problems in microcapsules, and the release of bioactive compounds. It also includes studies related to microencapsulation of vitamins, minerals, oily substances, antioxidants, and probiotic microorganisms. We searched for scientific information published between 2010 and 2020 in high impact databases in the scientific community, for a total of 78 related studies. We observed that some combinations of bioactive compounds, with defined physicochemical and functional properties, give rise to new functional foods that massively improve the health of frequent consumers. The advances in microencapsulation by spray-drying are numerous and related to the new development and innovation trends in the food field.

Keywords: biocomposites, drying, encapsulation, food technology, stability

Introducción

La microencapsulación es una técnica empleada para proteger compuestos activos y nutraceuticos (Ribeiro et al., 2020) y consiste en recubrir de manera uniforme los ingredientes funcionales (vitaminas, enzimas, fenoles, moléculas y células) con una película polimérica para obtener cápsulas de tamaño micrométrico (Dhakal & He, 2020; Ozkan et al., 2019; Ribeiro et al., 2020). El proceso de encapsulación se puede llevar a cabo en gases, gotas líquidas o pequeñas partículas sólidas (Ozkan et al., 2019). La película actúa como barrera para proteger el compuesto activo del entorno circundante, controlar su liberación, evitar la interacción con otros ingredientes y mejorar la estabilidad de los compuestos (Ribeiro et al., 2020).

Los compuestos bioactivos son, en su mayoría, metabolitos secundarios separados de productos naturales como animales, plantas, hongos y microorganismos (Banožić et al., 2020; Zhang, Wen et al., 2020). Son ampliamente utilizados en el tratamiento de enfermedades y en la fabricación de alimentos funcionales (Banožić et al., 2020; Zhang, Wen et al., 2020); es decir, productos que incorporan o mejoran ingredientes nutricionales con beneficios potenciales para la salud como, por ejemplo, alimentos con nutrientes o componentes adicionales; alimentos en los cuales se ha eliminado, reemplazado o reducido un componente nocivo, y alimentos cuya composición ha sido mejorada naturalmente (Contreras-Rodríguez et al., 2020).

Se han reconocido numerosos ingredientes activos para mejorar la salud humana: fibra dietética, oligosacáridos, alcoholes de azúcar, aminoácidos, péptidos y proteínas; glucósidos, alcoholes, isoprenos y vitaminas; colinas, bacterias acidolácticas, minerales, ácidos grasos insaturados, fitoquímicos y antioxidantes (Ye et al., 2018). La presente revisión se enfocó en componentes esenciales microencapsulados como vitaminas, minerales, sustancias oleosas, antioxidantes y microorganismos probióticos, los cuales son sensibles a condiciones como calor, luz y pH bajo (Lucas et al., 2020; Ye et al., 2018).

La incorporación directa de compuestos bioactivos y nutraceuticos en matrices alimentarias presenta dificultades relacionadas con baja solubilidad, defectos en la calidad de los productos (cambios negativos en color, textura, sabor y apariencia), pérdida de la funcionalidad ocasionada por las operaciones de procesamiento y almacenamiento del alimento, y degradación por enzimas digestivas y condiciones ambientales desfavorables (oxígeno, luz y temperatura) (Mohammadian et al., 2020). La microencapsulación es una solución tecnológica para optimizar la preservación de ingredientes activos en materias primas y alimentos durante su procesamiento y almacenamiento (Favaro-Trindade et al., 2020; Ye et al., 2018). Para reducir su deterioro térmico y lograr su incorporación y liberación controlada en el organismo, se han introducido varias estrategias de microencapsulación como, por ejemplo, el secado por aspersión (Lucas et al., 2020; Ye et al., 2018).

El secado por aspersión es la técnica de microencapsulación más antigua, utilizada debido a su capacidad de evaporar la humedad rápidamente y mantener una temperatura baja en las partículas. En esta técnica, la formación de microcápsulas implica la homogeneización de los materiales del núcleo (compuestos bioactivos) y los materiales de la pared (polisacáridos y proteínas) para crear una emulsión seguida de la atomización en la cámara de secado (Dhakil & He, 2020). Este proceso permite el procesamiento de materiales líquidos sensibles al calor sin disminuir significativamente su calidad y su funcionamiento es continuo y económico (Mujumdar, 2014; Ye et al., 2018). Además, se ha señalado que el deterioro por altas temperaturas en el producto es relativamente pequeño debido a los cortos tiempos del procedimiento (Campelo et al., 2018; Cortés-Rojas et al., 2015).

Esta revisión tiene como propósito recopilar información científica actualizada sobre los aspectos tecnológicos más relevantes del proceso de microencapsulación de compuestos bioactivos y funcionales (vitaminas, minerales, sustancias oleosas, antioxidantes y probióticos) dentro de matrices alimentarias mediante la técnica de secado por aspersión, específicamente sobre su principio tecnológico, sus propiedades fisicoquímicas, los materiales pared empleados y las condiciones de operación aplicadas para el desarrollo e innovación de alimentos funcionales.

Materiales y métodos

Se consultaron las bases de datos ScienceDirect, PubMed, SciELO y Springer con los siguientes descriptores de búsqueda: “microencapsulation”, “spray dryer”, “food matrix”, “functional food”, “nutrients”, “wall material”, “physicochemical and functional properties”, “antioxidant”, “vitamins” y “probiotics”. Estas palabras clave se combinaron de diferentes formas para obtener resultados de búsqueda afines al tema de estudio.

De los artículos obtenidos, se seleccionaron los publicados entre los años 2010 y 2020, se organizaron según los temas escogidos para cada sección y se analizaron para extraer información relacionada con la temática de investigación.

Resultados y discusión

Principio del secado por aspersión en procesos de microencapsulación

En el proceso de secado por aspersión, la alimentación ingresa a la cámara de secado y allí se atomiza, lo que aumenta la relación superficie/volumen de la gota asperjada y la transferencia de masa y calor. A su vez, las diferencias en la presión de vapor de las gotas y el aire caliente hacen que el disolvente de las gotas se transfiera a la corriente de gas (Poozesh & Bilgili, 2019; Tontul & Topuz, 2017). Dentro de la cámara de secado, una corriente de aire caliente a gran volumen como medio secante entra en contacto con otra corriente de partículas (10-500 μm de diámetro) con una gran área superficial, a través de la cual ocurre la evaporación de la humedad. Este proceso está sujeto a algunas características de diseño del secador como el tipo de boquilla, las temperaturas de operación, la velocidad de flujo y la presión aplicada (Tan et al., 2015; Wei et al., 2019). El aire se expande adiabáticamente desde la boquilla con pequeños orificios a la cámara de secado y su temperatura cae de forma casi instantánea (Morales-Guzmán et al., 2010).

Las partículas formadas durante la evaporación instantánea chocan con las paredes de la cámara de secado y pasan a un separador ciclónico (Lisboa et al., 2018), gracias al ajuste de la capacidad de alimentación, atomización y secado, con el caudal de aire caliente y la altura de la columna de secado (Paudel et al., 2013; Poozesh & Bilgili, 2019). El principal objetivo de la aplicación del secado por aspersión para la microencapsulación de compuestos bioactivos es construir una barrera entre el componente encapsulado y el medio ambiente, para evitar las reacciones químicas de deterioro y el contacto del encapsulado con otros ingredientes (Martínez et al., 2015).

Condiciones de operación

En este proceso, al considerar las características térmicas de los materiales, se pueden obtener compuestos con propiedades fisicoquímicas y estructurales que preservan las cualidades funcionales del material encapsulado, a bajo costo, en tiempos cortos de procesamiento y con un amplio número de materiales pared. Estas características confieren a esta técnica de secado numerosas ventajas para la protección de diversos compuestos bioactivos (Rodríguez-Restrepo et al., 2017; Solanki et al., 2013).

Se debe tener bien controlada la humedad del aire; esta es una variable crítica, ya que, si existe un contenido de humedad muy alto en el aire, el proceso de desecación tardará más en completarse. Además, el proceso de microencapsulación debe realizarse a bajas presiones, con diferentes capacidades de alimentación y una temperatura no elevada al interior del equipo, pues esto podría generar la pérdida de nutrientes en el material microencapsulado (Morales-Medina et al., 2016; Rodríguez-Huezo et al., 2014). El diámetro de los orificios en la boquilla dentro del atomizador determinará el tamaño de las partículas que entran a la cámara de secado (Morales-Guzmán et al., 2010). El fluido que ingresa a esta cámara debe estar concentrado y tener entre 30-50 % de sólidos para que el proceso sea eficiente y rápido (Rajabi et al., 2015). Al final del procedimiento, se obtiene un polvo fino cuyo tamaño de partícula puede ajustarse variando las condiciones operacionales de la atomización del fluido previamente concentrado (Poozesh & Bilgili, 2019).

