

Edición especial 25 años del doctorado en ingeniería

Estabilidad oxidativa de aceite de sachá inchi (*Plukenetia volubilis* Linneo) microencapsulado enriquecido con compuestos fenólicos extraídos de su cascarilla

Oxidative stability of sachá inchi oil (*Plukenetia volubilis* Linneo) microencapsulated enriched with phenolic compounds extracted from its shell

Cómo citar: Betancourth-López, C.F., Rodríguez-Stouvenel, A., Millán-Cruz, P. Estabilidad oxidativa de aceite de sachá inchi (*Plukenetia volubilis* Linneo) microencapsulado enriquecido con compuestos fenólicos extraídos de su cascarilla. Ingeniería y Competitividad. 25(suplemento), e-20513116. doi: 10.25100/iyc.v25isuplemento.13169

Cristhian F. Betancourth-López^{1§} , Aida Rodríguez-Stouvenel¹,
Patricia Millán-Cruz¹ 

Grupo de Investigación en Ingeniería de los Procesos Agroalimentarios y Biotecnológicos, GIPAB, Escuela de Ingeniería de Alimentos, Universidad del Valle, Cali, Colombia. cristhian.betancourth@correounivalle.edu.co §, ayda.rodriguez@correounivalle.edu.co, patricia.millan@correounivalle.edu.co

Resumen

El sacha inchi (SI) es una planta autóctona de la Amazonía, cuyas semillas se destacan por su alto contenido de ácidos grasos poliinsaturados, en particular el omega 3 (18:3n-3, ácido linolénico). Las semillas de SI empleadas en este trabajo contienen $37.9 \pm 1.2\%$ de aceite, en el cual $45.90 \pm 0.26\%$ es ácido linolénico. En el proceso de extracción del aceite de sacha inchi se retira la cascarilla (CSI), que representa el $31.30 \pm 0.50\%$ del total de la semilla. Este subproducto contiene concentraciones significativas de polifenoles (3372 ± 23 mg AGE/100 g FW). El aceite de sacha inchi (ASI), junto con el extracto vegetal de polifenoles de la cascarilla, se micro encapsuló mediante secado por aspersión, utilizando maltodextrina y goma arábiga como materiales de recubrimiento. La efectividad de la microencapsulación se evaluó mediante pruebas fisicoquímicas, como contenido de humedad (3.27%), actividad de agua (0.256 ± 0.015), tamaño de las microcápsulas (9.15 y 15.13 μm), solubilidad ($88.40 \pm 0.10\%$), humectabilidad (6.5 minutos) y digestión in vitro ($50.38 \pm 1.19\%$ de aceite liberado). La estabilidad oxidativa de las microcápsulas de ASI enriquecido se evaluó mediante el método Rancimat, revelando el efecto significativo de la microencapsulación al aumentar la vida útil del aceite microencapsulado en un 64% en comparación con el aceite líquido. La oxidación del producto final se evaluó en una cámara de almacenamiento con temperatura (35°C) y humedad (80%) controladas durante 60 días, donde el índice de peróxidos al final del período de seguimiento no superó los 4.22 ± 0.20 meq O₂/kg de aceite. Este estudio demuestra la viabilidad tecnológica del proceso de microencapsulación del ASI enriquecido con compuestos fenólicos para prolongar su vida útil.

Palabras clave: Sacha Inchi, Aceite, Cascarilla, Microencapsulación, Estabilidad Oxidativa.



Introducción

El sachá inchi (SI) ha emergido como una leguminosa de gran relevancia debido a sus beneficios nutricionales y fitoquímicos, entre los que se destacan sus propiedades antioxidantes, antiinflamatorias y su capacidad para mejorar la salud cardiovascular (1, 2). Además, es una fuente valiosa de aceite (33.40% – 54.70%) que contiene un alto porcentaje de ácidos grasos insaturados (90.6%). Sin embargo, este aceite es altamente susceptible a la rápida oxidación, lo que puede comprometer su calidad (3). La cascarilla de sachá inchi (CSI) que representa aproximadamente el 31.3% del peso total de la semilla, alberga compuestos fenólicos con propiedades antioxidantes, capaces de prolongar la vida útil del aceite de Sachá inchi (ASI), la cual es inferior a 9 meses (4). El uso del coproducto permitirá conservar la calidad del ASI durante el almacenamiento y su distribución.

La investigación se centra en enriquecer el ASI mediante la adición de compuestos fenólicos extraídos de la CSI. Este enriquecimiento no solo prolonga la vida útil del aceite al retardar las reacciones de oxidación, sino que también agrega propiedades antioxidantes adicionales (5). Para garantizar la protección de estos compuestos valiosos y su aplicación en la industria alimentaria y otros sectores, se utiliza la microencapsulación mediante el secado por aspersión. Este proceso protege tanto el aceite como los compuestos fenólicos y transforma el producto en partículas sólidas en polvo, lo que facilita su manejo y mezcla (6). Esta investigación aborda la problemática de la rápida oxidación del ASI y resalta la importancia de la CSI como un coproducto valioso con propiedades antioxidantes. Además, promueve la economía circular al aprovechar al máximo los recursos disponibles y reducir las pérdidas en la producción de SI, una leguminosa con una creciente importancia económica en términos de exportación y cuyos porcentajes de pérdida de calidad merecen atención (7). El objetivo de esta investigación fue estudiar la estabilidad oxidativa del ASI enriquecido con compuestos fenólicos extraídos de la CSI y el incremento de su vida útil.

