



Changes in the physicochemical properties of an emulsion enriched with peach palm epicarp carotenoids: Influence of ultrasound

Luis Eduardo Ordóñez-Santos , Viviana Andrea Velasco Arango , Lady Possu Noriega

Universidad Nacional de Colombia, Colombia

Jader Martínez-Girón 

Universidad del Valle Seccional Palmira, Colombia

Guillermo Duque , Misael Cortes Rodríguez 

Universidad Nacional de Colombia, Colombia

OPEN  ACCESS

Recibido:
10/06/2024
Aceptado:
05/08/2024
Publicado:
20/09/2024

Correspondencia:

leordonezs@unal.edu.co

DOI:

<https://doi.org/10.17081/invinno.12.2.7044>



Copyright 2024 by
Investigación e Innovación en
Ingenierías

Resumen

Objetivo: Evaluar los cambios generados por el ultrasonido en las propiedades fisicoquímicas de una emulsión elaborada con extracto de carotenoides de epicarpio de chontaduro. **Metodología:** Los carotenoides extraídos en aceite de girasol del epicarpio de chontaduro se utilizó para obtener una emulsión y se evaluaron las variables de respuesta pH, atributos de color, carotenoides, potencial z, tamaño de partícula y conductividad eléctrica, después de los tratamientos de ultrasonido. **Resultados:** El ultrasonido aumentó significativamente la concentración de todos los pigmentos carotenoides en la emulsión. Las coordenadas de color L* y C* se incrementaron significativamente, y pH, potencial zeta, tamaño de partícula y, conductividad eléctrica se redujeron significativamente después el procesamiento con ultrasonido. **Conclusiones:** El tratamiento con ultrasonido incrementa la concentración de los carotenoides, y mejora el color superficial en la emulsión evaluada.

Palabras claves: Color superficial, conductividad eléctrica, pH, pigmentos, potencial Z, tamaño de partícula.

Abstract

Objective: Assess the changes generated by ultrasound in the physicochemical properties of an emulsion made with carotenoid extract of peach palm epicarp. **Methodology:** The carotenoids extracted in sunflower oil from the chontaduro epicarp were used to obtain an emulsion and the response variables pH, color attributes, carotenoids, z potential, particle size and electrical conductivity were evaluated after ultrasound treatments. **Results:** Ultrasound significantly increased the concentration of all carotenoid pigments in the emulsion. The color coordinates L* and C* were significantly increased, and pH, zeta potential, particle size, and electrical conductivity were significantly reduced after ultrasonic processing. **Conclusions:** Ultrasound treatment increases the concentration of carotenoids, and improves the surface color in the evaluated emulsion.

Keywords: Surface color, electrical conductivity, pH, pigments, Z potential, particle size.

Como citar (IEEE): L.E. Ordóñez-Santos, V.A. Velasco-Arango, L. Possu-Noriega, J. Martínez-Girón, G. Duque, M. Cortes Rodríguez, "Cambios de las propiedades fisicoquímicas de una emulsión enriquecida con carotenoides de epicarpio de chontaduro: Influencia del ultrasonido", Investigación e Innovación en Ingenierías, vol. 12, no. 2, pp. 99-107, 2024. DOI: <https://doi.org/10.17081/invinno.12.2.7044>