Otros parámetros de operación como el tipo de boquilla, la capacidad del secador, la velocidad de flujo, la posición del atomizador en relación con el aire dispersor, el mecanismo para calentar del aire y el tipo de atomizador se relacionan con el diseño del secador y pueden ser predichas mediante simulación computacional, considerando las propiedades fisicoquímicas de la mezcla en función de variables operacionales de respuesta que determinarán la calidad del producto final (Wei et al., 2019). Por último, es necesario tener en cuenta que la transferencia simultánea de calor y masa gobierna el proceso de secado por aspersión y afecta directamente sus condiciones de operación (Islam et al., 2016).

Materiales de pared

En el proceso de microencapsulación de ingredientes alimentarios mediante secado por aspersión, se han empleado como materiales de pared carbohidratos, gomas, biopolímeros, coloides, ceras, proteínas y almidones, dado que presentan bajas viscosidades, alto contenido en sólidos y alta solubilidad (Cano-Chauca et al., 2011). La elección del material a utilizar depende de las propiedades físicas del núcleo (porosidad, solubilidad), la pared (viscosidad, temperatura de transición vítrea, capacidad de formación de película) y la compatibilidad del núcleo con la pared. Además, se deben tener en cuenta las condiciones del proceso de encapsulación y el uso final del producto (Costa et al., 2015). Las microcápsulas obtenidas

pueden estar conformadas por una o varias capas que contienen uno o más núcleos de forma esférica o irregular (Saifullah et al., 2019) (figura 1).

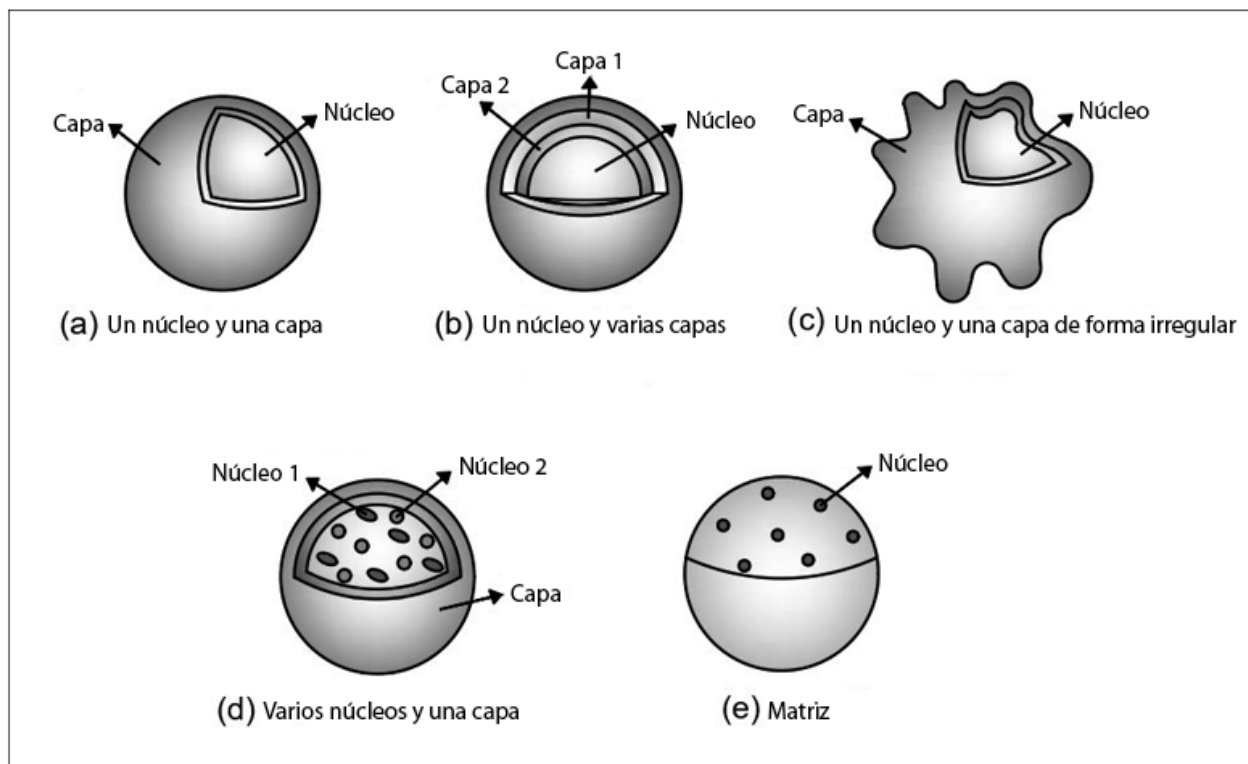


Figura 1. Formas de las microcápsulas obtenidas en el secado por aspersión. *a.* Un solo núcleo con una capa; *b.* Un solo núcleo con varias capas; *c.* Un solo núcleo y una capa de forma irregular; *d.* Varios núcleos dentro de una capa; *e.* En forma de matriz.

Fuente: Adaptada de Saifullah et al. (2019)

Algunos de los materiales de pared que han sido empleados en la encapsulación y microencapsulación de compuestos bioactivos se describen en la tabla 1. Adicionalmente, se relacionan algunos de los resultados obtenidos con estos materiales por diferentes investigadores.

Tabla 1. Materiales de pared empleados en la encapsulación y microencapsulación de compuestos bioactivos

Alimento o compuesto encapsulado	Material pared	Resultados	Autores
Zumo de sandía (<i>Citrullus lanatus</i>)	Maltodextrina	<ul style="list-style-type: none"> El uso de maltodextrina facilitó el proceso de secado al disminuir la pegajosidad del polvo de sandía. Con el aumento de la concentración de maltodextrina disminuye el contenido de humedad, mientras que aumenta el tiempo de reconstitución y el contenido de azúcares reductores. 	Oberoi & Sogi (2015)
Zumo de guayaba (<i>Psidium guajava</i>)	Maltodextrina	<ul style="list-style-type: none"> La temperatura de entrada y la concentración de maltodextrina influyen significativamente en las propiedades del polvo (humedad, densidad, color, rendimiento). 	Shishir et al. (2014)
Extracto de <i>Amaranthus gangeticus</i>	Maltodextrina en combinación con β -ciclodextrina	<ul style="list-style-type: none"> La temperatura de entrada y la concentración de β-ciclodextrina tienen un efecto lineal positivo sobre el tamaño de partícula. 	Chong et al. (2014)
Azafrán	Goma arábica en combinación con maltodextrina y gelatina	<ul style="list-style-type: none"> Una mayor concentración de sólidos genera mayor tamaño de partícula, menor contenido de humedad y mayor rendimiento. Se ha demostrado que la goma arábica funciona mejor en combinación con otros materiales de pared como la maltodextrina. 	Rajabi et al. (2015)
<i>Saccharomyces boulardii</i>	Gelatina, proteína de suero, almidón modificado, maltodextrina, proteína de guisante y goma arábica	<ul style="list-style-type: none"> La gelatina y la goma arábica se pueden recomendar como materiales pared prometedores para la microencapsulación de <i>S. boulardii</i>. 	Arslan et al. (2015)
Zumo de granada (<i>Punica granatum</i>)	Goma arábica en combinación con maltodextrina y almidón céreo	<ul style="list-style-type: none"> El tipo y la cantidad de material pared influyen en la solubilidad del polvo. El uso de goma arábica conduce a mejores propiedades físicas (rendimiento, densidad aparente, solubilidad y morfología del polvo), mientras que el uso de maltodextrina conduce a mejores propiedades de color y contenido de antocianinas. Es recomendable usar la goma arábica y la maltodextrina en combinación. 	Yousefi et al. (2011)
Ácido fólico	Goma arábica en combinación con maltodextrina	<ul style="list-style-type: none"> La goma arábica como material de pared presenta un papel importante en la fotoprotección del ácido fólico debido a su limitada permeabilidad al oxígeno. 	Lopera & Gallardo (2010)
Extracto de ajo (<i>Allium sativum</i>)	Almidón modificado en combinación con goma acacia y una mezcla comercial de gomas	<ul style="list-style-type: none"> El almidón modificado en combinación con la mezcla comercial de gomas resultó ser el mejor material encapsulante, ya que presentó mejores características en el producto final. 	Gil et al. (2011)
Flor de Jamaica (<i>Hibiscus sabdariffa</i>)	Almidón modificado	<ul style="list-style-type: none"> A mayor concentración de sólidos y menor temperatura de secado, se obtuvo mayor eficiencia de microencapsulación. El almidón de achira modificado química y físicamente tiene un alto potencial de uso como material de pared. 	Gómez-Aldapa et al. (2019)

(Continúa)

(Continuación tabla 1)

