

NANOEMULSIONES: UN ENFOQUE HACIA EL USO DE EMULSIFICANTES DE ORIGEN NATURAL

Data de submissão: 06/11/2024

Data de aceite: 02/12/2024

M.E. Guatemala-Cisneros

Centro de Investigación en Ciencia Aplicada y Tecnología Avanzada del Instituto Politécnico Nacional, Querétaro, México

M.O. Hernández-Jiménez

Centro de Investigación en Ciencia Aplicada y Tecnología Avanzada del Instituto Politécnico Nacional, Querétaro, México

J.D.A. Loa

Centro de Investigación en Ciencia Aplicada y Tecnología Avanzada del Instituto Politécnico Nacional, Querétaro, México

N.G. Rojas-Avelizapa

Centro de Investigación en Ciencia Aplicada y Tecnología Avanzada del Instituto Politécnico Nacional, Querétaro, México

y mejorar propiedades sensoriales las convierte en elementos indispensables en la formulación de una amplia gama de productos. Sin embargo, su inestabilidad termodinámica representa un desafío significativo, especialmente en aplicaciones donde la estabilidad a largo plazo es crucial. El objetivo de este capítulo es abordar las soluciones que desde la nanotecnología se han investigado y desarrollado para minimizar estas limitantes, específicamente la formulación de nanoemulsiones, una forma de emulsión con gotas de tamaño nanométrico. Se explorará el impacto de los emulsionantes, tanto sintéticos como naturales, en la formación y estabilidad de las nanoemulsiones, destacando su papel en la mejora de la seguridad y eficacia de diversos productos.

PALABRAS CLAVE: Compuestos bioactivos, inestabilidad termodinámica, surfactantes.

RESUMEN: Las emulsiones, constituidas por al menos dos líquidos inmiscibles entre sí, desempeñan un papel crucial en diversas industrias, desde la alimentaria hasta la farmacéutica y cosmética. Su capacidad para dispersar componentes

INTRODUCCIÓN

Las emulsiones son dispersiones coloidales que constan de al menos dos líquidos o fluidos inmiscibles entre sí (fase acuosa y fase oleosa), normalmente agua

en aceite (emulsión (w/o), esta corresponde a la dispersión de la fase acuosa en la fase oleosa aunque también puede presentarse como emulsiones de aceite en agua (emulsión (o/w), esta se presenta cuando la fase oleosa se dispersa en la fase acuosa; al formarse la emulsión uno de los líquidos queda disperso en el otro (normalmente la fase acuosa continua) en forma de pequeñas gotas (Tan & McClements et al., 2021). La clasificación de las emulsiones se ha establecido según el tamaño de las gotas macroemulsiones ($\approx 0.1 \mu\text{m}$) microemulsiones (0.01-0.1 μm) y nanoemulsiones (20 a 200 nm) (José et al., 2022; Tian et al., 2022). Esta clasificación se visualiza en la figura 1.

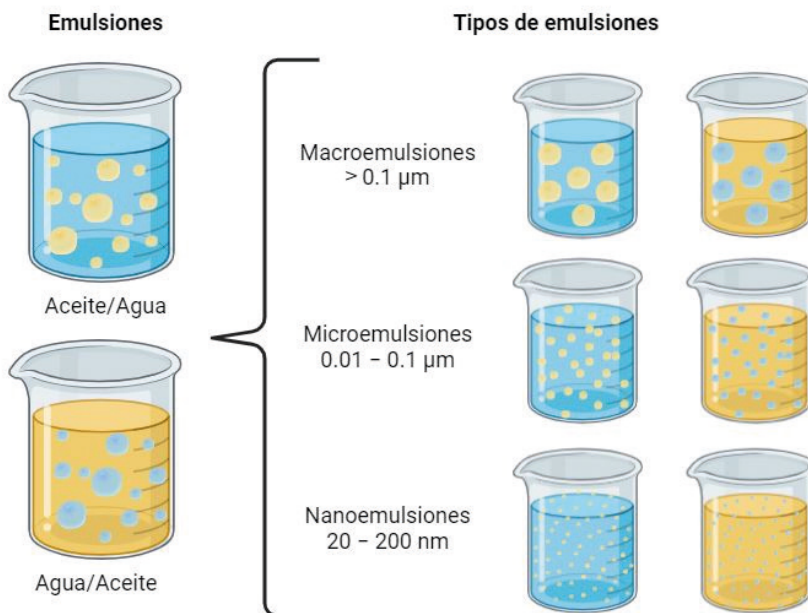


Figura 1. Emulsiones agua en aceite, aceite en agua y tipos de emulsiones.

Las emulsiones son componentes importantes de muchos productos farmacéuticos, cosméticos, productos de cuidado personal y agroquímicos (McClements, 2015; Yukuyama et al., 2015), por mencionar algunas de sus aplicaciones. Las emulsiones se emplean comúnmente en la industria alimentaria para crear una amplia variedad de productos alimenticios emulsionados como bebidas, leches, cremas, aderezos, salsas, entre otros productos alimenticios (Bai et al., 2021).

Respecto a los beneficios de las emulsiones en la industria alimentaria, estas confieren a los alimentos atributos funcionales distintos, como: apariencia, textura, mejoras en los perfiles de sabor y potencializa las sensaciones en la boca. En la industria farmacéutica y cosmética se han utilizados como vehículo para la encapsulación y administración de agentes bioactivos como vitaminas y nutraceuticos (Fig. 2).