Introducción

Los frutos de chontaduro (*Bactris gasipaes*) son una fuente promisoriosa de carotenoides, siendo el β -caroteno, δ -caroteno y γ -caroteno los mayores carotenoides presentes en este material vegetal [1, 2, 3]. Por lo tanto, este fruto es una posible fuente importante de carotenoides con potencial en la industria cosmética, farmacéutica y alimentaria [4]. Los carotenoides son compuestos liposolubles naturales que se encuentran principalmente en frutas y hortalizas y son los responsables del espectro de color que va del amarillo al rojo en la mayoría de los vegetales [5]. Además, estas moléculas poseen propiedades antioxidantes y son fuente de provitamina A con beneficios en la salud al reducir el riesgo de enfermedades oncológicas, cardiovasculares y degeneración macular [5]. Si embargo, la utilización de los carotenoides como ingrediente bioactivo en la industria presenta grandes retos, ya que estas moléculas son poco solubles en medio acuoso, y son susceptibles a la oxidación e isomerización en presencia de calor, luz y oxígeno [5, 6]. En los últimos años estas restricciones están siendo superadas al disolver los carotenoides en compuestos lipídicos que actúan como fase dispersante de una emulsión O/W, aumentando la estabilidad de estos pigmentos durante el procesamiento y almacenamiento [5, 7].

McClements [8] define una emulsión como dos líquidos inmiscibles, donde uno se dispersa en pequeñas gotas esféricas en el otro líquido, el tamaño de las gotas en los productos alimenticios emulsionados suele estar entre 0,1 a 100 μm . Algunos de los métodos más comunes en los procesos industriales para obtener emulsiones son los mezcladores de alta velocidad, homogenizadores de altas presión, microfluizadores y ultrasonido [9]. El autor expresa que el ultrasonido es un método de emulsificación con ciertas ventajas como la eficiencia energética, la reducción del tamaño de las gotas y la facilidad de operación en comparación con otras técnicas conocidas. El proceso asistido por ultrasonido ha sido empleado en diferentes investigaciones para obtener emulsiones enriquecidas con los pigmentos carotenoides, por ejemplo, Calva-Estrada et al. [10] obtienen una emulsión enriquecida con β -caroteno de residuo de zanahoria y jugo de mora como fase continua, utilizando ultrasonido con amplitud del 60% durante 2,5 minutos. En otro estudio abordado por de Niu et al. [11] obtienen una emulsión enriquecida con β -caroteno y alcanzan un nivel de retención del 40% después de 10 días de almacenamiento cuando la emulsión se obtiene a una potencia de ultrasonido de 360 W durante 10 minutos. En el trabajo realizado por Belgheisi et al. [12] evaluaron el impacto del ultrasonido (240-360 W durante 5 a 15 minutos) en una emulsión enriquecida con licopeno obtenido de tomate deshidratado. Lian et al. [13] logra obtener una emulsión enriquecida con β -caroteno al trabajar con una potencia de 400 W durante 10 minutos. A pesar de estas investigaciones, a la fecha no se registran estudios que informen el enriquecimiento de emulsiones con el epicarpio del fruto de chontaduro, y es limitado los estudios que reporten los cambios de concentración de los pigmentos carotenoides en las emulsiones alimentarias que han sido procesadas por ultrasonido. Por lo tanto, el objetivo fue evaluar los cambios generados por el ultrasonido en las propiedades fisicoquímicas de una emulsión elaborada con extracto de carotenoides de epicarpio de chontaduro.

Metodología

Obtención del extracto de carotenoides de epicarpio de chontaduro (ECEC)

Los frutos de chontaduro ecotipo rojo (*Bactris gasipaes*) se adquirieron en el mercado local del municipio de Palmira, Valle del Cauca, Colombia. Los frutos sanos y enteros se limpiaron con agua destilada, se desinfectaron con NaClO a 150 ppm y se cocinaron en agua a 90 ± 2 °C durante 60 minutos (2 L agua/kg fruta) tal como

se ha descrito previamente por Martínez-Girón et al. [14]. El epicarpio de los frutos cocidos es retirado manualmente y deshidratado en un horno de convección (Binder ED 53 UL, GmbH) a $60 \pm 2^\circ\text{C}$ hasta obtener un valor de humedad cercano al 11 % tal como ha sido descrito en la metodología reportada por [14]. Luego las muestras fueron trituradas en un molino eléctrico y tamizadas empleando un equipo (Advantech DT-168, México) con granulometría (≤ 0.25 mm) hasta obtener la harina de epicarpio de chontaduro, se refrigeró en frasco de vidrio ámbar a 4°C en ausencia de la luz para su posterior uso. ECEC se obtuvo de acuerdo a Ordóñez-Santos et al. [15], donde, 0,16 g de harina epicarpio de chontaduro se mezclaron con 100 g de aceite de girasol, y se llevaron a la acción del ultrasonido durante 30 minutos a 240 W, y el extracto lipídico fue almacenado a 4°C en un frasco para su posterior utilización.

