

UNIVERSIDAD MIGUEL HERNÁNDEZ DE ELCHE
ESCUELA POLITÉCNICA SUPERIOR DE ORIHUELA
GRADO EN CIENCIA Y TECNOLOGÍA DE LOS ALIMENTOS



**SOLVENTES “VERDES” UN NUEVO PARADIGMA EN LA EXTRACCIÓN
DE COMPUESTOS BIOACTIVOS**



TRABAJO FIN DE GRADO

Marzo-2025

Autor: David Beltrán Villaescusa

Tutor: Manuel Viuda Martos



Solventes “verdes” un nuevo paradigma en la extracción de compuestos bioactivos

RESUMEN

Se ha reconocido en los últimos años la necesidad de desarrollar procesos más sostenibles en la industria, debido al impacto ambiental que generan numerosos métodos tradicionales, especialmente aquellos que implican el uso de disolventes orgánicos derivados del petróleo. Estos solventes, además de ser volátiles e inflamables, pueden resultar tóxicos tanto para el medio ambiente como para la salud humana. Como respuesta a esta problemática, ha surgido un creciente interés por los denominados solventes verdes, los cuales se presentan como una alternativa más segura y respetuosa con el entorno.

En el presente trabajo, se estudiará la literatura científica disponible relacionada con el uso de solventes verdes en procesos de extracción, prestando especial atención a su eficacia, características fisicoquímicas, y ventajas frente a los disolventes convencionales. Asimismo, se abordarán distintas técnicas de extracción que hacen uso de estos compuestos, analizando los rendimientos obtenidos y su aplicabilidad en distintas industrias, especialmente la alimentaria.

Palabras Clave: Solventes eutécticos, asistida por ultrasonido, compuestos bioactivos

Green solvents: a new paradigm in the extraction of bioactive compounds

ABSTRACT

It has now been established that many traditional industrial processes generate a significant environmental impact, particularly those involving the use of petroleum-derived organic solvents. These solvents are not only volatile and flammable but can also be toxic to both human health and the environment. As a response to this issue, green solvents have gained increasing attention in recent years as a safer and more environmentally friendly alternative.

In this paper, we will review the current literature on the use of green solvents in extraction processes, focusing on their effectiveness, physicochemical properties, and advantages over conventional solvents. Furthermore, various extraction technique

involving these compounds will be discussed, along with the yields obtained and their potential application in different industries, especially the food sector.

Keywords: Eutectic solvents, ultrasound-assisted, bioactive compound



ÍNDICE

- 1 INTRODUCCION
- 2 OBJETIVOS
- 3 MATERIAL Y METODOS
 - 3.1 Criterios de búsqueda
- 4 RESULTADOS Y DISCUSIÓN
 - 4.1 Agua y etanol: agua para la extracción de compuestos bioactivos
 - 4.1.1 Agua y etanol: agua para la extracción de polifenoles
 - 4.1.2 Agua y etanol: agua para la extracción de polifenoles
 - 4.1.3 Agua y etanol: agua para la extracción de carotenoides
 - 4.1.4 Agua y etanol: agua para la extracción de betalainas
 - 4.2 Líquidos iónicos para la extracción de compuestos bioactivos
 - 4.2.1 Líquidos iónicos para la extracción de polifenoles
 - 4.2.2 Líquidos iónicos para la extracción de carotenoides
 - 4.2.3 Líquidos iónicos para la extracción de betalainas
 - 4.3 Líquidos eutécticos profundos (EDS) para la extracción de compuestos bioactivos
 - 4.3.1 Líquidos eutécticos para la extracción de polifenoles
 - 4.3.2 Líquidos eutécticos para la extracción de carotenoides
 - 4.3.3 Líquidos eutécticos para la extracción de betalainas
- 5 CONCLUSIONES
- 6 BIBLIOGRAFÍA

1. INTRODUCCIÓN

En los últimos años ha crecido notablemente el interés por los compuestos bioactivos de origen natural, tanto por parte de la comunidad científica como de diversas industrias, especialmente la alimentaria, farmacéutica y cosmética. Este fenómeno responde a una creciente preocupación social por llevar una alimentación más saludable y por el desarrollo de productos funcionales, es decir, alimentos que, además de nutrir, ofrecen efectos positivos sobre la salud física o mental (Silva et al., 2023; Liu et al., 2022). Como resultado, se ha intensificado la investigación orientada a identificar, extraer y aplicar compuestos vegetales con propiedades beneficiosas en una amplia gama de productos.

Numerosos estudios han demostrado que estos compuestos no solo poseen potencial terapéutico, sino que también aportan funcionalidades tecnológicas en los productos donde se incorporan. Esto ha facilitado su aplicación práctica en la formulación de ingredientes funcionales, suplementos dietéticos, nutracéuticos y conservantes naturales (Aktaş & Kurek, 2024; Álvarez et al., 2024). Estas alternativas permiten reducir el uso de aditivos sintéticos, alineándose con una tendencia global hacia lo natural, lo saludable y lo sostenible.

Los compuestos bioactivos son sustancias presentes en alimentos y matrices vegetales que, aunque no son nutrientes esenciales, pueden ejercer efectos positivos sobre el organismo. A diferencia de vitaminas o minerales, estos compuestos no son imprescindibles para mantener funciones vitales, pero sí se asocian a la prevención de enfermedades y la mejora de la salud (Carpentieri et al., 2023; Kussmann et al., 2023). Dentro de esta categoría se incluyen polifenoles, carotenoides, betalainas, terpenos y alcaloides, muchos de los cuales presentan propiedades antioxidantes, antiinflamatorias, antimicrobianas o incluso anticancerígenas.

Desde una perspectiva tecnológica, estos compuestos también desempeñan funciones relevantes en la industria alimentaria. Se utilizan como colorantes naturales (betalainas, carotenoides), antioxidantes vegetales o mejoradores sensoriales, ya que influyen en el sabor, aroma y textura de los alimentos (López-Cortés et al., 2023; Akdeniz Oktay et al., 2024a). Esta funcionalidad se ajusta a una demanda creciente por parte de los consumidores, que valoran productos naturales, sin aditivos sintéticos y con beneficios demostrados para la salud.

La extracción de compuestos bioactivos se realiza, en su mayoría, a partir de materias primas vegetales como frutas, verduras, raíces, semillas y hojas. No obstante, en los últimos años ha cobrado importancia el uso de subproductos agroalimentarios —como cáscaras, pulpas y semillas descartadas—, debido a su elevado contenido en metabolitos secundarios y su potencial dentro de estrategias de economía circular (Trabelsi et al., 2023; Zhang et al., 2023). Esta estrategia no solo reduce el desperdicio alimentario, sino que permite obtener ingredientes funcionales de manera sostenible y económicamente viable.

Tradicionalmente, la extracción de estos compuestos se ha realizado mediante disolventes orgánicos como etanol, metanol, acetona o hexano. Aunque eficaces, presentan limitaciones importantes: toxicidad, inflamabilidad, bajo perfil de biodegradabilidad y restricciones legales en alimentos (Fraterrigo Garofalo et al., 2025; Li et al., 2024). Además, los procesos convencionales suelen implicar altas temperaturas, largos tiempos de extracción y elevado consumo energético, lo que puede comprometer la estabilidad de compuestos termo- o foto-sensibles y afectar negativamente al impacto ambiental del proceso.

En respuesta a estas limitaciones, ha surgido el enfoque de la química verde, que promueve métodos más seguros, sostenibles y eficientes para la extracción de compuestos bioactivos. Esta disciplina propone el uso de tecnologías limpias, el empleo de materias primas renovables y la reducción de sustancias peligrosas o contaminantes (Zhang et al., 2023; Hernández-Aguirre et al., 2021). Entre los avances más relevantes destacan los llamados solventes verdes, disolventes que, además de ser más respetuosos con el medioambiente y la salud humana, presentan una elevada eficacia extractiva.

Entre los solventes verdes más utilizados destacan el etanol (especialmente en mezcla con agua), los líquidos iónicos (ILs), los disolventes eutécticos profundos (DES) y sus variantes naturales (NADES). Estos sistemas, formados por sustancias biodegradables y no tóxicas como azúcares, aminoácidos o ácidos orgánicos, pueden diseñarse a medida para ajustarse a las propiedades del compuesto objetivo (Dai et al., 2022; Cannavacciuolo et al., 2023). Su carácter modulable permite optimizar la selectividad y eficiencia del proceso.

Por último, la eficacia de estos disolventes puede incrementarse mediante técnicas de intensificación de procesos como la extracción asistida por ultrasonido (UAE), microondas (MAE), presión hidrostática o campos eléctricos pulsados, que permiten

reducir el tiempo y consumo energético de la extracción, mejorando los rendimientos y conservando la integridad de los compuestos bioactivos (Akdeniz Oktay et al., 2024b; Büyükkütük et al., 2023). La integración de disolventes verdes con tecnologías emergentes representa una de las principales líneas de investigación en el desarrollo de procesos sostenibles para la obtención de ingredientes funcionales.

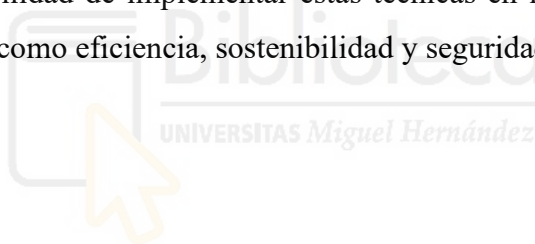


2. OBJETIVOS

El objetivo principal de este trabajo es examinar la literatura actual sobre las diferentes técnicas de extracción que emplean solventes verdes, con el fin de evaluar su aplicabilidad y eficacia en la obtención de compuestos bioactivos a partir de matrices vegetales.

Como objetivos particulares se plantean:

- ✓ Investigar el uso de mezclas de agua y etanol como alternativa sostenible a los disolventes orgánicos tradicionales en la extracción de compuestos bioactivos.
- ✓ Analizar la eficacia de los líquidos iónicos, líquidos eutécticos (DES) y líquidos eutécticos profundos naturales (NADES) en la extracción de polifenoles, carotenoides y betalainas.
- ✓ Comparar los rendimientos obtenidos con cada tipo de solvente verde en función del compuesto extraído.
- ✓ Evaluar la viabilidad de implementar estas técnicas en la industria alimentaria, considerando criterios como eficiencia, sostenibilidad y seguridad.



3. MATERIALES Y MÉTODOS

Por lo que respecta a los materiales y métodos utilizados, se ha llevado a cabo una revisión bibliográfica basada en la literatura científica existente relacionada con el uso de técnicas de extracción utilizando solventes verdes y su aplicación en la recuperación de compuestos bioactivos. Para ello, se realizó una búsqueda sistemática en bases de datos científicas como *PubMed*, *Scopus*, *Webof Science* y *Scielo*, así como mediante los motores de búsqueda Google y Google Scholar.

Las palabras clave empleadas para la búsqueda de artículos incluyeron términos como: “*green solvents*”, “*bioactive compounds extraction*”, “*natural deep eutectic solvents*”, “*ionic liquids extraction*”, “*ethanol-water extraction*”, “*phenolic compounds*”, “*carotenoids*” y “*betalains*”. Estas palabras clave se combinaron con el nombre de la matriz vegetal o categoría de alimento de interés, tales como “*fruits*”, “*vegetables*”, “*plants*”, “*herbs*”, entre otros.

Como criterios de inclusión, se seleccionaron artículos publicados a partir del año 2019 en adelante, escritos en inglés o castellano, que abordasen el uso de solventes verdes en procesos de extracción, comparaciones de rendimiento frente a disolventes convencionales, así como su aplicabilidad en la industria alimentaria. Se excluyeron aquellos artículos de pago sin acceso al texto completo, tesis doctorales y publicaciones que no abordasen directamente el uso de estas técnicas en contextos alimentarios o bioactivos.

En total, se han seleccionado 61 trabajos científicos que cumplen con los criterios establecidos.

4. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

4.1. Agua y etanol: agua para la extracción de compuestos bioactivos

El uso de mezclas de agua y etanol como solventes ecológicos se ha investigado ampliamente últimamente debido a su seguridad, bajo coste y capacidad para extraer diversos compuestos bioactivos. Esta combinación destaca como una alternativa efectiva y respetuosa con el medio ambiente frente a disolventes orgánicos convencionales, especialmente en la industria alimentaria. El etanol, derivado de fuentes renovables, disuelve compuestos polares y semipolares, mientras que el agua permite una mayor selectividad para ciertos metabolitos secundarios (Koubaa et al., 2023; Escarpa et al., 2024). Por estas razones, la mezcla etanol-agua es una opción versátil y sostenible para recuperar sustancias como polifenoles, flavonoides, carotenoides, antocianinas y betalainas, optimizando el equilibrio fisicoquímico entre ambos solventes.

4.1.1 Agua y etanol: agua para la extracción de polifenoles

El uso de mezclas de agua y etanol como disolventes sostenibles ha sido ampliamente evaluado en numerosos estudios experimentales que analizan su eficacia en la extracción de compuestos fenólicos, principalmente polifenoles y flavonoides, a partir de diversas matrices vegetales. Las proporciones de etanol y agua utilizadas, así como las condiciones del proceso (tiempo, temperatura, técnica aplicada), influyen significativamente en el rendimiento de extracción. A continuación, en la Tabla 1, se recogen distintos ejemplos extraídos de la literatura científica donde se ha empleado esta combinación de disolventes junto con otros sistemas comparativos como CO₂ supercrítico o glicerol para evaluar su eficacia en la recuperación de compuestos bioactivos. Se incluyen además los parámetros del proceso, la matriz utilizada, el compuesto extraído y los resultados obtenidos.

Tabla 1 Extracciones mediante Agua y etanol

Fuente	Solvente	Técnica de extracción	Compuesto	Rendimiento/ Recuperación	Referencia
Polvo de semillas no oleaginosas	Agua destilada.	Baño de agua ultrasónico 40 kHz y 50° durante 120min	Fenoles totales	18 mg de equivalentes de ácido gálico/ 100 g peso seco	(Diniyah, et al, 2020)
Polvo de semillas no oleaginosas	Etanol al 70%.	Baño de agua ultrasónico 40 kHz y 50° durante 120min	Fenoles totales	20 mg de equivalentes de ácido gálico/ 100 g peso seco	(Diniyah, et al., 2020)
Polvo de semillas no oleaginosas	Etanol al 100%.	Baño de agua ultrasónico 40 kHz y 50° durante 120 min	Fenoles totales	22 mg de equivalentes de ácido gálico/ 100 g peso seco	(Diniyah, et al., 2020)
Polvo de semillas no oleaginosas	Agua destilada.	Baño de agua ultrasónico 40 kHz y 50° durante 120 min	Flavonoides totales	14 mg de equivalentes de ácido gálico/ 100 g peso seco	(Diniyah, et al., 2020)
Polvo de semillas no oleaginosas	Etanol al 70%.	Baño de agua ultrasónico 40 kHz y 50° durante 120 min	Flavonoides totales	16 mg de equivalentes de ácido gálico/ 100 g peso seco	(Diniyah, et al., 2020)
Polvo de semillas no oleaginosas	Etanol al 100%.	Baño de agua ultrasónico 40 kHz y 50° durante 120min	Flavonoides	17 mg de equivalentes de ácido gálico/ 100 g peso seco	(Diniyah, et al 2020)
<i>Pistacia lentiscus</i>	CO ₂ puro	CO ₂ Supercrítico, a 150 bar, 45 °C	Fenoles totales	21,52 mg de equivalentes de ácido gálico/ 100 g peso seco	(Bouakline et al., 2025)

<i>Pistacia lentiscus</i>	CO ₂ + Agua	CO ₂ Supercrítico, a 150 bar, 45 °C	Fenoles totales	282 mg de equivalentes de ácido gálico /100 g peso seco	(Bouakline et al., 2025)
<i>Pistacia lentiscus</i>	CO ₂ + Etanol	CO ₂ Supercrítico, a 150 bar, 45 °C	Fenoles totales	59.40 mg de equivalentes de ácido gálico /100g peso seco	(Bouakline et al., 2025)
Hojas de Olivo	Agua	Sistema de ultrasonidos, a 20 kHz, 30 min, 70° C	Fenoles totales	11.5 mg de equivalentes de ácido gálico/ 100 g peso seco	(Huamán-Castilla et al., 2024)
Hojas de Olivo	Glicerol 15%	Extracción mediante líquidos presurizados. 50 °C	Fenoles totales	14 mg de equivalentes de ácido gálico/ 100 g peso seco	(Huamán-Castilla et al., 2024)
Hojas de Olivo	Etanol 15%	Extracción mediante líquidos presurizados. 50 °C	Fenoles totales	17 mg de equivalentes de ácido gálico/ 100 g peso seco	(Huamán-Castilla et al., 2024)
Hojas de Olivo	Agua	Extracción mediante líquidos presurizados. 50 °C	Fenoles totales	13.5 mg de equivalentes de ácido gálico/ 100 g peso seco	(Huamán-Castilla et al., 2024)
Hojas de Olivo	Agua + Glicerol 15%	Extracción mediante líquidos presurizados. 70°C	Fenoles totales	20 mg de equivalentes de ácido gálico/ 100 g peso seco	(Huamán-Castilla et al., 2024)
Hojas de Olivo	Etanol 15%	Extracción mediante líquidos presurizados. 70°C	Fenoles totales	18 mg de equivalentes de ácido gálico/ 100 g peso seco	(Huamán-Castilla et al., 2024)
Hojas de Olivo	Agua + Glicerol 30%	Extracción mediante líquidos presurizados. 70 °C	Fenoles totales	22,7 mg de equivalentes de ácido gálico/ 100 g peso seco	(Huamán-Castilla et al., 2024)
Hojas de Olivo	Etanol 30%	Extracción mediante líquidos presurizados. 70 °C	Fenoles totales	25,7 mg de equivalentes de ácido gálico/ 100 g peso seco	(Huamán-Castilla et al., 2024)