Ácido gálico	Mucílago de <i>Aloe vera</i>	<ul style="list-style-type: none"> El <i>Aloe vera</i> representa un potencial agente encapsulante con aplicaciones industriales relacionadas con antioxidantes, productos farmacéuticos, alimentos funcionales y pigmentos orgánicos. 	Medina-Torres et al. (2019)
Ácido gálico	Mucílago de nopal (<i>Opuntia ficus-indica</i>)	<ul style="list-style-type: none"> Se propone el mucílago de nopal como un material pared eficaz en alimentos bioactivos y funcionales, por su buena capacidad de encapsulación. 	Medina-Torres et al. (2013)
Eugenol	Proteína de suero y maltodextrina en combinación con ácido oleico y quitosano	<ul style="list-style-type: none"> Las formulaciones con proteína de suero como material pared y maltodextrina como coadyuvante mostraron una mayor eficiencia de encapsulación del eugenol. 	Talón et al. (2019)
Extracto de ajo (<i>Allium sativum</i>)	Proteína de suero y quitosano	<ul style="list-style-type: none"> El complejo formado por proteína de suero y quitosano es una buena alternativa como material de pared para proteger los compuestos bioactivos de extracto de ajo. 	Tavares & Zapata (2019)
Aceite de sardina	Quitosano injertado con ácido vanílico	<ul style="list-style-type: none"> Las propiedades antioxidantes y el comportamiento reológico del material de pared dieron como resultado una buena eficiencia de encapsulación y mantuvieron la estabilidad oxidativa del aceite encapsulado durante el almacenamiento. Se obtienen mejores resultados cuando el quitosano se usa en combinación con otros materiales. 	Vishnu et al. (2017)

Fuente: Elaboración propia

Los requisitos de un material de pared ideal para el secado por aspersión incluyen un alto grado de solubilidad, buenas propiedades emulsionantes, óptimas cualidades de secado, carácter no higroscópico, sabor suave, baja reactividad y bajo costo (Gómez-Aldapa et al., 2019).

Influencia del secado por aspersión en las propiedades fisicoquímicas y funcionales

Estos parámetros ayudan a entender la estructura, la distribución y la conformación de las partículas que componen una matriz alimentaria y los cambios que se pueden producir en el material microencapsulado. Los productos microencapsulados mediante esta técnica poseen características y propiedades iniciales que dependen del tipo de matriz alimentaria (Zhang, Khoo et al., 2020).

Tamaño de partícula

El tamaño y la forma de partícula varían en cada alimento y pueden verse afectados por las propiedades del líquido a secar y las condiciones de operación del proceso (Chong et al., 2014). Entre los métodos más comunes para determinar el tamaño de las partículas se encuentran los ópticos, basados principalmente en la dispersión de luz (Carneiro et al., 2013; Da Silva et al., 2013; Edris et al., 2016; Medina-Torres et al.,

2019). En el caso de los pigmentos de betacianina extraída de amaranto rojo (*Amaranthus gangeticus*), el tamaño de partícula obtenido fue de 44,44 a 49,44 μm usando β -ciclodextrina como material encapsulante y de 48,98 a 58,39 μm usando maltodextrina (Chong et al., 2014).

Para el polvo de propóleos con goma arábica en proporción 1:6, el tamaño de partícula promedio fue de $24,0 \pm 0,6 \mu\text{m}$ y en proporción 1:4 fue de $23,3 \pm 0,4 \mu\text{m}$. Usando almidón con ácido octenil succínico (OSA) como encapsulante en las mismas proporciones (1:6 y 1:4), se obtuvieron tamaños de partícula promedio de $15,0 \pm 0,3 \mu\text{m}$ y $16,0 \pm 0,0 \mu\text{m}$, respectivamente, los cuales fueron menores que el polvo de propóleos obtenido con el uso de goma arábica (Da Silva et al., 2013).

Otros estudios sobre la elaboración de polvos a partir de sustancias oleosas como aceite de linaza y oleorresina de *Nigella sativa*, que tenían en común la combinación de maltodextrina con goma arábica como material pared, mostraron resultados similares: para el aceite de linaza, el tamaño de partícula promedio fue de $23,03 \pm 0,31 \mu\text{m}$ y para la oleorresina de *Nigella sativa* fue de $28,30 \mu\text{m}$. La diferencia entre los resultados fue atribuida a las condiciones de secado y la formulación de la emulsión antes del proceso de secado, lo que incluye las proporciones entre los encapsulantes y el compuesto a encapsular (Carneiro et al., 2013; Edris et al., 2016). Según estos resultados, se puede observar que el uso de goma arábica como agente encapsulante produce un mayor tamaño de partícula. También se ha encontrado que las partículas más pequeñas se unen a otras partículas cercanas de mayor tamaño y, como consecuencia, el tamaño de partícula obtenido se hace aún mayor (Islam et al., 2016).

Contenido de humedad y actividad de agua

La humedad de entrada de la muestra o dispersión alimentaria en la cámara de secado influye directamente sobre el tiempo de residencia de la muestra en la cámara y la humedad final del producto (Daza et al., 2016; Goula & Adamopoulos, 2010). El contenido de humedad puede establecerse mediante un horno o una estufa (Goula & Adamopoulos, 2010), analizadores de humedad como los conductímetros, el método de Karl Fisher (Daza et al., 2016) o balanzas infrarrojas (Medina-Torres et al., 2019). Para conservar la calidad de los productos alimenticios, especialmente de los elaborados en polvo, es necesario disminuir su contenido de humedad. Si se establece una mayor diferencia entre las temperaturas del aire y el producto a secar, la velocidad de transferencia de calor será mayor (Daza et al., 2016; Goula & Adamopoulos, 2010).

Los contenidos de humedad de los productos en polvo obtenidos mediante secado por aspersión varían entre 1,50 % y 9,55 %; un bajo contenido de humedad evita la aglomeración entre partículas y mejora la dispersión del polvo (Daza et al., 2016; Goula & Adamopoulos, 2010; Medina-Torres et al., 2019). El contenido de humedad promedio para el polvo de propóleos con agentes encapsulantes de goma arábica y almidón OSA en proporción 1:6 fue de $9,3 \pm 0,4 \%$ y $4,9 \pm 0,3 \%$, respectivamente; en proporción 1:4 fue de $12,6 \pm 0,4 \%$ para goma arábica y de $7,2 \pm 0,6 \%$ para el almidón OSA (Da Silva et al., 2013). En estos resultados, se puede observar un mayor contenido de humedad con el uso de goma arábica en diferentes proporciones, lo que puede ser negativo para el producto, ya que, a mayor contenido de humedad, menor estabilidad.

En otro estudio sobre el secado de nanopartículas lipídicas sólidas (SLN, por su sigla en inglés) de grado alimenticio y transportadores lipídicos nanoestructurados (NLC, por su sigla en inglés), que contienen aceite de pescado con omega 3 y dos tipos diferentes de maltodextrina (DE 6 y DE 21) como materiales

protectores de las partículas de lípidos a diferentes temperaturas de entrada, Salminen et al. (2019) obtuvieron contenidos de humedad menores de 5,5 %. El rango de contenido de humedad más bajo fue para las partículas NLC con maltodextrina DE 21 (2,52-3,20 %) y el más alto fue para SLN con maltodextrina DE 6 (3,89-5,35 %) (Salminen et al., 2019).

Otro parámetro que guarda relación con el contenido de humedad es la actividad de agua (a_w). Para Caliskan y Dirim (2016), una alta eliminación de agua por incremento de la temperatura de secado influye en la disminución de la a_w , dado que una temperatura elevada proporciona una velocidad de transferencia de calor mayor, la cual genera la fuerza impulsora para la evaporación de la humedad y contribuye a la estabilidad química y microbiológica del alimento en polvo. Por su parte, Da Silva et al. (2013) reportaron actividades de agua entre 0,25 y 0,39 y Salminen et al. (2019) registraron valores en un rango de 0,13-0,29, resultados esperados que permiten asegurar la estabilidad microbiológica.

La actividad de agua está relacionada estrechamente con el contenido de humedad; esta relación se modela por medio de isotermas de sorción para representar la energía requerida o disipada durante los procesos (Da Silva et al., 2013; De Souza et al., 2015). En cuanto al polvo de propóleos, Da Silva et al. (2013) determinaron que los polvos con goma arábica fueron más higroscópicos que los de almidón OSA, aunque, al evaluar la estabilidad de los compuestos a temperaturas de almacenamiento de 10 °C y 25 °C, determinaron que esta no resultaba afectada con ninguno de los dos encapsulantes y, por lo tanto, el polvo de propóleos se podía almacenar a temperatura ambiente.

