



Ciencia Latina Revista Científica Multidisciplinar, Ciudad de México, México.
ISSN 2707-2207 / ISSN 2707-2215 (en línea), marzo-abril 2026,
Volumen 10, Número 2.

https://doi.org/10.37811/cl_rcm.v10i2

COMPUESTOS FENÓLICOS EN PLANTAS DE LA FAMILIA LAMIACEAE: QUÍMICA DE EXTRACCIÓN, EFECTOS DEL PROCESAMIENTO Y ESTRATEGIAS EMERGENTES DE OPTIMIZACIÓN

**PHENOLIC COMPOUNDS IN LAMIACEAE PLANTS: EXTRACTION CHEMISTRY,
PROCESSING EFFECTS, AND EMERGING OPTIMIZATION STRATEGIES**

Ana Giselle Rodríguez-Mena

Área Académica de Química, Instituto de Ciencias Básicas e Ingeniería, Universidad Autónoma del Estado de Hidalgo

Rosa Torres-Pacheco

Área Académica de Química, Instituto de Ciencias Básicas e Ingeniería, Universidad Autónoma del Estado de Hidalgo

Elizabeth Contreras-López

Área Académica de Química, Instituto de Ciencias Básicas e Ingeniería, Universidad Autónoma del Estado de Hidalgo

Jesús Guadalupe Pérez-Flores

Área Académica de Química, Instituto de Ciencias Básicas e Ingeniería, Universidad Autónoma del Estado de Hidalgo

Laura García-Curiel

Área Académica de Enfermería, Instituto de Ciencias de la Salud, Universidad Autónoma del Estado de Hidalgo

Judith Jaimez-Ordaz

Área Académica de Química, Instituto de Ciencias Básicas e Ingeniería, Universidad Autónoma del Estado de Hidalgo

Compuestos fenólicos en plantas de la familia *Lamiaceae*: química de extracción, efectos del procesamiento y estrategias emergentes de optimización

Ana Giselle Rodríguez-Mena¹

gmena1919@gmail.com

<https://orcid.org/0009-0007-0500-742X>

Área Académica de Química, Instituto de Ciencias Básicas e Ingeniería, Universidad Autónoma del Estado de Hidalgo
México

Rosa Torres-Pacheco*

to356702@uaeh.edu.mx

<https://orcid.org/0009-0009-4569-8709>

Área Académica de Química, Instituto de Ciencias Básicas e Ingeniería, Universidad Autónoma del Estado de Hidalgo
México

Elizabeth Contreras-López

elizac@uaeh.edu.mx

<https://orcid.org/0000-0002-9678-1264>

Área Académica de Química, Instituto de Ciencias Básicas e Ingeniería, Universidad Autónoma del Estado de Hidalgo
México

Jesús Guadalupe Pérez-Flores

jesus_perez@uaeh.edu.mx

<https://orcid.org/0000-0002-9654-3469>

Área Académica de Química, Instituto de Ciencias Básicas e Ingeniería, Universidad Autónoma del Estado de Hidalgo
Área Académica de Enfermería, Instituto de Ciencias de la Salud, Universidad Autónoma del Estado de Hidalgo
México

Laura García-Curiel

laura.garcia@uaeh.edu.mx

<https://orcid.org/0000-0001-8961-2852>

Área Académica de Enfermería, Instituto de Ciencias de la Salud, Universidad Autónoma del Estado de Hidalgo
México

Judith Jaimez-Ordaz

jjaimiez@uaeh.edu.mx

<https://orcid.org/0000-0001-6655-0759>

Área Académica de Química, Instituto de Ciencias Básicas e Ingeniería, Universidad Autónoma del Estado de Hidalgo
México

RESUMEN

La recuperación de compuestos fenólicos del romero y de especies relacionadas de *Lamiaceae* ha estado limitada por la diversidad química de estos metabolitos, la complejidad estructural de las matrices vegetales y la variabilidad derivada del procesamiento y de las condiciones de extracción. Esta revisión tuvo como objetivo analizar la evidencia científica disponible sobre los compuestos fenólicos en romero (*Salvia rosmarinus*) y otras *Lamiaceae*, considerando su naturaleza química, los factores que regulan su extracción, los efectos del procesamiento de la matriz y las estrategias emergentes de optimización, con el fin de aportar un marco conceptual para el diseño de procesos de extracción orientados a alimentos. Se realizó un análisis narrativo de estudios publicados, organizando la evidencia en cuatro ejes: química fenólica, comportamiento antioxidante, efectos de la matriz y del procesamiento, y optimización del proceso. La literatura mostró que el romero se caracteriza principalmente por ácido rosmarínico, ácido carnósico, carnosol y otros derivados del ácido cafeico, cuyas estructuras redox-activas se relacionan con estabilización de radicales, quelación de metales y control de la oxidación lipídica. Además, la optimización experimental y las tecnologías asistidas mejoraron la recuperación fenólica y la eficiencia del proceso.

