

Desarrollo de encapsulados de aceite de semilla de Sacha Inchi para la formulación de alimentos funcionales

J.A. Meneses-Gelves^{1*}, D.F. Mendoza-Gamboa¹, A. Rodríguez-Cortina¹ y M. Hernández-Carrión M¹.

¹ Universidad de los Andes, Departamento de Ingeniería Química y de Alimentos, Grupo de Diseño de Productos y Procesos (GDPP), Carrera 1 #18a-12, C.P. 111711, Bogotá D.C., Cundinamarca, Colombia.

*ja.meneses@uniandes.edu.co

RESUMEN:

El Sacha Inchi es un alimento cuyo aceite cuenta con un alto contenido de ácidos grasos insaturados (AGI), pero que son susceptibles a procesos de degradación oxidativa. Este estudio tuvo como objetivo la encapsulación del aceite de semilla de Sacha Inchi (ASI) por ultrasonidos de potencia y su posterior sellado mediante secado por aspersión y liofilización. Se evaluó el efecto de la concentración de ASI (5 y 7,5%, p/p) y el efecto de la relación de los materiales de pared: maltodextrina/caseinato sódico [M:C] (80:20 y 75:25, p/p) sobre las propiedades fisicoquímicas de las emulsiones y los encapsulados. Se encontró que, independientemente de la relación de los materiales de pared, las emulsiones con una concentración de aceite del 7.5% p/p fueron más estables y adecuadas para el sellado. Asimismo, se determinó que la proporción de los materiales de pared que maximizó la eficiencia de encapsulación fue para las emulsiones preparadas con 75:25 [M:C], obteniendo rendimientos superiores para el secado por aspersión en comparación a la liofilización, con valores de 80,97% y 66,28%, respectivamente. Este trabajo destaca el uso de tecnologías de secado innovadoras para encapsular compuestos bioactivos, lo que representa una oportunidad para el desarrollo de nuevos alimentos funcionales.

Palabras clave: Ácidos grasos insaturados, encapsulación, materiales de pared, ultrasonidos de potencia, secado por aspersión, liofilización.

ABSTRACT:

Sacha Inchi is a food whose oil has a significant content of polyunsaturated fatty acids (PUFAs), which are susceptible to oxidative degradation processes. However, these compounds are susceptible to oxidative degradation processes. The purpose of this study was the encapsulation of Sacha Inchi seed oil by implementing sonication, spray drying, and freeze-drying techniques. The effect of Sacha Inchi seed oil concentration (5 y 7,5%, p/p) and the impact of the wall materials ratio: maltodextrin/sodium caseinate [M: C] (80:20 y 75:25, p/p) were evaluated on the physicochemical properties of the emulsions and encapsulates. It was found that, regardless of the wall material ratio, emulsions made with an oil concentration of 7.5% w/w were most stable and suitable for the drying phase. Likewise, the wall material ratio that enhanced the encapsulation efficiency was for emulsions prepared with 75:25 [M: C], obtaining higher yields for spray drying compared to freeze-drying, with values of 80.97% and 66.28%, respectively. This work highlights the use of innovative drying technologies to ensure the encapsulation of bioactive compounds, which denotes an opportunity for the development of new functional foods.

Keywords: PUFAs, encapsulation, wall materials, power ultrasound, spray drying, freeze-drying.

INTRODUCCIÓN

A pesar de que Colombia se clasifica como uno de los territorios con mayor biodiversidad en el planeta, décadas de conflicto armado, infraestructura limitada y falta de recursos financieros acordes con dicha concentración sustancial de biodiversidad, han dejado los ecosistemas del país comparativamente inaccesibles, intactos y poco estudiados (Alho, 2008; Huddart *et al.*, 2021). En este sentido, existen grandes oportunidades de investigación y desarrollo para la obtención de productos sostenibles de valor agregado que contribuyan en el progreso de la sociedad. El Sacha Inchi (*Plukenetia volubilis* L.), es una planta oleaginosa que se encuentra ampliamente distribuida a lo largo del noroccidente del Amazonas y cuyo aceite es considerado de gran valor nutricional por su elevada cantidad de ácidos grasos insaturados (78.0%-84.2%), especialmente ácidos grasos esenciales α -linolénico (ALA) u ω -3 y ácido linoleico (LA) u ω -6 (Goyal *et al.*, 2021). La dominante composición de ácidos grasos esenciales en el aceite de Sacha Inchi y su proporción bien equilibrada (1.41:1), también ha generado un creciente interés de investigadores, puesto que su consumo puede traer numerosos beneficios para la salud como funciones antiinflamatorias y la prevención de enfermedades, entre las que destacan: hipercolesterolemia, cáncer, diabetes tipo II, hipertensión, desórdenes neurológicos y reducción de riesgo de enfermedades cardiovasculares (Punia *et al.*, 2019; Calder *et al.*, 2021; Goyal *et al.*, 2021). No obstante, este hecho también limita sus aplicaciones alimentarias debido a la susceptibilidad de sus ácidos grasos a procesos oxidativos (Da Silva Soares, 2022), presencia de altas temperaturas, luz, metales o humedad (El Ghazzaqui *et al.*, 2021).