Metodología

Extracción de compuestos fenólicos a partir de cascarilla de sachá inchi

La semilla de SI se adquirió en el municipio de Puerto Caicedo (Putumayo), seleccionándola según su tamaño y estado sanitario. A partir de la semilla se obtuvieron de forma manual la almendra y CSI. La CSI se sometió a procesos de molienda (IKA A11) y tamizado (80 μm) para reducir su tamaño de partícula a ≤ 1 mm, de manera que se optimizara la extracción de compuestos fenólicos presentes en ella (8). En el proceso de extracción asistida con ultrasonido se utilizó un equipo tipo sonda (Sonics & Materials, Modelo: Vibra-Cell VCX 500) con un diámetro de 13 mm, pulsos ON/OFF de 1 s, una amplitud del 40% y una frecuencia de 40KHz (34). El solvente fue una mezcla etanol-agua (v/v) de 67.27 %, la relación muestra:solvente 1:99, a una temperatura de 60°C por 15 minutos (9). Se midió la concentración de polifenoles totales mediante el método Folin –Ciocalteu y se expresaron como mg de equivalentes de ácido gálico/100 g de muestra (mg AGE/100g FW) (10). La capacidad antioxidante de los polifenoles totales se evaluó mediante las metodologías ABTS y DPPH, los resultados se expresaron como porcentaje de inhibición (%) (11).

Microencapsulación de aceite de sachá inchi enriquecido

Se empleó una emulsión aceite en agua (O/W) en la que se combinaron goma arábiga y maltodextrina (DE: 20) como agentes encapsulantes en un ratio de 3.5 partes de agua destilada por cada parte de polímeros (12). La preparación de la emulsión se llevó a cabo utilizando un homogeneizador ultra-turrax (IKA T25). En esta etapa, se incorporó el extracto vegetal directamente, considerando el IC50 (concentración inhibitoria del 50%), que representa la cantidad necesaria de un antioxidante para reducir la actividad de los radicales libres o la oxidación en un 50%, en este caso, aplicado a los radicales ABTS y DPPH. En el proceso de microencapsulación se utilizó un equipo de secado por aspersión de laboratorio (Mini Spray Dryer B-290 Advanced 230 V, 60 Hz Tipo AUS). En el proceso de secado se mantuvieron constantes la temperatura de salida (90°C), el flujo de alimentación de la muestra (5 ml/min) y el flujo de aire para pulverización (473 L/h). Se evaluaron diferentes ratios de agentes encapsulantes tomando como referencia la maltodextrina, 33%, 50% y 66%, con relación a la cantidad de goma arábiga utilizada, carga de aceite, 20%, 35% y 50%, y temperatura de entrada en el proceso, 150°C, 165°C y 180°C, determinando la eficiencia y el rendimiento, utilizando un diseño experimental de superficie de respuesta tipo Box-Behnken con 17 corridas para optimizar el proceso de secado por aspersión.

Caracterización fisicoquímica de las microcápsulas

La actividad de agua se evaluó utilizando el equipo AquaLab VSA. Para la caracterización microscópica se utilizó un microscopio electrónico de barrido para analizar forma y tamaño de las microcápsulas de aceite (12). La inspección fue realizada en un microscopio JEOL Modelo JSM 6490 LV. La solubilidad de las microcápsulas de aceite enriquecido se determinó mediante el tiempo de dispersión en el agua y su humectabilidad siguiendo la norma técnica colombiana para leche en polvo (NTC 1036) (13). El ASI microencapsulado se caracterizó utilizando cromatografía líquida de alto rendimiento (HPLC) y cromatografía de gases (GC). Se cuantificó el contenido de compuestos fenólicos utilizando un cromatógrafo líquido Shimadzu LC-20AD, se empleó una columna ultra C18 acuosa utilizando como fase móvil metanol acidificado con ácido fórmico al 0.1%, a una velocidad de flujo de 1.0 mL/min y temperatura de 45 °C bajo condiciones isocráticas. El espectro UV-visible se exploró en el rango de 200 nm a 600 nm para todos los compuestos. Los resultados se expresaron en mg de cada compuesto por 100 g de muestra (mg/100 g) y se realizaron cuantificaciones utilizando curvas de calibración para ocho compuestos (Ácido p-Cumárico, Ácido Ferúlico, Ácido Clorogénico, Ácido Cafeico, Ácido 3,4-Dihidroxicinámico, Ácido Cinámico, Catequina y Epicatequina). La caracterización de ácidos grasos se determinó con un cromatógrafo de Gases/Espectrómetro de Masas Shimadzu QP2010S con una columna DB-WAX (J&W Scientific, 30m x 0.25mm x 0.25µm). El análisis fue por triplicado utilizando metil ésteres derivatizados con una solución de HCl/Metanol al 5% p/v y n-Hexano grado HPLC. La identificación de los compuestos se efectuó mediante espectros de masas comparados con la base de datos NIST y WILEY, y la cuantificación se basó en el porcentaje relativo de área. Se evaluó la liberación in vitro de las microcápsulas de ASI enriquecido utilizando simulaciones de fluido gástrico y fluido intestinal (15). El pH se ajustó a 1.2 para el SGF y 6.8 para el SIF. La muestra se incubó inicialmente en el SGF y posteriormente se mezcló con el SIF. La cantidad de aceite liberado se calculó como un