Palabras clave: Lamiaceae; diterpenos; rosmarínico; antioxidantes; optimización

¹ Autor principal.

Correspondencia: to356702@uaeh.edu.mx

Phenolic compounds in *Lamiaceae* plants: extraction chemistry, processing effects, and emerging optimization strategies

ABSTRACT

The recovery of phenolic compounds from rosemary and related *Lamiaceae* species has been limited by the chemical diversity of these metabolites, the structural complexity of plant matrices, and the variability introduced by processing and extraction conditions. This review aimed to analyze the available scientific evidence on phenolic compounds in rosemary (*Salvia rosmarinus*) and other *Lamiaceae* species, considering their chemical nature, the factors governing their extraction, the effects of matrix processing, and emerging optimization strategies, in order to provide a conceptual framework for designing food-oriented extraction processes. A narrative analysis of published studies was conducted, organizing the evidence into four main areas: phenolic chemistry, antioxidant behavior, matrix and processing effects, and process optimization. The literature showed that rosemary is mainly characterized by rosmarinic acid, carnosic acid, carnosol, and other caffeic acid derivatives, whose redox-active structures are associated with radical stabilization, metal chelation, and control of lipid oxidation in food systems. In addition, experimental optimization and assisted extraction technologies improved phenolic recovery and process efficiency.

Keywords: Lamiaceae; diterpenes; rosmarinic; antioxidants; optimization

Artículo recibido 02 febrero 2026
Aceptado para publicación: 27 febrero 2026



1. INTRODUCCIÓN

Los compuestos fenólicos constituyen una de las principales familias de metabolitos secundarios de origen vegetal con relevancia directa en la química de los alimentos. Este grupo incluye ácidos fenólicos, flavonoides y diterpenos fenólicos capaces de participar en reacciones redox mediante transferencia de hidrógeno o de electrones, lo que les confiere la capacidad de neutralizar especies reactivas y de retardar procesos de oxidación en sistemas alimentarios, particularmente en matrices ricas en lípidos o proteínas (Gutiérrez-del-Río et al., 2021). Debido a ello, los extractos vegetales ricos en compuestos fenólicos han sido estudiados como fuentes de antioxidantes naturales para preservar la estabilidad fisicoquímica de distintos alimentos (Lourenço et al., 2019).

Las plantas medicinales y aromáticas constituyen una fuente destacada de estos metabolitos bioactivos. Sus extractos contienen mezclas complejas de polifenoles y compuestos terpénicos que pueden modular la oxidación lipídica y contribuir a la estabilidad de los alimentos procesados. En aceites, productos cárnicos, lácteos y sistemas envasados, estos extractos han sido evaluados como ingredientes de origen natural orientados a mejorar la estabilidad oxidativa y, en algunos casos, a sustituir o complementar antioxidantes sintéticos en formulaciones alimentarias (Gharby et al., 2022).

Entre las especies aromáticas de mayor interés tecnológico, el romero (*Salvia rosmarinus L.*) ha recibido especial atención por su contenido de compuestos fenólicos con actividad antioxidante. Entre los constituyentes más representativos se encuentran el ácido carnósico, el carnosol y el ácido rosmarínico, metabolitos asociados a la capacidad del romero para retardar la oxidación lipídica en aceites comestibles, productos cárnicos y otras matrices con alto contenido graso (Hcini et al., 2013). Esta composición, integrada por compuestos fenólicos no volátiles y fracciones terpénicas asociadas, ha favorecido su empleo como ingrediente funcional en sistemas alimentarios susceptibles al deterioro oxidativo (Brewer, 2011).

La aplicación tecnológica del romero no se limita a su incorporación directa en alimentos. Sus extractos también se han utilizado en películas comestibles, materiales de envasado activo y matrices poliméricas destinadas a la conservación de productos cárnicos y pesqueros, con resultados favorables en la estabilidad oxidativa y un menor impacto en las propiedades sensoriales del alimento cuando se seleccionan sistemas de incorporación adecuados (Andrade et al., 2025). Además, su reconocimiento



como antioxidante de origen natural ha favorecido su incorporación en desarrollos orientados a la conservación y a la formulación de alimentos (Blasi & Cossignani, 2020).

No obstante, la obtención eficiente de compuestos fenólicos a partir de matrices vegetales sigue siendo un desafío. La recuperación de estos metabolitos depende de la estructura del tejido vegetal, del contenido de agua, de la afinidad con el solvente y de las condiciones de extracción. Tradicionalmente, la optimización de este proceso se ha abordado mediante esquemas de un factor a la vez, lo que restringe la comprensión de las interacciones entre variables y limita la identificación de condiciones operativas robustas para el escalamiento (Putnik et al., 2018).