Temperatura de transición vítrea

Este parámetro ayuda a controlar la adhesividad, el apelmazamiento y las reacciones químicas adversas que se puedan presentar en las partículas del alimento en polvo (Medina-Torres et al., 2019) y, por lo tanto, puede ser utilizado para predecir la estabilidad de los alimentos secados y las microcápsulas obtenidas por aspersión (Daza et al., 2016; Islam et al., 2016). Esta propiedad ha sido empleada para medir la estabilidad en jugos y extractos de fruta. Goula y Adamopoulos (2010) obtuvieron valores de temperatura de transición vítrea (T_g) dentro del rango de 33-126 °C, que dependieron de la muestra y la composición, y observó un efecto positivo en la T_g al disminuir la movilidad molecular, lo que mejora la estabilidad de los polvos (Daza et al., 2016; Goula & Adamopoulos, 2010).

En compuestos bioactivos, se observó que, con diversos materiales de pared, la variación en esta propiedad térmica fue de 44,98 °C a 53,35 °C al aplicar secado por aspersión, lo que generó como resultado positivo un estado vítreo a temperatura ambiente (Ramakrishnan et al., 2018). De acuerdo con Caparino et al. (2012), el almidón puede presentar una T_g de 250 °C y, en la maltodextrina con diferente grado de hidrólisis, puede estar entre 100-188 °C. Una T_g alta es ideal para los polvos porque mejora la estabilidad y genera una mayor conservación (Medina-Torres et al., 2019; Ramakrishnan et al., 2018).

Solubilidad

Es la rapidez con la que las partículas del polvo alcanzan la disolución en agua, se dispersan y se humectan completamente (Cortés-Rojas et al., 2015; Daza et al., 2016). Se ha observado una mayor solubilidad acuosa y biodisponibilidad de compuestos de interés a través de la formación de complejos con vehículos

como el aislado de proteína de suero para la curcumina (Liu et al., 2016). Asimismo, en los extractos de fruta de cagaita (*Eugenia dysenterica*), la goma arábiga y la inulina en cualquier concentración aumentaron la solubilidad, en mayor grado la goma arábiga (94,4-97,8 %) que la inulina (86,8-95,9 %) (Daza et al., 2016). La solubilidad de un polvo es muy importante para su reconstitución y la disponibilidad de los compuestos encapsulados; por lo general, los productos en polvo comerciales tienen una solubilidad mayor del 90 % (Cortés-Rojas et al., 2015; Daza et al., 2016).

Viscosidad

La viscosidad en los alimentos secados por aspersión varía ante los cambios de temperatura, concentración y velocidad de cizalla (Badui, 2013). En un estudio sobre la microencapsulación de sabor a fresa sintético, cuando la concentración del agente encapsulante aumentaba, la viscosidad aumentó así: de 0,04 Pa·s a 0,29 Pa·s con almidón modificado, de 0,04 Pa·s a 0,92 Pa·s con goma arábiga y de 0,04 Pa·s a 0,64 Pa·s con goma xantano (Pellicer et al., 2018).

En oleoresina de *Nigella sativa* encapsulada mediante goma arábiga y maltodextrina, la viscosidad de la emulsión fue de 0,76 Pa·s antes del proceso de secado. La alta viscosidad de la solución generó gotas grandes en el secado al usar una boquilla de dos fluidos compuesta por una punta interna con una abertura de 0,7 mm de diámetro y un anillo externo con una abertura de 1,5 mm de diámetro (Edris et al., 2016).

Por otro lado, en la encapsulación de cafeína con albúmina de huevo como vehículo encapsulante, Tan et al. (2020) encontraron que a partir de los 56 °C se evidenciaba un aumento exponencial en la viscosidad atribuido a la desnaturalización de la proteína como efecto de la temperatura. La temperatura del aire de entrada para el secado por aspersión en los estudios mencionados osciló entre 60 °C y 200 °C y la temperatura de salida, entre 23 °C y 101 °C (Edris et al., 2016; Pellicer et al., 2018; Tan et al., 2020).

Color

Este parámetro es un atributo físico que resulta afectado por las altas temperaturas de secado (Caparino et al., 2012). El color se ha medido en la mayoría de estudios con la ayuda del sistema de color CIELAB, también conocido como $L^*a^*b^*$. L^* indica la luminosidad, a^* señala los colores verde negativo y rojo positivo, y b^* representa los colores azul negativo y amarillo positivo. Este sistema también permite calcular otras coordenadas como el croma o pureza del color (C^*), el matiz o ángulo de tono (H°) y el cambio de color (ΔE) (Caparino et al., 2012). En adelante, se considerará la luminosidad como variable para establecer si las muestras secadas por aspersión pierden o ganan luminosidad por efecto del tratamiento térmico con temperaturas de entrada que oscilan entre 120 °C y 180 °C y temperaturas de salida entre 70 °C y 90 °C (Caparino et al., 2012; Daza et al., 2016; Ramakrishnan et al., 2018; Rezende et al., 2018).

En un estudio sobre los compuestos bioactivos obtenidos de pulpa y residuos de acerola, Rezende et al. (2018) evidenciaron una diferencia de color (más oscuros) en los valores de luminosidad (L^*) como consecuencia del proceso de secado por aspersión. En compuestos bioactivos de jugo de tamarindo (*Tamarindus indica*) analizados por Ramakrishnan et al. (2018), el aumento en el valor L^* luego de la adición del material pared disminuyó la intensidad del color en el producto final en polvo. De igual forma, en un estudio realizado en extractos de fruta de cagaita, Daza et al. (2016) encontraron que el valor de

L* aumentó por la influencia que tuvo el agente encapsulante y la temperatura de entrada del aire sobre el producto en polvo obtenido al final del proceso.

El aumento de la luminosidad es una consecuencia positiva del proceso de secado por aspersión, ya que afecta la percepción de calidad de un producto a simple vista. Por ello, esta propiedad es relevante al momento de elegir las condiciones de operación y los agentes encapsulantes durante la microencapsulación (Caparino et al., 2012).

Problemas de calidad en microcápsulas

Las microcápsulas obtenidas pueden experimentar un fenómeno físico no deseado conocido como aglomeración durante el procesamiento, el almacenamiento y el transporte de productos en polvo, los cuales deben ser finos, fluidos y de fácil manejo (Haider et al., 2018). Una excesiva aglomeración y fusión de las partículas de polvo conduce a la formación de grumos que ensucian y bloquean los equipos, lo cual, a su vez, aumenta los pasos de producción y puede obligar al uso de agentes antiaglomerantes, que generan costos adicionales. Para reducir el desperdicio del producto, estos inconvenientes se pueden evitar cuando se controlan las interacciones individuales de los polvos y las condiciones que las rigen (Haider et al., 2018).

Liberación de las microcápsulas durante su consumo

La liberación de los compuestos se puede dar mediante los siguientes mecanismos: *difusión*, en la que los compuestos se desplazan desde el interior de la matriz hacia la superficie hasta quedar libres (Parra, 2010); *disolución*, cuando el material pared se disuelve gracias a la influencia de factores externos (Parra, 2010; Saifullah et al., 2019); *fractura*, en la que el encapsulante se rompe debido a fuerzas externas o internas (Parra, 2010); *hinchazón*, debido a la absorción de líquido circundante, y *erosión*, en la que el material encapsulante se hace delgado y se degrada gradualmente (Saifullah et al., 2019). La liberación controlada es un método que permite definir la disponibilidad y los tiempos en que el compuesto encapsulado será liberado a determinada velocidad (Carlan et al., 2017).

En estudios sobre la microencapsulación de vitamina C, se han encontrado tasas de liberación del 95 % en 30 minutos usando un agente de reticulación como el quitosano (Carlan et al., 2017). En el caso de la vitamina B₁₂, el 100 % fue liberado en 120 minutos usando también quitosano; sin embargo, al usar alginato, el tiempo de liberación de esta vitamina fue de 15 minutos y con quitosano modificado fue de 10 minutos. También se reportó que en vitamina C la tasa del 100 % de liberación fue similar a la de la vitamina B₁₂ (Estevinho et al., 2016; Murugesan & Orsat, 2011).

Microencapsulación de vitaminas

Las vitaminas se consideran como sustancias sensibles a diferentes tipos de procesamiento en la industria, lo que afecta en gran medida su estabilidad y se refleja principalmente en propiedades como el color y el sabor (Hategekimana et al., 2015). Los estudios sobre las variables que influyen en el comportamiento, la degradación y la estabilidad de las vitaminas han demostrado que la encapsulación brinda las mejores condiciones para mantener su estabilidad (Murugesan & Orsat, 2011; Parra, 2010).