Obtención de la emulsión y efecto del ultrasonido

La emulsión (O/W) se elaboró a partir de la metodología descrita previamente por Pra et al. [16] con algunas modificaciones. El extracto lipídico del epicarpio de chontaduro actuó como fase dispersa, el agua como fase continua, glicerina y Tween 80 fueron los surfactantes. Se procedió a mezclar los componentes según su polaridad en un Ultraturrax a 7000 rpm durante tres minutos, y se homogenizó durante una hora controlando la temperatura $<30^\circ\text{C}$, posteriormente, la muestra homogenizada se sometió a la acción del ultrasonido a 240 W durante 15 minutos, a una temperatura de proceso no mayor a 30°C , la emulsión obtenida fue estable a temperatura ambiente durante 7 días (Figura 1), de acuerdo con la metodología de [12].

Figura 1. Emulsión enriquecida con ECEC después de 7 días de almacenamiento a temperatura ambiente.



Fuente: Elaboración propia

Con el fin de validar el aporte de carotenoides del extracto lipídico en la emulsión enriquecida se decidió compararla con una emulsión control elaborada con aceite de girasol como fase dispersante. A continuación, la emulsión enriquecida fue expuesta a la acción del tratamiento de ultrasonido combinando tiempo (5-15 minutos) y potencia (240-440 W) con el propósito de conocer el efecto en los parámetros fisicoquímicos.

Determinación de los parámetros fisicoquímicos en la emulsión

El pH y la conductividad eléctrica de las muestras se estableció siguiendo el protocolo descrito previamente por [10, 11], respectivamente. La concentración de carotenoides (mg/100 g de emulsión), y color CIEL*a*b* se midió basados en Ordóñez-Santos et al. [17]. El potencial z (Mv) y el tamaño de partícula (μm) en la

emulsión se midieron de acuerdo con los métodos descritos previamente por Fu et al. [18].

Análisis estadístico

Cada tratamiento contó con tres repeticiones y los resultados se expresaron como media y desviación estándar. Un ANOVA de un factor de nueve tratamientos, que combinaron potencia de ultrasonido (240, 340 y 440 W) y tiempo de proceso (5, 10 y 15 minutos), se utilizó, para evaluar el nivel de significación sobre las variables de respuesta en la emulsión enriquecida, y las diferencias entre los tratamientos se evaluaron mediante la prueba de Tuckey ($p < 0,05$). La prueba T-Student fue utilizada para identificar la diferencia entre dos tratamientos. Los análisis estadísticos se llevaron a cabo con en el paquete estadístico SPSS Windows 25.

Resultados

En la Tabla 1, se relacionan los valores medios de los parámetros fisicoquímicos evaluados a la emulsión control y emulsión enriquecida (EE). El pH, y el color superficial de las muestras de estudio no presentaron cambios significativos entre las dos emulsiones, sin embargo, la concentración de carotenoides en la muestra EE supera significativamente a la emulsión control (Tabla 1). Este resultado confirma el enriquecimiento de pigmentos de la emulsión a partir del ECEC, otros autores también reportan enriquecimiento de emulsiones con carotenoides como posible suplemento nutricional [10-12, 19].