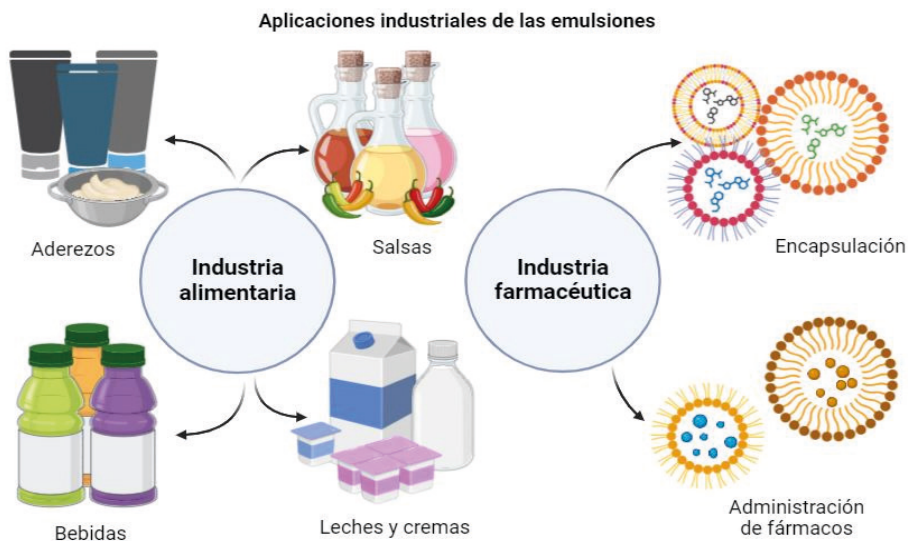


Figura 2. Aplicaciones de las emulsiones en la industria alimentaria y farmacéutica.

A pesar de que las emulsiones confieren ventajas importantes a los productos, una de las desventajas de su uso es que son termodinámicamente inestables y por lo tanto tienden a descomponerse con el tiempo debido a diversos factores como son la separación, floculación, coalescencia y separación de fases entre otros; en la industria farmacéutica, el uso de emulsiones presenta algunas salvedades ya que tienen una capacidad restringida en la liberación del componente encapsulado pues tienden a romperse (Israelachvili, 2011; Tan & McClements et al., 2021).

Sin embargo, las desventajas que presentan han dado lugar a distintas investigaciones dirigidas principalmente a, modificar el tamaño de las emulsiones para hacerlas más estables, lo cual se ha subsanado al alcanzar la escala nanométrica. Las nanoemulsiones, también conocidas como emulsiones submicrónicas o ultrafinas son emulsiones de tamaño nanométrico, con tamaños que oscilan de 20 a 200 nm (Lago et al., 2019). La formación de nanoemulsiones tiene lugar con dispersiones coloidales que son termodinámicamente inestables y que contienen gotas de aceite de un diámetro <200 nm. Su obtención se basa en enfoques de baja (energía química o agitación suave) y de alta energía (fuerzas disruptivas como sonicadores), aunque por lo general se requiere el uso de emulsionantes sintéticos (Fig. 3), (Borin et al., 2016; Ren et al., 2019; Jiang et al., 2020).

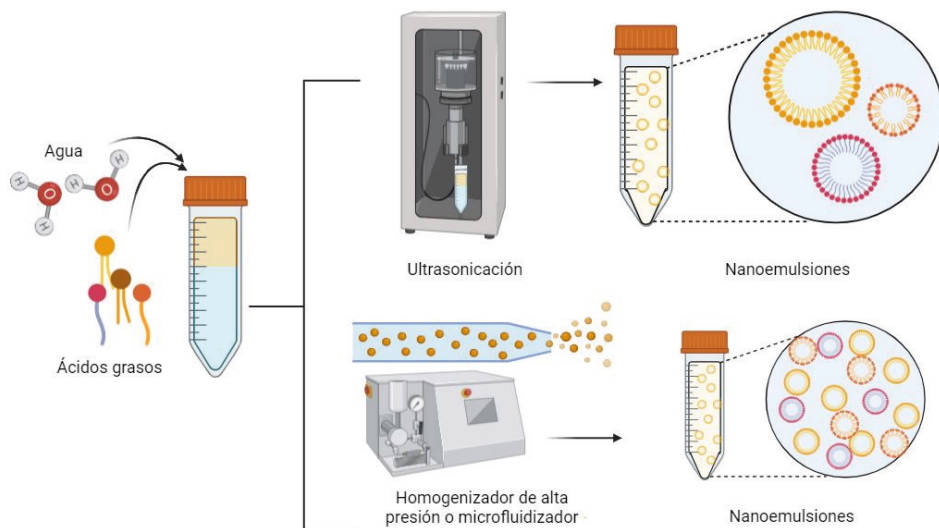


Figura 3. Síntesis de nanoemulsiones.

Las nanoemulsiones presentan varias ventajas en comparación con las emulsiones convencionales; tienen mejor estabilidad física, mejorando así la agregación de partículas y disminuyendo la separación gravitacional, pueden fabricarse en una variedad de formulaciones, dispersan débilmente la luz y por lo tanto pueden ser incorporadas en productos ópticamente transparentes, mejoran la biodisponibilidad de sustancias hidrofóbicas (Choi & McClements, 2020; Fuentes et al., 2021). Debido a la relevancia y avance en el campo de investigación, a continuación, se mencionarán las aplicaciones de nanoemulsiones en las industrias alimentaria, cosmética y farmacéutica; donde las nanoemulsiones ofrecen beneficios significativos.

Como se ha mencionado anteriormente, las nanoemulsiones presentan propiedades únicas y beneficiosas. Se constituyen principalmente por una fase oleosa, una fase acuosa y un emulsionante. Aunque los emulsionantes sintéticos ofrecen ventajas, surgen preocupaciones sobre su seguridad a largo plazo, lo que ha motivado la investigación en emulsionantes de origen natural.