Hategekimana et al. (2015) han estudiado la microencapsulación mediante secado por aspersión de las vitaminas C, A, D, E y algunas del complejo B. Para la vitamina B12, con una temperatura de entrada de 120 °C, una temperatura de salida entre 53 °C y 58 °C y una boquilla estándar de 0,5 mm como condiciones de secado, Carlan et al. (2017) reportaron buenos resultados de estabilidad usando quitosano modificado como material pared. La microencapsulación mejora considerablemente la estabilidad de las vitaminas y les brinda protección ante oxidación, luz, temperatura, humedad y otros factores durante el tiempo de almacenamiento, de manera que su calidad puede ser óptima durante varios meses con una leve disminución en su concentración (Carlan et al., 2017).

Microencapsulación de minerales

Los minerales pueden reaccionar ante el oxígeno mediante liberación rápida, degradación química, agregación de proteínas y sensaciones de sabor desagradables (magnesio y hierro). Además, pueden experimentar reacciones durante el almacenamiento que comprometen su biodisponibilidad (antiminerales o quelantes) y la estabilidad de los alimentos que los contienen (Salminen et al., 2019; Ye et al., 2018). Wang et al. (2016) aplicaron la encapsulación mediante secado por aspersión para desarrollar formulaciones en polvo de bebidas instantáneas funcionales. La mezcla de pectina-caseína como material pared y la adición de aceite de menta como potencial agente antimicrobiano permitió la encapsulación simultánea de vitaminas hidrofílicas e hidrofóbicas con un pH de 4,5, prolongó la vida útil de sales minerales durante el almacenamiento en refrigeración y temperatura ambiente hasta por 15 días y conservó la actividad antioxidante de los nutrientes encapsulados.

Secado por aspersión en sustancias oleosas

Uno de los principales problemas asociados con los aceites ricos en ácidos grasos poliinsaturados es su alta tendencia al deterioro oxidativo y su consecuente producción de sabores indeseables (Carneiro et al., 2013). Ante la necesidad de proteger estos aceites para hacerlos más estables durante su manejo, procesamiento y almacenamiento, se ha demostrado que el secado por aspersión protege las gotas de aceite de una emulsión contra la oxidación lipídica, ayuda a controlar la liberación de ingredientes activos encapsulados y mejora su estabilidad en el almacenamiento (Hashib et al., 2015).

La selección del material pared influye en la estabilidad de la emulsión durante su formación y después del proceso de secado; además, su concentración puede afectar las características de las microcápsulas resultantes (Martínez et al., 2015). Esto ocurre con los polisacáridos o agentes tensoactivos de alto peso molecular, que al ser adicionados en exceso pueden permanecer libres en la fase acuosa y generar a largo plazo mecanismos de desestabilización como la floculación y la coalescencia de las gotas de aceite (Carneiro et al., 2013; Hernández et al., 2015).

El material pared empleado en la microencapsulación de ácidos grasos mediante secado por aspersión debe tener una alta solubilidad en agua, buenas propiedades emulsionantes (Campelo et al., 2018), un aroma neutro y baja viscosidad a altas concentraciones sólidas. Además, debe proporcionar buena protección contra la oxidación, tener bajo costo, baja toxicidad y buen rendimiento de producción de microcápsulas (Fernandes et al., 2016).

Además de conservar las propiedades nutricionales de los aceites y mejorar su estabilidad ante cambios fisicoquímicos (Luna-Guevara et al., 2017; Yingngam et al., 2019), la microencapsulación mediante secado por aspersión permite la obtención de alimentos funcionales a partir de la adición de los aceites encapsulados a cualquier tipo de alimento, con el fin de mejorar su calidad nutricional y aumentar el contenido de ácidos grasos esenciales y antioxidantes (Martínez et al., 2015).

Microencapsulación de antioxidantes

Las frutas se caracterizan por aportar cantidades significativas de agua, fibra y una gran variedad de vitaminas y minerales, tienen un bajo contenido en grasa y son fuente casi exclusiva de antioxidantes (Santos et al., 2019). Sin embargo, aunque el secado de las frutas aumenta la estabilidad del producto y mejora su manipulación, puede producir pérdidas de tipo nutracéutico debido a las temperaturas empleadas en el proceso, que pueden oscilar entre 140 °C y 180 °C en el aire de entrada y entre 60 °C y 110 °C en el aire de salida (Fang & Bhandari, 2011; Rezende et al., 2018; Santos et al., 2019).

Diferentes estudios han reportado la microencapsulación exitosa de compuestos bioactivos, como los obtenidos de la pulpa y los residuos de acerola (*Malpighia emarginata*), en los que el secado por aspersión presentó mejor retención de concentraciones de compuestos bioactivos en comparación con el secado por liofilización (Rezende et al., 2018). Asimismo, en antocianinas, compuestos fenólicos y actividad antioxidante en moras (*Rubus ulmifolius*), la encapsulación redujo la degradación de los antioxidantes ante los cambios de pH (Santos et al., 2019).

Microencapsulación de probióticos

La mayoría de los alimentos probióticos en el mercado actual son productos lácteos refrigerados. Sin embargo, recientemente se ha incrementado la venta de probióticos no lácteos tales como horneados, cárnicos, productos a base de frutas y leguminosas, mayonesas y productos a base de chocolate, como alternativa para disminuir los riesgos relacionados con la intolerancia a la lactosa, las alergias producidas por proteínas lácteas y el consumo de grasas saturadas y colesterol (Rouf et al., 2018).

Se ha determinado que los probióticos deberían sobrevivir en un número significativo de 10^6 UFC/g a 10^8 UFC/g, aunque el número varía de una cepa probiótica a otra (Martín et al., 2015). El crecimiento y la supervivencia de los probióticos están determinados por las propiedades de los alimentos (disponibilidad de agua, pH, capacidad de amortiguación, entre otras) y las condiciones de almacenamiento (temperatura, humedad relativa y atmósfera) (Tripathi & Giri, 2014). La microencapsulación es el mecanismo ideal para mejorar la viabilidad de probióticos en algunas matrices alimentarias; de hecho, durante los últimos años, se han introducido productos alimenticios comerciales que contienen células probióticas encapsuladas (Tripathi & Giri, 2014).

Algunos investigadores han reportado valores de viabilidad de microorganismos encapsulados mediante secado por aspersión dentro del rango de 10^7 UFC/g a 10^{10} UFC/g, entre los que se destacan *Lactobacillus paracasei* (Cassanego et al., 2015), *Lactobacillus acidophilus* (Yonekura et al., 2014) y una terna microbiana probiótica de *Bacillus polymyxa*, *Bacillus megaterium* y *Lactobacillus delbrueckii* subsp. *bulgaricus* (De Araújo-Urbe et al., 2018).

En un estudio reciente, Huang et al. (2017) realizaron un secado por aspersión a escala piloto para la microencapsulación de *L. casei* y *P. freudenreichii* y obtuvieron una supervivencia del 100 %, independientemente de la cepa probiótica utilizada, operando a temperaturas más bajas, con suero hiperconcentrado de sales inorgánicas de calcio (Ca^{2+}) como material pared, el cual generó un aumento en la tolerancia al calor, al ácido y a las sales biliares de las microcápsulas obtenidas.

Conclusiones

Numerosas investigaciones se han llevado a cabo sobre la aplicación del secado por aspersión para la microencapsulación de compuestos bioactivos. Esta operación unitaria es muy versátil y tiene diversidad de aplicaciones, entre las que se destaca la prolongación de la vida útil de materias primas alimentarias mediante el análisis de las isotermas de absorción, que relacionan el contenido de humedad en equilibrio y la actividad de agua.

El material pared tiene un gran impacto en diferentes características de encapsulación como la estabilidad, la solubilidad, el tamaño de partícula, las propiedades sensoriales (color y sabor) y el poder antioxidante.

El proceso de microencapsulación mediante secado por aspersión contribuye notablemente a la fortificación y el enriquecimiento de los alimentos, al incorporar vitaminas y minerales de diferente naturaleza química. Asimismo, esta tecnología permite la liberación controlada del componente bioactivo y permite el incremento en su biodisponibilidad por parte del organismo. La encapsulación de probióticos mediante secado por aspersión se está aplicando con éxito en alimentos no lácteos, lo que ha generado el desarrollo de nuevas opciones de alimentación funcional.

Existe una tendencia creciente a reemplazar los materiales encapsulantes tradicionales por nuevos compuestos de origen natural, de amplia disponibilidad y bajo costo. Esto puede impulsar la variedad y la oferta de materias primas en el mercado de encapsulantes al incluir subproductos agroindustriales para este fin. Además, los subproductos pueden utilizarse como ingredientes biofuncionales capaces de contrarrestar enfermedades crónicas y de alta prevalencia en la población global.

Agradecimientos

Los autores agradecen al Laboratorio de Análisis Sensorial e Industrialización del Café de la Universidad de Caldas, por su apoyo en la recopilación de la información necesaria para preparar el presente manuscrito.