porcentaje del total de aceite encapsulado. La medición de cada parámetro se realizó por triplicado.

Estabilidad Oxidativa y Vida Útil del Aceite Microencapsulado

Para el índice de estabilidad oxidativa en el aceite líquido y en el aceite microencapsulado se utilizó el equipo 892 Profesional Rancimat. Se realizaron análisis triplicados utilizando 3.0 g de aceite de sachá inchi líquido y 3.0 g de microcápsulas con y sin adición de compuestos fenólicos (16). Cada muestra se sometió a un proceso de oxidación acelerada a temperaturas de 70°C, 80°C, 90°C y 100°C bajo una corriente de aire constante con un flujo de 20 L/h. El resultado se expresó como el Índice de Estabilidad Oxidativa (OSI) o Tiempo de Inducción (PI). La determinación de la vida útil del producto se realizó mediante el método de extrapolación a diferentes temperaturas de almacenamiento estableciendo una relación matemática entre los valores de OSI obtenidos y las temperaturas correspondientes al flujo de aire utilizado en el equipo Rancimat.

Parámetros fisicoquímicos de las microcápsulas almacenadas en cámara de estabilidad

Se evaluó el comportamiento de oxidación en el aceite microencapsulado con y sin compuestos fenólicos mediante una prueba acelerada de almacenamiento a temperatura de 35°C y 80% de humedad relativa en una cámara ambiental durante 60 días, identificando el contenido de humedad, actividad de agua de las microcápsulas y el índice de peróxidos (oxidación ferrosa en xilenol naranja - FOX) del ASI microencapsulado (17).

Análisis estadístico

El diseño Box-Behnken se optimizó de acuerdo con la superficie de respuesta a las condiciones de operación del secador por aspersión con tres factores. Estos factores fueron la temperatura del aire en la entrada (150°C, 165°C y 180°C), carga de aceite (20%, 35% y 50%) y ratios de agentes encapsulantes (33%, 50% y 66%). El proceso se optimizó bajo las siguientes condiciones: maximización del rendimiento y la eficiencia del secado. Los resultados del diseño experimental se analizaron mediante análisis de varianza ($p = 0,05$), prueba de falta de ajuste, determinación de coeficientes de regresión y superficies de respuesta con el software Minitab 18.

Resultados y discusión

Extracción de compuestos fenólicos a partir de cascarilla de sachá inchi

En el proceso de extracción asistida por ultrasonido se logró obtener una concentración de polifenoles totales de 3372 ± 23 mg AGE/100 g FW. Este valor es significativo al compararse con otras fuentes vegetales, como los arándanos, que generalmente contienen entre 275 y 645 mg AGE/100 g FW (19). Las cáscaras de otros productos vegetales presentan concentraciones más altas de compuestos fenólicos, como la curaba con valores de 4690.1 ± 28.2 mg AGE/100 g FW (20), y el orujo de uva con 7475 mg AGE/100 g FW (21).

Los valores del IC50 para los radicales ABTS y DPPH varió en una concentración entre 50 y 100 mg AGE/100 g FW (tabla 1).

Tabla 1. Actividad antioxidante de polifenoles presentes en la cascarilla de sachá inchi