NANOEMULSIONES A PARTIR DE EMULSIFICADORES/EMULSIONANTES SINTÉTICOS

Las nanoemulsiones tienen características y propiedades que dependen de su composición y método de fabricación, por ejemplo, las nanoemulsiones de aceite en agua consisten en pequeñas gotas de aceite dispersas en un medio acuoso con cada gota de aceite rodeada por una capa protectora de tensoactivo y/o emulsionante (McClements,

2012; Troncoso et al., 2012). El tamaño pequeño de las nanoemulsiones presenta dos ventajas relevantes: mejora la estabilidad de la emulsión y cuentan con la capacidad de aumentar la superficie de contacto del sistema de emulsión incrementando con ello, la biodisponibilidad de los compuestos bioactivos encapsulados (Öztürk et al., 2015).

Las nanoemulsiones están constituidas por tres componentes principales: fase oleosa, fase acuosa y surfactante. Varias son las condiciones que influyen en la formación, estabilidad y propiedades fisicoquímicas de las nanoemulsiones; por ejemplo en el caso de la fase oleosa, las características fisicoquímicas como la tensión interfacial, viscosidad y estabilidad química; en la fase acuosa, esta puede contener otros componentes polares como cosolventes, minerales, ácidos y bases, estos compuestos puede determinar la polaridad, tensión interfacial, reología, pH y fuerza iónica, almacenamiento a largo plazo; tanto la fase oleosa como la fase acuosa son imprescindibles para la elaboración de las nanoemulsiones pero por encima de estas dos, el factor más importante para el diseño adecuado es la selección correcta del emulsionante o la mezcla de ellos (McClements & Öztürk 2021), estos han sido clasificados como aniónicos, catiónicos, no iónicos, anfóteros o zwitteriónicos (Fig. 4), los cuales son fabricados a partir de productos derivados del petróleo, grasas, aceites, gliceroles, ácidos orgánicos y azúcares (Dickinson, 2009).

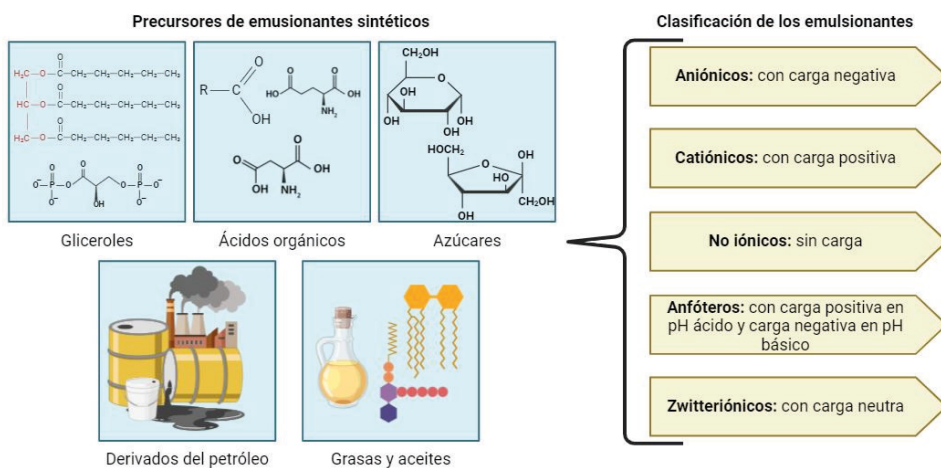


Figura 4. Precusores y clasificación de emulsionantes sintéticos.

El emulsionante a partir del cual se forma la nanoemulsión es vital para la formación de ésta y desempeña un papel clave en su estabilidad. En la industria alimentaria el uso de nanoemulsiones puede aumentar la vida de anaquel de los productos que las contienen, ayudan a mantener la estabilidad física y oxidativa, mejora las propiedades organolépticas, la viscosidad y tensión interfacial (Marhamati et al., 2021). Se ha reportado que las nanoemulsiones tienen gran éxito en encapsular compuestos bioactivos, transportarlos y mejorar su disponibilidad (Gorain et al., 2014; Bangia & Om, 2015; Zahi et al., 2015; Cenobio-Galindo et al., 2019).

El uso de emulsionantes sintéticos ofrece ventajas en la formulación de una nanoemulsión, sin embargo, se tienen algunas inquietudes con respecto a la seguridad asociada al uso de estos emulsionantes. Se ha reportado que estos emulsionantes sintéticos podrían causar síntomas tóxicos para los consumidores por la administración prolongada de los mismos. Gao et al., (2016) reportó que después de realizar pruebas clínicas se observó una posible unión de emulsionantes aniónicos a proteínas, enzimas y membranas de fosfolípidos en el cuerpo humano; lo anterior provoca alteraciones adversas, por ejemplo: disfunción de enzimas y modificación de la estructura de proteínas. Algunos otros estudios hacen referencia a su citotoxicidad; en estos últimos, se reportó que los emulsionantes no iónicos tienen menor toxicidad que los aniónicos, catiónicos y zwitterionicos; de los cuales se reportó que la toxicidad producida por los emulsionantes catiónicos es la más importante (Vlachy et al., 2009). Una limitante del uso de emulsionantes sintéticos se refiere a su baja biodegradabilidad y por ende efecto negativo al medio ambiente provocada por la acumulación de estos (García et al., 2016). Por lo anterior, en los últimos años se han realizado investigaciones para innovar en tecnologías que conlleven a la formulación de nanoemulsiones a partir de emulsionantes de origen natural.

NANOEMULSIONES A PARTIR DE EMULSIONANTES NATURALES

Se han realizado distintas investigaciones para sustituir los emulsionantes sintéticos por emulsionantes naturales. En esta búsqueda se han identificado nuevas moléculas con actividad emulsificante y con potencial para formar nanoemulsiones, dentro de estas se encuentran: proteínas, fosfolípidos, polisacáridos, lipopolisacáridos y saponinas (Fig. 5); las fuentes a partir de las cuales se obtienen son de origen biológico, como, por ejemplo: extractos de plantas, microorganismos como: hongos, bacterias y levaduras, y residuos alimentarios (Schreiner et al., 2020; McClements et al., 2021; Marhamati et al., 2021b).