Descargos de responsabilidad

Todos los autores realizaron aportes significativos al documento, están de acuerdo con su publicación y manifiestan que no existen conflictos de interés en este estudio.

Referencias

- Arslan, S., Erbas, M., Tontul, I., & Topuz, A. (2015). Microencapsulation of probiotic *Saccharomyces cerevisiae* var. *boulardii* with different wall materials by spray drying. *LWT - Food Science and Technology*, *63*(1), 685-690. <https://doi.org/10.1016/j.lwt.2015.03.034>
- Badui, S. (2013). *Química de los alimentos* (5th ed.). Pearson Educación.
- Banožić, M., Babić, J., & Jokić, S. (2020). Recent advances in extraction of bioactive compounds from tobacco industrial waste-a review. *Industrial Crops and Products*, *144*, 112009. <https://doi.org/10.1016/j.indcrop.2019.112009>
- Caliskan, G., & Dirim, S. (2016). The effect of different drying processes and the amounts of maltodextrin addition on the powder properties of sumac extract powders. *Powder Technology*, *287*, 308-314. <https://doi.org/10.1016/j.powtec.2015.10.019>
- Campelo, P., Sanches, E., De Barros Fernandes, R., Botrel, D., & Borges, S. (2018). Stability of lime essential oil microparticles produced with protein-carbohydrate blends. *Food Research International*, *105*, 936-944. <https://doi.org/10.1016/j.foodres.2017.12.034>
- Cano-Chauca, M., Stringheta, P., Barbosa, S., Fonseca, K., & Silva, F. (2011). Influence of microstructure on the hygroscopic behaviour of mango powdered obtained by spray drying. *African Journal of Food Science*, *5*, 148-155.
- Caparino, O., Tang, J., Nindo, C., Sablani, S., Powers, J., & Fellman, J. (2012). Effect of drying methods on the physical properties and microstructures of mango (*Philippine "Carabao" var.*) powder. *Journal of Food Engineering*, *111*(1), 135-148. <https://doi.org/10.1016/j.jfoodeng.2012.01.010>
- Carlan, I., Estevinho, B., & Rocha, F. (2017). Study of microencapsulation and controlled release of modified chitosan microparticles containing vitamin B12. *Powder Technology*, *318*, 162-169. <https://doi.org/10.1016/j.powtec.2017.05.041>
- Carneiro, H., Tonon, R., Grosso, C., & Hubinger, M. (2013). Encapsulation efficiency and oxidative stability of flaxseed oil microencapsulated by spray drying using different combinations of wall materials. *Journal of Food Engineering*, *115*(4), 443-451. <https://doi.org/10.1016/j.jfoodeng.2012.03.033>
- Cassanogo, E., Da Silva, T., Goulart, J., De Oliveira, G., & Sant'Anna, E. (2015). *Lactobacillus paracasei* isolated from grape sourdough: acid, bile, salt, and heat tolerance after spray drying with skim milk and cheese whey. *European Food Research and Technology*, *240*, 977-984. <https://doi.org/10.1007/s00217-014-2402-x>
- Chong, P., Yusof, Y., Aziz, M., Nazli, N., Chin, N., & Muhammad, S. (2014). Effects of spray drying conditions of microencapsulation of *Amaranthus gangeticus* extract on drying behaviour. *Agriculture and Agricultural Science Procedia*, *2*, 33-42. <https://doi.org/10.1016/j.aaspro.2014.11.006>
- Contreras-Rodríguez, O., Mata, F., Verdejo-Román, J., Ramírez-Bernabé, R., Moreno, D., Vilar-López, R., Soriano-Mas, C., & Verdejo-García, A. (2020). Neural-based valuation of functional foods among lean and obese individuals. *Nutrition Research*, *78*, 27-35. <https://doi.org/10.1016/j.nutres.2020.03.006>
- Cortés-Rojas, D., Fernandes, C., & Oliveira, W. (2015). Optimization of spray drying conditions for production of *Bidens pilosa* L. dried extract. *Chemical Engineering Research and Design*, *93*, 366-376. <https://doi.org/10.1016/j.cherd.2014.06.010>
- Costa, S., Souza, B., Martin, A., Bagnara, F., Ragadalli, S., & Costa, A. (2015). Drying by spray drying in the food industry: micro-encapsulation, process parameters and main carriers used. *African Journal of Food Science*, *9*(9), 462-470. <https://doi.org/10.5897/AJFS2015.1279>
- Da Silva, F., Rodrigues, C., De Alencar, S., Thomazini, M., De Carvalho, J., Pittia, P., & Favaro-Trindade, C. (2013). Assessment of production efficiency, physicochemical properties and storage stability of spray-dried propolis, a natural food additive, using gum Arabic and OSA starch-based carrier systems. *Food and Bioprocess Technology*, *91*(1), 28-36. <https://doi.org/10.1016/j.fbp.2012.08.006>

- Daza, L., Fujita, A., Fávaro-Trinda, C., Rodrigues-Ract, J., Granato, D., & Genovese, M. (2016). Effect of spray drying conditions on the physical properties of Cagaita (*Eugenia dysenterica* DC.) fruit extracts. *Food and Bioproducts Processing*, 97, 20-29. <https://doi.org/10.1016/j.fbp.2015.10.001>
- De Araújo-Urbe, N., Ruiz-Villadiego, O., Montoya-Campuzano, O., & Gutiérrez-Ramírez, L. (2018). Viability of probiotic bacteria *Bacillus polymyxa*, *Bacillus megaterium* and *Lactobacillus delbruekii* subsp. *bulgaricus* microencapsulated under the spray-drying technique. *DYNA*, 85(204), 272-276. <https://doi.org/10.15446/dyna.v85n204.61644>
- De Souza, V., Thomazini, M., De Carvalho, J., Fávaro-Trindade, C. (2015). Effect of spray drying on the physicochemical properties and color stability of the powdered pigment obtained from vinification byproducts of the Bordo grape (*Vitis labrusca*). *Food and Bioproducts Processing*, 93, 39-50. <https://doi.org/10.1016/j.fbp.2013.11.001>
- Dhakal, S., & He, J. (2020). Microencapsulation of vitamins in food applications to prevent losses in processing and storage: a review. *Food Research International*, 137, 109326. <https://doi.org/10.1016/j.foodres.2020.109326>
- Edris, A., Kalembe, D., Adamiec, J., & Piątkowski, M. (2016). Microencapsulation of *Nigella sativa* oleoresin by spray drying for food and nutraceutical applications. *Food Chemistry*, 204, 326-333. <https://doi.org/10.1016/j.foodchem.2016.02.143>
- Estevinho, B., Carlan, I., Blaga, A., & Rocha, F. (2016). Soluble vitamins (vitamin B12 and vitamin C) microencapsulated with different biopolymers by a spray drying process. *Powder Technology*, 289, 71-78. <https://doi.org/10.1016/j.powtec.2015.11.019>
- Fang, Z., & Bhandari, B. (2011). Effect of spray drying and storage on the stability of bayberry polyphenols. *Food Chemistry*, 129(3), 1139-1147. <https://doi.org/10.1016/j.foodchem.2011.05.093>
- Favaro-Trindade, C., Patel, B., Silva, M., Comunian, T., Federici, E., Jones, O., & Campanella, O. (2020). Microencapsulation as a tool to producing an extruded functional food. *LWT*, 128, 109433. <https://doi.org/10.1016/j.lwt.2020.109433>
- Fernandes, R., Borges, S., Silva, E., Da Silva, Y., De Souza, H., Do Carmo, E., De Oliveira, C., Yoshida, M., & Botrel, D. (2016). Study of ultrasound-assisted emulsions on microencapsulation of ginger essential oil by spray drying. *Industrial Crops and Products*, 94, 413-423. <https://doi.org/10.1016/j.indcrop.2016.09.010>
- Gil, M., Alzate, L., Sánchez-Camargo, A., & Millán, L. (2011). Secado por aspersión: una alternativa para la conservación de los compuestos bioactivos y aromáticos del extracto de ajo (*Allium sativum* L.). *Revista Lasallista de Investigación*, 8(2), 40-52. <http://repository.lasallista.edu.co:8080/ojs/index.php/rldi/article/view/25/14>
- Gómez-Aldapa, C., Castro-Rosas, J., Rangel-Vargas, E., Navarro-Cortez, R., Cabrera-Canales, Z., Díaz-Batalla, L., Martínez-Bustos, F., Guzmán-Ortiz, F., & Falfan-Cortez, R. (2019). A modified Achira (*Canna indica* L.) starch as a wall material for the encapsulation of *Hibiscus sabdariffa* extract using spray drying. *Food Research International*, 119, 547-553. <https://doi.org/10.1016/j.foodres.2018.10.031>
- Goula, A., & Adamopoulos, K. (2010). A new technique for spray drying orange juice concentrate. *Innovative Food Science & Emerging Technologies*, 11(2), 342-351. <https://doi.org/10.1016/j.ifset.2009.12.001>
- Haider, C., Niederreiter, G., Palzer, S., Hounslow, M., & Salman, A. (2018). Unwanted agglomeration of industrial amorphous food powder from a particle perspective. *Chemical Engineering Research and Design*, 132, 1160-1169. <https://doi.org/10.1016/j.cherd.2018.02.023>
- Hashib, S., Rahman, N., Suzihaque, M., Ibrahim, U., & Hanif, N. (2015). Effect of slurry concentration and inlet temperature towards glass temperature of spray dried pineapple powder. *Procedia - Social and Behavioral Sciences*, 195, 2660-2667. <https://doi.org/10.1016/j.sbspro.2015.06.472>
- Hategekimana, J., Masamba, K., Ma, J., & Zhong, F. (2015). Encapsulation of vitamin E: effect of physicochemical properties of wall material on retention and stability. *Carbohydrate Polymers*, 124, 172-179. <https://doi.org/10.1016/j.carbpol.2015.01.060>