En este contexto, las técnicas de encapsulación emergen como alternativas innovadoras que pueden solucionar estas limitaciones al encerrar y transportar los compuestos bioactivos del aceite dentro de un material polimérico que protege al alimento de los factores adversos que promueven su degradación, inhibe interacciones con otros componentes y controla su liberación en el cuerpo, aumentando la biodisponibilidad del constituyente encapsulado (Cerqueira *et al.*, 2018; El Ghazzaqui *et al.*, 2021; Marques *et al.*, 2021). El secado por aspersión es la técnica más común de encapsulación debido a que es más económica, posee mayor accesibilidad de equipos, tiene costos de operación bajos, la estabilidad final del producto es buena y su eficiencia de encapsulación es relativamente alta (Parra Huertas, 2011; Pérez *et al.*, 2013; El-Kader *et al.*, 2020). Por otro lado, la liofilización se considera como el método más efectivo para retener la mayor cantidad de compuestos bioactivos, obtener productos de mayor calidad y evitar la degradación causada por las altas temperaturas de operación. No obstante, su aplicación incurre en altos costos de operación, considerables gastos energéticos y requiere de mucho tiempo debido a sus lentas velocidades de secado (Razola Díaz *et al.*, 2021).

A pesar de que hasta la fecha existen algunos estudios asociados con la encapsulación de aceite de semilla de Sacha Inchi (Fadini *et al.*, 2018; Fidelis *et al.*, 2019; El Ghazzaqui *et al.*, 2021; Da Silva Soares, 2022; Juárez *et al.*, 2022), todavía es necesario profundizar más en este tema. Por ello, este estudio tuvo como objetivo evaluar el proceso de encapsulación de aceite de semilla de Sacha Inchi a partir de ultrasonidos de potencia para la etapa de emulsificación y sellar el proceso implementando novedosas tecnologías de secado. Se realizó un diseño experimental que evaluó el efecto de la concentración de aceite de semilla de Sacha Inchi (5% y 7,5%, p/p) y el impacto de la relación de los materiales de pared: maltodextrina/caseinato sódico [M:C] (80:20 y 75:25, p/p) sobre las propiedades fisicoquímicas de las emulsiones y se eligieron las dos opciones más prometedoras para sellar la encapsulación por secado por aspersión y liofilización. Finalmente, se evaluó la eficiencia de la encapsulación y las propiedades de los polvos obtenidos para valorar su posible implementación en el desarrollo de nuevos alimentos funcionales.

MATERIALES Y MÉTODOS

1. Materiales

Se utilizó aceite de semilla de Sacha Inchi (ASI; *Plukenetia volubilis L.*) premium virgen extra (Sachacol S.A.S, Bucaramanga, Colombia), caseinato de sodio (Food systems, Ingredientes y Productos Funcionales S.A.S, Bogotá, Colombia), maltodextrina (LIHUA, Cimpa S.A.S, Bogotá, Colombia) y los tensoactivos Tween 20 y Span 80 (Croda ©, Bogotá, Colombia).

2. Métodos

2.1. Elaboración de las emulsiones a partir de ultrasonidos de potencia

Las emulsiones fueron realizadas siguiendo la metodología implementada por Rodríguez-Cortina & Hernández-Carrión (2021). Se prepararon 300 g de emulsión mediante una sonda ultrasónica (Sonics Materials VCX 750) empleando una amplitud del 35% durante 30 min.

2.2. Caracterización de las emulsiones

2.2.1. Tamaño de gota

Se determinó con un analizador de tamaño de partículas Mastersizer 3000 (Malvern). Las mediciones se hicieron por duplicado.

2.2.2. Comportamiento al flujo

Se analizó en un reómetro rotacional ARG2 (TA Instruments) con una geometría de cilindro concéntrico cónico (997616) a temperatura ambiente (20°C) y con un gap de 5920 µm. Los resultados se trataron según lo establecido en Rodríguez-Cortina & Hernández-Carrión (2021). Las mediciones se hicieron por duplicado.

2.2.3. Índice de estabilidad Turbiscan

Se evaluó en las emulsiones recién elaboradas a través de la medición del Índice de Estabilidad Turbiscan (TSI) en un Analizador Óptico Turbiscan LAB durante 30 minutos. Las mediciones se hicieron por duplicado.

2.3. Sellado del proceso de encapsulación mediante secado por aspersión y liofilización

El proceso de secado por aspersión se realizó en el equipo Mini Spray B-290 (Büchi) haciendo uso de aire a una temperatura de entrada de 150°C, temperaturas de salida de 125°C, tasa de aspiración nominal del 90% y una tasa de bombeo peristáltico del 10% con un dispositivo atomizador de boquilla. Para la liofilización, las emulsiones se congelaron a -80°C en un ultracongelador (Undercounter ULT Freezer, Haier) se introdujeron al liofilizador (FreeZone 6, Labconco) durante 144 h a una temperatura de -40°C y una presión de 0,160 mbar.