Hojas de Olivo	Agua	Extracción mediante líquidos presurizados. 70 °C	Fenoles totales	16 mg de equivalentes de ácido gálico/ 100 g peso seco	(Huamán-Castilla et al., 2024)
Té negro	Agua	Baño de agua, 2370 ml de Agua caliente a 74 °C Durante 40 s	Fenoles totales	452 de equivalentes de ácido gálico /g peso seco	(Harfoush et al., 2024)
Té Verde	Agua	2370 ml de Agua caliente a 74 °C Durante 40 s	Fenoles totales	16 de equivalentes de ácido gálico /g peso seco	(Harfoush et al., 2024)
Hojas de Olivo	Agua	Extracción asistida por microondas 10min, 80 °C	Fenoles totales	8.5 mg de equivalentes de ácido gálico/ 100 g peso seco	(Tapia-Quirós, et al 2025)
Hojas de Olivo	Etanol 20%, Agua 80%	Extracción asistida por microondas 10min, 80 °C	Fenoles totales	12.5 mg de equivalentes de ácido gálico/ 100 g peso seco	(Tapia-Quirós, et al 2025)
Bagazo de cerveza	Etanol 50% Agua 50%	Baño de agua 80° 120 min	Fenoles totales	400 mg de equivalentes de ácido gálico/ 100 g peso seco	(Mollea & Bosco, 2025)
Harina desgrasada de avellana	Etanol 60% Agua 40%	Agitación magnética 70 °C, 180 min	Fenoles totales	230 mg de equivalentes de ácido gálico /g peso seco	(Bencresciuto et al., 2025)
Harina desgrasada de avellana	Etanol 60% Agua 40%	Ultrasonido 60 min	Fenoles totales	344 mg de equivalentes de ácido gálico/ g peso seco	(Bencresciuto et al., 2025)
Piel avellana	Etanol 60% Agua 40%	Agitación magnética 70 °C, 180 min	Fenoles totales	9183 mg de equivalentes de ácido gálico/ g peso seco	(Bencresciuto et al., 2025)
Piel avellana	Etanol 60% Agua 40%	Ultrasonido 60 min	Fenoles totales	2995 mg de equivalentes de ácido gálico/ g peso seco	(Bencresciuto et al., 2025)

Cáscara avellana	Etanol 60% Agua 40%	Agitación magnética 70 °C, 180 min	Fenoles totales	645 mg de equivalentes de ácido gálico/ g peso seco	(Bencresciuto et al., 2025)
Cáscara avellana	Etanol 60% /Agua 40%	Ultrasonido 60 min	Fenoles totales	853 mg de equivalentes de ácido gálico/ g peso seco	(Bencresciuto et al., 2025)



En el estudio realizado por Diniyah, Badrul Alam y Lee (2020), se exploró la eficacia del uso de agua destilada y etanol a diferentes concentraciones (70 % y 100 %) como disolventes verdes en la extracción de compuestos fenólicos y flavonoides a partir de polvo de semillas no oleaginosas, empleando un baño de ultrasonidos a 40 kHz y 50 °C durante 120 min. Los resultados mostraron un incremento en el rendimiento conforme aumentaba la proporción de etanol. En el caso de los polifenoles, se obtuvieron 18 mg equivalentes de ácido gálico /100 g peso seco con agua, 20 mg con etanol al 70 % y un máximo de 22 mg con etanol absoluto. Una tendencia similar se observó para los flavonoides, con valores de 14, 16 y 17 mg equivalentes de ácido gálico /100 g de peso seco respectivamente, confirmando que la polaridad reducida del etanol favorece la solubilidad y liberación de estos compuestos (Diniyah et al., 2020).

Por su parte, Bouakline et al. (2025) llevaron a cabo extracciones mediante dióxido de carbono en condiciones supercríticas (150 bar, 45 °C) para obtener compuestos fenólicos y flavonoides a partir de *Pistacia lentiscus*. El rendimiento con CO₂ puro fue bajo (21,52 mg/100 g peso seco), sin embargo, la adición de agua como co-solvente mejoró notablemente la recuperación, alcanzando 282 mg/100 g peso seco. En cambio, la combinación con etanol solo permitió extraer 59,4 mg/100 g peso seco. Estos datos resaltan la importancia de la selección del co-solvente en la eficiencia del proceso SFE, siendo el agua más eficaz que el etanol en este caso (Bouakline et al., 2025).

En relación con las hojas de olivo, Huamán-Castilla et al. (2024) compararon distintas condiciones de extracción tanto por ultrasonidos como mediante líquidos presurizados a 50 y 70 °C. La extracción asistida por ultrasonidos con agua proporcionó un contenido moderado de polifenoles (11,5 mg/100 g peso seco), mientras que el uso de líquidos presurizados mejoró considerablemente los resultados. A 50 °C, los mejores rendimientos se obtuvieron con etanol al 15 % (17 mg/100 g peso seco), seguidos por glicerol al 15 % (14 mg) y agua (13,5 mg). A 70 °C, el uso de glicerol al 30 % y etanol al 30 % produjo mayores extracciones (22,7 y 25,7 mg respectivamente), en comparación con sus versiones al 15 % o con agua (16 mg), evidenciando la influencia de la temperatura y la concentración del disolvente en la eficiencia del proceso.

Complementariamente, Tapia-Quirós et al. (2025) evaluaron la extracción asistida por microondas (10 min, 80 °C) en hojas de olivo, observando que una mezcla de etanol al 20 % con agua fue más eficaz (12,5 mg equivalentes de ácido gálico /100 g peso seco)

que el uso exclusivo de agua (8,5 mg), destacando la efectividad de combinaciones hidroalcohólicas bajo calentamiento dieléctrico.

En cuanto a hojas de té, Harfoush et al. (2024) obtuvieron un contenido fenólico excepcionalmente alto (452 mg equivalentes de ácido gálico/g) en té negro y un valor significativamente menor en té verde (16 mg equivalentes de ácido gálico/g), tras un breve tratamiento con agua caliente (74 °C, 40 s), lo que evidencia la riqueza en compuestos bioactivos del té negro y la eficiencia de esta técnica para esta matriz.

Por otro lado, la recuperación de compuestos fenólicos en subproductos agroindustriales ha demostrado ser especialmente prometedora. Mollea y Bosco (2025) emplearon una mezcla hidroalcohólica (50 % etanol) en un baño de agua a 80 °C durante 120 min sobre bagazo de cerveza, logrando un rendimiento de 400 mg equivalentes de ácido gálico /100 g peso seco. De forma más destacada, Bencresciuto et al. (2025) aplicaron una mezcla etanol 60 % / agua 40 % en combinación con agitación magnética (70 °C, 180 min) y ultrasonido (60 min) sobre harina desgrasada, piel y cáscara de avellana. Los rendimientos oscilaron entre 230–344 mg equivalentes de ácido gálico /g peso seco para la harina, alcanzando cifras sobresalientes en la piel (2 995-9 183 mg/g) y en la cáscara (645-853 mg/g), posicionando estos subproductos como fuentes altamente concentradas y sostenibles de polifenoles, con un claro beneficio del ultrasonido frente a la agitación tradicional en ciertos casos.

4.1.2 Agua y etanol:agua para la extracción de Carotenoides

La extracción de carotenoides a partir de matrices vegetales y microbianas ha sido objeto de numerosas investigaciones debido a su interés nutricional, funcional y comercial, especialmente en la industria alimentaria. Los carotenoides actúan como pigmentos naturales con propiedades antioxidantes, y su recuperación a través de métodos sostenibles es clave para desarrollar ingredientes funcionales con bajo impacto ambiental. En los últimos años, se han explorado diferentes técnicas y disolventes para mejorar la eficiencia del proceso, siendo el etanol, en sus distintas concentraciones, uno de los más utilizados por su carácter seguro y renovable. La Tabla 2 recoge una selección de estudios que evalúan el rendimiento de diferentes procesos de extracción de carotenoides utilizando tanto disolventes tradicionales como opciones más ecológicas, así como diversas tecnologías asistidas como ultrasonidos, enzimas o CO₂ supercrítico.

Tabla 2 Agua y etanol: agua para la extracción de carotenoides

Fuente	Solvente	Técnica de extracción	Compuesto	Rendimiento/ Recuperación	Referencia
Microalgas	Etanol al 99%	Extracción asistida por ultrasonido	Carotenoides	2640.55 µg eq. β-caroteno /g peso seco	(Fernandes, et al 2024)
<i>Capsicum annuum</i>	Etanol 100%.	Saponificación	Carotenoides	60 mg eq. β-caroteno /100 g peso seco	(Hong et al., 2025)
<i>Citrus limon</i>	50 % de etanol y un 50 % de agua	Extracción asistida por ultrasonidos. 50°C	Carotenoides	0,0649 mg eq. β-caroteno/100 g peso seco	(Chatzimitakos, et al 2023)
<i>Rhodospiridium paludigenum</i>	CO ₂ supercrítico con etanol	Extracción con CO ₂ supercrítico (SFE-CO ₂)	Carotenoides	1.24 mg/L	(Fani Sereti et al.)
Pulpa de zanahoria	Etanol (51%)	Extracción asistida por ultrasonidos	Carotenoides	31.82 µg/g	(Umair et al., 2021)
<i>Mauritia flexuosa</i>	Acetona/Etanol (75:25)	Extracción asistida por ultrasonidos (40 kHz, 80 W, 30 min)	Carotenoides	1026 µg/g	(Silva et al., 2022)
Zumo de zanahoria	Etanol 95%	Extracción Asistida por Enzimas	Carotenoides	393.2 µg/mL	(Adadi et al., 2019)
<i>Daucus carota L.</i>	Etanol acuoso	Extracción asistida por ultrasonidos	Carotenoides	31.82 µg/g	(Muhammad Umair et al., 2021)

Residuos de tomate	Etanol	Extracción asistida por ultrasonido.	Licopeno	1536 $\mu\text{g/g}$ de biomasa seca	(Li, et al. 2022)
--------------------	--------	--------------------------------------	----------	--------------------------------------	-------------------



Diversos estudios han evaluado el empleo de técnicas sostenibles para la recuperación de carotenoides en matrices vegetales y microbianas, destacando la eficiencia de los disolventes verdes y tecnologías asistidas. En el caso de microalgas, Fernandes et al. (2024) aplicaron ultrasonidos junto con etanol absoluto (99 %), obteniendo un elevado rendimiento de 2640.55 μg eq. β -caroteno /g peso seco, lo que refleja la notable afinidad de este disolvente con los carotenoides y la eficacia de la disrupción celular por ultrasonido en esta matriz rica en lípidos.

Por su parte, Hong et al. (2025) emplearon una técnica tradicional de saponificación con etanol al 100 % en frutos de *Capsicum annuum*, logrando una recuperación de 60 mg/100 g de peso seco, valor destacable que pone de relieve la utilidad de la hidrólisis alcalina para la liberación de carotenoides esterificados.

Chatzimitakos et al. (2023) utilizaron una mezcla hidroalcohólica al 50 % (etanol/agua) en combinación con ultrasonidos a 50 °C para extraer carotenoides de *Citrus limon*. El rendimiento, sin embargo, fue muy bajo (0,0649 mg eq. β -caroteno/100 g peso seco), lo cual puede atribuirse a la baja concentración del compuesto en la matriz o a la limitada afinidad del solvente frente a carotenoides en este tipo de sustratos.

Un enfoque alternativo lo representa la extracción con CO₂ supercrítico. En el estudio de Fani Sereti et al. (s.f.), se utilizó este gas en combinación con etanol como co-solvente para recuperar carotenoides de *Rhodospiridium paludigenum*, logrando una concentración de 1,24 mg/L. Aunque inferior respecto a otras técnicas, este método ofrece ventajas medioambientales al prescindir de disolventes orgánicos en grandes cantidades.

En productos a base de zanahoria, Umair et al. (2021) emplearon extracción asistida por ultrasonidos con etanol al 51 %, obteniendo un rendimiento constante de 31,82 $\mu\text{g/g}$ tanto en pulpa como en tejido de *Daucus carota L.* (Muhammad Umair et al., 2021), lo que confirma la reproducibilidad de este procedimiento bajo condiciones controladas (UAE a 20 kHz, 70 % de amplitud, 32 °C). Paralelamente, Adadi et al. (2019) utilizaron extracción asistida por enzimas con etanol al 95 % sobre zumo de zanahoria, alcanzando 393,2 $\mu\text{g/mL}$, lo que demuestra el potencial de las enzimas en la liberación celular y extracción selectiva de carotenoides hidrofóbicos.

En el caso de *Mauritia flexuosa*, Silva et al. (2022) utilizaron una mezcla acetona:etanol (75:25) en un sistema ultrasónico de 40 kHz y 80 W durante 30 min, obteniendo un rendimiento de 1 026 µg/g. Este valor destaca entre los más altos, y pone en evidencia la capacidad sinérgica del sistema disolvente y la técnica de cavitación acústica.

Finalmente, Li et al. (2022) aplicaron ultrasonidos (65 °C, 20 min) sobre residuos de tomate, utilizando etanol como disolvente. El protocolo incluyó condiciones optimizadas de relación líquido/sólido (72 mL/g), amplitud (65 %), y pulso (33 s), lo que permitió recuperar 1 536 µg de licopeno por gramo de biomasa seca, cifra que posiciona esta estrategia como altamente eficiente para la valorización de subproductos agroindustriales ricos en carotenoides.

4.1.3. Agua y etanol: agua para la extracción de Betalaina

El uso de disolventes verdes como el agua y el etanol ha cobrado especial relevancia en la extracción de betalainas, debido a su carácter seguro, económico y respetuoso con el medio ambiente (Akdeniz Oktay et al., 2024). Estos disolventes, ya sea de forma individual o en combinación, permiten recuperar eficientemente estos pigmentos hidrosolubles desde matrices vegetales como la remolacha roja o la cáscara de pitaya (Hernández-Aguirre et al., 2021). En la tabla 3 se recopilan distintos estudios recientes que han evaluado el rendimiento de extracción de betalainas utilizando agua, etanol o mezclas de ambos, así como las condiciones de extracción empleadas, con el objetivo de comparar su eficacia y aplicabilidad en el desarrollo de ingredientes funcionales.

Tabla 3 Agua y etanol: agua para la extracción de Betaláina

Fuente	Solvente	Técnica de extracción	Compuesto	Rendimiento / Recuperación	referencia
<i>Amaranthus hypochondriacus</i>	Agua destilada pH 5 42,25°C, 198,72 mW/ mL.	Ultrasonido asistido	Betaláina	49. mg/kg de peso seco	Tabio-García et al. (2021)
<i>Amaranthus caudatus L.</i>	Agua destilada pH 5 474 W, 4.8 min, 37 °C	Ultrasonido asistido	Betaláina	79.2 mg/kg de peso seco	Roriz et al. (2021)
<i>Opuntia ficus-indica L.</i>	Etanol 40 % 220 V, 40 Hz, 30 min, 49.99 °C	Ultrasonido asistido	Betaláina	471.818 mg/kg de peso seco	Akdeniz Oktay et al. (2024)
<i>Beta vulgaris</i>	Etanol acuoso 15 % 1 hora/20°C	Baño de agua	Betaláina	1.39 mg/kg de peso seco	(Zin et al., 2020b)
<i>Beta vulgaris</i>	Etanol y ácido cítrico (1:10, p/v), 49,9 minutos/ 52,52°C	Maceración en un agitador orbital	Betaláina	1.20 mg/kg de peso seco	Kumar et al. (2023)
<i>Beta vulgaris</i>	Agua destilada (1:20, p/ v) 1 hora/25°C	Agitador orbital	Betaláina	535 mg/100g de peso seco	(El-Beltagi et al., 2022)
<i>Hylocereus polyrhizus</i>	Agua (1:50, w/v)	Maceración en agitador	Betaláina	59.90 mg/kg de peso seco	(Putthawan et al., 2021)
<i>Hylocereus polyrhizus</i>	Etanol (1:1, w/v), 60 min/40 °C	Maceración en una licuadora	Betaláina	2.09 mg/kg de peso seco	(Dang-Bao y Tran, 2023)

<i>Hylocereus polyrhizus</i>	Ethanol 60 % (1:6, w/v) 20 min/25 °C	Maceración en una licuadora de alta velocidad	Betalaína	0.03 mg/kg de peso seco	(Li et al., 2022)
<i>Beta vulgaris</i>	Agua destilada (1:15 w/v) 10 min	Extracción asistida por ultrasonido	Betalaína	1.84 mg/kg de peso seco	(Rodríguez-Felix et al., 2022)
<i>Hylocereus polyrhizus</i>	Etanol (1:10, w/v) 25 h/40 °C	Extracción con fluidos supercríticos	Betalaína	0.31 mg/kg de peso seco	(Yu et al., 2023)



En el análisis de diferentes estrategias de extracción de betalaínas a partir de matrices vegetales, se observan contrastes significativos en cuanto a disolventes, condiciones operativas y rendimientos obtenidos.