- Hernández, M., Cuvelier, M.-E., & Turchiuli, C. (2015). Design of liquid emulsions to structure spray dried particles. *Journal of Food Engineering*, 167, Part B, 99-105. <https://doi.org/10.1016/j.jfoodeng.2015.07.036>
- Huang, S., Méjean, S., Rabah, H., Dolivet, A., Le Loir, Y., Chen, X., Jan, G., Jeantet, R., & Schuck, P. (2017). Double use of concentrated sweet whey for growth and spray drying of probiotics: towards maximal viability in pilot scale spray dryer. *Journal of Food Engineering*, 196, 11-17. <https://doi.org/10.1016/j.jfoodeng.2016.10.017>
- Islam, M., Kitamura, Y., Yamano, Y., & Kitamura, M. (2016). Effect of vacuum spray drying on the physicochemical properties, water sorption and glass transition phenomenon of orange juice powder. *Journal of Food Engineering*, 169, 131-140. <https://doi.org/10.1016/j.jfoodeng.2015.08.024>
- Lisboa, H., Duarte, M., & Cavalcanti-Mata, M. (2018). Modeling of food drying processes in industrial spray dryers. *Food and Bioprocess Technology*, 107, 49-60. <https://doi.org/10.1016/j.fbp.2017.09.006>
- Liu, W., Chen, X., Cheng, Z., & Selomulya, C. (2016). On enhancing the solubility of curcumin by microencapsulation in whey protein isolate via spray drying. *Journal of Food Engineering*, 169, 189-195. <https://doi.org/10.1016/j.jfoodeng.2015.08.034>
- Lopera, S. C., & Gallardo, C. C. (2010). Estudio de la fotodegradación de ácido fólico encapsulado en microesferas de goma arábica y maltodextrina. *Revista Cubana de Farmacia*, 44(4), 443-455.
- Lucas, J., Ralaivao, M., Estevinho, B., & Rocha, F. (2020). A new approach for the microencapsulation of curcumin by a spray drying method, in order to value food products. *Powder Technology*, 362, 428-435. <https://doi.org/10.1016/j.powtec.2019.11.095>
- Luna-Guevara, J., Ochoa-Velasco, C., Hernández-Carranza, P., & Guerrero-Beltrán, J. (2017). Microencapsulation of walnut, peanut and pecan oils by spray drying. *Food Structure*, 12, 26-32. <https://doi.org/10.1016/j.foos.2017.04.001>
- Martín, M., Lara-Villoslada, F., Ruiz, M., & Morales, M. (2015). Microencapsulation of bacteria: a review of different technologies and their impact on the probiotic effects. *Innovative Food Science & Emerging Technologies*, 27, 15-25. <https://doi.org/10.1016/j.ifset.2014.09.010>
- Martínez, M., Curti, M., Rocca, P., Llabot, J., Penci, M., Bodoira, R., & Ribotta, P. (2015). Oxidative stability of walnut (*Juglans regia* L.) and chia (*Salvia hispanica* L.) oils microencapsulated by spray drying. *Powder Technology*, 270, Part A, 271-277. <https://doi.org/10.1016/j.powtec.2014.10.031>
- Medina-Torres, L., García-Cruz, E., Calderas, F., González, R., Sánchez-Olivares, G., Gallegos-Infante, J., Rocha-Guzmán, N., & Rodríguez-Ramírez, J. (2013). Microencapsulation by spray drying of gallic acid with nopal mucilage (*Opuntia ficus indica*). *LWT - Food Science and Technology*, 50(2), 642-650. <https://doi.org/10.1016/j.lwt.2012.07.038>
- Medina-Torres, L., Núñez-Ramírez, D., Calderas, F., González-Laredo, R., Minjares-Fuentes, R., Valadez-García, M., Bernad-Bernad, M., & Manero, O. (2019). Microencapsulation of gallic acid by spray drying with aloe vera mucilage (*Aloe barbadensis* Miller) as wall material. *Industrial Crops and Products*, 138, 111461. <https://doi.org/10.1016/j.indcrop.2019.06.024>
- Mohammadian, M., Waly, M., Moghadam, M., Emam-Djomeh, Z., Salami, M., & Moosavi-Movahedi, A. (2020). Nanostructured food proteins as efficient systems for the encapsulation of bioactive compounds. *Food Science and Human Wellness*. <https://doi.org/10.1016/j.fshw.2020.04.009>
- Morales-Guzmán, J., Medina-Torres, M. G., Andrade-Esquivel, E., Guzmán-Maldonado, S. H., & Hernández-López, D. (2010). Evaluación de los efectos del secado por aspersión sobre los compuestos fitoquímicos-funcionales y características fisicoquímicas en encapsulados de zarzamora (*Rubus* spp). *XII Congreso Nacional de Ciencia y Tecnología de los Alimentos* (Universidad de Guanajuato, Universidad Autónoma de Nuevo León), Guanajuato, México. <https://bit.ly/3gEBCQA>
- Morales-Medina, R., Tamm, F., Guadix, A., Guadix, E., & Drusch, S. (2016). Functional and antioxidant properties of hydrolysates of sardine (*S. pilchardus*) and horse mackerel (*T. mediterraneus*) for the microencapsulation of fish oil by spray-drying. *Food Chemistry*, 194, 1208-1216. <https://doi.org/10.1016/j.foodchem.2015.08.122>
- Mujumdar, A. (Ed.). (2014). *Handbook of industrial drying* (4th ed.). CRC Press.