2.4. Caracterización de los encapsulados de aceite de semilla de Sacha Inchi

2.4.1. Humedad

Se analizó en una termobalanza (Precisa Gravimetrics, Master Serie 330 Mx). Los resultados se expresaron en base húmeda. Las mediciones se realizaron por duplicado.

2.4.2. Rendimiento y eficiencia de encapsulación

El rendimiento de secado (EY) se calculó mediante la Ec. (1), mientras que la eficiencia de encapsulación (EX) se obtuvo aplicando la metodología de Bae & Lee (2008) mediante la ecuación presentada por El Ghazzaqui *et al.* (2021).

$$Y (\%) = \frac{\text{Peso de sólidos tras el secado (g)}}{\text{Peso de sólidos en la emulsión (g)}} \cdot 100 \quad [1]$$

2.4.3. Estabilidad de los encapsulados

Se evaluó a partir de un análisis termogravimétrico (TGA) en un equipo SDTQ600 (TA Instruments). Se varió la temperatura desde 25°C hasta 600°C con un aumento de temperatura de 10°C/min y un flujo constante de nitrógeno UAP de 100 mL/min. Las mediciones se realizaron por duplicado.

2.5. Análisis estadístico

Se realizó estadística descriptiva calculando la media y la desviación estándar para cada variable de respuesta. Se empleó el programa estadístico Minitab® (versión 18.1) para realizar un análisis de varianza (ANOVA) con un nivel de significancia del 5% haciendo uso del test de Tukey.

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

1. Caracterización de las emulsiones

Los resultados obtenidos de la caracterización de las emulsiones se muestran en la tabla I. El tamaño de gota y su distribución son factores críticos en la estabilidad y el comportamiento reológico de sistemas coloidales. Tamaños de gota uniformes y pequeños están asociados con sistemas de mayor estabilidad, y conforme incrementa su valor, se fomenta la inestabilidad termodinámica de la emulsión (Saifullah *et al.*, 2016). Según los resultados obtenidos en el análisis estadístico ANOVA, se concluye que la concentración de aceite y su interacción con la relación de los materiales de pared tuvieron un efecto significativo sobre el tamaño de gota, expresados por la variable D [4,3] y cuyos valores oscilaron entre 0,358 y 0,499 μm (Tabla I). Los resultados muestran que los ultrasonidos de potencia permiten la obtención de tamaños de gota menores en comparación con otras metodologías de homogenización (Rodríguez-Cortina & Hernández-Carrión, 2021). Estos resultados coinciden con lo establecido por Modarres-Gheisari *et al.* (2018), quien afirma que los ultrasonidos fomentan la obtención de nanoemulsiones con tamaños de gota pequeños y gran área superficial, en comparación con procesos convencionales debido a los grandes fenómenos de cavitación ejercidos.

Tabla I. Resultados de las propiedades fisicoquímicas de las emulsiones de ASI; Tamaño de gota, viscosidad a una velocidad de cizalla de 50 s⁻¹ y TSI.

Corrida	Concentración ASI (%p/p)	[M:C] (%p/p)	Tamaño de gota (μm)	Viscosidad (10 ³ ·Pa·s)	TSI
---------	-----------------------------	-----------------	------------------------	---------------------------------------	-----

1	5,0	80:20	0,448 ^{ab} (<0,01)	5,01 ^d (0,24)	7,872 ^a (0,676)
2	5,0	75:25	0,358 ^b (<0,01)	5,72 ^c (0,01)	6,016 ^b (0,402)
3	7,5	80:20	0,416 ^{ab} (<0,01)	12,43 ^b (0,01)	1,674 ^c (0,172)
4	7,5	75:25	0,499 ^a (0,050)	17,66 ^a (0,08)	0,976 ^c (0,021)

Para una misma columna, letras diferentes indican la presencia de diferencias estadísticamente significativas de acuerdo con el test de Tukey ($p < 0.05$). Los valores en paréntesis corresponden a las desviaciones estándar.

El comportamiento al flujo es una variable importante en el estudio de emulsiones, puesto que permite conocer las propiedades reológicas del sistema con el objetivo de descifrar el éxito de la metodología a partir de la estabilidad de las emulsiones. Es importante resaltar que esto último está especialmente ligado a la viscosidad de la muestra, quien es determinante en el tamaño de gota de la emulsión, razón por la cual, puede ocurrir que, debido a una disminución de la viscosidad de la película interfacial, se rompan con mayor facilidad las gotas de aceite al aumentar la solubilidad de la emulsión (Kosegarten-Conde & Jiménez-Munguía, 2012). A partir del análisis estadístico, fue posible concluir que la concentración de aceite, las proporciones de los materiales de pared y su interacción influyeron sobre la variable de respuesta. En la Tabla I, es posible observar que la viscosidad obtenida para una velocidad de cizalla de 50 s^{-1} estuvo comprendida entre 5,01 y 17,66 cP, en las cuales, la viscosidad de las emulsiones aumentó proporcionalmente con el incremento en la concentración de aceite de semilla de Sacha Inchi (McClements, 2012) y con la cantidad de caseinato sódico. Este incremento en el caseinato sódico genera mayor fricción entre las partículas suspendidas de aceite debido a su carácter proteico (Kosegarten-Conde & Jiménez-Munguía, 2012). En la Fig. 1 se puede apreciar que las emulsiones preparadas con una concentración de aceite de 7,5 % p/p presentaron viscosidades significativamente mayores. Asimismo, en esta figura se puede observar que el comportamiento de las emulsiones fue de carácter pseudoplástico (Rao, 2014).