Tabla 1. pH, concentración de carotenoides y color superficial en dos emulsions

Variable	Emulsión Control	Emulsión enriquecida (EE)	t-Student
pH	5.44 ± 0.33 ^a	5.58 ± 0.07 ^a	NS
β-Caroteno ¹	0.15 ± 0.04 ^b	0.42 ± 0.03 ^a	**
α-Caroteno ¹	0.10 ± 0.03 ^b	0.19 ± 0.01 ^a	**
β-criptoxantina ¹	0.17 ± 0.03 ^b	0.60 ± 0.01 ^a	**
Zeaxantina ¹	0.17 ± 0.03 ^b	0.59 ± 0.01 ^a	**
Licopeno ¹	ND	0.19 ± 0.01	--
L*	65.71 ± 1.09 ^a	67.10 ± 0.56 ^a	NS
C	4.18 ± 0.48 ^a	3.67 ± 0.21 ^a	NS
h ^º	116.07 ± 1.35 ^a	118.43 ± 0.70 ^a	NS

Valores medios ± desviación estándar, n = 3. (**)= $p < 0.01$ t - Student; NS: no hay diferencias significativas. 1mg/100 g de emulsión. ND=no detectado

Fuente: Elaboración propia

Los cambios en la concentración de los carotenoides en la EE por efecto de los tratamientos de ultrasonido se pueden observar en la Tabla 2. Los carotenoides en la emulsión enriquecida cambian significativamente después de los tratamientos con ultrasonido (Tabla 2). El proceso con ultrasonido incrementa significativamente los carotenoides respecto a la muestra sin ultrasonido, y el tratamiento a 440 W durante 5 minutos presento significativamente la mayor concentración los carotenoides evaluados en la emulsión, sin embargo, tiempos mayores en esta

potencia reduce la concentración de los carotenoides en la muestra de estudio (Tabla 2).

Tabla 2. Cambios en la concentración de carotenoides después de los tratamientos con ultrasonido en la emulsión enriquecida (EE).

Tratamiento	mg/ 100 g de emulsión				
	β - Caroteno	α -Caroteno	β -criptoxantina	Zeaxantina	Licopeno
EE	0.42 \pm 0.03 ^c	0.19 \pm 0.01 ^c	0.60 \pm 0.01 ^b	0.59 \pm 0.01 ^b	0.19 \pm 0.01 ^c
EE+240 W/5min	0.71 \pm 0.33 ^b	0.67 \pm 0.24 ^b	0.77 \pm 0.39 ^b	0.77 \pm 0.29 ^b	0.61 \pm 0.28 ^a
EE+240 W/10min	0.77 \pm 0.33 ^b	0.73 \pm 0.38 ^b	0.83 \pm 0.25 ^b	0.83 \pm 0.25 ^b	0.47 \pm 0.27 ^a
EE+240 W/15min	0.76 \pm 0.60 ^b	0.63 \pm 0.48 ^b	0.91 \pm 0.77 ^b	0.90 \pm 0.76 ^b	0.71 \pm 0.50 ^a
EE+340 W/5min	0.55 \pm 0.17 ^b	0.51 \pm 0.05 ^b	0.62 \pm 0.07 ^b	0.61 \pm 0.07 ^b	0.39 \pm 0.15 ^a
EE+340 W/10min	0.58 \pm 0.09 ^b	0.52 \pm 0.12 ^b	0.54 \pm 0.07 ^b	0.53 \pm 0.07 ^b	0.39 \pm 0.18 ^a
EE+ 340 W/15min	1.12 \pm 0.19 ^b	1.02 \pm 0.14 ^b	1.25 \pm 0.30 ^b	1.24 \pm 0.30 ^b	0.77 \pm 0.31 ^a
EE+440 W/ 5 min	2.12 \pm 0.34 ^a	4.15 \pm 0.31 ^a	2.18 \pm 0.41 ^a	2.16 \pm 0.40 ^a	1.36 \pm 0.87 ^a
EE+440 W/10min	0.71 \pm 0.28 ^b	0.56 \pm 0.29 ^b	0.74 \pm 0.42 ^b	0.74 \pm 0.41 ^b	0.57 \pm 0.31 ^a
EE+440 W/15min	0.82 \pm 0.69 ^b	0.91 \pm 0.77 ^b	0.78 \pm 0.71 ^b	0.77 \pm 0.70 ^b	0.48 \pm 0.37 ^a
ANOVA	*	*	*	*	*

Valores medios \pm desviación estándar, n = 3. Los valores con letras diferentes en la misma columna son significativamente diferentes ($p < 0.05$) entre sí. (*) = $p < 0.05$ Tukey; NS: no hay diferencias significativas.