En el caso de los compuestos emulsionantes provenientes de plantas, se han estudiado saponinas de quillaja (Böttcher & Drusch, 2015; Reichert et al., 2019; Zhu et al., 2019) las cuales han sido aplicadas en productos cosméticos que contienen ácido hialurónico, así como en el desarrollo de productos para el tratamiento de impurezas de la piel y como tintes para el cabello. Por otro lado, las saponinas de yuca, también se han utilizado en la formulación de emulsiones de aceite en agua, así como productos base para composiciones cosméticas y excipientes farmacéuticos. Adicionalmente, se han empleado ambas saponinas, de quillaja y yuca, como agentes emulsionantes/espumantes en una pasta de dientes orgánica (Adharsh & Sontakke, 2023). De igual forma, se ha reportado que la saponina glicirricina y soya, fueron añadidas a formulaciones cosméticas, dando lugar a una mejor estabilidad durante el almacenamiento a diferentes temperaturas y también han contribuido en la mejora de las propiedades organolépticas. En el caso de las saponinas de ginseng, éstas se han utilizado con el objetivo de obtener nanoemulsiones para el cuidado

de la piel con efectos antienviejecimiento, favoreciendo la proliferación de fibroblastos y la biosíntesis de colágeno (Fig. 5), (Schreiner et al., 2022).

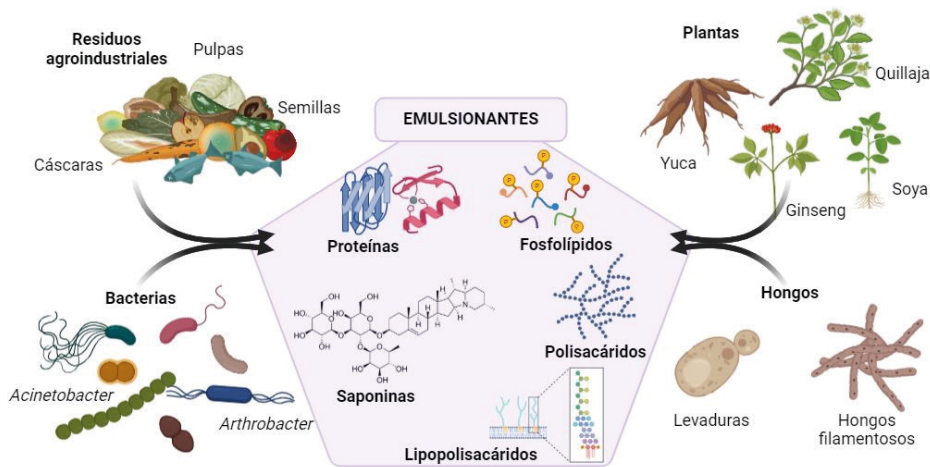


Figura 5. Precusores de emulsionantes naturales.

En cuanto a los emulsionantes provenientes de microorganismos, se han reportado que se pueden obtener a partir de hongos (soforolípidos), levaduras (ácidos grasos) y bacterias, de estas últimas, se han obtenido polisacáridos provenientes de *Arthrobacter* sp. y su uso se enfocó en la administración de proteínas y productos farmacéuticos. Por otro lado, se obtuvo un polisacárido aniónico con actividad emulsionante a partir de *Acinetobacter radioresistens*, con potencial aplicación en la administración de fármacos (Thraeib et al., 2022).

Por su parte, el uso de residuos agroindustriales también ha sido una valiosa fuente de emulsionantes, tanto de origen animal como vegetal, esto debido a que, con su uso, se podrían reducir los costos de producción y el impacto ambiental (Gayathiri et al., 2022). Principalmente, se pueden extraer de la industria frutícola y azucarera (cáscaras, pulpas y semillas), obteniendo sustratos ricos en proteínas, lípidos y carbohidratos, para la síntesis de emulsionantes (Sundaram et al., 2024). En los residuos de animales, se han obtenido fosfolípidos en tejidos de animales e incluso de leche de vaca, los cuales presentan la actividad emulsificante que se puede aprovechar para diversas áreas (Lordan & Blesso, 2023). En la Tabla 1, se enlistan algunos biosurfactantes/emulsionantes naturales que se han obtenido a partir de residuos cuyos componentes han permitido su aplicación en diversos sectores.

Residuo	Compuestos bioactivos	Uso	Tipo de biosurfactante	Aplicación	Referencia
Cáscaras, tallos de cultivos, semillas y desechos de frutas	Carotenoides, polifenoles, enzimas, fibras, aceites, carbohidratos, vitaminas, minerales	Sustrato para la producción de biosurfactantes y biocombustibles mediante fermentación microbiana	Rhamnolípidos, lipopéptidos y glicolípidos	Reducción de la tensión superficial, elaboración de productos para limpieza, recuperación mejorada de petróleo y remediación ambiental.	Chebbi et al., 2021; Kondaveeti et al., 2019; Sagar et al., 2018; Szabo et al., 2018; Schieber, 2017; Reddy et al., 2016; Paraszkiwicz et al., 2018
Fraciones de leche cruda, yogurth, queso, crema, leche en polvo.	Ácidos grasos, proteínas, lactosa, carbohidratos, minerales y vitaminas	Sustrato para la producción de biosurfactantes mediante la fermentación microbiana.	Rhamnolípidos, glicolípidos, y sophorolípidos	Reducción de tensión superficial, elaboración de productos para limpieza de superficies y remediación ambiental.	Sharma et al., 2020; Lappa et al., 2019; Enayati et al., 2018; Kushwaha et al., 2011
Suero de leche: Dulce (generado durante la elaboración de quesos) y ácido (generado en la producción de queso cottage y yogurt)	Ácidos grasos, carbohidratos, proteínas, lactosa, glucosa	Sustrato para la producción de biosurfactantes mediante fermentación microbiana.	Sophorolípidos y otros surfactantes	Industria de alimentos y bebidas, elaboración de productos de limpieza, aditivos en la alimentación animal, precursores de biocombustibles y antimicrobianos	Gomes et al., 2021; Mohanakrishna et al., 2020; Xu et al., 2019;
Melaza de caña de azúcar y remolacha	Almidón, glucosa, fructosa, vitaminas	Sustrato para la producción de biosurfactantes mediante la fermentación microbiana.	Rhamnolípidos y sophorolípidos	Aditivos en la industria alimentaria y de cosméticos, biorremediación de sitios y producción de productos de limpieza	Wongsirichot et al., 2021; Nazaret et al., 2021; Rivera et al., 2019; Martins & Martins 2018; Rane et al., 2017
Restos de aceites, tortas de semillas oleaginosas, restos de ácidos grasos y efluentes solubles en agua.	Lípidos, ácidos grasos, carbohidratos y proteínas	Sustrato para la producción de biosurfactantes mediante la fermentación microbiana.	Rhamnolípidos, biotensoactivo lipopéptido y biosurfactantes zwitterionicos	Producción de alimentos, biorremediación de suelos contaminados, productos de limpieza	Prakash et al., 2021; Sood et al., 2020; Jimoh y Lin, 2020; Hentati et al., 2019; Adetunji & Olaniran, 2019; Chen et al., 2018