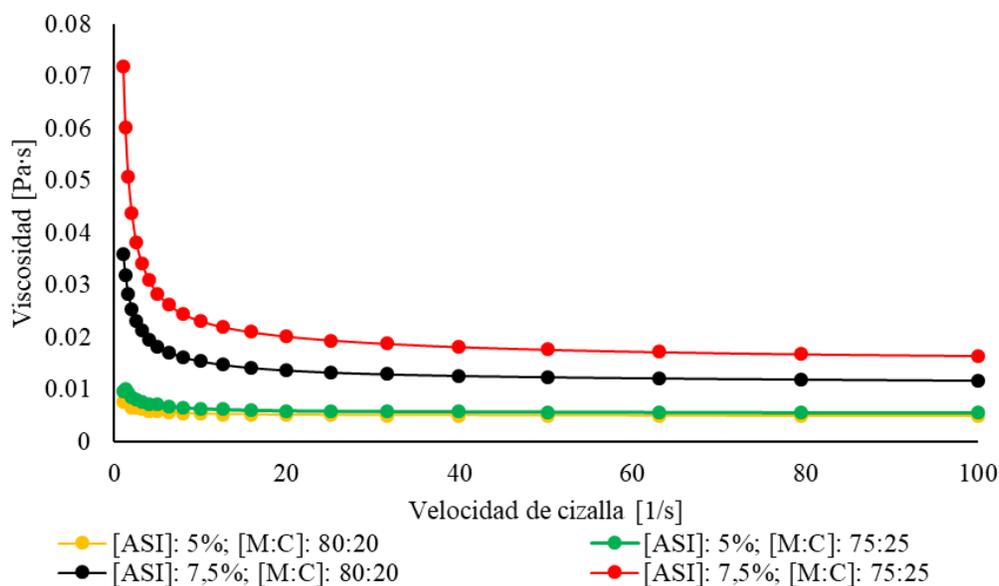


Figura 1. Comportamiento al flujo de las emulsiones de aceite de semilla de Sacha Inchi.

Por otro lado, el Índice de estabilidad Turbiscan (TSI) permite cuantificar la probabilidad de que en una emulsión ocurran fenómenos de inestabilidad coloidal con variación de tamaño de partícula (agregación, floculación, coalescencia, coagulación, maduración de Oswald) o de migración de partículas de una emulsión (sedimentación, cremado, clarificación, separación de fases). En él, los valores entre 0 y 1 indican que la muestra es visualmente estable o que su desestabilización se encuentra en una fase muy temprana, y a medida que incrementa este parámetro aumenta el nivel de inestabilidad de la emulsión (Formulation, 2022). El análisis estadístico indicó que tanto la concentración de aceite como la relación de los materiales de pared tuvieron un efecto significativo en la variable de respuesta. Asimismo, los valores de TSI de las emulsiones evaluadas variaron desde 0,976 a 7,872 (Tabla I). Los resultados muestran que el factor que mayor impacto tuvo en el TSI fue la concentración de aceite, el cual es el principal responsable de someter a la emulsión a mecanismos de desestabilización debido a la repulsión natural presente entre el agua y este componente. Asimismo, según los resultados obtenidos de la Tabla I, es posible afirmar que las emulsiones con mayor estabilidad corresponden a las formulaciones realizadas con una concentración de aceite del 7,5% p/p, puesto que, sus valores de TSI fueron significativamente menores.

2. Selección de las dos mejores emulsiones

Una vez caracterizadas las emulsiones, se seleccionaron las dos que permitieran garantizar la estabilidad oxidativa de los AGI. Lo anterior debido a que la degradación de los ingredientes encapsulados incrementa considerablemente en emulsiones inestables cuando se exponen a estrés ambiental como tratamientos térmicos, congelación/descongelación, condiciones extremas de pH y altas concentraciones de minerales (Barrow *et al.*, 2013). Asimismo, la estabilidad de la emulsión es un factor de gran importancia para obtener mayores eficiencias de encapsulación (Li *et al.*, 2017). En este sentido, se determinó que las formulaciones óptimas para continuar con el proceso de sellado en la encapsulación de aceite de semilla de Sacha Inchi fueron las dos emulsiones preparadas con una concentración de aceite de 7,5% p/p, ya que presentaron los menores valores de TSI y su viscosidad indicó una menor probabilidad de que se rompan las gotas de aceite.