Fuente: Elaboración propia

El aumento de los carotenoides en las muestras procesadas con ultrasonido puede estar asociada a la reducción del tamaño de partículas de las gotas de aceite por la acción del proceso de cavitación y cizallamiento del ultrasonido [9]. Esta reducción del tamaño de gota permite incrementar el área superficial de la fase dispersante en la emulsión, aumentando el coeficiente de transferencia de masa de estos pigmentos [20]. La posible explicación de la reducción de los carotenoides en este estudio puede estar asociado a producción de radicales libres (H^+ y OH^-) durante el procesamiento de ultrasonido, ya que estos radicales se incrementan con el tiempo de exposición, acelerando la oxidación e isomeración de los pigmentos carotenoides [21].

En la Tabla 3 se presentan las propiedades fisicoquímicas evaluadas a la emulsión enriquecida con ECEC sin y con el procesamiento de ultrasonido a 400 W durante 5 minutos. Los valores de pH se ajustan a los reportados por [16] en una emulsión O/W elaborada con aceite de palma como agente dispersante ($pH = 4,80-6,14$). Por el contrario, este autor obtiene un valor de potencial z (-7,18 a -16,33 mV) y tamaño de partícula (0.98 a 0.346 μm) menor al registrado en la presente investigación. En otro estudio realizado por [11] en una emulsión con β - caroteno, reportan valores de conductividad que superan a los del presente trabajo 318 a 334 $\mu s/cm$, por el contrario, el potencial z es menor a los obtenidos en la presente investigación (-19,80 a -32,40 mV).

Tabla 3. Parámetros fisicoquímicos evaluados en la emulsión sin y con tratamiento de ultrasonido

PARAMETRO	Emulsión enriquecida (EE)	EE+Tratamiento (440 W/ 5 min)	t-Student
pH	5.58 \pm 0.07a	5.30 \pm 0.07b	**
Conductividad eléctrica (ms/cm)	65.33 \pm 1.06 a	44.13 \pm 0.36 b	**
Potencial zeta (Mv)	-60.53 \pm 9.63 a	-46.53 \pm 1.45 b	**

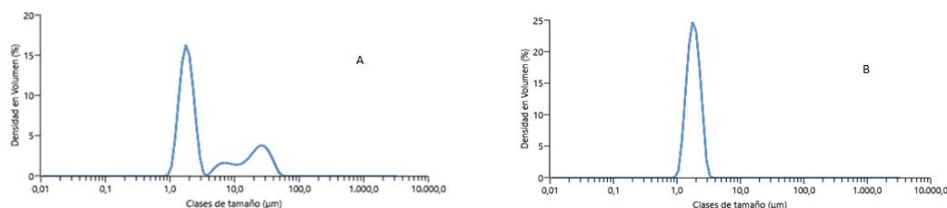
Tamaño de partícula (µm)	2.38 ± 0.07 a	1.84 ± 0.06 b	*
L*	67.10 ± 0.56 b	85.81 ± 0.11 a	**
C	3.67 ± 0.21 b	5.13 ± 0.65 a	**
hº	119.50 ± 0.70 a	117.95 ± 4.60 a	NS