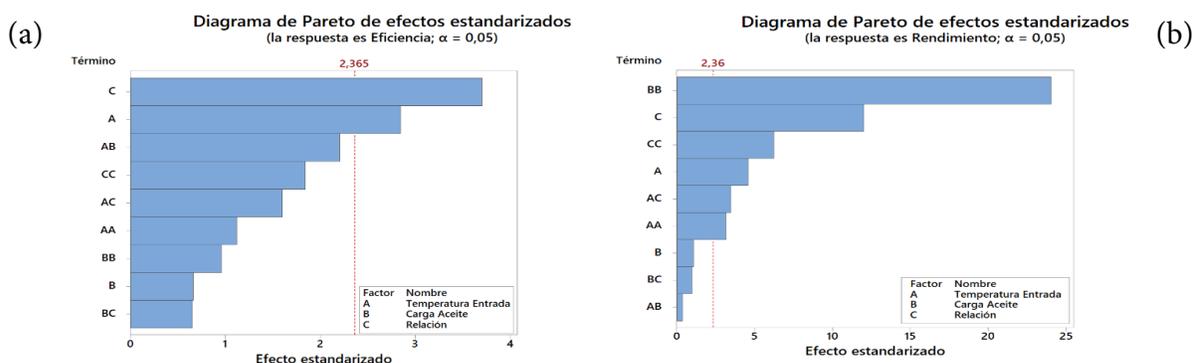
Concentración de polifenoles mgAGE/100 g FW	Radical ABTS* Porcentaje Inhibición (%)	Radical DPPH* Porcentaje Inhibición (%)
50	36.33 ± 0.18	31.92 ± 0.24
100	64.81 ± 0.16	55.56 ± 0.48
150	93.18 ± 0.16	88.20 ± 0.29
200	98.81 ± 0.18	91.34 ± 0.13

* Valores corresponden a: media ± desviación estándar, n = 3

El valor de IC50 para los radicales ABTS y DPPH varió entre 50 y 100 mg AGE/100 g FW. En análisis por separado se evaluó el extracto y se encontró que a partir de una concentración de 150 mg AGE/100 g FW presenta genotoxicidad celular (9), por tal razón se utilizó esta cantidad con el objetivo de proporcionar un efecto antioxidante al ASI.

Microencapsulación de aceite de sachá inchi enriquecido

Al ASI se le adicionó el extracto de compuestos fenólicos en una concentración de 150 mg AGE/100 g FW, ajustada según la cantidad de aceite presente en la emulsión. La carga de aceite influyó en el rendimiento, y no tuvo un efecto significativo en la eficiencia. Se observó una interacción significativa entre la temperatura de entrada y la relación de materiales de pared (Grafica 1). La cantidad de aceite en la emulsión afectó la relación entre el núcleo y la pared en las microencapsuladas. El exceso de aceite influyó negativamente en la formación de partículas estables y disminuir la eficiencia del proceso (23). La relación entre goma arábiga y maltodextrina incidió en la formación de las paredes alrededor de las gotas de aceite, y diferentes relaciones pueden dar como resultados matrices con propiedades distintas y además influyó en el tamaño de las microcápsulas, lo que es relevante para la liberación controlada de los compuestos encapsulados (24). La temperatura de entrada incidió en la evaporación controlada del agua y en la formación de microencapsuladas uniformes



Grafica 1. Diagramas de Pareto para las variables de respuesta rendimiento (a) y eficiencia (b) en el proceso de microencapsulación de ASI ($\alpha = 0,05$)

Las condiciones óptimas en el secado por aspersión fueron una temperatura de entrada de 150°C, una carga de aceite del 33%, y una proporción de 33% de maltodextrina en relación con la cantidad de goma arábiga en los agentes encapsulantes. Estos parámetros resultaron en un rendimiento del 90.65% \pm 0.46% y una eficiencia del 85.55% \pm 0.04%, valores típicos dados los parámetros de microencapsulación utilizados (25). Los valores alcanzados de humedad 3.27% y actividad de agua 0.256 \pm 0.015 se encuentran dentro del rango recomendado para garantizar la estabilidad microbiológica de las microcápsulas (26). Estudios anteriores revelan que la humedad y actividad de agua de microcápsulas de aceites vegetales presentaron valores entre 2.23% y 0.22 (36). El valor de solubilidad fue de 88.40 \pm 0.10% y de humectabilidad 6.5 minutos, los valores indican que los materiales de recubrimiento seleccionados garantizan la aplicación en la industria de alimentos y permiten una liberación controlada del principio activo (aceite y polifenoles) contenido en las microcápsulas (28). Se obtuvieron microcápsulas con diámetros entre 8.08 y 12.91 μ m, con formas irregulares y poca aglomeración (figura 1). Estos resultados son considerados típicos en el secado por aspersión y con los materiales de pared utilizados (25).

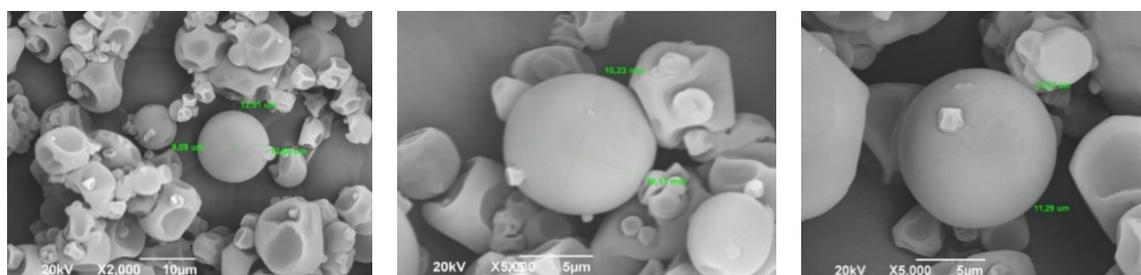


Figura 1. Imágenes de microscopía SEM de las microcápsulas de aceite de sacha inchi enriquecido con compuestos fenólicos

La estructura morfológica de las microcápsulas es afectada por los materiales de pared utilizados. Al utilizar maltodextrina y goma arábiga la superficie de las microcápsulas puede ser lisa e irregular, y se produce una contracción en la forma de la partícula y la cavidad, lo que podría resultar en una mayor protección del principio activo (27). En las microcápsulas el aceite de sacha inchi es una fuente vegetal rica en ácido linoleico (tabla 2), que promueve un equilibrio saludable con relación a la cantidad de ácido linoleico, lo que beneficia la salud de sus consumidores (1).