En el caso de *Amaranthus* spp., tanto *A. hypochondriacus* como *A. caudatus* fueron tratados mediante extracción asistida por ultrasonido empleando agua destilada ajustada a pH 5. Los resultados muestran que *A. caudatus* (Roriz et al., 2021) presentó una mayor recuperación de betalaínas (79.2 mg/kg) frente a *A. hypochondriacus* (49 mg/kg) (Tabio-García et al., 2021), lo cual podría atribuirse a las diferencias de potencia y tiempo aplicado (474 W durante 4.8 min frente a 198.72 mW/mL sin especificación temporal).

En cuanto a *Opuntia ficus-indica*, Akdeniz Oktay et al. (2024) utilizaron una solución hidroalcohólica al 40 % bajo condiciones de ultrasonido, alcanzando un rendimiento excepcional de 471.8 mg/kg de peso seco. Este valor es notablemente superior al obtenido en otras matrices, lo que evidencia el elevado contenido de betalaínas en esta especie y la eficiencia de la técnica aplicada.

Respecto a *Beta vulgaris*, se reportan múltiples condiciones experimentales con resultados dispares. La extracción mediante baño de agua con etanol 15 % (Zin et al., 2020b) y la maceración en presencia de etanol y ácido cítrico (Kumar et al., 2023) arrojaron rendimientos bajos, de 1.39 mg/kg y 1.20 mg/kg respectivamente. Resultados similares fueron obtenidos con ultrasonidos durante 10 min en agua (1.84 mg/kg) (Rodríguez-Félix et al., 2022), lo cual sugiere una limitada eficacia de estos procedimientos en condiciones suaves. No obstante, El-Beltagi et al. (2022) describieron un rendimiento de 535 mg/100 g utilizando maceración acuosa, un valor considerablemente superior al resto, que podría explicarse por una mayor concentración en la matriz utilizada (cáscara seca) o una expresión referida al extracto, aunque el dato ha sido validado por fuentes primarias.

En cuanto a *Hylocereus polyrhizus*, Putthawan et al. (2021) lograron 59.9 mg/kg mediante maceración acuosa, resultado mucho más elevado que el obtenido con etanol (2.09 mg/kg) (Dang-Bao y Tran, 2023), etanol al 60 % (0.03 mg/kg) (Li et al., 2022) o mediante extracción con fluidos supercríticos (0.31 mg/kg) (Yu et al., 2023). Estos datos resaltan que, en esta matriz, el uso de agua resulta más efectivo que los disolventes

alcohólicos o técnicas avanzadas, probablemente por una mayor afinidad de las betalaínas con el medio polar.

En conjunto, los resultados indican que la extracción de betalaínas depende fuertemente de la naturaleza de la matriz, las propiedades del disolvente y la técnica utilizada. Las matrices como *Opuntia ficus-indica* o la cáscara de *Beta vulgaris* destacan por sus elevados rendimientos, mientras que *Hylocereus polyrhizus* y ciertas condiciones en *Beta vulgaris* ofrecen valores más modestos. El uso de ultrasonidos en medio acuoso aparece como una estrategia prometedora, aunque su eficacia puede variar significativamente según las variables operativas.

4.2 Líquidos iónicos para la extracción de compuestos bioactivos

Los líquidos iónicos (ILs, del inglés Ionic Liquids) son sales líquidas a temperaturas inferiores a los 100 °C que están compuestas de aniones y cationes discretos cuyas entalpías de vaporización son extremadamente altas, convirtiéndolos en disolventes de volatilidad despreciable y por ello, no peligrosos en cuanto a emisiones (Calla-Quispe et al. 2020). Son solubles, no inflamables y muy estables térmica y químicamente, sin embargo, sus principales desventajas se relacionan con la alta toxicidad que poseen y con su dificultad de síntesis (Ventura et al., 2017). Con respecto a su preparación, se necesitan muchas etapas que implican preparaciones muy lentas, bajo condiciones inertes y con posteriores purificaciones para poder alcanzar la pureza requerida. Además, resulta complicado recuperarlos del proceso de forma económica y eficiente, lo cual supone una de las principales barreras a la hora de adoptarlos en la industria (Moshikur y Goto, 2023). Con relación a la toxicidad, ciertos líquidos iónicos suponen un peligro para el medioambiente con problemas como la ecotoxicidad del agua, así como un peligro para la salud humana, pudiendo provocar alteraciones endócrinas, toxicidad crónica, mutagenicidad, bioacumulación y persistencia, teratogenicidad y carcinogenicidad (Sadaghiyanfam et al., 2025). A pesar de ser disolventes versátiles y de que se intentan sintetizar alternativas que consigan minimizar este tipo de impactos, no es fácil eliminarlos por completo, con lo cual los líquidos iónicos son una alternativa poco atractiva para la industria a la hora de sustituir los disolventes tradicionales, aunque muy útiles a nivel de investigación en laboratorio (Toledo-Hijo et al 2023).

Los líquidos iónicos han sido empleados de forma habitual para la extracción de numerosos compuestos bioactivos como polifenoles, carotenoides o betalainas, entre otros de distintas matrices vegetales.

4.2.1 Líquidos iónicos para la extracción de polifenoles

En la literatura científica existen numerosos estudios donde se recogen la extracción de polifenoles mediante el uso de líquidos iónicos como solvente y empleando distintas técnicas de extracción, todas ellas relacionadas con la extracción limpia tal y como se muestra en la Tabla 4.



Tabla 4 Líquidos iónicos para la extracción de polifenoles

Fuente	Solvente	Técnica de extracción	Compuesto	Rendimiento / Recuperación	Referencia
<i>Acanthopanax senticosus</i>	1-Octil-3-metilimidazolio Bromuro	Sistema acuoso bifásico asistido por IL	Polifenoles	15.90 mg/g peso seco	Li et al. (2023)
Hojas de <i>Chaenomelessp eciosa</i>	1-Butil-3-metilimidazolio Bromuro	Extracción asistida por ultrasonido	Polifenoles	78.6 mg/g peso seco	Hou et al. (2025)
<i>Tetrastigma hemsleyanum</i>	1-Butil-3-metilimidazolio Bromuro	Extracción asistida por ultrasonido	Flavonoides	3.31 mg/g peso seco	Li et al. (2020)
<i>Schisandra chinensis</i>	1-Butil-3-metilimidazolio cloruro	Extracción asistida por ultrasonido	Quercetina	0.539 mg/g peso seco	Hao et al. (2025)
<i>Labisia pumila</i>	1-Butil-3-metilimidazolio cloruro	Extracción Asistida por Microondas	Ácido gálico, quercetina	Hasta 1.76 mg/ml (quercetina)	Rahman et al., (2020)
<i>Zingiber officinale</i>	1-decil-3-metilimidazolio Bromuro	Extracción Asistida por Microondas	6-, 8-, 10-gingerols	Rendimiento de extracion del 0.76%	Guo et al. (2018)

Li et al. (2020) condujeron un estudio para conocer la eficacia de extracción de polifenoles a partir de *Ganoderma lucidum* usando 1-Butil-3-metilimidazolio Bromuro en un sistema de extracción asistido por ultrasonidos. Estos autores reportan un valor de extracción empleando este solvente y esta técnica de 3,31 mg/g de flavonoides, lo que revela la eficacia de este solvente para extraer compuestos de polaridad intermedia sin necesidad de co-solventes adicionales. Más recientemente, en un estudio realizado por Li et al. (2023), se empleó un sistema acuoso bifásico asistido por líquidos iónicos, combinando 1-Octil-3-metilimidazolio Bromuro con etanol, para extraer polifenoles de *Acanthopanax senticosus*. Bajo estas condiciones, se logró un rendimiento de 15,90 mg/g de peso seco, destacando la capacidad de los IL para mejorar la solubilidad de compuestos fenólicos en fases acuosas y orgánicas. En un estudio similar, Hou et al. (2025) emplearon la extracción asistida por ultrasonido (380,43 W, 10 min) usando como líquido iónico el 1-Butil-3-metilimidazolio Bromuro a 1,33 mol/L en hojas de *Chaenomeles speciosa*, obteniendo 78,6 mg/g de polifenoles. Este resultado subraya la sinergia entre la cavitación ultrasónica y la afinidad de los IL con los compuestos fenólicos procedentes de matrices ricas en lignina. En esta misma línea de estudio Hao et al. (2025) combinaron IL (1-Butil-3-metilimidazolio cloruro a 0,90 mol/L con enzimas empleando como técnica de extracción el ultrasonido para extraer compuestos polifenólicos a partir de *Schisandra chinensis*. Los autores mencionan una extracción total de quercetina de 0,54 mg/g material vegetal. La acción enzimática junto con el efecto disruptivo de la cavitación favoreció la liberación de flavonoles ligados a la matriz.

Por otro lado, Rahman et al. (2020) aplicaron una extracción asistida por microondas con el mismo líquido iónico en *Labisia pumila*, alcanzando valores de hasta 1.76 mg/mL de quercetina. Este resultado es significativo, ya que refleja tanto una alta eficacia del líquido iónico como una optimización adecuada del proceso por microondas. Finalmente, Guo et al. (2018) emplearon 1-decil-3-metilimidazolio bromuro para extraer gingeroles (6-, 8-, y 10-) de *Zingiber officinale*, mediante microondas, obteniendo un rendimiento total del 0.76 %. Aunque se expresa en porcentaje, y no como concentración por gramo, este valor es relevante por tratarse de compuestos no fenólicos y más lipofílicos, lo cual reafirma la versatilidad de estos disolventes para metabolitos diversos.

4.2.2 Líquidos iónicos para la extracción de carotenoides

En los últimos años, los líquidos iónicos (ILs) han emergido como alternativas prometedoras a los disolventes orgánicos convencionales en la extracción de compuestos bioactivos, incluidos los carotenoides (Stolarska et al., 2022). Estos compuestos, formados por una sal orgánica con punto de fusión inferior a 100 °C, presentan propiedades como baja volatilidad, alta estabilidad térmica y capacidad de diseñarse a medida en función del compuesto objetivo. Gracias a su versatilidad, los líquidos iónicos permiten optimizar la eficiencia del proceso extractivo, mejorando la selectividad y reduciendo la degradación térmica de carotenoides, especialmente en matrices de origen vegetal o microalgas (Sánchez-Campillo et al., 2021). En la tabla número 5 se presenta una recopilación de algunos líquidos iónicos empleados en la extracción de carotenoides, indicando su nomenclatura química y su fórmula simplificada.

Tabla 5 Líquidos iónicos para la extracción de carotenoides

Nombre del Solvente	Fórmula Simplificada
1-Butil-3-metilimidazolio hexafluorofosfato	[BMIM][PF ₆]
1-Butil-3-metilimidazolio cloruro	[BMIM][Cl]
1-Hexil-3-metilimidazolio cloruro	[HMIM][Cl]
1-Butil-3-metilimidazolio tetrafluoroborato	[BMIM][BF ₄]
Cloruro de colina + octanoato (50 % p/p)	[Ch][Oct] (50 % w/w)
Mezcla de 1-Hexil-3-metilimidazolio cloruro y etanol	[HMIM][Cl] + Etanol

La Tabla 6 presenta diversos estudios centrados en la extracción de carotenoides mediante líquidos iónicos, especialmente en matrices de origen microbiano y vegetal. La técnica predominante en estos trabajos fue la extracción asistida por ultrasonido, lo que evidencia la sinergia entre tecnologías verdes y disolventes alternativos.

Tabla 6 Líquidos iónicos para la extracción de carotenoides

Fuente	Solvente	Técnica de extracción	Compuesto	Rendimiento Recuperación	Referencia
<i>Scenedesmus obliquus</i>	[BMIM] [PF6]	Extracción asistida por ultrasonido	Carotenoides	1757.63 mg/g de peso seco	(Fernandes, Caetano, et al. 2024)
<i>Scenedesms obliquus</i>	[BMIM] [Cl]	Extracción asistida por ultrasonido	Carotenoides	1649.21 mg/g de peso seco	(Fernandes, Caetano, et al. 2024)
<i>Scenedesmus obliquus</i>	[HMIM] [Cl]	Extracción asistida por ultrasonido	Carotenoides	1650.67 mg/g de peso seco	(Fernandes, Caetano, et al. 2024)
<i>Scenedesmus obliquus</i>	[BMIM] [BF4]	Extracción asistida por ultrasonido	Carotenoides	1818.55 mg/g de peso seco	(Fernandes, Caetano, et al. 2024)
<i>Arthrospira platensis</i>	[BMIM] [PF6]	Extracción asistida por ultrasonido	Carotenoides	593.84 mg/g de peso seco	(Fernandes, Caetano, et al. 2024)
<i>Arthrospira platensis</i>	[BMIM] [Cl]	Extracción asistida por ultrasonido	Carotenoides	564.23 mg/g de peso seco	(Fernandes, Caetano, et al. 2024)
<i>Arthrospira platensis</i>	[HMIM] [Cl]	Extracción asistida por ultrasonido	Carotenoides	576.42 mg/g de peso seco	(Fernandes, et al. 2024)
<i>Arthrospira platensis</i>	[BMIM] [BF4]	Extracción asistida por ultrasonido	Carotenoides	614.29 mg/g de peso seco	(Fernandes, Caetano, et al. 2024)
<i>Cáscara naranja</i>	[BMIM][Cl]	Extracción asistida por ultrasonido	Carotenoides	17.95 µg/g de peso seco	(Murador, et al. 2019)

<i>Cáscara naranja</i>	[BMIM][PF6]	Extracción asistida por ultrasonido	Carotenoides	6.01 µg/g de peso seco	(Murador, et al. 2019)
<i>Cáscara naranja</i>	[BMIM][BF4]	Extracción asistida por ultrasonido	Carotenoides	22.80 µg/g de peso seco	(Murador, et al. 2019)
<i>Cáscara naranja</i>	[HMIM][Cl]	Extracción asistida por ultrasonido	Carotenoides	12.19 µg/g de peso seco	(Murador, et al. 2019)
<i>Phaffia rhodozyma</i>	([Ch][Oct]) 50 % (w/w)	Extracción sólido-líquido, 45 °C, 60 minutos, 300 rpm	Carotenoides	40% (w/w)	(Mussagy et al., 2022)
<i>Chlorella sorokiniana</i>	([HMIM][Cl]) y Etanol	Extracción asistida por ultrasonido ratio IL cosolvente: 1:4	Carotenoides	1,29 mg/g de peso seco	(Bianchini et al., 2024)

En cuanto a las microalgas, *Scenedesmus obliquus* fue tratada con diferentes líquidos iónicos imidazólicos. El rendimiento más alto se obtuvo con [BMIM][BF₄], alcanzando 1818.55 mg/g de peso seco, seguido muy de cerca por [BMIM][PF₆] (1757.63 mg/g), [HMIM][Cl] (1650.67 mg/g) y [BMIM][Cl] (1649.21 mg/g) (Fernandes et al., 2024). Estos resultados reflejan una notable eficacia de los ILs con aniones poco coordinantes como BF₄⁻ y PF₆⁻, especialmente en matrices ricas en pigmentos como las microalgas.

Por su parte, en *Arthrospira platensis*, los valores obtenidos fueron sensiblemente menores que en *Scenedesmus*, aunque se mantuvo la tendencia general. El IL [BMIM][BF₄] ofreció el mejor rendimiento (614.29 mg/g), seguido de [BMIM][PF₆] (593.84 mg/g), [HMIM][Cl] (576.42 mg/g) y [BMIM][Cl] (564.23 mg/g) (Fernandes et al., 2024). Esta diferencia entre especies puede atribuirse a variaciones en la composición lipídica o en la distribución celular de los carotenoides.