3. Caracterización de los encapsulados de aceite de semilla de Sacha Inchi

La humedad es una propiedad física que depende principalmente de la porosidad del material, composición, los sólidos que contenga inicialmente y variables de proceso según el método de secado. Para la elaboración de polvos que no contienen conservantes ni aditivos, entre más contenido de humedad tiene el producto, más corta es la vida útil de este. Es por lo anterior, que se recomienda que este valor sea inferior a 3% (Ceballos-Peñaloza, 2008). Asimismo, según Karthik & Anandharamakrishna (2013), la humedad depende de la temperatura a la que se realiza el secado y de la tecnología empleada, lo cual soporta el hecho de que el factor de la proporción de maltodextrina y caseinato sódico presente en el material de pared no fuese significativo. Los valores de humedad expresados en base húmeda variaron entre 1,31% - 1,77% (Tabla II) lo cual cumple con la recomendación de mantener la humedad por debajo del 3% (Ceballos, 2008). Los resultados estadísticos muestran que tanto el tipo de tecnología de secado como la interacción entre esta y la proporción de materiales de pared tuvieron efecto significativo sobre la variable de respuesta.

Tabla II. Resultados de las propiedades de los encapsulados obtenidos por secado por aspersión y liofilización: humedad, rendimiento de secado (EY) y eficiencia de encapsulación (EX).

Corrida	Concentración ASI (%p/p)	[M:C] (%p/p)	Tecnología de secado	Humedad (%)	EY (%)	EX (%)
1	7,5	80:20	Liofilizador	1,65 ^{a,b} (0,17)	83,82	62,35
2	7,5	75:25	Liofilizador	1,31 ^b (0,04)	83,13	66,28
3	7,5	80:20	Secado por aspersión	1,60 ^{a,b} (0,08)	54,29	72,18
4	7,5	75:25	Secado por aspersión	1,77 ^a (0,02)	63,73	80,97

Para una misma columna, letras diferentes indican la presencia de diferencias estadísticamente significativas de acuerdo con el test de Tukey ($p < 0.05$). Los valores en paréntesis son las desviaciones estándar.

El rendimiento del secado se define como la relación entre la masa de materia seca de polvo recolectada después del secado y el peso de los sólidos totales de la muestra durante su preparación. Este es un indicador de gran importancia en la industria, puesto que, un mayor rendimiento está directamente asociado con un incremento en ganancias (Tontul & Topuz, 2017). Como se puede observar en la tabla II, los valores de este parámetro oscilaron entre un 54,29% y 83,82%. Dado que la totalidad de experimentos tuvo un valor mayor al 50 % se puede concluir que el proceso se realizó de manera exitosa (Bhandari *et al.*, 1997). Asimismo, al comparar los resultados para las dos tecnologías implementadas, es posible notar que el proceso de liofilización maximizó el rendimiento de secado. Este hecho pudo deberse a que, las altas temperaturas del secado por aspersión aumentaron la pegajosidad del polvo al influir directamente sobre los azúcares (maltodextrina) y, como consecuencia, se recuperó una menor cantidad de materia seca (Bhandari *et al.*, 1997).

La eficiencia de encapsulación es definida como el porcentaje de aceite de semilla de Sacha Inchi encapsulado con éxito y su valor representa el nivel de eficacia del proceso realizado. Los resultados presentes en la Tabla II muestran que los valores calculados para este parámetro se encontraron entre un 62,35% y un 80,97%, en donde, el proceso de secado por aspersión proporcionó una mayor eficiencia de encapsulación en comparación con la liofilización, similar a lo encontrado por El-Messery *et al.* (2020) y Elik *et al.* (2021). Este resultado pudo deberse a que, durante la liofilización, existe una tendencia de las partículas a aglomerarse debido a la mayor energía superficial en la etapa de congelación (Anandharamakrishnan & Ishwarya, 2015). De igual manera, es importante mencionar que existe una tendencia en la cual el rendimiento de la encapsulación aumenta conforme crece la cantidad de caseinato de sodio en las muestras (Li *et al.*, 2017; Amaya *et al.*, 2021). Este fenómeno se puede atribuir a las propiedades surfactantes de este material de pared, que permiten un mejor desempeño en emulsiones O/W, y por ende, un mayor efecto encapsulante (Augustin & Oliver, 2014). Los resultados obtenidos concuerdan con lo propuesto por Li *et al.* (2017), quienes indican que a medida que incrementa la estabilidad de la emulsión se aumenta el rendimiento de la encapsulación. Este comportamiento se puede corroborar analizando los resultados de la Tabla I, en los cuales, la corrida que menor TSI obtuvo fue aquella que logró mayor rendimiento de encapsulación en cada tecnología.

En cuanto al análisis termogravimétrico (TGA), permite conocer el comportamiento de los componentes puros de las cápsulas, los cuales se van degradando a medida que aumenta la temperatura. Esto se puede observar a través de los picos de la curva que relacionan la derivada del peso con respecto a la temperatura. Es así como en la Fig. 2 es posible identificar la degradación de

cada componente. En la gráfica se puede visualizar que el primer rango entre 50-90°C está asociado a la pérdida de peso de los residuos de agua que pudieron quedar en la muestra o por la rehidratación de la cápsula posterior al secado (França *et al.*, 2018). El segundo y tercer componente se encuentran en el rango de 200-240°C y 270-320°C, los cuales hacen referencia a la maltodextrina y caseinato de sodio, respectivamente. Estos resultados concuerdan con la literatura, donde se ha reportado que la degradación de la maltodextrina ocurre en el rango de 200-350°C, mientras que en el caseinato de sodio sucede a una temperatura de 300°C (Alizadeh-Sani *et al.*, 2019). Finalmente, el último rango hace referencia a la volatilización del aceite de semilla de Sacha Inchi, el cual está entre 380-440°C. Adicionalmente, se observa que para temperaturas superiores a 500°C no ocurre una variación significativa del peso perdido del aceite, lo cual coincide con lo reportado por Amaya *et al.* (2021) donde a partir de esta temperatura no encontraron remanentes de aceite de semilla de chía.