Tabla 2. Caracterización de ácidos grasos poliinsaturados en las microcápsulas

Ácido Graso	Aceite Microencapsulado (%) *
Ácido Palmítico	5.83 \pm 0.06 ^a
Ácido Esteárico	3.20 \pm 0.10 ^b
Ácido Oleico	9.87 \pm 0.06 ^c
Ácido Linoleico	33.60 \pm 0.17 ^d
Ácido Linolénico	47.47 \pm 0.29 ^e

* Valores corresponden a: media \pm desviación estándar, n = 3

La cantidad de compuestos fenólicos presentes en las microcápsulas fue de 132.05 mg/100 g de muestra (tabla 3). El perfil de compuestos fenólicos en las microcápsulas se caracteriza por la presencia de varios compuestos, siendo los más predominantes el Ácido Cafeico (34.85 mg/100 g) y el Ácido Cinámico (27.29 mg/100 g). Estos compuestos son ampliamente reconocidos por sus destacadas propiedades antioxidantes (10, 11). Su presencia en las microcápsulas sugiere un potencial beneficio significativo para la estabilidad oxidativa del producto final.

Tabla 3. Caracterización de compuestos fenólicos en las microcápsulas

Compuesto fenólico	Microcápsulas con extracto (mg/100 g de muestra) *
Ácido p-Cumárico	20.16 ± 0,06
Ácido Ferúlico	15.42 ± 0,30
Ácido Clorogénico,	8.55 ± 0,27
Ácido Cafeico,	34.85 ± 0,38
Ácido 3,4-Dihidroxicinámico	11.98 ± 0,12
Ácido Cinámico	27.29 ± 0,23
Catequina	5,10 ± 0,02
Epicatequina	8,70 ± 0,01

* Valores corresponden a: media ± desviación estándar, n = 3

En la digestión in vitro después de 2 horas (pH 1.2) simulando el estómago (SGF) se liberó un 39.2% del aceite de Sacha inchi debido a la coalescencia de las gotas de emulsión por las enzimas gástricas (14). Durante la simulación de la digestión intestinal (SIF) durante 3 horas, la liberación aumentó al 50.38% debido a la acción de la amilasa y proteasa de la pancreatina que digirieron la cápsula liberando el aceite. Estos resultados son consecuentes con estudios de liberación de aceite vegetales microencapsulados cuyos valores oscilan entre 46.6 % y 68.45% (15).

Estabilidad Oxidativa y Vida Útil del Aceite Microencapsulado

El ASI microencapsulado con compuestos fenólicos mostró mayor estabilidad oxidativa en comparación con el aceite líquido y el aceite microencapsulado sin compuestos. Los PI aumentaron significativamente a temperaturas de 70°C, 80°C, 90°C y 100 °C, con incrementos del 67.89%, 76.33%, 87.32% y 79.05%, respectivamente en comparación con el aceite líquido. Se observaron diferencias significativas entre el ASI microencapsulado con y sin compuestos fenólicos, sugiriendo que la adición de estos compuestos contribuye a la mayor estabilidad (tabla 4).

Tabla 4. Tiempo de inducción de los aceites de sachá inchi

Muestra	Temperatura 70°C	Temperatura 80°C	Temperatura 90°C	Temperatura 100°C
	PI (H)*	PI (H*)	PI (H)*	PI (H)*
ASI Líquido	38.84 ± 0.73 ^a	17.87 ± 1.48 ^d	8.36 ± 0.35 ^g	4.04 ± 0.27 ^j
ASI Microencapsulado Sin Compuestos Fenólicos	62.15 ± 0.82 ^b	28.95 ± 0.19 ^e	14.99 ± 0.15 ^h	6.72 ± 0.43 ^k



ASI					
Microencapsulado	65.21 ± 2.55 ^c	31.51 ± 1.96 ^f	15.66 ± 0.31 ⁱ	7.27 ± 0.29 ^j	
Con Compuestos Fenólicos					

Nota. * Valores corresponden a: media ± desviación estándar, n = 3. Letras diferentes indican diferencias significativas (Tukey, p ≤ 0.05)