En el caso de matrices vegetales como la cáscara de naranja (*Citrus sinensis*), Murador et al. (2019) evaluaron cuatro ILs, todos con la técnica UAE. Los valores más altos se obtuvieron con [BMIM][BF₄] (22.80 µg/g), seguido por [BMIM][Cl] (17.95 µg/g), [HMIM][Cl] (12.19 µg/g) y [BMIM][PF₆] (6.01 µg/g). Estos datos muestran un rendimiento muy inferior en comparación con microalgas, reflejando las diferencias en la concentración natural de carotenoides y la posible retención de estos compuestos en matrices lignocelulósicas más resistentes.

Mussagy et al. (2022) emplearon un sistema sólido-líquido con ([Ch][Oct]) al 50 % para extraer carotenoides de la levadura *Phaffia rhodozyma*, alcanzando un rendimiento del 40 % en base al peso, un valor destacable si se considera la eficiencia de extracción directa desde biomasa microbiana.

Por último, Bianchini et al. (2024) utilizaron una mezcla de [HMIM][Cl] con etanol como cosolvente en *Chlorella sorokiniana*, logrando recuperar 1.29 mg/g de peso seco. Aunque el rendimiento es menor que en *Scenedesmus*, la combinación de IL con solvente convencional puede optimizar tanto la eficacia como la reducción de costos y viscosidad, aspectos críticos en procesos a escala.

4.2.3 Líquidos iónicos para la extracción de Betalaina

En los últimos años, el empleo de líquidos iónicos (ILs) y sistemas bifásicos acuosos (ABS) ha cobrado especial relevancia como alternativa sostenible para la extracción de betalainas.

La extracción de betalainas, pigmentos hidrosolubles con propiedades antioxidantes, antiinflamatorias y colorantes naturales, requiere disolventes que sean selectivos, eficientes y compatibles con matrices vegetales. En este contexto, los líquidos iónicos (ILs) han despertado un creciente interés como alternativa a los disolventes orgánicos tradicionales, debido a su alta capacidad de solubilización, su baja volatilidad y su estructura química modulable. Su aplicación en la extracción de betalainas permite mejorar el rendimiento y la estabilidad del pigmento, al tiempo que se reduce el impacto ambiental del proceso. En la tabla número 7 se recogen diferentes líquidos iónicos empleados en la literatura para la extracción de betalainas, junto con su formulación y nombre simplificado.



Tabla 7 Líquidos iónicos para la extracción de Betalaina

Fuente	Solvente	Técnica de extracción	Compuesto	Rendimiento/ Recuperación	Referencia
Jugo de remolacha fresca	Trioctilmetilamonio : Adipato / Tributilmethylamonio : Hexanoato	Agitación 1 h, 25 °C	Betanina	50%	(Morales-García et al., 2021)
Jugo de remolacha fresca	Trioctilmetilamonio : Adipato / Tributilmethylamonio : Hexanoato	Agitación 1 h por paso (Dos pasos)	Betanina	74–82 %	(Morales-García et al., 2021)
Jugo de remolacha fresca	Cation largo + ácido dicarboxílico	Agitación 1 h	Betanina	68.9 %	(Morales-García et al., 2021)
Hojas y tallos de remolacha (<i>Beta vulgaris</i>)	Bromuro de N,N-dihidroxietil-etilamonio + polipropilenglicol + agua	ABS termorreversible	betalaina	96 %	(Rosa et al., 2023)

En el estudio realizado por Morales-García et al. (2021), se aplicaron líquidos iónicos formados por combinaciones de cationes de cadena larga (trioctilmetilamonio o tributilmetilamonio) con ácidos dicarboxílicos (adipato o hexanoato), empleando jugo de remolacha fresca como matriz. Mediante una simple agitación durante 1 h a 25 °C, se obtuvo una recuperación de betanina del 50 %, que se incrementó hasta el 74–82 % al aplicar una estrategia en dos pasos consecutivos de extracción, lo que pone de relieve la eficiencia acumulativa del proceso.

En otro estudio destacado, Rosa et al. (2023) emplearon un sistema ABS termorreversible basado en una combinación de [N21(2OH)(2OH)]Br, polipropilenglicol (PPG) y agua para recuperar betalainas a partir de hojas y tallos de remolacha. Este enfoque logró un rendimiento del 96 %, superando ampliamente las estrategias anteriores. Este tipo de sistemas permite una separación eficiente del compuesto bioactivo en una fase enriquecida, y al ser termorreversibles, facilitan la recuperación tanto del disolvente como del compuesto, lo cual es clave para aplicaciones industriales sostenibles

4.3. Líquidos eutécticos profundos

Los líquidos eutécticos profundos son mezclas eutécticas de dos o más componentes cuyo punto de fusión es más bajo que el de los componentes por separado. Su preparación se lleva a cabo por calentamiento y agitación de dos o más componentes (bien sean sólidos o sólidos y líquidos) hasta alcanzar una determinada temperatura, conocida como punto eutéctico, en el cual se aprecia el cambio de fase de sólido a líquido (Buarque, et al., 2024). Los líquidos eutécticos profundos poseen una energía de red baja, de ahí que posean puntos de fusión bajos. Por lo general se obtienen al combinar una especie aceptora de enlaces de hidrógeno (HBA, del inglés Hydrogen Bond Acceptor) con una especie dadora de enlaces de hidrógeno (HBD, del inglés Hydrogen Bond Donor) que provoca una deslocalización de carga responsable del descenso en el punto de fusión de la mezcla en comparación con el punto de fusión de sus componentes por separado (Ojeda, et al., 2025). Las propiedades físicas y químicas de los líquidos eutécticos profundos dependen en gran medida de las características del dador y aceptor de enlaces de hidrógeno utilizados en su preparación, lo que convierte a los líquidos eutécticos en solventes muy versátiles cuyas propiedades se pueden adaptar en función de las necesidades de las aplicaciones a las que se vayan a destinar. De esta forma es posible obtener solventes con solubilidades muy variables que permiten extraer un amplio

abánico de compuestos de interés distintos en función del tipo de industria y de los objetivos de las extracciones a realizar (Viñas-Ospino et al., 2024).

4.3.1 Líquidos eutécticos profundos para la extracción de polifenoles

Los líquidos eutécticos profundos han demostrado ser una alternativa eficiente y sostenible para la extracción de polifenoles, debido a su capacidad para interactuar con compuestos fenólicos a través de enlaces de hidrógeno y otras interacciones polares en distintas matrices vegetales. En la Tabla numero 8 se presentan diversas formulaciones de líquidos eutécticos profundos utilizadas en estudios recientes, junto con las condiciones de extracción y los resultados obtenidos, con el fin de comparar su eficacia frente a otros sistemas convencionales.

Gao et al. (2020) reportaron un rendimiento mucho más bajo (4.51 mg/g) en hojas de morera, utilizando colina:glicerol (1:2) bajo condiciones de microondas. Este resultado podría atribuirse tanto a la menor capacidad extractiva del sistema utilizado como al perfil fenólico más limitado de la matriz en comparación con otras fuentes vegetales. En un estudio similar, Pal y Jadeja (2020) emplearon acetato de sodio:ácido láctico (1:3) con microondas en cáscaras de mango, logrando una recuperación intermedia de 56.17 mg/g. Este resultado confirma el potencial de este tipo de disolvente combinado con irradiación microondas para la valorización de residuos agroindustriales ricos en polifenoles.

Ünlü (2021) empleó una mezcla ternaria de colina:fructosa:agua (5:2:5) en una extracción asistida por ultrasonido (UAE) para recuperar polifenoles totales de hojas de olivo, alcanzando un rendimiento destacado de 171.56 mg/g. Este valor representa uno de los más elevados reportados para este tipo de extracto, resaltando tanto la eficiencia del sistema ternario como la riqueza fenólica de esta matriz. De forma similar, Airouyuwa et al. (2023) aplicaron una técnica de extracción asistida por microondas utilizando el sistema colina:ácido láctico (1:2) para extraer polifenoles totales de semillas de dátil, alcanzando un rendimiento de 147.92 mg/g. Este resultado también refleja una alta eficiencia, probablemente atribuible a la combinación de una matriz rica en fenoles y el efecto sinérgico entre el calentamiento selectivo de microondas y la baja viscosidad del líquido eutéctico profundo empleado. Por su parte, Mattonai et al., (2023) emplearon colina:etilenglicol (5:1 molar) con un 13 % de agua como modificador, en la extracción asistida por microondas (30 min, 85 °C) de residuos lignocelulósicos procedentes de poda

de vid. Los rendimientos obtenidos variaron en función de la variedad, siendo la más destacada *Cabernet Sauvignon*, con 22 mg/g, seguida de *Merlot* (15 mg/g), mientras que *Cabernet Franc*, *Canaiolo* y *Sangiovese* presentaron rendimientos menores e idénticos (12 mg/g). Estos datos sugieren que, más allá de las condiciones de extracción o el disolvente, la composición fenólica específica de cada cultivar influye notablemente en el rendimiento final, así como la accesibilidad de los polifenoles en función del tipo de lignina y estructura celular.

En el caso de residuos de uva, Wang et al. (2025) utilizaron el sistema colina:glicerol en extracción asistida por ultrasonido, recuperando proantocianidinas con un rendimiento de 48.36 mg/g equivalentes de ácido gálico. Aunque inferior a los anteriores, el resultado sigue siendo relevante dada la naturaleza más lignificada del residuo y el tipo de compuesto extraído. Por otro lado, Yu et al. (2021) aplicaron colina:1,4-butanodiol (1:3) en UAE sobre pulpa de arándano, obteniendo 41.6 mg/g de polifenoles totales, lo que indica un buen rendimiento en una matriz rica en antocianinas y otros compuestos fenólicos solubles.

Finalmente, Fuentes-Jorquera et al. (2025) evaluaron la eficacia del líquido eutéctico profundo colina:ácido láctico (1:2) en la extracción de polifenoles totales a partir de hojas y frutos de dos especies chilenas, *Ugni molinae* y *Ugni candollei*. En ambos casos, se aplicaron técnicas de extracción verde como la extracción asistida por microondas (MAE, 15 min a 80 °C) y la extracción asistida por ultrasonidos (UAE, 20 min a 30 °C). Los mayores rendimientos se registraron en hojas de *U. molinae* (64.3 mg/g) y *U. candollei* (53.8 mg/g) mediante MAE, mientras que los frutos, extraídos con UAE, mostraron valores inferiores, 46.2 mg/g y 38.5 mg/g respectivamente. Esto evidencia, por un lado, el mayor contenido fenólico en tejidos foliares respecto al fruto, y por otro, la mayor eficacia de la tecnología de microondas frente a los ultrasonidos en esta combinación NaDES/matriz. Estos resultados ponen de manifiesto el potencial del sistema colina:ácido láctico para recuperar compuestos bioactivos en matrices vegetales nativas, así como la influencia de la técnica de extracción sobre la eficiencia del proceso.

Tabla 8 Líquidos eutécticos para la extracción de polifenoles

Fuente	Solvente	Técnica de extracción	Compuesto	Rendimiento / Recuperación	Referencia
Hojas de <i>Ugni molinae</i>	ChCl:ácido láctico (1:2)	MAE (15 min, 80 °C)	Polifenoles totales	64.3 mg equivalentes de ácido gálico / g	(Fuentes-Jorquera et al., 2025)
Fruto de <i>Ugni molinae</i>	ChCl:ácido láctico (1:2)	UAE (20 min, 30 °C)	Polifenoles totales	46.2 mg equivalentes de ácido gálico / g	(Fuentes-Jorquera et al., 2025)
Hojas de <i>Ugni candollei</i>	ChCl:ácido láctico (1:2)	MAE (15 min, 80 °C)	Polifenoles totales	53.8 mg equivalentes de ácido gálico / g	(Fuentes-Jorquera et al., 2025)
Fruto de <i>Ugni candollei</i>	ChCl:ácido láctico (1:2)	UAE (20 min, 30 °C)	Polifenoles totales	38.5 mg equivalentes de ácido gálico / g	(Fuentes-Jorquera et al., 2025)
Poda de vid - <i>Merlot</i>	colina:etilenglicol (5:1 molar)	Extracción asistida por microondas (30 min, 85 °C, 13 % agua)	Polifenoles totales	15 mg equivalentes de ácido gálico / g	(Mattonai et al., 2023)
Poda de vid - <i>Cabernet Sauvignon</i>	colina:etilenglicol (5:1 molar)	Extracción asistida por microondas (30 min, 85 °C, 13 % agua)	Polifenoles totales	22 mg equivalentes de ácido gálico / g	(Mattonai et al., 2023)
Poda de vid - <i>Cabernet Franc</i>	colina:etilenglicol (5:1 molar)	Extracción asistida por microondas (30 min, 85 °C, 13 % agua)	Polifenoles totales	12 mg equivalentes de ácido gálico / g	(Mattonai et al., 2023)

Poda de vid - <i>Canaiolo</i>	colina:etilenglicol (5:1 molar)	Extracción asistida por microondas (30 min, 85 °C, 13 % agua)	Polifenoles totales	12 mg equivalentes de ácido gálico / g	(Mattonai et al., 2023)
Poda de vid - <i>Sangiovese</i>	colina:etilenglicol (5:1 molar)	Extracción asistida por microondas (30 min, 85 °C, 13 % agua)	Polifenoles totales	12 mg equivalentes de ácido gálico / g	(Mattonai et al., 2023)
Hojas de olivo	ChCl:fructosa:agua (5:2:5)	UAE	Polifenoles totales	171.56 mg equivalentes de ácido gálico / g	(Ünlü et al.,2021)
Semillas de dátil	ChCl:ácido láctico (1:2)	Microondas	Polifenoles totales	147.92 mg equivalentes de ácido gálico / g	(Airouyuwa et al., 2023)
Residuo de uva	Cloruro de colina + glicerol	UAE	Proantocianinas	48,36 mg /g peso seco	(Wang et al. 2025)
Pulapa de arandano	ChCl:1,4-butanodiol (1:3)	UAE	Polifenoles totales	41.6 mg equivalentes de ácido gálico / g	(Yu et al., 2021)
hojas de morera	ChCl:glicerol (1:2)	Microondas	Polifenoles totales	4.51 mg equivalentes de ácido gálico / g	(Gao et al., 2020)
Cáscaras de mango	Acetato de sodio:ácido láctico (1:3)	Microondas	Polifenoles totales	56.17 mg equivalentes de ácido gálico / g	(Pal & Jadeja, 2020)

4.3.2 Líquidos eutécticos para la extracción de carotenoides

Los líquidos eutécticos se han consolidado como disolventes verdes eficaces para la extracción de carotenoides, gracias a su baja toxicidad, alta estabilidad, su bajo impacto ambiental, su capacidad de diseño estructural y capacidad de adaptación a compuestos lipofílicos. En este apartado se recogen distintas formulaciones empleadas para recuperar carotenoides de matrices vegetales, destacando su rendimiento y aplicabilidad en procesos sostenibles. En la Tabla 9 se muestran diversos estudios donde se emplean líquido eutécticos para la extracción de carotenoides.

Stupar et al. (2021) analizaron diversas combinaciones de ácidos grasos y alcoholes con DL-mentol para la recuperación de β -caroteno en frutos de *Cucurbita maxima*. La mejor eficiencia se logró con ácido caprílico:capríco (3:1) y extracción por ultrasonido (151,41 $\mu\text{g}/\text{mL}$), mientras que los sistemas con agitación mostraron una ligera reducción de los valores, aunque manteniendo un perfil extractivo aceptable en torno a 89-93 $\mu\text{g}/\text{mL}$. En el estudio de Marinaccio et al. (2024), se observó una elevada eficiencia en la extracción de licopeno a partir de pieles de tomate mediante el uso de disolventes eutécticos hidrofóbicos, concretamente mentol:timol (1:1), alcanzando un rendimiento de 484,2 mg/g DE. Este valor superó al obtenido con la mezcla de mentol:timol + agua bajo las mismas condiciones (358,7 mg/g DE), evidenciando cómo la presencia de agua puede disminuir la eficacia extractiva de compuestos lipofílicos como los carotenoides. En una línea similar, Fraterrigo et al. (2025) evaluaron la extracción simultánea de licopeno y β -caroteno en *Solanum lycopersicum* usando una mezcla de mentol:ácido butírico (1:2), logrando 52,38 $\mu\text{g}/\text{g}$ de licopeno y 23,65 $\mu\text{g}/\text{g}$ de β -caroteno, lo que pone de manifiesto la versatilidad de estos disolventes en la recuperación de múltiples carotenoides.

Tanriver et al. (2025) llevaron a cabo un enfoque comparativo en matrices de calabaza (*Cucurbita moschata*) y espinaca (*Spinacia oleracea*), utilizando mentol:ácido propiónico en proporciones 1:2 y 1:4, respectivamente, en combinación con dos técnicas: microondas (MMAE) y emulsificación de alta energía (HAE). En general, los mejores rendimientos se lograron con la técnica MMAE en espinaca (18,99 μg β -caroteno/g), seguido por el uso de HAE (12,17 $\mu\text{g}/\text{g}$), lo que sugiere que la combinación solvente-matriz-condición de extracción influye significativamente en el rendimiento final.