Así mismo, en la Fig. 2 es posible comprobar los resultados de la eficiencia de encapsulación que se discutieron en la sección anterior. Esto se logra al relacionar el peso y la temperatura, ya que, entre mayor sea el peso para una temperatura aproximada de 600°C, más cantidad de polvo encapsulado logró superar la degradación asociada al incremento de la temperatura. Es así como, la curva en color rojo y verde, las cual tienen una relación de [M:C] de 75:25, corresponden al polvo con mejores resultados de eficiencia para cada tecnología, debido a que esta posee el mayor valor del porcentaje de peso, siendo coherente con lo reportado en la Tabla II.

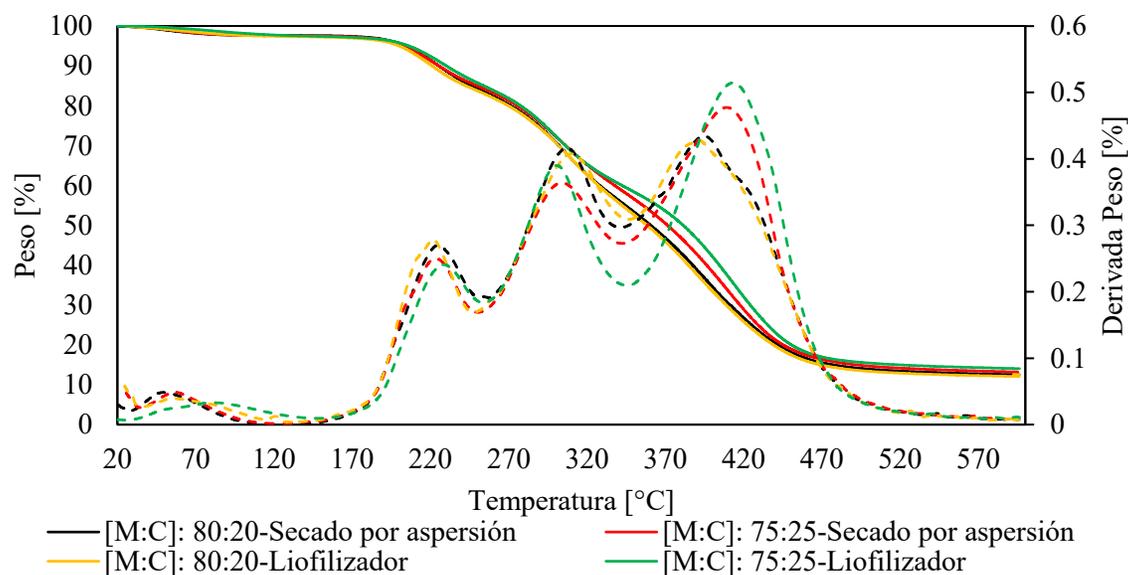


Figura 2. TGA de cápsulas de aceite de semilla de Sacha Inchi elaboradas por ultrasonido de potencia y secadas por liofilización y secado por aspersión. (—) Pérdida de peso. (- -) Derivada de pérdida de peso.

CONCLUSIÓN

Los resultados obtenidos muestran que fue posible la encapsulación de aceite de semilla de Sacha Inchi mediante la aplicación de ultrasonidos de potencia y el posterior sellado por secado por aspersión y liofilización. Las emulsiones presentaron un tamaño de gota pequeño debido a la

aplicación de ultrasonidos de potencia. Asimismo, las formulaciones elaboradas con una concentración de aceite de 7,5% p/p fueron más estables y, por ende, más apropiadas para el proceso de secado al minimizar la degradación de los ácidos grasos insaturados y permitir mayores rendimientos de encapsulación. Tras el secado por aspersión y liofilización, se encontró que los encapsulados obtenidos haciendo uso de una relación de material de pared 75:25 [M:C] presentaron las mejores eficiencias de encapsulación, resultado que fue posible corroborar mediante el análisis termogravimétrico (TGA), siendo el secado por aspersión el que logró obtener rendimientos de hasta el 80,97%. En este orden de ideas, la tecnología de secado por aspersión garantiza altas eficiencias de encapsulación sin la necesidad de incurrir en los altos costos de operación presentes en el proceso de liofilización. En definitiva, el proceso de encapsulación de aceite de semilla de Sacha Inchi emerge como una alternativa novedosa para proteger los ácidos grasos insaturados del alimento y así, desarrollar nuevos alimentos funcionales que aporten numerosos beneficios al consumidor.