Estos resultados indican que el proceso de microencapsulación de aceite de sachá inchi retrasa el PI y, por tanto, prolonga su vida útil. Los aceites con alta concentración de ácidos grasos poliinsaturados presentan resultados PI entre 0.25 y 2.0 evaluados a temperaturas por encima de 100°C (16, 30). Se establece un tiempo de vida útil extrapolado de 1004 horas para esta muestra ASI líquido, lo que equivale a 1.32 meses. La vida útil del ASI microencapsulado sin compuestos fenólicos fue de 1645 horas, equivalente a 2.28 meses. La vida útil extrapolada del ASI con compuestos fenólicos a 25°C es de 1813 horas, equivalentes a 2.40 meses. Los resultados están sujetos al tipo de muestra y parámetros de operación en el secador, así como al contenido de ácidos grasos poliinsaturados, sin embargo, estos resultados son similares a otras investigaciones (24, 31).

Parámetros fisicoquímicos de las microcápsulas almacenadas en cámara de estabilidad

No se evidencian diferencias estadísticamente significativas en las muestras (microcápsulas con y sin compuestos fenólicos) al evaluar la humedad y aw (tabla 5) donde se aplicó una prueba de Tukey sin existir diferencias significativas para un 95% de confianza. Los valores de humedad y aw indican que la mayor eliminación de agua en los microencapsulados fue posible gracias a las temperaturas elevadas en el proceso de secado.

Tabla 5. Parámetros de las microcápsulas de sachá inchi con compuestos fenólicos en relación con el tiempo de almacenamiento. (Temperatura: 35°C y Humedad: 80%)

Parámetro	Muestras				
	Día 0	Día 15	Día 30	Día 45	Día 60
Humedad (%) [*]	3.47 ± 0.07 ^a	3.59 ± 0.03 ^b	3.62 ± 0.02 ^b	4.13 ± 0.03 ^c	4.20 ± 0.07 ^d
Aw [*]	0.237 ± 0.001 ^e	0.247 ± 0.001 ^f	0.251 ± 0.002 ^f	0.256 ± 0.001 ^g	0.264 ± 0.002 ^g
Índice	2.92 ± 0.73 ^h	3.41 ± 0.42 ^h	3.66 ± 0.73 ^h	3.89 ± 0.84 ^h	4.22 ± 0.20 ^h

Nota. * Valores corresponden a: media ± desviación estándar, n = 3. Letras diferentes indican diferencias significativas (Tukey, p ≤ 0,05)

El valor máximo reportado de actividad de agua de 0,264 indica que el producto tiene una baja disponibilidad de agua libre, beneficioso para la estabilidad y vida útil del producto, ya que una baja aw reduce la actividad microbiológica y la degradación química del aceite (32).

El índice de hidroperóxidos del microencapsulado de ASI enriquecido con compuestos fenólicos se mantuvo dentro de los valores establecidos por la NTP 151,400, (2018) que fija un límite máximo de 10 meq O₂/kg de aceite.

Esto asegura la calidad del aceite de sacha inchi al prevenir el inicio del proceso de oxidación (16). Similares resultados se presentan en investigaciones donde el proceso de microencapsulación o el uso de antioxidantes naturales en aceites con alta concentración de ácidos grasos poliinsaturados como el de chía o linaza retardan la producción de hidroperóxidos y prolongan su vida útil (35).

Conclusiones

El proceso de microencapsulación a escala de laboratorio para el ASI enriquecido con compuestos fenólicos, obtenidos a partir de residuos de sus semillas, demostró ser altamente efectivo al alcanzar rendimientos y eficiencias de aproximadamente el 90.65 ± 0.46% y 85.55 ± 0.04%, respectivamente. Estos resultados confirman la viabilidad de obtener un producto final de alta calidad mediante este método. La microencapsulación del aceite de SI logró prolongar significativamente su vida útil, duplicándola de 0.11 a 0.2 años en comparación con el aceite líquido. Este proceso de encapsulación preservó la concentración de ácidos grasos poliinsaturados y los compuestos fenólicos agregados para enriquecer el aceite.

Las microcápsulas obtenidas mostraron propiedades fisicoquímicas y térmicas apropiadas para su aplicación en la industria de alimentos. Esto representa una innovación significativa al brindar una fuente adicional de antioxidantes en productos alimenticios, lo que puede tener un impacto positivo en la salud y el valor nutricional de los alimentos procesados. La evaluación del comportamiento de liberación de las microcápsulas durante el tránsito in vitro en el sistema gastrointestinal reveló una liberación significativa de aproximadamente el 50.38 ± 1.19%. Este valor representa un aporte considerable de compuestos fenólicos para el consumo humano.