Tabla 9 Líquidos eutécticos para la extracción de carotenoides

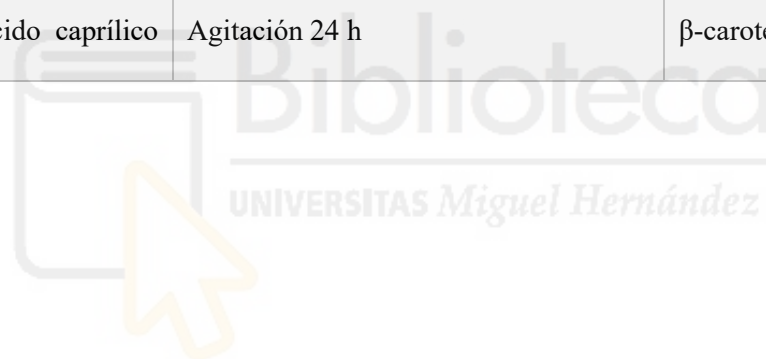
Fuente	Solvente	Técnica de extracción	Compuesto	Rendimiento / Recuperación	Referencia
Cáscara de mango criollo (<i>Mangifera indica</i>)	Timol:Mentol (1:1)	Agitación magnética (180 min, 25 °C, 1:15 m/v)	β -caroteno	3.58 $\mu\text{g}/\text{mg}$	(Ojeda et al., 2025)
Cáscara de mango criollo (<i>Mangifera indica</i>)	Timol:Ácido levulínico (1:1)	Agitación magnética (180 min, 25 °C, 1:15 m/v)	β -caroteno	4.71 $\mu\text{g}/\text{mg}$	(Ojeda et al., 2025)
Cáscara de mango criollo (<i>Mangifera indica</i>)	Mentol:Ácido láurico (1:1)	Agitación magnética (180 min, 25 °C, 1:15 m/v)	β -caroteno	4.53 $\mu\text{g}/\text{mg}$	(Ojeda, et al., 2025)
Cáscara de mango criollo (<i>Mangifera indica</i>)	Timol:Ácido láurico (1:1)	Agitación magnética (180 min, 25 °C, 1:15 m/v)	β -caroteno	3.96 $\mu\text{g}/\text{mg}$	(Ojeda, et al., 2025)
Cáscara de mango criollo (<i>Mangifera indica</i>)	Mentol:Ácido caprílico (1:1)	Agitación magnética (180 min, 25 °C, 1:15 m/v)	β -caroteno	4.32 $\mu\text{g}/\text{mg}$	(Ojeda, et al., 2025)
Cáscara de mango criollo (<i>Mangifera indica</i>)	Mentol:Ácido caprílico (1:1)	Agitación magnética (180 min, 25 °C, 1:15 m/v)	β -caroteno	3.71 $\mu\text{g}/\text{mg}$	(Ojeda et al 2025)
<i>Capsicum frutescens</i>	DL-mentol : ácido caprílico (2:1)	Agitación 24 h, 400 rpm, 35 °C (308 K)	Carotenoides totales	152.8 $\mu\text{g}/\text{g}$	(Buarque, et al 2024)
<i>Capsicum frutescens</i>	DL-mentol : ácido cáprico (2:1)	Agitación 24 h, 400 rpm, 35 °C (308 K)	Carotenoides totales	167.5 $\mu\text{g}/\text{g}$	(Buarque, et al 2024)

<i>Capsicum frutescens</i>	DL-mentol : ácido láurico (2:1)	Agitación 24 h, 400 rpm, 35 °C (308 K)	Carotenoides totales	174.7 µg/g	(Buarque, et al 2024)
<i>Capsicum frutescens</i>	DL-mentol : ácido láurico (4:1)	Agitación 24 h, 400 rpm, 35 °C (308 K)	Carotenoides totales	179.2 µg/g	(Buarque, et al 2024)
<i>Capsicum frutescens</i>	DL-mentol : ácido láurico (10:1)	Agitación 24 h, 400 rpm, 35 °C (308 K)	Carotenoides totales	187.9 µg/g	(Buarque, et al , 2024)
<i>Capsicum frutescens</i>	DL-mentol : ácido mirístico (10:1)	Agitación 24 h, 400 rpm, 35 °C (308 K)	Carotenoides totales	193.2 µg/g	(Buarque, et al, 2024)
<i>Capsicum frutescens</i>	DL-mentol : ácido palmítico (10:1)	Agitación 24 h, 400 rpm, 35 °C (308 K)	Carotenoides totales	198.6 µg/g	(Buarque, et al., 2024)
<i>Capsicum frutescens</i>	DL-mentol : ácido esteárico (10:1)	Agitación 24 h, 400 rpm, 35 °C (308 K)	Carotenoides totales	200.2 µg/g	(Buarque, et al., 2024)
<i>Capsicum frutescens</i>	DL-mentol : octanol (1:1)	Agitación 24 h, 400 rpm, 35 °C (308 K)	Carotenoides totales	160.2 µg/g	(Buarque, et al., 2024)
<i>Capsicum frutescens</i>	DL-mentol : octanol (2:1)	Agitación 24 h, 400 rpm, 35 °C (308 K)	Carotenoides totales	163.6 µg/g	(Buarque, et al., 2024)
<i>Capsicum frutescens</i>	DL-mentol : decanol (2:1)	Agitación 24 h, 400 rpm, 35 °C (308 K)	Carotenoides totales	197.0 µg/g	(Buarque, et al., 2024)
<i>Capsicum frutescens</i>	DL-mentol : dodecanol (2:1)	Agitación 24 h, 400 rpm, 35 °C (308 K)	Carotenoides totales	185.7 µg/g	(Buarque, et al., 2024)
Cáscara de naranja	Octanoic acid : L-proline (4:1)	UAE 20 min, 60% intensidad, 45 °C	Carotenoides totales	46.01 µg/g	(Viñas-Ospino et al., 2024)

Cáscara de naranja	Lauric acid : Octanoic acid (1:3)	UAE 20 min, 60% intensidad, 45 °C	Carotenoides totales	40.33 µg/g	(Viñas-Ospino et al., 2024)
Cáscara de naranja	Octanoic acid (puro)	UAE 20 min, 60% intensidad, 45 °C	Carotenoides totales	31.61 µg/g	(Viñas-Ospino et al., 2024)
Cáscara de naranja	Menthol : Camphor (1:1)	UAE 20 min, 60% intensidad, 45 °C	Carotenoides totales	36.19 µg/g	(Viñas-Ospino et al., 2024)
Cáscara de naranja	Menthol : Eucalyptol (1:1)	UAE 20 min, 60% intensidad, 45 °C	Carotenoides totales	34.98 µg/g	(Viñas-Ospino et al., 2024)
<i>Saccharina latissima</i>	DL-mentol : ácido acético (1:1)	Agitación 1800 rpm, 120 min, 25 °C, SLR 0.05	Fucoxantina	0.0 µg/g	(Kholany et al., 2024)
<i>Saccharina latissima</i>	DL-mentol : ácido láctico (1:1 molar)	Agitación 1800 rpm, 120 min, 25 °C, SLR 0.05	Fucoxantina	74.0 µg/g	(Kholany et al., 2024)
<i>Saccharina latissima</i>	DL-mentol : ácido caprílico (1:1 molar)	Agitación 1800 rpm, 120 min, 25 °C, SLR 0.05	Fucoxantina	76.0 µg/g	(Kholany et al., 2024)
<i>Saccharina latissima</i>	DL-mentol : ácido levulínico (1:1 molar)	Agitación 1800 rpm, 120 min, 25 °C, SLR 0.05	Fucoxantina	137.2 µg/g	(Kholany et al., 2024)
Pieles de tomate	Mentol:timol (1:1)	Extracción asistida por ultrasonido , 20 min a 36 °C, relación masa/volumen 1:20, con agitación y sonicación	Licopeno	484.2 mg/g extracto seco	(Marinaccio et al., 2024)
Pieles de tomate	Mentol:timol + agua	Extracción asistida por ultrasonido , 20 min a 36 °C, relación masa/volumen 1:20, con agitación y sonicación	Licopeno	358.7 mg/g extracto seco	(Marinaccio et al., 2024)

<i>Solanum lycopersicum</i>	Mentol:ácido butírico (1:2)	Agitación en incubadora (450 rpm, 24 h, RT)	licopeno β-caroteno	52.38 μg/g 23.65 μg/g	(Fraterrigo et al 2025)
Cáscaras de naranja (<i>Citrus sinensis</i> L)	Timol:ácido hexanoico (2:1 molar)	Agitación a 500 rpm	Carotenoides totales	259.45 μg/g	(Terlidis, et al. 2023)
<i>Cucurbita moschata</i>	Mentol:propiónico (1:2)	MMAE. 15 min, 25 °C	β-caroteno	10.82 μg β-caroteno/g	(Tanriver, et al 2025)
<i>Cucurbita moschata</i>	Mentol:propiónico (1:2)	HAE. 30 s, 7061 rpm, 25 °C	β-caroteno	8.76 μg β-caroteno/g	(Tanriver, et al 2025)
<i>Spinacia oleracea</i>	Mentol:propiónico (1:4)	MMAE. 60 min, 25 °C	β-caroteno	18.99 μg β-caroteno/g	(Tanriver, et al 2025)
<i>Spinacia oleracea</i>	Mentol:propiónico (1:4)	HAE. 120 s, 7000 rpm	β-caroteno	12.17 μg β-caroteno/g	(Tanriver, et al 2025)
Cáscara de <i>Cucurbita moschata</i>	DL-mentol:ácido láctico (1:2)	Vortex + agitación + ultrasonido asistido (60 min a 45 kHz)	β-caroteno	0.823 mg/mL	(Sportiello, , et al 2025)
Cáscara de <i>Cucurbita moschata</i>	DL-mentol:ácido láctico (1:2)	Vortex + agitación + ultrasonido asistido (60 min a 45 kHz)	Carotenoides totales	2995 mg/mL	(Sportiello, , et al 2025)
Cáscara de naranja (var. Navel)	L-Mentol : D,L-Cánfora	Extracción asistida por ultrasonido	β-caroteno	653.51 mg/100gfw	(Viñas-Ospino, et al 2023)
Cáscara de naranja (var. Navel)	L-Mentol : Eucaliptol	Extracción asistida por ultrasonido	β-caroteno	168.75 mg/100gfw	(Viñas-Ospino, , et al 2023)

Cáscara de naranja (var. Navel)	Ácido láurico : octanoico	Extracción asistida por ultrasonido	β -caroteno	153.12 mg/100gfw	(Viñas-Ospino, , et al 2023)
<i>Cucurbita maxima</i>	Ácido caprílico : caprico (3:1)	Extracción asistida por ultrasonido 10 min	β -caroteno	151.41 μ g/mL	(Stupar et al., 2021)
<i>Cucurbita maxima</i>	Ácido caprílico : caprico (2:1)	Agitación 24 h	β -caroteno	93.17 μ g/mL	(Stupar et al., 2021)
<i>Cucurbita maxima</i>	DL-mentol : ácido caprico (2:1)	Agitación 24 h	β -caroteno	90.33 μ g/mL	(Stupar et al., 2021)
<i>Cucurbita maxima</i>	DL-mentol : ácido caprílico (1:1)	Agitación 24 h	β -caroteno	89.49 μ g/mL	(Stupar et al., 2021)



En cuanto a matrices cítricas, Terlidis et al. (2023) emplearon timol:ácido hexanoico (2:1 molar) para extraer carotenoides totales de cáscaras de naranja, obteniendo un rendimiento de 259,45 $\mu\text{g/g}$, un valor notablemente superior al registrado en otras fuentes vegetales tratadas con disolventes similares. Por otro lado, Viñas-Ospino et al. (2023) destacaron la influencia del tipo de solvente en la extracción de β -caroteno desde cáscaras de naranja var. Navel mediante ultrasonidos, logrando el máximo rendimiento con mentol:cánfora (653,51 $\text{mg}/100\text{g fw}$), mientras que combinaciones como mentol:eucaliptol o ácidos grasos mostraron resultados inferiores, lo que reafirma el papel clave de la estructura química del disolvente. En un estudio similar de este grupo de investigación, Viñas-Ospino et al. (2024) estudiaron la extracción de carotenoides totales de cáscara de naranja mediante extracción asistida por ultrasonido (UAE, 20 min, 45 °C, intensidad 60 %), utilizando diversos DES basados en ácidos y terpenos. El mayor rendimiento se alcanzó con octanoic acid:L-proline (4:1), con 46.01 $\mu\text{g/g}$, seguido por lauric acid:octanoic acid (1:3) y octanoic acid puro, con 40.33 y 31.61 $\mu\text{g/g}$ respectivamente. Las combinaciones menthol:camphor (1:1) y menthol:eucalyptol (1:1) presentaron valores más modestos (36.19 y 34.98 $\mu\text{g/g}$), lo cual sugiere que los sistemas basados en aminoácidos pueden superar a los derivados terpénicos en matrices ricas en aceites esenciales.

Sportiello et al. (2025) demostraron una altísima eficiencia del sistema DL-mentol:ácido láctico (1:2) en la extracción de carotenoides totales y β -caroteno desde cáscaras de calabaza, alcanzando valores de 2995 mg/mL y 0,823 mg/mL , respectivamente, al combinar técnicas de vortex, agitación y ultrasonido asistido, lo que subraya el potencial de la sinergia técnica en la mejora de los rendimientos.

En el estudio de Ojeda et al. (2025), se evaluó la eficacia de diferentes DES hidrofóbicos basados en terpenos y ácidos grasos para la extracción de β -caroteno a partir de cáscara de mango criollo. Mediante agitación magnética durante 180 minutos a 25 °C y una relación sólido-líquido de 1:15, se observaron rendimientos que oscilaron entre 3.58 y 4.71 $\mu\text{g/mg}$, destacando la combinación timol:ácido levulínico (1:1) con el mayor valor (4.71 $\mu\text{g/mg}$), seguida de mentol:ácido láurico (1:1) y mentol:ácido caprílico (1:1), con 4.53 y 4.32 $\mu\text{g/mg}$ respectivamente. Estas formulaciones mostraron un rendimiento superior al sistema timol:ácido láurico (1:1), que alcanzó los 3.96 $\mu\text{g/mg}$, o al sistema timol:mentol (1:1), con 3.58 $\mu\text{g/mg}$, sugiriendo que el tipo de ácido graso tiene un efecto

significativo en la capacidad extractiva del disolvente. Por otro lado, Buarque et al. (2024) analizaron diferentes combinaciones de DL-mentol con ácidos grasos y alcoholes lineales en la extracción de carotenoides totales a partir de *Capsicum frutescens*. Los rendimientos más elevados se obtuvieron con DL-mentol:ácido esteárico (10:1), alcanzando 200.2 $\mu\text{g/g}$, seguido muy de cerca por DL-mentol:ácido palmítico (198.6 $\mu\text{g/g}$) y DL-mentol:decanol (197.0 $\mu\text{g/g}$). El aumento progresivo del número de carbonos en los ácidos grasos condujo a mayores recuperaciones, desde 152.8 $\mu\text{g/g}$ con ácido caprílico hasta 200.2 $\mu\text{g/g}$ con ácido esteárico, evidenciando una correlación entre la longitud de cadena del ácido y la eficiencia del DES. En cuanto a los alcoholes, DL-mentol:octanol (1:1 y 2:1) y DL-mentol:dodecanol (2:1) mostraron rendimientos algo inferiores, entre 160.2 y 185.7 $\mu\text{g/g}$.

Finalmente, Kholany et al. (2024) exploraron diferentes combinaciones de DL-mentol con ácidos orgánicos para extraer fucoxantina de *Saccharina latissima*. Bajo condiciones de agitación controlada (1800 rpm, 120 min, 25 °C), el disolvente DL-mentol:ácido levulínico (1:1 molar) proporcionó el mayor rendimiento (137.2 $\mu\text{g/g}$), seguido de DL-mentol:ácido caprílico (76.0 $\mu\text{g/g}$) y DL-mentol:ácido láctico (74.0 $\mu\text{g/g}$), mientras que DL-mentol:ácido acético no mostró actividad extractiva (0.0 $\mu\text{g/g}$). Este comportamiento podría atribuirse a la polaridad y viscosidad del sistema, factores determinantes en la eficacia de extracción de carotenoides en algas marrones.

4.3.3 Líquidos eutécticos para la extracción de Betalaína

Los líquidos eutécticos profundos han sido explorados como disolventes verdes eficaces para la extracción de betalaínas, gracias a su capacidad para preservar la estabilidad de estos pigmentos hidrosolubles y mejorar su rendimiento extractivo ya que los líquidos eutécticos profundos reúnen plenamente las características fundamentales de estos sistemas.