Fuente: Elaboración propia

El análisis estadístico reporta diferencias significativas en todas las variables de respuesta, excepto el atributo de color hº después del tratamiento con ultrasonido (Tabla 3). El tratamiento con ultrasonido redujeron significativamente las variables pH, potencial zeta, tamaño de partícula y, conductividad eléctrica, mientras que las coordenadas de color L* y C* se incrementaron significativamente (Tabla 3). La disminución del pH, y la conductividad en las muestras de estudio se debe principalmente a presencia de menores cargas libres en la superficie del fluido [22]. Los valores negativos del potencial z en las dos muestras debe principalmente a la carga negativa de la glicerina gracias a la presencia de tres grupos OH- en su estructura, ya que el Tween 80, es un surfactante no iónico que tiene carga eléctrica neutra [23, 24]. La reducción del valor absoluto del potencial z en la muestra tratada con ultrasonido probablemente es consecuencia de la degradación de la glicerina inducida por la acción del ultrasonido que permitió la exposición de las partes hidrófobas de la emulsión [11].

La reducción del tamaño de gota después del procesamiento con ultrasonido se debe principalmente al fenómeno físico de cavitación y cizallamiento generado durante el tratamiento con ultrasonido, y a la acción de los surfactantes que rodearon las gotas de aceite para mantener un tamaño pequeño de gota [7, 11]. En la Figura 2 se observa la distribución del tamaño de las gotas de las dos emulsiones evaluadas, la emulsión enriquecida presenta un comportamiento bimodal, mientras que la emulsión con ultrasonido describe un sistema unimodal con mayor uniformidad de tamaño. La emulsión con tratamiento de ultrasonido presenta la distribución de tamaño más reducida, confirmando el efecto del ultrasonido en romper las gotas de aceite en partículas de tamaños más pequeños. Respecto al color superficial el aumento significativo de los atributos de color L*, y C en las muestras procesadas con el ultrasonido, puede estar asociada al aumento del área superficial de las gotas de aceite y a la liberación de los carotenoides en la emulsión, gracias a los procesos de cavitación y cizallamiento durante la acción del proceso de ultrasonido [11].

Figura 2. Emulsión enriquecida (A), y EE+Tratamiento 440 W/ 5 min (B).



Fuente: Elaboración propia

Conclusión

Los resultados obtenidos en esta investigación evidencian que los frutos de chontaduro (*Bactris gasipaes*) constituyen una fuente prometedora de carotenoides, especialmente β-caroteno, δ-caroteno y γ-caroteno, con alto potencial para aplicaciones en las industrias cosmética, farmacéutica y alimentaria. El uso del epicarpio del chontaduro como fuente de pigmentos carotenoides representa una estrategia innovadora para enriquecer emulsiones tipo O/W, mejorando tanto sus propiedades funcionales como estéticas.

El procesamiento por ultrasonido demostró ser una técnica efectiva para incrementar la concentración de carotenoides en la emulsión, mejorar su estabilidad al reducir significativamente el potencial zeta y el tamaño de partícula, y optimizar las propiedades ópticas al incrementar las coordenadas de color. Estas modificaciones no solo favorecen la estabilidad y calidad del producto, sino que también abren nuevas posibilidades para superar los retos asociados con la oxidación y la baja solubilidad de los carotenoides en medio acuoso.

Este artículo contribuye a la literatura científica al ser uno de los primeros estudios en evaluar el impacto del ultrasonido sobre emulsiones enriquecidas con extracto de epicarpio de chontaduro, evidenciando el potencial de esta tecnología para el desarrollo de productos alimenticios funcionales con aplicaciones sostenibles y de alto valor agregado.