Tabla 1. Surfactantes/emulsionantes naturales obtenidos a partir de residuos agroindustriales.

CONCLUSIÓN

El desarrollo de nanoemulsiones a partir de emulsionantes sintéticos y naturales representa un paso significativo hacia la mejora de la estabilidad y funcionalidad de una

amplia gama de productos de distintas industrias, desde la alimenticia, productos de limpieza, de cuidado personal hasta la industria farmacéutica, cosmética y petrolera. Si bien los emulsionantes sintéticos han demostrado ser eficaces en la formación de nanoemulsiones, su toxicidad a la salud humana y al medio ambiente plantean una gran preocupación mundial. En contraste, los emulsionantes naturales provenientes de diversas fuentes biológicas y residuos agroindustriales ofrecen una alternativa prometedora, aprovechando recursos renovables y minimizando los riesgos asociados con su uso, mediante la formulación de productos seguros, eficaces y sostenibles en diversas industrias.

REFERENCIAS

- Bai, L., Huan, S., Rojas, O. J., & McClements, D. J. (2021). Recent Innovations in Emulsion Science and Technology for Food Applications. *Journal Of Agricultural And Food Chemistry*, 69(32), 8944-8963. <https://doi.org/10.1021/acs.jafc.1c01877>
- Borrin, T. R., Georges, E. L., Moraes, I. C. F., & Pinho, S. C. (2016). Curcumin-loaded nanoemulsions produced by the emulsion inversion point (EIP) method: An evaluation of process parameters and physico-chemical stability. *Journal Of Food Engineering*, 169, 1-9. <https://doi.org/10.1016/j.jfoodeng.2015.08.012>
- Böttcher, S., & Drusch, S. (2015). Interfacial Properties of Saponin Extracts and Their Impact on Foam Characteristics. *Food Biophysics*, 11(1), 91-100. <https://doi.org/10.1007/s11483-015-9420-5>
- Chebbi, A., Franzetti, A., Castro, F. D., Gomez, F. H., Tazzari, M., Sbaffoni, S., & Vaccari, M. (2021). Potentials of Winery and Olive Oil Residues for the Production of Rhamnolipids and Other Biosurfactants: A Step Towards Achieving a Circular Economy Model. *Waste And Biomass Valorization*, 12(8), 4733-4743. <https://doi.org/10.1007/s12649-020-01315-8>
- Chen, C., Sun, N., Li, D., Long, S., Tang, X., Xiao, G., & Wang, L. (2018). Optimization and characterization of biosurfactant production from kitchen waste oil using *Pseudomonas aeruginosa*. *Environmental Science And Pollution Research International*, 25(15), 14934-14943. <https://doi.org/10.1007/s11356-018-1691-1>
- Choi, S. J., & McClements, D. J. (2020). Nanoemulsions as delivery systems for lipophilic nutraceuticals: strategies for improving their formulation, stability, functionality and bioavailability. *Food Science And Biotechnology*, 29(2), 149-168. <https://doi.org/10.1007/s10068-019-00731-4>
- De Jesús Cenobio-Galindo, A., Campos-Montiel, R. G., Jiménez-Alvarado, R., Almaraz-Buendía, I., Medina-Pérez, G., & Fernández-Luqueño, F. (2019). Development and incorporation of nanoemulsions in food. *International Journal Of Food Studies*, 8(2), 105-124. <https://doi.org/10.7455/ijfs/8.2.2019.a10>
- Dickinson, E. (2009). Hydrocolloids as emulsifiers and emulsion stabilizers. *Food Hydrocolloids*, 23(6), 1473-1482. <https://doi.org/10.1016/j.foodhyd.2008.08.005>
- Enayati, M., Gong, Y., Goddard, J. M., & Abbaspourrad, A. (2018). Synthesis and characterization of lactose fatty acid ester biosurfactants using free and immobilized lipases in organic solvents. *Food Chemistry*, 266, 508-513. <https://doi.org/10.1016/j.foodchem.2018.06.051>
- Fuentes, K., Matamala, C., Martínez, N., Zúñiga, R. N., & Troncoso, E. (2021). Comparative Study of Physicochemical Properties of Nanoemulsions Fabricated with Natural and Synthetic Surfactants. *Processes*, 9(11), 2002. <https://doi.org/10.3390/pr9112002>