- Reducción del punto de fusión
- Formación de extensas redes de puentes de hidrógeno
- Capacidad de ajuste de polaridad

En la Tabla 10 se muestran distintas formulaciones de líquidos eutécticos profundos utilizadas en estudios recientes, junto con sus condiciones de extracción y los resultados obtenidos.

Tabla 10 Líquidos eutécticos profundos para la extracción de Betalainas

Fuente	Solvente	Técnica de extracción	Compuesto	Rendimiento / Recuperación	Referencia
Residuos remolacha	de MgCl ₂ ·6H ₂ O : urea (2:1) pH 3	Ultrasonido asistido (UAE) a 25 °C durante 3 h + agitación por vortex (15 min)	Betalainas totales	3.99 mg/100g	(Hernández-Aguirre et al., 2021)
Residuos remolacha	de MgCl ₂ ·6H ₂ O : urea (2:1) pH 7	Ultrasonido asistido (UAE) a 25 °C durante 3 h + agitación por vortex (15 min)	Betalainas totales	3.65 mg/100g	(Hernández-Aguirre et al., 2021)
Cáscara de pitaya roja (<i>Hylocereus polyrhizus</i>)	Cloruro de colina: ácido cítrico (1:1 molar)	Ultrasonido asistido; T ^a :39 °C; t: 51 min	Betalainas totales	4.39 mg/g	(Liu et al., 2024)
Remolacha roja	Cloruro de colina: Etilenglicol (1:2)	Agitación en baño de agua (30 min a 30 °C)	Betalainas totales	775.00 mg/kg	(Kaba et al., 2024)
Remolacha roja	Cloruro de colina: Butanodiol (1:2)	Agitación en baño de agua (30 min a 30 °C)	Betalainas totales	814.72 mg/kg	(Kaba et al., 2024)
Remolacha roja	Cloruro de colina: Ácido acético (1:2)	Agitación en baño de agua (30 min a 30 °C)	Betalainas totales	837.44 mg/kg	(Kaba et al., 2024)
Remolacha roja	Cloruro de colina: Glicerol (1:2)	Agitación en baño de agua (30 min a 30 °C)	Betalainas totales	952.53 mg/kg	(Kaba et al., 2024)

Remolacha roja	Cloruro de colina: Glucosa (1:0.75)	Agitación en baño de agua (30 min a 30 °C)	Betalainas totales	1192.17 mg/kg	(Kaba et al., 2024)
Remolacha roja	Ácido ascórbico: ChCl (1:2)	Agitación en baño de agua (30 min a 30 °C)	Betalainas totales	1015.25 mg/kg	(Kaba et al., 2024)
Remolacha roja	Ácido láctico: Sorbitol (1:2)	Agitación en baño de agua (30 min a 30 °C)	Betalainas totales	845.69 mg/kg	(Kaba et al., 2024)
Remolacha roja	Ácido málico: Xilitol (1:2)	Agitación en baño de agua (30 min a 30 °C)	Betalainas totales	877.35 mg/kg	(Kaba et al., 2024)
Remolacha roja	Ácido ascórbico: Xilitol (1:2)	Agitación en baño de agua (30 min a 30 °C)	Betalainas totales	925.40 mg/kg	(Kaba et al., 2024)
Remolacha roja	Ácido ascórbico: Glucosa (1:2)	Agitación en baño de agua (30 min a 30 °C)	Betalainas totales	970.57 mg/kg	(Kaba et al., 2024)
Remolacha roja fresca	Cloruro de colina: glucosa (2:1)	Vortex (2 min) + rotador (10 min) + centrifugación	Betacianina	119.31 mg/100 g	(Makarova, Özten, & Zieniuk, 2025)
Remolacha roja fresca	Cloruro de colina: glucosa (2:1)	Vortex (2 min) + rotador (10 min) + centrifugación	Betaxantinas	83.73 mg/100 g	(Makarova, Özten, & Zieniuk, 2025)
Remolacha roja fresca	Cloruro de colina: glicerol (1:2)	Vortex (2 min) + rotador (10 min) + centrifugación	Betacianina	179.86 mg/100 g	(Makarova, Özten, & Zieniuk, 2025)
Remolacha roja fresca	Cloruro de colina: glicerol (1:2)	Vortex (2 min) + rotador (10 min) + centrifugación	Betaxantinas	170.77 mg/100 g	(Makarova et al., 2025)

Remolacha fresca	roja	Cloruro de colina: ácido cítrico (2:1)	Vortex (2 min) + rotador (10 min) + centrifugación	Betacianina	68.11 mg/100 g	(Makarova et al., 2025)
Remolacha fresca	roja	Cloruro de colina: ácido cítrico (2:1)	Vortex (2 min) + rotador (10 min) + centrifugación	Betaxantinas	24.42 mg/100 g	(Makarova et al., 2025)
Remolacha fresca	roja	Cloruro de colina: urea (1:2)	Vortex (2 min) + rotador (10 min) + centrifugación	Betacianina	163.73 mg/100 g	(Makarova et al., 2025)
Remolacha fresca	roja	Cloruro de colina: urea (1:2)	Vortex (2 min) + rotador (10 min) + centrifugación	Betaxantinas	134.82 mg/100 g	(Makarova et al., 2025)
Remolacha fresca	roja	Cloruro de colina: sorbitol (1:1)	Vortex (2 min) + rotador (10 min) + centrifugación	Betacianina	137.23 mg/100 g	(Makarova et al., 2025)
Remolacha fresca	roja	Cloruro de colina: sorbitol (1:1)	Vortex (2 min) + rotador (10 min) + centrifugación	Betaxantinas	129.01 mg/100 g	(Makarova et al., 2025)

La recuperación de betalaínas desde remolacha roja y matrices similares ha sido ampliamente estudiada mediante la aplicación de disolventes eutécticos profundos y técnicas de baja intensidad energética. Los resultados más destacados fueron obtenidos por Kaba et al. (2024), quienes evaluaron múltiples combinaciones de disolventes eutécticos profundos basados en colina y ácidos u otras sustancias biocompatibles, logrando una recuperación máxima de 1192.17 mg/kg con el sistema cloruro de colina:glucosa (1:0.75), seguido de mezclas como cloruro de colina:ácido ascórbico (1:2) con 1015.25 mg/kg y cloruro de colina:glicerol (1:2) con 952.53 mg/kg, todas mediante agitación en baño de agua a 30 °C durante 30 minutos. Esta eficacia se atribuye a la alta capacidad solvatante de estos disolventes eutécticos profundos, así como a su afinidad estructural con las betalaínas.

Hernández-Aguirre et al. (2021) emplearon una mezcla de $MgCl_2 \cdot 6H_2O$:urea (2:1) en residuos de remolacha, obteniendo rendimientos mucho más bajos (3.65–3.99 mg/100 g), incluso utilizando ultrasonido asistido durante 3 h, lo que sugiere una menor eficiencia tanto del disolvente como de la técnica empleada. También cabe mencionar el estudio de Liu et al. (2024) en cáscaras de *Hylocereus polyrhizus*, donde la aplicación de cloruro de colina:ácido cítrico (1:1) bajo ultrasonidos logró 4.39 mg/g, un valor moderado pero significativamente inferior a los logrados con matrices de *Beta vulgaris* y sistemas glucosa o glicerol.

Makarova et al. (2025) exploraron distintas combinaciones de disolventes eutécticos profundos sobre remolacha roja fresca, aplicando un procedimiento rápido (vortex + rotación) a temperatura ambiente. El sistema más eficiente fue cloruro de colina:glicerol (1:2), que permitió recuperar 179.86 mg/100 g de betacianinas y 170.77 mg/100 g de betaxantinas. Otras mezclas como ChCl:urea (1:2) y ChCl:sorbitol (1:1) también presentaron buenos rendimientos (más de 130 mg/100 g), destacando por la rapidez del procedimiento y la ausencia de temperatura elevada.

5. CONCLUSIONES

De los resultados descritos en la presente memoria pueden extraerse las siguientes conclusiones:

- i. Las mezclas de agua y etanol han demostrado ser un sistema extractivo versátil y de bajo coste, capaz de optimizar la recuperación de compuestos fenólicos (hasta 22 mg de equivalentes de ácido gálico/100 g de materia seca) y flavonoides en matrices vegetales, sin los riesgos ambientales asociados a los disolventes petroquímicos.
- ii. Los líquidos iónicos (ILs) ofrecen rendimientos muy elevados, por ejemplo, hasta 78,6 mg/g de polifenoles en hojas leñosas mediante ultrasonidos, gracias a su selectividad polar; sin embargo, su elevado coste, posible toxicidad y complejidad de reciclado constituyen barreras para su aplicación industrial a gran escala.
- iii. Los líquidos eutécticos profundos (DES/NADES), especialmente aquellos basados en colina, azúcares o ácidos orgánicos, han logrado recuperaciones superiores al 90 % de compuestos fenólicos y pigmentos como las betalainas, combinando baja toxicidad y biodegradabilidad con propiedades fisicoquímicas ajustables, lo que los sitúa como la opción más sostenible para matrices alimentarias sensibles.

A pesar de su potencial, los solventes verdes presentan desafíos tecnológicos:

- i. Para garantizar la viabilidad económica y ambiental, es imprescindible la recuperación y el reciclado eficiente de IL y DES/NADES.
- ii. Son necesarios estudios de escalado industrial, análisis del ciclo de vida y evaluaciones coste-beneficio para su implementación práctica en las industrias alimentaria.

En conjunto, los resultados avalan que los solventes verdes conforman un nuevo paradigma extractivo que, al combinar alta eficiencia con criterios de seguridad y respeto

medioambiental, puede sustituir progresivamente a los disolventes convencionales, siempre que se aborden sus retos de escalado y reciclado.



6. BIBLIOGRAFÍA

Adadi, P., Barakova, N. V., Beznosikov, B. V., & Bityutskaya, L. A. (2019). Sustainable green extraction of carotenoid pigments from carrot juice using enzyme-assisted method. *Molecules*, 24(24), 4585. <https://doi.org/10.3390/molecules24244585>

Airouyuwa, J. O., Mostafa, H., Riaz, A., Stathopoulos, C., & Maqsood, S. (2023). *Natural deep eutectic solvents and microwave-assisted green extraction for efficient recovery of bioactive compounds from by-products of date fruit (Phoenix dactylifera L.) processing: Modeling, optimization, and phenolic characterization. Food and Bioprocess Technology*, 16(4), 824–843. <https://doi.org/10.1007/s11947-022-02960-8>

Akdeniz Oktay, B., Turabi Yolaçaner, E., & Aytaç, S. A. (2024a). Ultrasound-assisted extraction of betalain-rich bioactive compounds of prickly pear fruit: An optimization study. *Food Bioscience*, 61. <https://doi.org/10.1016/j.fbio.2024.104734>

Akdeniz Oktay, B., Turabi Yolaçaner, E., & Aytaç, S. A. (2024b). Ultrasound-assisted extraction of betalain-rich bioactive compounds of prickly pear fruit: An optimization study. *Food Bioscience*, 61. <https://doi.org/10.1016/j.fbio.2024.104734>

Aktaş, H., & Kurek, M. A. (2024). Deep eutectic solvents for the extraction of polyphenols from food plants. *Food Chemistry*, 444. <https://doi.org/10.1016/j.foodchem.2024.138629>

Anzà, B., Fraterrigo Garofalo, S., Lapolla, A., & Fino, D. (2025). Green protein extraction from hazelnut press cake: Yield, efficiency, and secondary structure analysis. *Separations*, 12(3), 63. <https://doi.org/10.3390/separations12030063>

Álvarez, M. S., Deive, F. J., Rodríguez, A., & Longo, M. A. (2024). Designing biodegradable aqueous biphasic systems for the selective separation of enzymes. *Separation and Purification Technology*, 353. <https://doi.org/10.1016/j.seppur.2024.128508>

Bencresciuto, G. F., Carnevale, M., Paris, E., Gallucci, F., Santangelo, E., & Migliori, C. A. (2025). A sustainable alternative for cosmetic applications: NADES extraction of bioactive compounds from hazelnut by-products. *Sustainability*, 17(4). <https://doi.org/10.3390/su17041516>

Bianchini, C. B., Ramos-Souza, C., Schappo, F. B., Farina, M., De Rosso, V. V., & Nunes, I. L. (2024a). Ionic liquid and ultrasound as a fast and innovative combination for improved extraction

of *Chlorella sorokiniana*-derived carotenoids. *Algal Research*, 82.
<https://doi.org/10.1016/j.algal.2024.103650>

Bianchini, C. B., Ramos-Souza, C., Schappo, F. B., Farina, M., De Rosso, V. V., & Nunes, I. L. (2024b). Ionic liquid and ultrasound as a fast and innovative combination for improved extraction of *Chlorella sorokiniana*-derived carotenoids. *Algal Research*, 82.
<https://doi.org/10.1016/j.algal.2024.103650>

Boravelli, J. A. R., & Vir, A. B. (2024). Continuous flow aqueous two-phase extraction of betalains in millifluidic channel. *Chemical Engineering Journal*, 495.
<https://doi.org/10.1016/j.cej.2024.153265>

Bouakline, H., Ziani, I., Yahyaoui, M. I., Corrias, F., Abdeslam, A., & El Bachiri, A. (2025). Using green solvents as co-solvent in supercritical carbon dioxide extraction: A promising source of extracts rich in antioxidants and antimicrobial agents. *Sustainable Chemistry and Pharmacy*, 44. <https://doi.org/10.1016/j.scp.2025.101950>

Buarque, F. S., Soares, M. A., Ribeiro, B. D., & Marrucho, I. M. (2024). Development of hydrophobic eutectic solvents composed of DL-menthol and fatty acids/alcohols: Application in the extraction of capsaicinoids and carotenoids from *Capsicum frutescens*. *Journal of Molecular Liquids*, 417. <https://doi.org/10.1016/j.molliq.2024.126591>

Büyükkütük, M. A., Yalçın, M., & Ceylan, F. D. (2023). Enhancement of phenolic compound extraction using natural deep eutectic solvents and ultrasonic-assisted techniques. *Innovative Food Science and Emerging Technologies*, 87, 103380. <https://doi.org/10.1016/j.ifset.2023.103380>

Carpentieri, S., Ferrari, G., & Pataro, G. (2023). Optimization of pulsed electric fields–assisted extraction of phenolic compounds from white grape pomace using response surface methodology. *Frontiers in Sustainable Food Systems*, 6, 854968. <https://doi.org/10.3389/fsufs.2022.854968>

Calla-Quispe, E., Li, X., Chen, Y., & Liu, J. (2020). Are ionic liquids better extracting agents than toxic volatile organic solvents? A combination of ionic liquids, microwave and LC/MS/MS, applied to the lichen *Stereocaulon glareosum*. *Frontiers in Chemistry*, 8, 450. <https://doi.org/10.3389/fchem.2020.00450>

Chatzimitakos, T., Athanasiadis, V., Kotsou, K., Bozinou, E., & Lalas, S. I. (2023). Response surface optimization for the enhancement of the extraction of bioactive compounds from citrus limon peel. *Antioxidants*, 12(8). <https://doi.org/10.3390/antiox12081605>

Cannavacciuolo, C., Pagliari, S., Frigerio, J., Giustra, C. M., Labra, M., & Campone, L. (2023). Natural deep eutectic solvents (NADESs) combined with sustainable extraction techniques: A review of the green chemistry approach in food analysis. *Foods*, 12(1), 56. <https://doi.org/10.3390/foods12010056>

Cheng, W., Xian, F., Zhou, Z., Hu, K., & Gao, J. (2023). Solubility and stability of carotenoids in ammonium- and phosphonium-based ionic liquids: Effect of solvent nature, temperature and water. *Molecules*, 28(8). <https://doi.org/10.3390/molecules28083618>

Dai, Y., Witkamp, G.-J., Verpoorte, R., & Choi, Y. H. (2022). Natural deep eutectic solvents (NADES): Characteristics, applications and toxicity. *Food Chemistry*, 370, 130991. <https://doi.org/10.1016/j.foodchem.2021.130991>

Dang-Bao, T., & Tran, U. P. N. (2023). Stability improvement of betalains recovered from red dragon fruit peels (*Hylocereus polyrhizus*) by cellulose-based encapsulation. *Fibers and Polymers*, 24(3), 784–793. <https://doi.org/10.1007/s12221-023-00248-y>

De Souza Mesquita, L. M., Murador, D. C., Neves, B. V., Braga, A. R. C., Pisani, L. P., & De Rosso, V. V. (2021). Bioaccessibility and cellular uptake of carotenoids extracted from *Bactris gasipaes* fruit: Differences between conventional and ionic liquid-mediated extraction. *Molecules*, 26(13). <https://doi.org/10.3390/molecules26133989>

Diniyah, N., Badrul Alam, M., & Lee, S. (2020). Antioxidant potential of non-oil seed legumes of Indonesian's ethnobotanical extracts. *Arabian Journal of Chemistry*, 13(5), 5208. <https://doi.org/10.1016/j.arabjc.2020.02.019>