Referencias bibliográficas

- [1] J. Martínez-Girón and L. E. and Ordóñez-Santos, "Determinación de la concentración de pigmentos carotenoides en harina de residuos de chontaduro (*Bactris gasipaes*)," *Prod. Limpia*, vol. 11, no. 1, pp. 85–93, 2016. doi:10.22507/pml.v11n1a8
- [2] K. A. N. Matos, D. Praia Lima, A. P. Pereira Barbosa, A. Zerlotti Mercadante, and R. Campos Chisté, "Peels of tucumã (*Astrocaryum vulgare*) and peach palm (*Bactris gasipaes*) are by-products classified as very high carotenoid sources," *Food Chem.*, vol. 272, pp. 216–221, 2019. doi:10.1016/j.foodchem.2018.08.053
- [3] R. C. Chisté, E. L. N. Costa, S. F. Monteiro, and A. Z. Mercadante, "Carotenoid and phenolic compound profiles of cooked pulps of orange and yellow peach palm fruits (*Bactris gasipaes*) from the Brazilian Amazonia," *J. Food Compost. Anal.*, vol. 99, no. 103873, p. 103873, 2021. doi:10.1016/j.jfca.2021.103873
- [4] L. M. de Souza Mesquita, B. V. Neves, L. P. Pisani, and V. V. de Rosso, "Mayonnaise as a model food for improving the bioaccessibility of carotenoids from *Bactris gasipaes* fruits," *Lebensw. Wiss. Technol.*, vol. 122, no. 109022, p. 109022, 2020. doi.org/10.1016/j.lwt.2020.109022
- [5] S. Fang, X. Zhao, Y. Liu, X. Liang, and Y. Yang, "Fabricating multilayer emulsions by using OSA starch and chitosan suitable for spray drying: Application in the encapsulation of β -carotene," *Food Hydrocoll.*, vol. 93, pp. 102–110, 2019. doi:10.1016/j.foodhyd.2019.02.024
- [6] S. Roohinejad, I. Oey, J. Wen, S. J. Lee, D. W. Everett, and D. J. Burritt, "Formulation of oil-in-water β -carotene microemulsions: effect of oil type and fatty acid chain length," *Food Chem.*, vol. 174, pp. 270–278, 2015. doi:10.1016/j.foodchem.2014.11.056
- [7] Y. Li and D. Xiang, "Stability of oil-in-water emulsions performed by ultrasound power or high-pressure homogenization," *PLoS One*, vol. 14, no. 3, p. e0213189, 2019. doi:10.1371/journal.pone.0213189
- [8] D. J. McClements, "Critical review of techniques and methodologies for characterization of emulsion stability," *Crit. Rev. Food Sci. Nutr.*, vol. 47, no. 7, pp. 611–649, 2007. doi:10.1080/10408390701289292