BIBLIOGRAFÍA

- Alho, C.J., 2008, *The value of biodiversity*, Braz J Biol, (4 Suppl):1115-8.
- Alizadeh-Sani, M., Rhim, J., Azizi-Lalabadi, M., Hemmati-Dinarvand, M., & Ehsani, A., 2020, *Preparation and characterization of functional sodium caseinate/guar gum/TiO₂/cumin essential oil composite film*, Int. J. Biol. Macromol., Vol. 145, pp. 835–844.
- Amaya Cano, J., Segura Pacheco, S., Galán, F., Arenas Bustos, I., Rincón Durán, C., & Hernández Carrión, M., 2021, *Formulation of a responsive in vitro digestion wall material, sensory and market analyses for chia seed oil capsules*, Journal of Food Engineering, Vol. 296, 110460.
- Anandharamakrishnan, C., & Ishwarya, S., 2015. *Spray drying techniques for food ingredient encapsulation*. Wiley, ISBN: 978-1-118-86419-7.
- Augustin, M., & Oliver, C., 2014, *Use of Milk Proteins for Encapsulation of Food Ingredients*, Microencapsulation in the Food Industry, Vol. 19, pp. 211-226.
- Bae, E.K., & Lee, S.J., 2008, *Microencapsulation of avocado oil by spray drying using whey protein and maltodextrin*, Journal of microencapsulation, Vol. 25, pp. 549-560.
- Bai, X., Chuanxin, L., Yu, L., Jiang, Y., Wang, M., Lang, S., & Liu, D., 2019, *Development and characterization of soybean oil microcapsules employing kafirin and sodium caseinate as wall materials*, LWT, Vol. 111, pp. 235-241.
- Barrow, C., Wang, B., Adhikari, B., & Liu, H., 2013, *Chapter 6. Spray drying and encapsulation of omega-3 oils*, Woodhead Publishing Series in Food Science, Technology and Nutrition, pp. 194-225.
- Bhandari, B., Datta, N., & Howes, T., 1997, *Problems associated With Spray Drying Of Sugar-Rich Foods*, Drying Technology, Vol. 15:2, pp. 671-684.
- Calder, P., 2021, *Chapter 2 - Health benefits of omega-3 fatty acids*, Production, Physical Characterization and Oxidative Stability, pp. 25-53.
- Ceballos Peñaloza, A., 2008, *Estudio comparativo de tres sistemas de secado para la producción de un polvo deshidratado de fruta*, Universidad Nacional de Colombia.
- Cerqueira e Silva, K., da Silva Carvalho, A., Santos Rabelo, R., & Dupas Hubinger, M., 2019, *Sacha Inchi oil encapsulation: Emulsion and alginate beads characterization*, Food and Bioproducts Processing, Vol. 116, pp. 118-129.
- Da Silva Soares, B., Pinto Siqueira, R., de Carvalho, M., Juarez, V., & García-Rojas, E., 2022, *Microencapsulation of Sacha Inchi oil (Plukenetia Volubilis L.) using complex coacervation: Formation and structural characterization*, Food Chemistry, Vol. 15, 125045.

- Elik, A., Yanik, D. K., & Göğüş, F., 2021, *A comparative study of encapsulation of carotenoid enriched-flaxseed oil and flaxseed oil by spray freeze-drying and spray drying techniques*, LWT, Vol. 143, 111153.
- El-Ghazzaqui Barbosa, A., Tomé Constantino, A., Heckert Bastos, L., & Garcia-Rojas, E., 2021, *Encapsulation of Sacha Inchi oil in complex coacervates formed by carboxymethylcellulose and lactoferrin for controlled release of β -carotene*, Foods Hydrocolloids for Health, Vol. 2, 100047.
- El-Kader, A., & Abu Hashish, H., 2020, *Encapsulation Techniques of Food Bioproduct*, Egyptian Journal of Chemistry, Vol. 63, pp. 1881-1909.
- El-Messery, T. M., Altuntas, U., Altin, G., & Özçelik, B., 2020, *The effect of spray-drying and freeze-drying on encapsulation efficiency, in vitro bioaccessibility and oxidative stability of krill oil nanoemulsion system*, Food Hydrocolloids, Vol. 106, 105890.
- Fadini, A., Alvim, I., Porto Ribeiro, I., Geraldini Ruzene, L., Bataglia da Silva, L., & Queiroz, M., 2018, *Innovative strategy based on combined microencapsulation technologies for food application and the influence of wall material composition*, LWT, Vol. 91, pp. 345-352.
- Fidelis Cerqueira Silva, K., da Silva Carvalho, A., Santos Rabelo, R., & Hubinger, M., 2019, *Sacha inchi oil encapsulation: Emulsion and alginate beads characterization*, Foods and Bioproducts processing, Vol. 116, pp. 118-129.
- Formulation - Smart scientific analysis. (2022). *Turbiscan Stability Index*. Formulation.com. Retrieved 21 March 2022, from <https://www.formulation.com/en/knowledge-center/turbiscan-stability-index>.
- França, D., Medina, L., Messa, S.C., & Faez, R., 2018, *Chitosan spray-dried microcapsule and microsphere as fertilizer host for swellable -controlled release*, Carbohydr. Polym, Vol. 196, pp. 47–55.
- Goyal, A., Tanwar, B., Kumar Sihag, M., & Sharma, V., 2021, *Sacha inchi (Plukenetia Volubilis L.): An emerging source of nutrients, omega-3 fatty acid and phytochemicals*, Food Chemistry, Vol. 373, Part B, 131459.
- Huddart, J., Crawford, A.J., Luna-Tapia, A.L., Restrepo, S., & Di Palma, F., 2021, *EBP-Colombia, and the bioeconomy: Genomics in the service of biodiversity conservation and sustainable development. Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America*, Vol. 119 (4), 35042804.
- Juárez, V., de Souza Cezarino, T., Barreto Pereira, L., Pinto da Rocha, E., Raymundo Sá, G., & Domingues Gamallo, O., 2022, *Microencapsulation of sachá inchi oil using emulsion-based delivery systems*, Food Research International, Vol. 99 Part 1, pp. 612-622.
- Karthik, P., & Anandharamakrishnan, C., 2013, *Microencapsulation of Docosahexaenoic Acid by Spray-Freeze-Drying Method and Comparison of its Stability with Spray-Drying and Freeze-Drying Methods*, Food Bioprocess Technol, Vol. 6, pp. 2780–2790.
- Kosegarten-Conde, C. E., & Jiménez-Munguía, M. T., 2012, *Factores principales que intervienen en la estabilidad de una emulsión doble*, Temas Selectos de Ingeniería de Alimentos, Vol. 6, no. 2, pp. 1–18.
- Li, K., Wai-Woo, M., Patel, H. and Selomulya, C., 2017, *Enhancing the stability of protein-polysaccharides emulsions via Maillard reaction for better oil encapsulation in spray-dried powders by pH adjustment*, Food Hydrocolloids, Vol. 69, pp. 121-131.
- Marques Mandaji, C., da Silva Pena, R., & Campos Chisté, R., 2021, *Encapsulation of bioactive compounds extracted from plants of genus Hibiscus: A review of selected techniques and applications*, Food Research International, Vol. 151, 110820.
- McClements, D., 2011, “*Food Emulsion Principle, Practices, and Techniques*”. Materials Science and Engineering C, Vol 31(2), pp. 486–493.