Gao, H., Xu, R., Cao, W., Zhou, X., Yan, Y., Lu, L., Xu, Q., & Shen, Y. (2016). Food Emulsifier Glycerin Monostearate Increases Internal Exposure Levels of Six Priority Controlled Phthalate Esters and Exacerbates Their Male Reproductive Toxicities in Rats. *PLoS One*, *11*(8), e0161253. <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0161253>

García, M., Kaczerewska, O., Ribosa, I., Brycki, B., Materna, P., & Drgas, M. (2016). Biodegradability and aquatic toxicity of quaternary ammonium-based gemini surfactants: Effect of the spacer on their ecological properties. *Chemosphere*, *154*, 155-160. <https://doi.org/10.1016/j.chemosphere.2016.03.109>

Gayathiri, E., Prakash, P., Karmegam, N., Varjani, S., Awasthi, M. K., & Ravindran, B. (2022). Biosurfactants: Potential and Eco-Friendly Material for Sustainable Agriculture and Environmental Safety—A Review. *Agronomy*, *12*(3), 662. <https://doi.org/10.3390/agronomy12030662>

Gomes, J. V. P., Oliveira, L. A., Pereira, S. M. S., Da Conceição, A. R., Anunciação, P. C., De Souza, E. C. G., Perrone, Í. T., Da Silva Junqueira, M., Santana, H., & Della Lúcia, C. M. (2021). Comparison of bioactive compounds and nutrient contents in whey protein concentrate admixture of turmeric extract produced by spray drying and foam mat drying. *Food Chemistry*, *345*, 128772. <https://doi.org/10.1016/j.foodchem.2020.128772>

Gorain, B., Choudhury, H., Kundu, A., Sarkar, L., Karmakar, S., Jaisankar, P., & Pal, T. K. (2014). Nanoemulsion strategy for olmesartan medoxomil improves oral absorption and extended antihypertensive activity in hypertensive rats. *Colloids And Surfaces B: Biointerfaces*, *115*, 286-294. <https://doi.org/10.1016/j.colsurfb.2013.12.016>

Hentati, D., Chebbi, A., Hadrich, F., Frikha, I., Rabanal, F., Sayadi, S., Manresa, Á., & Chamkha, M. (2019a). Production, characterization and biotechnological potential of lipopeptide biosurfactants from a novel marine *Bacillus stratosphericus* strain FLU5. *Ecotoxicology And Environmental Safety*, *167*, 441-449. <https://doi.org/10.1016/j.ecoenv.2018.10.036>

Hentati, D., Chebbi, A., Hadrich, F., Frikha, I., Rabanal, F., Sayadi, S., Manresa, Á., & Chamkha, M. (2019b). Production, characterization and biotechnological potential of lipopeptide biosurfactants from a novel marine *Bacillus stratosphericus* strain FLU5. *Ecotoxicology And Environmental Safety*, *167*, 441-449. <https://doi.org/10.1016/j.ecoenv.2018.10.036>

[https://doi.org/10.13040/ijpsr.0975-8232.6\(4\).1363-72](https://doi.org/10.13040/ijpsr.0975-8232.6(4).1363-72). (2015). *International Journal Of Pharmaceutical Sciences And Research*, *6*(4). [https://doi.org/10.13040/ijpsr.0975-8232.6\(4\).1363-72](https://doi.org/10.13040/ijpsr.0975-8232.6(4).1363-72)

Israelachvili, J. N. (2011). Intermolecular and Surface Forces. En *Elsevier eBooks* (p. iii). <https://doi.org/10.1016/b978-0-12-391927-4.10024-6>

Jiang, T., Liao, W., & Charcosset, C. (2020). Recent advances in encapsulation of curcumin in nanoemulsions: A review of encapsulation technologies, bioaccessibility and applications. *Food Research International*, *132*, 109035. <https://doi.org/10.1016/j.foodres.2020.109035>

Jimoh, A. A., & Lin, J. (2020). Biotechnological Applications of *Paenibacillus* sp. D9 Lipopeptide Biosurfactant Produced in Low-cost Substrates. *Applied Biochemistry And Biotechnology*, *191*(3), 921-941. <https://doi.org/10.1007/s12010-020-03246-5>

Jose, D., Muenmuang, C., Kitiborwornkul, N., Yasurin, P., Asavasanti, S., Tantayotai, P., & Sriariyanun, M. (2022). Effect of surfactants and Co-surfactants in formulation of noni fruit extract in virgin coconut oil-based emulsion. *Journal Of The Indian Chemical Society*, *99*(10), 100729. <https://doi.org/10.1016/j.jics.2022.100729>