- [9] T. Leong, S. Manickam, G. J. O. Martin, W. Li, and M. Ashokkumar, *Ultrasonic production of nano-emulsions for bioactive delivery in drug and food applications*, 1st ed. Cham, Switzerland: Springer International Publishing, 2018.
- [10] S. de J. Calva-Estrada, O. García, M. R. Mendoza, and M. Jiménez, "Characterization of O/W emulsions of carotenes in blackberry juice performed by ultrasound and high-pressure homogenization," *J. Dispers. Sci. Technol.*, vol. 39, no. 2, pp. 181–189, 2018. doi:10.1080/01932691.2017.1306783
- [11] B. Niu, P. Shao, and P. Sun, "Ultrasound-assisted emulsion electrosprayed particles for the stabilization of β -carotene and its nutritional supplement potential," *Food Hydrocoll.*, vol. 102, no. 105634, p. 105634, 2020. doi:10.1016/j.foodhyd.2019.105634
- [12] S. Belgheisi, A. Motamedzadegan, J. M. Milani, L. Rashidi, and A. Rafe, "Impact of ultrasound processing parameters on physical characteristics of lycopene emulsion," *J. Food Sci. Technol.*, vol. 58, no. 2, pp. 484–493, 2021. doi:10.1007/s13197-020-04557-5
- [13] Z. Lian et al., "pH-Shifting combined with ultrasound treatment of emulsion-filled β -conglycinin gels as β -carotene carriers: Effect of emulsion concentration on gel properties," *Ultrason. Sonochem.*, vol. 95, p. 106412, 2023. doi:10.1016/j.ultsonch.2023.106412
- [14] J. Martínez-Girón, C. Osorio, and L. E. Ordoñez-Santos, "Effect of temperature and particle size on physicochemical and techno-functional properties of peach palm peel flour (*Bactris gasipaes*, red and yellow ecotypes)," *Food Sci. Technol. Int.*, vol. 28, no. 6, pp. 535–544, 2022. doi:10.1177/10820132211025133
- [15] L. E. Ordoñez-Santos, L. X. Pinzón-Zarate, and L. O. González-Salcedo, "Optimization of ultrasonic-assisted extraction of total carotenoids from peach palm fruit (*Bactris gasipaes*) by-products with sunflower oil using response surface methodology," *Ultrason. Sonochem.*, vol. 27, pp. 560–566, 2015. doi:10.1016/j.ultsonch.2015.04.010
- [16] V. D. Prá et al., "Formulation and Characterization of Ultrasound-Assisted Nanoemulsions Containing Palm Oil (*Elaeis guineensis* Jacq) IN WATER," *Braz. J. Chem. Eng.*, vol. 36, no. 2, pp. 941–947, 2019. doi:10.1590/0104-6632.20190362s20180291
- [17] L. E. Ordoñez-Santos, J. Martínez-Girón, and M. E. Arias-Jaramillo, "Effect of ultrasound treatment on visual color, vitamin C, total phenols, and carotenoids content in Cape gooseberry juice," *Food Chem.*, vol. 233, pp. 96–100, 2017. doi:10.1016/j.foodchem.2017.04.114
- [18] D. Fu et al., "Encapsulation of β -carotene in wheat gluten nanoparticle-xanthan gum-stabilized Pickering emulsions: Enhancement of carotenoid stability and bioaccessibility," *Food Hydrocoll.*, vol. 89, pp. 80–89, 2019. doi:10.1016/j.foodhyd.2018.10.032
- [19] R. Mozafarpour and A. Koocheki, "Fabrication of emulsion gels based on sonicated grass pea (*Lathyrus sativus* L.) protein as a delivery system for β -carotene: Kinetic modeling and release behavior," *Lebenson. Wiss. Technol.*, vol. 184, no. 115020, p. 115020, 2023. doi:10.1016/j.lwt.2023.115020

- [20] K. Barman, D. Chowdhury, and P. K. Baruah, "Development of β -carotene loaded nanoemulsion using the industrial waste of orange (*Citrus reticulata*) peel to improve in vitro bioaccessibility of carotenoids and use as natural food colorant," *J. Food Process. Preserv.*, vol. 44, no. 5, p. e14429, 2020. doi:10.1111/jfpp.14429
- [21] Y. Tao and D.-W. Sun, "Enhancement of food processes by ultrasound: a review," *Crit. Rev. Food Sci. Nutr.*, vol. 55, no. 4, pp. 570–594, 2015. doi:10.1080/10408398.2012.667849
- [22] N. Bock, M. A. Woodruff, D. W. Hutmacher, and T. R. Dargaville, "Electrospraying, a reproducible method for production of polymeric microspheres for biomedical applications," *Polymers (Basel)*, vol. 3, no. 1, pp. 131–149, 2011. doi:10.3390/polym3010131
- [23] D. F. Ramírez Jiménez, "Sistema de medición y control de temperatura para un prototipo de planta de tratamiento de aguas residuales", *Investigación e Innovación en Ingenierías*, vol. 9, n.º 1, pp. 100–113, abr. 2021. DOI: <https://doi.org/10.17081/invinno.9.1.4305>
- [24] N. A. Riquelme Hinojosa and C. A. Arancibia Aguilar, "Obtención de nanoemulsiones utilizando saponinas de quillay como sustituto de un surfactante sintético," *Mundo Nano Rev. Interdiscip. Nanociencia Nanotecnología*, vol. 12, no. 23, p. 1, 2019. doi:10.22201/ceiich.24485691e.2019.23.67654