- Murugesan, R., & Orsat, V. (2011). Spray drying for the production of nutraceutical ingredients. A review. *Food and Bioprocess Technology*, 5(1), 3-14. <https://doi.org/10.1007/s11947-011-0638-z>
- Oberoi, D., & Sogi, D. (2015). Effect of drying methods and maltodextrin concentration on pigment content of watermelon juice powder. *Journal of Food Engineering*, 165, 172-178. <https://doi.org/10.1016/j.jfoodeng.2015.06.024>
- Ozkan, G., Franco, P., De Marco, I., Xiao, J., & Capanoglu, E. (2019). A review of microencapsulation methods for food antioxidants: principles, advantages, drawbacks and applications. *Food Chemistry*, 272, 494-506. <https://doi.org/10.1016/j.foodchem.2018.07.205>
- Parra, R. (2010). Revisión: microencapsulación de alimentos. *Revista Facultad Nacional de Agronomía Medellín*, 63(2), 5669-5684. <https://revistas.unal.edu.co/index.php/refame/article/view/25055/37055>
- Paudel, A., Worku, Z., Meeus, J., Guns, S., & Van den Mooter, G. (2013). Manufacturing of solid dispersions of poorly water soluble drugs by spray drying: formulation and process considerations. *International Journal of Pharmaceutics*, 453(1), 253-284. <https://doi.org/10.1016/j.ijpharm.2012.07.015>
- Pellicer, J., Fortea, M., Trabal, J., Rodríguez-López, M., Carazo-Díaz, C., Gabaldón, J., & Núñez-Delicado, E. (2018). Optimization of the microencapsulation of synthetic strawberry flavour with different blends of encapsulating agents using spray drying. *Powder Technology*, 338, 591-598. <https://doi.org/10.1016/j.powtec.2018.07.080>
- Poozesh, S., & Bilgili, E. (2019). Scale-up of pharmaceutical spray drying using scale-up rules: a review. *International Journal of Pharmaceutics*, 562, 271-292. <https://doi.org/10.1016/j.ijpharm.2019.03.047>
- Rajabi, H., Ghorbani, M., Jafari, S., Mahoonak, A., & Rajabzadeh, G. (2015). Retention of saffron bioactive components by spray drying encapsulation using maltodextrin, gum Arabic and gelatin as wall materials. *Food Hydrocolloids*, 51, 327-337. <https://doi.org/10.1016/j.foodhyd.2015.05.033>
- Ramakrishnan, Y., Adzahan, N., Yusof, Y., & Muhammad, K. (2018). Effect of wall materials on the spray drying efficiency, powder properties and stability of bioactive compounds in tamarillo juice microencapsulation. *Powder Technology*, 328, 406-414. <https://doi.org/10.1016/j.powtec.2017.12.018>
- Rezende, Y., Nogueira, J., & Narain, N. (2018). Microencapsulation of extracts of bioactive compounds obtained from acerola (*Malpighia emarginata* DC) pulp and residue by spray and freeze drying: chemical, morphological and chemometric characterization. *Food Chemistry*, 254, 281-291. <https://doi.org/10.1016/j.foodchem.2018.02.026>
- Ribeiro, A., Shahgol, M., Estevinho, B., & Rocha, F. (2020). Microencapsulation of vitamin A by spray-drying, using binary and ternary blends of gum Arabic, starch and maltodextrin. *Food Hydrocolloids*, 108, 106029. <https://doi.org/10.1016/j.foodhyd.2020.106029>
- Rodríguez-Huezo, M., Estrada-Fernández, A., García-Almendárez, B., Ludeña-Urquiza, F., Campos-Montiel, R., & Pimentel-González, D. (2014). Viability of *Lactobacillus plantarum* entrapped in double emulsion during Oaxaca cheese manufacture, melting and simulated intestinal conditions. *LWT - Food Science and Technology*, 59(2), Part 1, 768-773. <https://doi.org/10.1016/j.lwt.2014.07.004>
- Rodríguez-Restrepo, Y., Giraldo, G., & Rodríguez-Barona, S. (2017). Solubility as a fundamental variable in the characterization of wall material by spray drying of food components: application to microencapsulation of *Bifidobacterium animalis* subsp. *lactis*. *Journal of Food Process Engineering*, 40(6), e12557. <https://doi.org/10.1111/jfpe.12557>
- Rouf, S., Jan, T., & Sharma, P. (2018). Non-dairy probiotics – An emerging trend in health care products. *International Journal of Current Microbiology and Applied Sciences*, 7(10), 131-145. <https://doi.org/10.20546/ijcmas.2018.710.015>
- Saifullah, Md., Islam, M., Ferdowsi, R., Rahman M., & Vuong, V. (2019). Micro and nano encapsulation, retention and controlled release of flavor and aroma compounds: a critical review. *Trends in Food Science & Technology*, 86, 230-251. <https://doi.org/10.1016/j.tifs.2019.02.030>

- Salminen, H., Ankenbrand, J., Zeeb, B., Badolato G., Schäfer, C., Kohlus, R., & Weiss, J. (2019). Influence of spray drying on the stability of food-grade solid lipid nanoparticles. *Food Research International*, 119, 741-750. <https://doi.org/10.1016/j.foodres.2018.10.056>
- Santos, S., Rodrigues, L., Costa, S., & Madrona, G. (2019). Antioxidant compounds from blackberry (*Rubus fruticosus*) pomace: microencapsulation by spray-dryer and pH stability evaluation. *Food Packaging and Shelf Life*, 20, 100177. [https://doi.org/10.1016/j.fpsl.2017.12.001](https://doi.org/10.1016/j.foodres.2018.10.056)
- Shishir, M., Taip, F., Aziz, N., & Talib, R. (2014). Physical properties of spray-dried pink guava (*Psidium guajava*) powder. *Agriculture and Agricultural Science Procedia*, 2, 74-81. <https://doi.org/10.1016/j.aaspro.2014.11.011>
- Solanki, H., Pawar, D., Shah, D., Prajapati, V., Jani, G., Mulla, A., & Thakar, P. (2013). Development of microencapsulation delivery system for long-term preservation of probiotics as biotherapeutics agent. *BioMed Research International*, 2013, 620719. <https://doi.org/10.1155/2013/620719>
- Talón, E., Lampi, A., Vargas, M., Chiralt, A., Jouppila, K., & González-Martínez, C. (2019). Encapsulation of eugenol by spray-drying using whey protein isolate or lecithin: release kinetics, antioxidant and antimicrobial properties. *Food Chemistry*, 295, 588-598. <https://doi.org/10.1016/j.foodchem.2019.05.115>
- Tan, S., Kha, T., Parks, S., Stathopoulos, C., & Roach, P. (2015). Effects of the spray-drying temperatures on the physicochemical properties of an encapsulated bitter melon aqueous extract powder. *Powder Technology*, 281, 65-75. <https://doi.org/10.1016/j.powtec.2015.04.074>
- Tan, S., Zhong, C., & Langrish, T. (2020). Encapsulation of caffeine in spray-dried micro-eggs for controlled release: The effect of spray-drying (cooking) temperature. *Food Hydrocolloids*, 108, 105979. <https://doi.org/10.1016/j.foodhyd.2020.105979>
- Tavares, L., & Zapata, C. (2019). Encapsulation of garlic extract using complex coacervation with whey protein isolate and chitosan as wall materials followed by spray drying. *Food Hydrocolloids*, 89, 360-369. <https://doi.org/10.1016/j.foodhyd.2018.10.052>
- Tontul, I., & Topuz, A. (2017). Review. Spray-drying of fruit and vegetable juices: effect of drying conditions on the product yield and physical properties. *Trends in Food Science & Technology*, 63, 91-102. <https://doi.org/10.1016/j.tifs.2017.03.009>
- Tripathi, M., & Giri, S. (2014). Probiotic functional foods: survival of probiotics during processing and storage. *Journal of Functional Foods*, 9, 225-241. <https://doi.org/10.1016/j.jff.2014.04.030>
- Vishnu, K., Chatterjee, N., Ajeeshkumar, K., Lekshmi, R., Tejal, C., Mathew, S., & Ravishankar, C. (2017). Microencapsulation of sardine oil: application of vanillic acid grafted chitosan as a bio-functional wall material. *Carbohydrate Polymers*, 174, 540-548. <https://doi.org/10.1016/j.carbpol.2017.06.076>
- Wang, T., Soyama, S., & Luo, Y. (2016). Development of a novel functional drink from all natural ingredients using nanotechnology. *LWT*, 73, 458-466. <https://doi.org/10.1016/j.lwt.2016.06.050>
- Wei, Y., Woo, M., Selomulya, C., Wu, W., Xiao, J., & Chen, J. (2019). Numerical simulation of mono-disperse droplet spray dryer under the influence of nozzle motion. *Powder Technology*, 355, 93-105. <https://doi.org/10.1016/j.powtec.2019.07.017>
- Ye, Q., Georges, N., & Selomulya, C. (2018). Microencapsulation of active ingredients in functional foods: from research stage to commercial food products. *Trends in Food Science & Technology*, 78, 167-179. <https://doi.org/10.1016/j.tifs.2018.05.025>
- Yingngam, B., Kacha, W., Rungseewijitprapa, W., Sudta, P., Prasitpuriprecha, C., & Brantner, A. (2019). Response surface optimization of spray-dried citronella oil microcapsules with reduced volatility and irritation for cosmetic textile uses. *Powder Technology*, 355, 372-385. <https://doi.org/10.1016/j.powtec.2019.07.065>
- Yonekura, L., Sun, H., Soukoulis, C., & Fisk, I. (2014). Microencapsulation of *Lactobacillus acidophilus* NCIMB 701748 in matrices containing soluble fiber by spray drying: technological characterization, storage stability and survival after *in vitro* digestion. *Journal of Functional Foods*, 6, 205-214. <https://doi.org/10.1016/j.jff.2013.10.008>

- Yousefi, S., Emam-Djomeh, Z., & Mousavi, S. (2011). Effect of carrier type and spray drying on the physicochemical properties of powdered and reconstituted pomegranate juice (*Punica granatum* L.). *Journal of Food Science and Technology*, 48(6), 677-684. <https://doi.org/10.1007/s13197-010-0195-x>
- Zhang, C., Khoo, S., Chen, X., & Quek, S. (2020). Microencapsulation of fermented noni juice via micro-fluidic-jet spray drying: evaluation of powder properties and functionalities. *Powder Technology*, 361, 995-1005. <https://doi.org/10.1016/j.powtec.2019.10.098>
- Zhang, J., Wen, C., Zhang, H., Duan, Y., & Ma, H. (2020). Recent advances in the extraction of bioactive compounds with subcritical water: a review. *Trends in Food Science & Technology*, 95, 183-195. <https://doi.org/10.1016/j.tifs.2019.11.018>