- Mohsen Modarres-Gheisari, S., Gavagsaz-Ghoachani, R., Malaki, M., Safarpour, P., & Zandi, M., 2018, *Ultrasonic nano-emulsification – A review*, *Ultrasonics Sonochemistry*, Vol. 52, pp. 88-105.
- Oliver, C., Augustin, M., & Sanguansri, L., 2009, *Maillard-based casein-carbohydrate microcapsules for the delivery of fish oil: emulsion stability during in vitro digestion*, *Australian Journal of Dairy Technology*, Vol. 64, pp. 80-83.
- Parra Huertas, R., 2011, *Revisión: Microencapsulación de Alimentos*. *Revista Facultad Nacional de Agronomía Medellín*, Vol. 63 no 2, 0304-2847.
- Pérez, H., Bueno, G., Brizuela, M., Tortoló, K., & Gastón, C., 2013, *Microencapsulación: una vía de protección para microorganismos probióticos*. *Instituto Cubano de Investigaciones de los Derivados de la Caña de Azúcar*, Vol. 47, pp. 14-25.
- Punia, S., Singh Sandhu, K., Kumar Siroha, A., & Bala Dhull, S., 2019, *Omega 3-metabolism, absorption, bioavailability and health benefits—A review*, *PharmaNutrition*, Vol. 10, 100162.
- Rao, M., 2014, *Flow and functional models for rheological properties of fluid foods*, Springer, (pp. 27-61).
- Razola Díaz, M., Guerra Hernández, E., García Villanova, B., & Verardo, V., 2021, *Recent developments in extraction and encapsulation techniques of orange essential oil*, *Food Chemistry*, Vol. 354, 129575.
- Rodríguez Cortina, A., & Hernández Carrión, M., 2021, *Caracterización fisicoquímica y obtención de emulsiones a partir del aceite de semilla de Sacha Inchi*, *Desarrollo en Innovación en Ingeniería*, Vol. 1 ed 6, ISBN: 978-958-53278-5-6.
- Roos, Y., & Livney, Y., 2017, *Engineering Foods for Bioactives Stability and Delivery*, Springer, (pp. 1-423).
- Saifullah, M., Amimul, A., Rezaul, M., & Shishir, I., 2016, *Production, stability and application of micro- and nanoemulsion in food production and the food processing industry*, *Innovative Food Science & Emerging Technologies*, Vol. 76, pp. 405-442.
- Sánchez-Reinoso, Z., & Gutiérrez, L.F., 2017, *Effects of the Emulsion Composition on the Physical Properties and Oxidative Stability of Sacha Inchi (Plukenetia Volubilis L.) Oil Microcapsules Produced by Spray Drying*. *Food Chemistry*, Vol. 387, pp. 1354-1366.
- Tontul, I., & Topuz, A., 2017, *Spray-drying of fruit and vegetable juices: Effect of drying conditions on the product yield and physical properties*, *Trends in Food Science & Technology*, Vol. 63, pp. 91-102.