El-Beltagi, H. S., El-

Mogy, M. M., Parmar, A., Mansour, A. T., Shalaby, T. A., & Ali, M. R. (2022). Phytochemical characterization and utilization of dried red beetroot (*Beta vulgaris*) peel extract in maintaining the quality of Nile Tilapia fish fillet. *Antioxidants*, 11(5), 906. <https://doi.org/10.3390/antiox11050906>

Escarpa, A., Morales-Sillero, A., & Luque de Castro, M. D. (2024). The influence of solvent choice on the extraction of bioactive compounds from plants. **Foods, 13*(19), 3151*. <https://doi.org/10.3390/foods13193151>

Fernandes, A. S., Caetano, P. A., Jacob-Lopes, E., Zepka, L. Q., & De Rosso, V. V. (2024a). Alternative green solvents associated with ultrasound-assisted extraction: A green chemistry approach for the extraction of carotenoids and chlorophylls from microalgae. *Food Chemistry, 455*. <https://doi.org/10.1016/j.foodchem.2024.139939>

Fernandes, A. S., Caetano, P. A., Jacob-Lopes, E., Zepka, L. Q., & De Rosso, V. V. (2024b). Alternative green solvents associated with ultrasound-assisted extraction: A green chemistry approach for the extraction of carotenoids and chlorophylls from microalgae. *Food Chemistry, 455*. <https://doi.org/10.1016/j.foodchem.2024.139939>

Fernandes, A. S., Caetano, P. A., Jacob-Lopes, E., Zepka, L. Q., & De Rosso, V. V. (2024c). Alternative green solvents associated with ultrasound-assisted extraction: A green chemistry approach for the extraction of carotenoids and chlorophylls from microalgae. *Food Chemistry, 455*. <https://doi.org/10.1016/j.foodchem.2024.139939>

Fraterrigo Garofalo, S., Mallen, V., & Fino, D. (2025a). Extraction of carotenoids from tomato pomace using deep eutectic solvents composed of short- and medium-chain fatty acids and menthol. *Food Chemistry, 484*. <https://doi.org/10.1016/j.foodchem.2025.144342>

Fraterrigo Garofalo, S., Mallen, V., & Fino, D. (2025b). Extraction of carotenoids from tomato pomace using deep eutectic solvents composed of short- and medium-chain fatty acids and menthol. *Food Chemistry, 484*. <https://doi.org/10.1016/j.foodchem.2025.144342>

Fuentes-Jorquera, N., Villalva, M., Pérez-Jiménez, J., González-Miquel, M., González, E. J., Mariotti-Celis, M. S., ... Canales, R. I. (2025). A sustainable approach to obtain polyphenols from Chilean wild *Murta*, *Ugni candollei* B., and *Ugni molinae* T., using eutectic solvents and advanced extraction techniques. *Innovative Food Science & Emerging Technologies, 102*. <https://doi.org/10.1016/j.ifset.2025.104017>

Gao, M.-Z., Cui, Q., Wang, L.-T., Meng, Y., Yu, L., Li, Y.-Y., & Fu, Y.-J. (2020). A green and integrated strategy for enhanced phenolic compounds extraction from *Morus alba* L. leaves by deep eutectic solvent. *Microchemical Journal, 154*, 104598. <https://doi.org/10.1016/j.microc.2020.104598>

Gómez-López, I., Mendiola, J. A., Portillo, M. P., & Cano, M. P. (2022). Pressurized green liquid extraction of betalains and phenolic compounds from *Opuntia stricta* var. *dillenii* whole fruit: Process optimization and biological activities of green extracts. *Innovative Food Science & Emerging Technologies*, 80. <https://doi.org/10.1016/j.ifset.2022.103066>

Grisales-Mejía, J. F., Cedeño, V., Ortega, J. P., Torres-Castañeda, H. G., Andrade-Mahecha, M. M., Martínez-Correa, H. A., Álvarez-Rivera, G., & Mendiola, J. A. (2024). Advanced NADES-based extraction processes for the recovery of phenolic compounds from Hass avocado residues: A sustainable valorization strategy. *Separation and Purification Technology*, 351, 128104. <https://doi.org/10.1016/j.seppur.2024.128104>

Guo, J. B., Saranya, K., Ramalakshmi, K., & Jagan Mohan Rao, L. (2018). *Microwave-assisted extraction of non-volatiles from ginger using ionic liquids*. *International Journal of Innovative Technology and Exploring Engineering*, 8(2S2), 157–162.

Harfoush, A., Swaidan, A., Khazaal, S., Salem Sokhn, E., Grimi, N., Debs, E., ... El Darra, N. (2024). From spent black and green tea to potential health boosters: Optimization of polyphenol extraction and assessment of their antioxidant and antibacterial activities. *Antioxidants*, 13(12). <https://doi.org/10.3390/antiox13121588>

Hao, J., Zhou, Y., Zhou, X., Li, Q., Pei, Y., Sun, Y., & Liu, H. (2025). Optimization of quercetin extraction from *Schisandra chinensis* by an ultrasound-assisted ionic liquid–enzyme composite system and its antioxidant research analysis. *ChemistrySelect*, 10(16), e202500400. <https://doi.org/10.1002/slct.202500400>

Hernández-Aguirre, O. A., Muro, C., Hernández-Acosta, E., Alvarado, Y., & Díaz-Nava, M. D. C. (2021a). Extraction and stabilization of betalains from beetroot (*Beta vulgaris*) wastes using deep eutectic solvents. *Molecules*, 26(21). <https://doi.org/10.3390/molecules26216342>

Hong, H. T., Agarwal, R., Takagi, T., Netzel, M. E., Harper, S. M., & O'Hare, T. J. (2025). A modified extraction and saponification method for the determination of carotenoids in the fruit of *Capsicum annuum*. *Agriculture*, 15(6). <https://doi.org/10.3390/agriculture15060646>

Huamán-Castilla, N. L., Mamani Apaza, L. O., Zirena Vilca, F., Saldaña, E., Diaz-Valencia, Y. K., & Mariotti-Celis, M. S. (2024). Comparative analysis of sustainable extraction methods and green solvents for olive leaf extracts with antioxidant and antihyperglycemic activities. *Antioxidants*, 13(12). <https://doi.org/10.3390/antiox13121523>

Jing-Bo Guo, Ying Fan, Wen-Jie Zhang, Hao Wu, Li-Ming Du, & Yin-Xia Chang. (2017). Extraction of gingerols and shogaols from ginger (*Zingiber officinale* Roscoe) through microwave technique using ionic liquids. *Journal of Food Composition and Analysis*, 62, 35–42.

Kaba, B., Zannou, O., Ali Redha, A., & Koca, I. (2024). Enhancing extraction of betalains from beetroot (*Beta vulgaris* L.) using deep eutectic solvents: Optimization, bioaccessibility and stability. *Food Production, Processing and Nutrition*, 6(1). <https://doi.org/10.1186/s43014-023-00208-2>

Kholany, M., Reynaga-Navarro, W., Abranches, D. O., Wijffels, R., Coutinho, J. A. P., Ventura, S. P. M., & Kazbar, A. (2024). Extraction and separation of pigments from *Saccharina latissima* using eutectic solvents. *Separation and Purification Technology*, 357. <https://doi.org/10.1016/j.seppur.2024.130053>

Koubaa, M., Cifuentes, C., Barba, F. J., & del Castillo, M. D. (2023). New insights on the application of water or ethanol-water plant extracts used as flavors, colorings and preservatives to fortify food and feed products. **International Journal of Food Sciences and Nutrition**. <https://doi.org/10.1080/09637486.2023.10086256>

Kumar, R.; Methven, L.; & Oruna-Concha, M. J. (2023b). A comparative study of ethanol and citric acid solutions for extracting betalains and total phenolic content from freeze-dried beetroot powder. *Molecules*, 28(17). <https://doi.org/10.3390/molecules28176405>

Kumar, P., Kumari, A., & Singh, R. (2023). Optimization of mild acidified ethanol extraction of betalains from *Beta vulgaris* using response surface methodology. *Journal of Food Processing and Preservation*, 47(5), e16789. <https://doi.org/10.1111/jfpp.16789>

Kussmann, M., Abe Cunha, D. H., & Berciano, S. (2023). Bioactive compounds for human and planetary health. *Frontiers in Nutrition*, 10, 1193848. <https://doi.org/10.3389/fnut.2023.1193848>

Kyriakoudi, A., Mourtzinou, I., Tyśkiewicz, K., & Milovanovic, S. (2024). An eco-friendly supercritical CO₂ recovery of value-added extracts from *Olea europaea* leaves. *Foods*, 13(12). <https://doi.org/10.3390/foods13121836>

Leal-Alcazar, M. C., Bautista-Palestina, F., Rocha-Pizaña, M. D. R., Mojica, L., Hernández-Álvarez, A. J., & Luna-Vital, D. A. (2025a). Extraction, stabilization, and health application of betalains: An update. *Food Chemistry*, 481. <https://doi.org/10.1016/j.foodchem.2025.144011>

Li, C., Cui, Y., Lu, J., Liu, C., Chen, S., Ma, C., ... Kang, W. (2020). Ionic liquid-based ultrasonic-assisted extraction coupled with HPLC and artificial neural network analysis for *Ganoderma lucidum*. *Molecules*, 25(6). <https://doi.org/10.3390/molecules25061309>

Liu, F., Mallick, S., O'Donnell, T. J., Rouzimaimaiti, R., Luo, Y., Sun, R., Wall, M., Wongwiwatthanakit, S., Date, A., Silva, D. K., et al. (2022). Coumarinolignans with reactive oxygen species (ROS) and NF- κ B inhibitory activities from the roots of *Waltheria indica*. *Molecules*, 27(11), 3270. <https://doi.org/10.3390/molecules27113270>

Li, J., Pettinato, M., Casazza, A. A., & Perego, P. (2022). A comprehensive optimization of ultrasound-assisted extraction for lycopene recovery from tomato waste and encapsulation by spray drying. *Processes*, 10(2). <https://doi.org/10.3390/pr10020308>

Li, Y., Li, X., Wang, X., Xue, J., Zhang, R., Ding, Y., ... Su, J. (2023). Study on extraction and purification of *Acanthopanax senticosus* polyphenols by an ionic liquid-assisted aqueous two-phase system. *Molecules*, 28(17). <https://doi.org/10.3390/molecules28176383>

Li, M. H., Rao, C., Wang, C. X., Cui, X. M., & Xiong, Y. (2024). Natural deep eutectic solvents-based selective extraction of saponins from *Panax notoginseng*. *Journal of Chromatography A*, 1705, 462281. <https://doi.org/10.1016/j.chroma.2024.462281>

Li, Q., Zhao, F., & Sun, M. (2020). Ultrasound-assisted extraction of flavonoids from *Tetragium hemsleyanum* using 1-butyl-3-methylimidazolium bromide. *Phytochemical Analysis*, 31(4), 512–519. <https://doi.org/10.1002/pca.2938>

Li, X., Chen, Y., Wang, Z., & Liu, J. (2023). Solid–liquid biphasic extraction of polyphenols from *Acanthopanax senticosus* using 1-octyl-3-methylimidazolium bromide. *Journal of Separation Science*, 46(5), 1023–1031. <https://doi.org/10.1002/jssc.202200885>

Liu, Y., Mu, X., Wang, H., Wang, M., Zhang, L., Chen, G., & Wang, S. (2024a). Extraction of betalaine from red pitaya peel using deep eutectic solvent and its research in films. *Food and Bioproducts Processing*, 149, 16. <https://doi.org/10.1016/j.fbp.2024.11.005>

- López-Cortés, M. D., et al. (2023). Green solvents and non-conventional extraction techniques for carotenoid recovery from fruit and vegetable by-products: A critical review. **Foods**, 12(4), 863. <https://doi.org/10.3390/foods12040863>
- Makarova, A., Özten, C., & Zieniuk, B. (2025). Utilizing natural deep eutectic solvents (NADESs) for sustainable phytonutrient recovery: Optimization and multi-matrix extraction of bioactive compounds. *Applied Sciences*, 15(9). <https://doi.org/10.3390/app15094843>
- Marinaccio, L., Zengin, G., Bender, O., Cichelli, A., Novellino, E., Stefanucci, A., & Mollica, A. (2024). Ultrasound-assisted lycopene extraction from tomato skin waste by volatile natural deep eutectic solvent. *Food Chemistry Advances*, 4. <https://doi.org/10.1016/j.focha.2024.100656>
- Martins, I. R., Martins, L. H. D. S., Chisté, R. C., Picone, C. S. F., & Joele, M. R. S. P. (2024a). Betalains from vegetable peels: Extraction methods, stability, and applications as natural food colorants. *Food Research International*, 195. <https://doi.org/10.1016/j.foodres.2024.114956>
- Martins, I. R., Martins, L. H. D. S., Chisté, R. C., Picone, C. S. F., & Joele, M. R. S. P. (2024b). Betalains from vegetable peels: Extraction methods, stability, and applications as natural food colorants. *Food Research International*, 195. <https://doi.org/10.1016/j.foodres.2024.114956>
- Mattonai, M., Massai, P., & Ribechini, E. (2023). Sustainable microwave-assisted eutectic solvent extraction of polyphenols from vine pruning residues. *Microchemical Journal*, 197. <https://doi.org/10.1016/j.microc.2023.109816>
- Mehta, D., Kuksal, K., Yadav, K., Kumar Yadav, S., Zhang, Y., & Hariram Nile, S. (2024). Ultrasound-assisted extraction and encapsulation of betalain from prickly pear: Process optimization, in-vitro digestive stability, and development of functional gummies. *Ultrasonics Sonochemistry*, 108. <https://doi.org/10.1016/j.ultsonch.2024.106975>
- Mollea, C., & Bosco, F. (2025). Solid-state fermentation of brewery spent grains to enhance biomolecule extraction. *Separations*, 12(3). <https://doi.org/10.3390/separations12030058>
- Morón-Ortiz, Á, Mapelli-Brahm, P., León-Vaz, A., Benitez-González, A. M., Martín-Gómez, A. N., León, R., & Meléndez-Martínez, A. J. (2024a). Assessment of milling and the green biosolvents ethyl lactate and 2-methyltetrahydrofuran (2-methyloxolane) for the ultrasound-

assisted extraction of carotenoids in common and phytoene-rich *Dunaliella bardawil* microalgae. *LWT*, 213. <https://doi.org/10.1016/j.lwt.2024.117007>

Morón-Ortiz, Á, Mapelli-Brahm, P., León-Vaz, A., Benitez-González, A. M., Martín-Gómez, A. N., León, R., & Meléndez-Martínez, A. J. (2024b). Assessment of milling and the green biosolvents ethyl lactate and 2-methyltetrahydrofuran (2-methyloxolane) for the ultrasound-assisted extraction of carotenoids in common and phytoene-rich *Dunaliella bardawil* microalgae. *LWT*, 213. <https://doi.org/10.1016/j.lwt.2024.117007>

Morón-Ortiz, Á, Mapelli-Brahm, P., León-Vaz, A., Benitez-González, A. M., Martín-Gómez, A. N., León, R., & Meléndez-Martínez, A. J. (2024c). Assessment of milling and the green biosolvents ethyl lactate and 2-methyltetrahydrofuran (2-methyloxolane) for the ultrasound-assisted extraction of carotenoids in common and phytoene-rich *Dunaliella bardawil* microalgae. *LWT*, 213. <https://doi.org/10.1016/j.lwt.2024.117007>

Morón-Ortiz, Á, Mapelli-Brahm, P., & Meléndez-Martínez, A. J. (2024). Sustainable green extraction of carotenoid pigments: Innovative technologies and bio-based solvents. *Antioxidants*, 13(2). <https://doi.org/10.3390/antiox13020239>

Murador, D. C., Braga, A. R. C., Martins, P. L. G., Mercadante, A. Z., & De Rosso, V. V. (2019a). Ionic liquid associated with ultrasonic-assisted extraction: A new approach to obtain carotenoids from orange peel. *Food Research International*, 126. <https://doi.org/10.1016/j.foodres.2019.108653>

Murador, D. C., Braga, A. R. C., Martins, P. L. G., Mercadante, A. Z., & De Rosso, V. V. (2019b). Ionic liquid associated with ultrasonic-assisted extraction: A new approach to obtain carotenoids from orange peel. *Food Research International*, 126. <https://doi.org/10.1016/j.foodres.2019.108653>

Mussagy, C. U., Farias, F. O., Bila, N. M., Giannini, M. J. S. M., Pereira, J. F. B., Santos-Ebinuma, V. C., & Pessoa Jr, A. (2022a). Recovery of β -carotene and astaxanthin from *Phaffia rhodozyma* biomass using aqueous solutions of cholinium-based ionic liquids. *Separation and Purification Technology*, 290. <https://doi.org/10.1016/j.seppur.2022.120852>