Referencias bibliográficas

1. García-Castañeda, F. J., Martínez-Navarrete, N., Rojas, R., & Acosta-Estrada, B. A. (2018). Sacha Inchi (*Plukenetia volubilis* L.): A Promising Amazonian Oilseed. *Food Chemistry*, 263, 385-395.
2. Taipe-Ocas, P., Cañari-Chumpitaz, C., Vargas-Rojas, J. A., Martínez-Navarrete, N., Rojas, R., & Acosta-Estrada, B. A. (2020). Valorization of Sacha Inchi Residues: Extraction and Characterization of Phenolic Compounds. *Industrial Crops and Products*, 154, 112722.
3. Molano, J. C., Camargo-Ricalde, S. L., Jaramillo-Rojas, M. E., & García, F. A. (2021). Aceite de Sacha inchi: su composición química y beneficios nutricionales y funcionales. *Revista Chilena de Nutrición*, 48(1), 41-50.
4. Nguyen, T.T.T., Pham, Q.T., Chau, V.M., & Nguyen, M.H. (2022). Evaluation of antioxidant activity and total phenolic content of Vietnamese traditional medicinal plants. *Journal of Pharmaceutical Analysis*, 12(1), 34-42.





5. Mansour, Hanem M. M., Sobhy Ahmed El-Sohaimy, Ahmed M. Zeitoun, and Eman M. Abdo. (2022). Effect of Natural Antioxidants from Fruit Leaves on the Oxidative Stability of Soybean Oil during Accelerated Storage. *Antioxidants* 11, no. 9: 1691.
6. Norhazlindah, M. F., Jahurul, M. H. A., Norliza, M., Shihabul, A., Islam, S., Nyam, K. L., & Zaidul, I. S. M. (2023). Techniques for extraction, characterization, and application of oil from sachá inchi (*Plukenetia volubilis* L.) seed: a review. In *Journal of Food Measurement and Characterization* (Vol. 17, Issue 1, pp. 904–915).
7. Chasquibol, N., Alarcón, R., Gonzales, B. F., Sotelo, A., Landoni, L., Gallardo, G., ... & Pérez-Camino, M. C. (2022). Design of Functional Powdered Beverages Containing Co-Microcapsules of Sachá Inchi (*P. huayllabambana*) Oil and Antioxidant Extracts of Camu Camu and Mango Skins. *Antioxidants*, 11(8), 1420.
8. Chirinos, R., Necochea, O., Pedreschi, R., & Campos, D. (2016). Original article Sachá inchi (*Plukenetia volubilis* L.) shell: an alternative source of phenolic compounds and antioxidants. *International Journal of Food Science & Technology*, 51(4), 986–993.
9. Betancourth, C., Rodríguez, A., & Millán, P. Obtención de microcápsulas de aceite de sachá inchi (*Plukenetia volubilis* Linneo) enriquecido con compuestos fenólicos extraídos de residuos de la semilla para extender su vida útil (Tesis doctoral). Universidad del Valle; (2023)
10. Ordoñez, Y.A., Luna-Vital, D.A., Ongkowijoyo, J., & González de Mejía, E. (2018). Optimized methodologies for the extraction of polyphenols from different Amazonian fruits using central composite designs and response surface methodology. *Food Chemistry*, 240, 1131-1139.
11. Leos-Rivas, C., Rivas-Morales, C., & García-Hernández, D. G. (2016). Actividad antioxidante y toxicidad. *OmniaScience monographs*, 41–76.
12. Pastuña, A., López, O., Debut, A., Vaca, A., Rodríguez, E., Vicente, R., ... Tapia, F. (2016). Microencapsulation of oil sachá inchi (*Plukenetia volubilis* L.) by spray drying, 45(3), 422–437.
13. Cihat Icyer, N., Toker, O. S., Karasu, S., Tornuk, F., Kahyaoglu, T., & Arici, M. (2017). Microencapsulation of fig seed oil rich in polyunsaturated fatty acids by spray drying. *Journal of Food Measurement and Characterization*, 11(1), 50–57.
14. Escalona, L. (2016). Estudio termodinámico y térmico-oxidativo de microcápsulas de aceite de chíá microencapsuladas mediante secado por aspersión. [Universidad Autónoma del Estado de México].
15. Wang, S., Shi, Y., & Han, L. (2018). Development and evaluation of microencapsulated peony seed oil prepared by spray drying: Oxidative stability and its release behavior during in-vitro digestion. *Journal of Food Engineering*, 231, 1–9.