- Kondaveeti, S., Abu-Reesh, I. M., Mohanakrishna, G., Pant, D., & He, Z. (2019). Utilization of residual organics of Labaneh whey for renewable energy generation through bioelectrochemical processes: Strategies for enhanced substrate conversion and energy generation. *Bioresource Technology*, *286*, 121409. <https://doi.org/10.1016/j.biortech.2019.121409>
- Kushwaha, J. P., Srivastava, V. C., & Mall, I. D. (2011). An Overview of Various Technologies for the Treatment of Dairy Wastewaters. *Critical Reviews In Food Science And Nutrition*, *51*(5), 442-452. <https://doi.org/10.1080/10408391003663879>
- Lago, A. M. T., Neves, I. C. O., Oliveira, N. L., Botrel, D. A., Minim, L. A., & De Resende, J. V. (2019). Ultrasound-assisted oil-in-water nanoemulsion produced from *Pereskia aculeata* Miller mucilage. *Ultrasonics Sonochemistry*, *50*, 339-353. <https://doi.org/10.1016/j.ultsonch.2018.09.036>
- Lappa, I. K., Papadaki, A., Kachrimanidou, V., Τέρπου, A., Koulougliotis, D., & Eriotou, E. (2019). Cheese Whey Processing: Integrated Biorefinery Concepts and Emerging Food Applications. *Foods*, *8*(8), 347. <https://doi.org/10.3390/foods8080347>
- Lordan, R., & Blesso, C. N. (2023). Editorial: Phospholipids and sphingolipids in nutrition, metabolism, and health. *Frontiers In Nutrition*, *10*. <https://doi.org/10.3389/fnut.2023.1153138>
- Marhamati, M., Ranjbar, G., & Rezaie, M. (2021a). Effects of emulsifiers on the physicochemical stability of Oil-in-water Nanoemulsions: A critical review. *Journal Of Molecular Liquids*, *340*, 117218. <https://doi.org/10.1016/j.molliq.2021.117218>
- Marhamati, M., Ranjbar, G., & Rezaie, M. (2021b). Effects of emulsifiers on the physicochemical stability of Oil-in-water Nanoemulsions: A critical review. *Journal Of Molecular Liquids*, *340*, 117218. <https://doi.org/10.1016/j.molliq.2021.117218>
- Martins, P. C., & Martins, V. G. (2018). Biosurfactant production from industrial wastes with potential remove of insoluble paint. *International Biodeterioration & Biodegradation*, *127*, 10-16. <https://doi.org/10.1016/j.ibiod.2017.11.005>
- McClements, D. J. (2012). Nanoemulsions versus microemulsions: terminology, differences, and similarities. *Soft Matter*, *8*(6), 1719-1729. <https://doi.org/10.1039/c2sm06903b>
- McClements, D. J. (2015). Food emulsions. En *CRC Press eBooks*. <https://doi.org/10.1201/b18868>
- McClements, D. J., Das, A. K., Dhar, P., Nanda, P. K., & Chatterjee, N. (2021). Nanoemulsion-Based Technologies for Delivering Natural Plant-Based Antimicrobials in Foods. *Frontiers In Sustainable Food Systems*, *5*. <https://doi.org/10.3389/fsufs.2021.643208>
- McClements, D. J., & Öztürk, B. (2021). Utilization of Nanotechnology to Improve the Handling, Storage and Biocompatibility of Bioactive Lipids in Food Applications. *Foods*, *10*(2), 365. <https://doi.org/10.3390/foods10020365>
- Mohanakrishna, G., Abu-Reesh, I. M., & Pant, D. (2020). Enhanced bioelectrochemical treatment of petroleum refinery wastewater with Labaneh whey as co-substrate. *Scientific Reports*, *10*(1). <https://doi.org/10.1038/s41598-020-76668-0>
- N, A. A., & Sontakke, M. (2023). Plant-based emulsifiers: Sources, extraction, properties and applications. *Pharma Innovation*, *12*(5), 08-16. <https://doi.org/10.22271/tpi.2023.v12.i5a.20043>

- Nazareth, T. C., Zanutto, C. P., Tripathi, L., Juma, A., Maass, D., De Souza, A. A. U., & Banat, I. M. (2020). The use of low-cost brewery waste product for the production of surfactin as a natural microbial biocide. *Biotechnology Reports*, 28, e00537. <https://doi.org/10.1016/j.btre.2020.e00537>
- Öztürk, B., Argin, S., Özilgen, M., & McClements, D. J. (2015). Formation and stabilization of nanoemulsion-based vitamin E delivery systems using natural biopolymers: Whey protein isolate and gum arabic. *Food Chemistry*, 188, 256-263. <https://doi.org/10.1016/j.foodchem.2015.05.005>
- Paraszkiewicz, K., Bernat, P., Kuśmierska, A., Chojniak, J., & Płaza, G. (2018). Structural identification of lipopeptide biosurfactants produced by *Bacillus subtilis* strains grown on the media obtained from renewable natural resources. *Journal Of Environmental Management*, 209, 65-70. <https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2017.12.033>
- Prakash, A. A., Prabhu, N. S., Rajasekar, A., Parthipan, P., AlSalhi, M. S., Devanesan, S., & Govarthanan, M. (2021). Bio-electrokinetic remediation of crude oil contaminated soil enhanced by bacterial biosurfactant. *Journal Of Hazardous Materials*, 405, 124061. <https://doi.org/10.1016/j.jhazmat.2020.124061>
- Rane, A., Baikar, V. V., Kumar, D. V. R., & Deopurkar, R. L. (2017). Agro-Industrial Wastes for Production of Biosurfactant by *Bacillus subtilis* ANR 88 and Its Application in Synthesis of Silver and Gold Nanoparticles. *Frontiers In Microbiology*, 8. <https://doi.org/10.3389/fmicb.2017.00492>
- Reddy, K. S., Khan, M., Archana, K., Reddy, M. J., & Hameeda, B. (2016). Utilization of mango kernel oil for the rhamnolipid production by *Pseudomonas aeruginosa* DR1 towards its application as biocontrol agent. *Bioresource Technology*, 221, 291-299. <https://doi.org/10.1016/j.biortech.2016.09.041>
- Reichert, C. L., Salminen, H., & Weiß, J. (2019). QuillajaSaponin Characteristics and Functional Properties. *Annual Review Of Food Science And Technology*, 10(1), 43-73. <https://doi.org/10.1146/annurev-food-032818-122010>
- Ren, G., Sun, Z., Wang, Z., Zheng, X., Xu, Z., & D, S. (2019). Nanoemulsion formation by the phase inversion temperature method using polyoxypropylene surfactants. *Journal Of Colloid And Interface Science*, 540, 177-184. <https://doi.org/10.1016/j.jcis.2019.01.018>
- Rivera, Á. D., Urbina, M. Á. M., & López, V. E. L. Y. (2019). Advances on research in the use of agro-industrial waste in biosurfactant production. *World Journal Of Microbiology & Biotechnology Incorporating The MIRCEAN Journal Of Applied Microbiology And Biotechnology/World Journal Of Microbiology & Biotechnology*, 35(10). <https://doi.org/10.1007/s11274-019-2729-3>
- Sagar, N. A., Pareek, S., Sharma, S., Yahia, E. M., & Lobo, M. (2018). Fruit and Vegetable Waste: Bioactive Compounds, Their Extraction, and Possible Utilization. *Comprehensive Reviews In Food Science And Food Safety*, 17(3), 512-531. <https://doi.org/10.1111/1541-4337.12330>
- Schieber, A. (2017). Side Streams of Plant Food Processing As a Source of Valuable Compounds: Selected Examples. *Annual Review Of Food Science And Technology*, 8(1), 97-112. <https://doi.org/10.1146/annurev-food-030216-030135>
- Schreiner, T. B., Dias, M. M., Barreiro, M., & Pinho, S. P. (2022). Saponins as Natural Emulsifiers for Nanoemulsions. *Journal Of Agricultural And Food Chemistry*, 70(22), 6573-6590. <https://doi.org/10.1021/acs.jafc.1c07893>
- Schreiner, T. B., Santamaria-Echart, A., Ribeiro, A., Peres, A. M., Dias, M. M., Pinho, S. P., & Barreiro, M. F. (2020). Formulation and Optimization of Nanoemulsions Using the Natural Surfactant Saponin from Quillaja Bark. *Molecules (Basel. Online)*, 25(7), 1538. <https://doi.org/10.3390/molecules25071538>