Mussagy, C. U., Farias, F. O., Bila, N. M., Giannini, M. J. S. M., Pereira, J. F. B., Santos-Ebinuma, V. C., & Pessoa Jr, A. (2022b). Recovery of β -carotene and astaxanthin from *Phaffia rhodozyma*

biomass using aqueous solutions of cholinium-based ionic liquids. *Separation and Purification Technology*, 290. <https://doi.org/10.1016/j.seppur.2022.120852>

Moshikur, R., & Goto, M. (2023). Pharmaceutical applications of ionic liquids: A personal account. *Chemical Records*, 23(8), e202300026. <https://doi.org/10.1002/tcr.202300026>

Ojeda, G. A., Vallejos, M. M., Samori, C., & Galletti, P. (2025). Hydrophobic eutectic solvents for sustainable recovery of carotenoids from mango peel: Extraction optimization and insights into molecular interactions at play. *Journal of Molecular Liquids*, 425. <https://doi.org/10.1016/j.molliq.2025.127264>

Oo, N., Shiekh, K. A., Jafari, S., Kijpatanasilp, I., & Assatarakul, K. (2024). Characterization of marigold flower (*Tagetes erecta*) extracts and microcapsules: Ultrasound-assisted extraction and subsequent microencapsulation by spray drying. *Foods*, 13(15). <https://doi.org/10.3390/foods13152436>

Pal, C. B. T., & Jadeja, G. C. (2020). Microwave-assisted extraction for recovery of polyphenolic antioxidants from ripe mango (*Mangifera indica* L.) peel using lactic acid/sodium acetate deep eutectic mixtures. *Food Science and Technology International*, 26(1), 78–92. <https://doi.org/10.1177/1082013219870010>

Putthawan, P., Prompanya, B., & Promnet, S. (2021). Extraction, biological activities and stability of *Hylocereus polyrhizus* peel extract as a functional food colorant and nutraceutical. *Tropical Journal of Pharmaceutical Research*, 20(6), 1234–1240. <https://doi.org/10.4314/tjpr.v20i6.24>

Rahman, R. A., Tan, M. W., & Kassim, N. M. (2020). Microwave-assisted extraction of gallic acid and quercetin from *Labisia pumila* using ionic liquids. *Molecules*, 25(24), 5832. <https://doi.org/10.3390/molecules25245832>

N.R.H.A. Rahman, A. Idris, N.A. Yunus, & A.A. Mustaffa. (2019). Optimization of ionic liquid-based microwave extraction of flavonoid and phenolic acid from *Labisia pumila*. In *AIP Conference Proceedings* (Article 020027). AIP Publishing LLC.

Rodríguez-Félix, F., Medina-Montoya, A., & Gómez-Arroyo, S. (2022). Ultrasound-assisted extraction of betalains from red beet (*Beta vulgaris*) under short-time conditions. *Journal of Food Science*, 87(8), 3193–3200. <https://doi.org/10.1111/1750-3841.16205>

Rodrigues Vieira, T. R., Lima, A. B., Ribeiro, C. M. C. M., De Medeiros, P. V. Q., Converti, A., Dos Santos Lima, M., & Maciel, M. I. S. (2024). Red pitaya (*Hylocereus polyrhizus*) as a source of betalains and phenolic compounds: Ultrasound extraction, microencapsulation, and evaluation of stability. *LWT*, 196. <https://doi.org/10.1016/j.lwt.2024.115755>

Rosa, M. E., Ferreira, A. M., Neves, C. M. S. S., Almeida, M. R., Barros, R., & Cristovão, A. et al. (2023). Valorisation of red beet waste: One-step extraction and separation of betalains and chlorophylls using thermoreversible aqueous biphasic systems. *Green Chemistry*, 25(5), 1852. <https://doi.org/10.1039/d2gc04480c>

Roriz, C. L., Xavier, V., Heleno, S. A., Pinela, J., Dias, M. I., Calhelha, R. C., Morales, P., Ferreira, I. C. F. R., & Barros, L. (2021). Chemical and bioactive features of *Amaranthus caudatus* L. flowers and optimized ultrasound-assisted extraction of betalains. *Foods*, 10(4), 779. <https://doi.org/10.3390/foods10040779>

Sadaghiyanfam, S., Kamberaj, H., & Isler, Y. (2025). Enhanced prediction of ionic liquid toxicity using a meta-ensemble learning framework with data augmentation. *Artificial Intelligence in Chemistry*, 3(1), 100087. <https://doi.org/10.1016/j.aichem.2025.100087>

Sánchez-Campillo, M., Aranda, F., Fernández-Sevilla, J. M., Molina-Grima, E., & Contreras-Gómez, A. (2021). Use of ionic liquids for the extraction of carotenoids from microalgae. *Separation and Purification Technology*, 266, 118581. <https://doi.org/10.1016/j.seppur.2021.118581>

Sereti, F., Alexandri, M., Papapostolou, H., Kachrimanidou, V., Papadaki, A., & Kopsahelis, N. (2025). Green extraction of carotenoids and oil produced by *Rhodospiridium paludigenum* using supercritical CO₂ extraction: Evaluation of cell disruption methods and extraction kinetics. *Food Chemistry*, 483. <https://doi.org/10.1016/j.foodchem.2025.144261>

Silva, T. P., Alves, L., Salgado, F., Roseiro, J. C., Łukasik, R. M., & Paixão, S. M. (2024). Ionic liquids toward enhanced carotenoid extraction from bacterial biomass. *Molecules*, 29(17). <https://doi.org/10.3390/molecules29174132>

Silva, D. K., et al. (2023). Coumarinolignans with reactive oxygen species (ROS) and NF-κB inhibitory activities from the roots of *Waltheria indica*. *Molecules*, 28(11), 4450. <https://doi.org/10.3390/molecules.4450>

Silva, D. S. N., Silva, M. S., Coelho, T. L. S., Dantas, C., Lopes Júnior, C. A., Caldas, N. M., & Vieira, E. C. (2022). Combining high-intensity ultrasound and experimental design to improve carotenoid extraction efficiency from Buriti (*Mauritia flexuosa*). *Ultrasonics Sonochemistry*, 88, 106076. <https://doi.org/10.1016/j.ultsonch.2022.106076>

Singh, P. S., Priyanka, N., Devi, T. J., & Devi, T. G. (2025). Investigation of the molecular properties of betanin–natural deep eutectic solvent complex using computational and experimental methods. *Journal of Molecular Structure*, 1337. <https://doi.org/10.1016/j.molstruc.2025.142132>

Sportiello, L., Marchesi, E., Tolve, R., & Favati, F. (2025a). Green extraction of carotenoids from pumpkin by-products using natural hydrophobic deep eutectic solvents: Preliminary insights. *Molecules*, 30(3). <https://doi.org/10.3390/molecules30030548>

Sportiello, L., Marchesi, E., Tolve, R., & Favati, F. (2025b). Green extraction of carotenoids from pumpkin by-products using natural hydrophobic deep eutectic solvents: Preliminary insights. *Molecules*, 30(3). <https://doi.org/10.3390/molecules30030548>

Stolarska, M., Bajkacz, S., & Adamek, J. (2022). Extraction of carotenoids from *Spirulina platensis* using ionic liquids. *Molecules*, 27(5), 1512. <https://doi.org/10.3390/molecules27051512>

Stupar, A., Šeregelj, V., Ribeiro, B. D., Pezo, L., Cvetanović, A., Mišan, A., & Marrucho, I. (2021). Recovery of β -carotene from pumpkin using switchable natural deep eutectic solvents. *Ultrasonics Sonochemistry*, 76. <https://doi.org/10.1016/j.ultsonch.2021.105638>

Tabio-García, D., Paraguay-Delgado, F., Sánchez-Madrigal, M. Á., García-Huante, Y., & Espinoza-Hicks, J. C. (2021). Optimisation of the ultrasound-assisted extraction of betalains and polyphenols from *Amaranthus hypochondriacus* var. *Nutrisol*. *Ultrasonics Sonochemistry*, 77, 105680. <https://doi.org/10.1016/j.ultsonch.2021.105680>

Tanriver, K., Bilgin, M., Şahin Sevgili, S., Toprakçı Yüksel, İ., & Kurtulbaş Şahin, E. (2025). Extraction of carotenoids from pumpkin (*Cucurbita moschata*) and spinach (*Spinacia oleracea*) using environmentally friendly deep eutectic solvents (DESS). *AppliedChem*, 5(1). <https://doi.org/10.3390/appliedchem5010002>

Tapia-Quirós, P., Mir-Cerdà, A., Granados, M., Sentellas, S., & Saurina, J. (2025). From waste to resource: Exploring green approaches for phenolics recovery from olive leaves. *Antioxidants*, 14(2). <https://doi.org/10.3390/antiox14020136>

Terlidis, K., Athanasiadis, V., Chatzimitakos, T., Bozinou, E., & Lalas, S. I. (2023). Carotenoids extraction from orange peels using a thymol-based hydrophobic eutectic solvent. *AppliedChem*, 3(4), 437. <https://doi.org/10.3390/appliedchem3040028>

Trabelsi, N., Mourtzinou, I., & Ornelas-García, A. G. (2023). Valorization of bioactive compounds from bio-wastes of agro-food sector using green technologies. *Frontiers in Nutrition*, 10, 1218915. <https://doi.org/10.3389/fnut.2023.1218915>

Toledo Hijo, A. A. C., Silva, E. K., Cristianini, M., & Meirelles, A. J. A. (2023). High-intensity ultrasound assisted-emulsification using ionic liquids as novel naturally-derived emulsifiers for food industry applications. *Innovative Food Science & Emerging Technologies*, 84, 103301. <https://doi.org/10.1016/j.ifset.2023.103301>

Toledo-Hijo, A. A. C., Ferreira, F. A. C., & Meirelles, A. J. A. (2023). Exploring the potential of naturally-derived ionic liquids for sustainable vegetable oil deacidification. *Food and Bioproducts Processing*, 141, 119–128. <https://doi.org/10.1016/j.fbp.2023.08.0>

Hou, L., Zhang, Y., & Wu, H. (2025). Ultrasound-assisted extraction of polyphenolics from *Chaenomeles speciosa* leaves using ionic liquids. *Food and Bioproducts Processing*, 159, 143–150. <https://doi.org/10.1016/j.fbp.2024.12.006>

Hou, M., Lin, C., Zhu, L., & Bian, Z. (2025). Phenolics from *Chaenomeles speciosa* leaves: Ionic liquid-based ultrasound-assisted extraction, adsorptive purification, UPLC–QqQ–MS/MS quantification, and bioactivity assessment. *Ultrasonics Sonochemistry*, 114, 107282. <https://doi.org/10.1016/j.ultsonch.2025.107282>

Hao, J., Pei, Y., & Dong, N. (2025). Ultrasound-assisted ionic liquid–enzyme extraction of quercetin from *Schisandra chinensis*: Optimization and characterization. *Separation Science and Technology*, 60(8), 1420–1427. <https://doi.org/10.1002/slct.202500400>

Hao, J., Zhou, Y., Zhou, X., Li, Q., Pei, Y., Dong, N., Sun, Y., & Liu, H. (2025). Optimization of quercetin extraction from *Schisandra chinensis* by an ultrasound-assisted ionic liquid–enzyme

composite system and its antioxidant research analysis. *Chemistry Select*, 10(16), 202500400. <https://doi.org/10.1002/slct.202500400>

Morales-García, P., Calvillo-Muñoz, E. Y., Lijanova, I. V., Likhanova, N. V., Olivares-Xometl, O., & Arellanes-Lozada, P. (2021). Synthesis of ammonium-based ionic liquids for the extraction process of a natural pigment (betanin). *Molecules*, 26(18), 5458. <https://doi.org/10.3390/molecules26185458>

Moshikur, R. M., & Goto, M. (2023). Pharmaceutical applications of ionic liquids: A personal account. *Chemical Records*, 23(8), e202300026. <https://doi.org/10.1002/tcr.202300026>

Muhammad Umair, S., Jabbar, S., Nasiru, M. M., Lu, Z., & Zhao, L. (2021). Ultrasound-assisted extraction of carotenoids from carrot pomace: Optimization by response surface methodology. *Molecules*, 26(22), 6263. <https://doi.org/10.3390/molecules26226263>

Mussagy, C. U., Farias, F. O., Bila, N. M., Giannini, M. J. S. M., Pereira, J. F. B., Santos-Ebinuma, V. C., & Pessoa Jr, A. (2022a). Recovery of β -carotene and astaxanthin from *Phaffia rhodozyma* biomass using aqueous solutions of cholinium-based ionic liquids. *Separation and Purification Technology*, 290. <https://doi.org/10.1016/j.seppur.2022.120852>

Mussagy, C. U., Farias, F. O., Bila, N. M., Giannini, M. J. S. M., Pereira, J. F. B., Santos-Ebinuma, V. C., & Pessoa Jr, A. (2022b). Recovery of β -carotene and astaxanthin from *Phaffia rhodozyma* biomass using aqueous solutions of cholinium-based ionic liquids. *Separation and Purification Technology*, 290. <https://doi.org/10.1016/j.seppur.2022.120852>

Umair, M., Jabbar, S., Nasiru, M. M., Lu, Z., Zhang, J., Abid, M., ... Zhao, L. (2021). Ultrasound-assisted extraction of carotenoids from carrot pomace and their optimization through response surface methodology. *Molecules*, 26(22). <https://doi.org/10.3390/molecules26226763>

Ünlü, A. E. (2021). Green and non-conventional extraction of bioactive compounds from olive leaves: Screening of novel natural deep eutectic solvents and investigation of process parameters. *Waste and Biomass Valorization*, 12(10), 5329–5346. <https://doi.org/10.1007/s12649-021-01411-3>

Ventura, S. P. M., e Silva, F. A., Quental, M. V., Mondal, D., Freire, M. G., & Coutinho, J. A. P. (2017). Ionic-liquid-mediated extraction and separation processes for bioactive compounds: Past,

present, and future trends. *Chemical Reviews*, 117(10), 6984–7050.
<https://doi.org/10.1021/acs.chemrev.7b00246>

Viñas-Ospino, A., Panić, M., Radojčić-Redovniković, I., Blesa, J., & Esteve, M. J. (2023). Using novel hydrophobic deep eutectic solvents to improve a sustainable carotenoid extraction from orange peels. *Food Bioscience*, 53. <https://doi.org/10.1016/j.fbio.2023.102570>

Viñas-Ospino, A., Rita Jesus, A., Paiva, A., Esteve, M. J., Frígola, A., Blesa, J., & López-Malo, D. (2024). Comparison of green solvents for the revalorization of orange by-products: Carotenoid extraction and in vitro antioxidant activity. *Food Chemistry*, 442. <https://doi.org/10.1016/j.foodchem.2024.138530>

Wang, C., You, Y., Huang, W., & Zhan, J. (2025). Efficient recovery of procyanidins from grape residue by UAE-NADES and macroporous resin. *Ultrasonics Sonochemistry*, 119, 107400. <https://doi.org/10.1016/j.ultsonch.2025.107400>

Yu, X., Li, Z., & Wang, J. (2023). Supercritical fluid extraction of betalains from *Hylocereus polyrhizus* peel: Process optimization and fractionation study. *Journal of the Science of Food and Agriculture*, 103(7), 2756–2764. <https://doi.org/10.1002/jsfa.13383>

Zannou, O., Koca, I., & Ibrahim, S. A. (2024). Acidic deep eutectic solvent as a greener medium for highly efficient extraction of anthocyanins from blackberry fruit: Optimization, stability and purification with two-aqueous phase method. *Microchemical Journal*, 205. <https://doi.org/10.1016/j.microc.2024.111291>

Zarie, A. A., Hassan, A. B., Alshammari, G. M., Yahya, M. A., & Osman, M. A. (2023). Date industry by-product: Date seeds (*Phoenix dactylifera* L.) as potential natural sources of bioactive and antioxidant compounds. *Applied Sciences*, 13(21). <https://doi.org/10.3390/app132111922>

Zhang, Q., De Oliveira Vigier, K., Royer, S., & Jérôme, F. (2023). Natural deep eutectic solvents (NADES) for extraction of phenolic compounds from agri-food by-products using green assisted techniques. *Chromatography*, 12(6), 150. <https://doi.org/10.3390/chromatography12060150>

Zin, N. M., Mohd Noor, S., Lim, P. E., & Esa, N. (2020). Betalain extraction from red beet (*Beta vulgaris*): Comparison of conventional and novel

techniques. *Journal of Food Science and Technology*, 57(7), 2600–2608.
<https://doi.org/10.1007/s13197-020-04377-5>

Zhou, M., Fakayode, O. A., & Li, H. (2023). Green extraction of polyphenols via deep eutectic solvents and assisted technologies from agri-food by-products. *Molecules*, 28(19).
<https://doi.org/10.3390/molecules28196852>