16. Alarcón Rivera, R., Pérez Camino, M., y Chasquibol Silva, N. (2019). Evaluación de la vida útil de los aceites de Sacha Inchi (*Plukenetia huayllabambana* y *Plukenetia volubilis*) microencapsulados. *Revista de la Sociedad Química del Perú*, 85(3), 327-337.
17. Panpa, W., Nogata, Y., & Mankhetkorn, S. (2022). Evaluation of quality and authenticity of virgin sachu inchi oil by GC-FID and GC-MS. *Journal of Food Composition and Analysis*, 106, 104319.
18. Basilio, J. 2015. Predicción de la vida útil de chifles de plátanos (*Musa paradisiaca*) mediante modelos matemáticos [Tesis Magister Scientiae, Universidad Nacional Agraria la Molina. Lima, Perú].
19. Caicedo Narváez, S., & Hernández Carrión, M. (2022). Evaluation of antioxidant activity, phenolic content, anthocyanins, and flavonoids of fresh and dried 'Biloxi' blueberries. *Vitae* (01214004), 29(3).
20. De Almeida, V. L., Silva, C. G., & Campana, P. R. V. (2021). Flavonoids of *Passiflora*: isolation, structure elucidation, and biotechnological application. *Studies in Natural Products Chemistry*, 71, 263-310.
21. Chakka, A. K., & Babu, A. S. (2022). Bioactive compounds of winery by-products: extraction techniques and their potential health benefits. *Applied Food Research*, 2(1), 100058.
22. Burhan, A. M., Abdel-Hamid, S. M., Soliman, M. E., & Sammour, O. (2019). Optimisation of the microencapsulation of lavender oil by spray drying. *Journal of Microencapsulation*, 36(3), 250–266.
23. Corrêa, F. N., Lopes, M. S., & Thomazini, M. (2019). Microencapsulation of β -carotene by spray drying: Influence of oil concentration and emulsifier type on powder properties. *Journal of Food Engineering*, 240, 105-114.
24. Alcântara, M. A., de Lima, A. E. A., Braga, A. L. M., Tonon, R. V., Galdeano, M. C., da Costa Mattos, M., ... & de Magalhães Cordeiro, A. M. T. (2019). Influence of the emulsion homogenization method on the stability of chia oil microencapsulated by spray drying. *Powder Technology*, 354, 877-885.
25. Suwannasang, S., Zhong, Q., Thumthanaruk, B., Uttapap, D., Puttanlek, C., Vatanyoopaisarn, S., & Rungsardthong, V. (2022). Optimization of Wall Material Composition for Production of Spray-dried Sacha Inchi Oil Microcapsules with Desirable Physicochemical Properties. *Food and Bioprocess Technology*, 15(11), 2499-2514.
26. Bhardwaj, A., Sharma, N., Sharma, V., Alam, T., & Shafia, S. (2022). Smart Food Packaging Systems. In *Smart and Sustainable Food Technologies* (pp. 235-260).
27. Eun, J., Maruf, A., Das, P. R., & Nam, S. (2019). A review of encapsulation of carotenoids using spray drying and freeze drying A review of encapsulation of carotenoids using spray drying and freeze drying. *Food Science and Nutrition*, 0(0), 1–26.





28. Karrar, E., Sheth, S., Navicha, W. B., Wei, W., Hassanin, H., Abdalla, M., & Wang, X. (2019). A potential new source: Nutritional and antioxidant properties of edible oils from cucurbit seeds and their impact on human health. *Journal of food biochemistry*, 43(2), e12733.
29. Núñez-Ramírez, D. M., López-Martínez, A., Medina-Torres, L., Calderas, F., Martínez-Prado, M. A., Lara, R. H., Herrera-Valencia, E. E., Anguiano-Vega, G. A., & Manero, O. (2021). Microencapsulation of *Acidithiobacillus thiooxidans* by spray drying using biopolymers as wall materials: A potential alternative for its application in the mining industry.
30. Hoyos-Leyva, J. D., Bello-Perez, L. A., Agama-Acevedo, J. E., Alvarez-Ramirez, J., & Jaramillo-Echeverry, L. M. (2018). Characterization of spray drying microencapsulation of almond oil into taro starch spherical. *LWT - Food Science and Technology*, 101, 526–533.
31. Rodríguez, G., Villanueva, E., Glorio, P., & Baquerizo, M. (2015). Oxidative stability and estimate of the shelf life of sacha inchi (*Plukenetia volubilis* L.) oil. *Scientia Agropecuaria*, 6(3), 155–163.
32. Reinoso Z. (2016) Evaluación de propiedades fisicoquímicas, morfológicas y sensoriales de microencapsulados de cacao obtenidos por spray drying. Universidad Nacional de Colombia Facultad de Ciencias Agrarias Bogotá, Colombia.
33. Karaaslan, M., Sengün, F., Cansu, Ü., Basyigit, B., & Saglam, H. (2021). Gum arabic / maltodextrin microencapsulation confers peroxidation stability and antimicrobial ability to pepper seed oil. *Food Chemistry*, 337.
34. Muangrat, R., Pongsirikul, I., & Blanco, P. H. (2018). Ultrasound assisted extraction of anthocyanins and total phenolic compounds from dried cob of purple waxy corn using response surface methodology. *Journal of Food Processing and Preservation*.
35. Carvalho da Silva, L., Castelo, R. M., Cheng, H. N., Biswas, A., Furtado, R. F., & Alves, C. R. (2022). Methods of Microencapsulation of Vegetable Oil: Principles, Stability and Applications-A Minireview. *Food Technology and Biotechnology*, 60(3), 308-320.
36. Zhu, J., Li, X., Liu, L., Li, Y., Qi, B., & Jiang, L. (2022). Preparation of spray-dried soybean oil body microcapsules using maltodextrin: Effects of dextrose equivalence. *Lwt*, 154, 112874.