- Sharma, P., Gaur, V. K., Kim, J. S., & Pandey, A. (2020). Microbial strategies for bio-transforming food waste into resources. *Bioresource Technology*, 299, 122580. <https://doi.org/10.1016/j.biortech.2019.122580>
- Sood, U., Singh, D., Hira, P., Lee, J., Kalia, V. C., Lal, R., & Shakarad, M. (2020). Rapid and solitary production of mono-rhamnolipid biosurfactant and biofilm inhibiting pyocyanin by a taxonomic outlier *Pseudomonas aeruginosa* strain CR1. *Journal Of Biotechnology*, 307, 98-106. <https://doi.org/10.1016/j.jbiotec.2019.11.004>
- Szabo, K., Cătoi, A., & Vodnar, D. C. (2018). Bioactive Compounds Extracted from Tomato Processing by-Products as a Source of Valuable Nutrients. *Plant Foods For Human Nutrition*, 73(4), 268-277. <https://doi.org/10.1007/s11130-018-0691-0>
- Tan, C., & McClements, D. J. (2021). Application of Advanced Emulsion Technology in the Food Industry: A Review and Critical Evaluation. *Foods*, 10(4), 812. <https://doi.org/10.3390/foods10040812>
- Thanigaivel, S., Govindarajan, R. K., Saranya, V., Krishnan, V., Nagarajan, S., Gnanasekaran, G. R., Baek, K., & Sekar, S. K. R. (2024). Advancements in biosurfactant production using agro-industrial waste for industrial and environmental applications. *Frontiers In Microbiology*, 15. <https://doi.org/10.3389/fmicb.2024.1357302>
- Thraeib, J. Z., Altemimi, A. B., Al-Manhel, A. J. A., Abedelmaksoud, T. G., El-Maksoud, A. A. A., Madankar, C. S., & Cacciola, F. (2022). Production and Characterization of a Bioemulsifier Derived from Microorganisms with Potential Application in the Food Industry. *Life (Basel)*, 12(6), 924. <https://doi.org/10.3390/life12060924>
- Tian, Y., Zhou, J., He, C., He, L., Li, X., & Sui, H. (2022). The Formation, Stabilization and Separation of Oil–Water Emulsions: A Review. *Processes*, 10(4), 738. <https://doi.org/10.3390/pr10040738>
- Troncoso, E., Aguilera, J. M., & McClements, D. J. (2012). Fabrication, characterization and lipase digestibility of food-grade nanoemulsions. *Food Hydrocolloids*, 27(2), 355-363. <https://doi.org/10.1016/j.foodhyd.2011.10.014>
- Vlachy, N., Jagoda-Cwiklik, B., Vácha, R., Touraud, D., Jungwirth, P., & Kunz, W. (2009). Hofmeister series and specific interactions of charged headgroups with aqueous ions. *Advances In Colloid And Interface Science (Print)*, 146(1-2), 42-47. <https://doi.org/10.1016/j.cis.2008.09.010>
- Wongsirichot, P., Ingham, B., & Winterburn, J. (2021). A review of sophorolipid production from alternative feedstocks for the development of a localized selection strategy. *Journal Of Cleaner Production*, 319, 128727. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2021.128727>
- Xu, J., Hao, J., Guzman, J. J. L., Spirito, C. M., Harroff, L. A., & Angenent, L. T. (2018). Temperature-Phased Conversion of Acid Whey Waste Into Medium-Chain Carboxylic Acids via Lactic Acid: No External e-Donor. *Joule*, 2(2), 280-295. <https://doi.org/10.1016/j.joule.2017.11.008>
- Yukuyama, M. N., Ghisleni, D. D. M., De Jesus Andreoli Pinto, T., & Bou-Chacra, N. A. (2015). Nanoemulsion: process selection and application in cosmetics – a review. *International Journal Of Cosmetic Science*, 38(1), 13-24. <https://doi.org/10.1111/ics.12260>
- Zahi, M. R., Liang, H., & Yuan, Q. (2015). Improving the antimicrobial activity of d-limonene using a novel organogel-based nanoemulsion. *Food Control*, 50, 554-559. <https://doi.org/10.1016/j.foodcont.2014.10.001>

Zhu, Z., Ye, W., Yi, J., Cao, Y., Liu, F., & McClements, D. J. (2019). Comparison of natural and synthetic surfactants at forming and stabilizing nanoemulsions: Tea saponin, Quillaja saponin, and Tween 80. *Journal Of Colloid And Interface Science (Print)*, 536, 80-87. <https://doi.org/10.1016/j.jcis.2018.10.024>