Frente a estas limitaciones, en años recientes se han incorporado tecnologías de extracción asistida, como ultrasonido, microondas, fluidos presurizados y fluidos supercríticos, junto con el uso de solventes compatibles con aplicaciones alimentarias, como mezclas hidroalcohólicas y sistemas acuosos (Plaskova & Mlcek, 2023). De manera paralela, la optimización del proceso ha comenzado a apoyarse en herramientas multivariadas, como la metodología de superficie de respuesta y modelos predictivos basados en inteligencia artificial, que permiten evaluar simultáneamente múltiples condiciones operativas y mejorar la eficiencia de la extracción (Tocai (Mořoc) et al., 2025).

En este sentido, el estudio de los compuestos fenólicos de romero y de otras especies de la familia *Lamiaceae* requiere una perspectiva integrada que considere, al mismo tiempo, la química de los compuestos fenólicos, la estructura y la transformación de la matriz vegetal, y los enfoques actuales de optimización del proceso de extracción. Con base en ello, esta revisión tuvo como objetivo analizar y sintetizar la evidencia científica disponible sobre los compuestos fenólicos presentes en romero (*Salvia rosmarinus*) y en otras especies de la familia *Lamiaceae*, examinando su naturaleza química, los principios que gobiernan su extracción, los efectos del procesamiento de la matriz vegetal y las estrategias emergentes de optimización, con el fin de comprender los factores que determinan su recuperación y actividad antioxidante y aportar un marco conceptual útil para el diseño de procesos en química y tecnología de alimentos.



2. COMPUESTOS FENÓLICOS EN EL ROMERO Y OTRAS PLANTAS DE LA FAMILIA *LAMIACEAE*

2.1 Naturaleza química de los compuestos fenólicos

Las especies de la familia *Lamiaceae* sintetizan una amplia diversidad de metabolitos fenólicos asociados a mecanismos de defensa frente al estrés oxidativo y a la interacción química con su entorno. En el romero (*Salvia rosmarinus*), el perfil fenólico está dominado por tres clases principales de compuestos: ácidos fenólicos, flavonoides y diterpenos fenólicos, cuya distribución relativa puede variar según el genotipo, las condiciones ambientales y el método de extracción empleado (Mena et al., 2016). Los ácidos fenólicos constituyen una fracción importante de los polifenoles presentes en el romero. Entre ellos, el ácido rosmarínico es uno de los metabolitos más característicos de la familia *Lamiaceae*. Este compuesto deriva estructuralmente del ácido cafeico y posee grupos hidroxilo en posiciones orto que generan sistemas catecólicos capaces de estabilizar radicales libres mediante deslocalización electrónica. Estas características estructurales favorecen tanto la neutralización de especies reactivas como la quelación de iones metálicos implicados en procesos de oxidación catalizada (Peixoto et al., 2021). Otros hidroxycinamatos, incluidos los derivados del ácido cafeico, ferúlico y p-cumárico, contribuyen adicionalmente al conjunto de antioxidantes presentes en los extractos de romero (Tzima et al., 2018).

Los flavonoides constituyen otra fracción relevante del perfil fenólico. En romero se han identificado principalmente flavonas y sus derivados glicosilados, incluidos compuestos relacionados con luteolina y genkwanina. Estas moléculas presentan sistemas aromáticos conjugados y múltiples grupos hidroxilo, capaces de estabilizar radicales fenólicos y de participar en procesos de transferencia electrónica, propiedades asociadas con su actividad antioxidante y con su capacidad de interacción con metales de transición (Chan et al., 2021).

Una de las características distintivas del romero es la presencia de diterpenos fenólicos de tipo abietano, entre los que destacan el ácido carnósico y el carnosol. Estas moléculas poseen un esqueleto tricíclico con un anillo aromático funcionalizado con grupos hidroxilo que confieren propiedades redox. Su estructura favorece la estabilización de los radicales y la inhibición de los procesos de peroxidación lipídica, particularmente en sistemas alimentarios ricos en grasas (Senanayake, 2018).



La actividad antioxidante de estos compuestos se relaciona estrechamente con características estructurales específicas, especialmente con la presencia de grupos hidroxilo fenólicos y la resonancia del sistema aromático. Estas características permiten la donación de hidrógeno y la formación de intermediarios radicalarios relativamente estables, además de facilitar la formación de complejos con iones metálicos como el hierro y el cobre, lo que reduce su participación en reacciones que promueven la oxidación de lípidos (Shan et al., 2005).

En los extractos de romero, los compuestos fenólicos no actúan de forma aislada. La interacción entre ácidos fenólicos, flavonoides y diterpenos fenólicos genera sistemas antioxidantes complejos en los que diferentes moléculas contribuyen a la estabilidad redox en medios de polaridad distinta. Este comportamiento combinado explica la eficacia antioxidante observada en extractos vegetales complejos derivados de especies de *Lamiaceae* (Luca et al., 2023).

2.2. Compuestos fenólicos principales en hojas de romero y comparación con otras *Lamiaceae*

Las hojas de romero (*Salvia rosmarinus*) presentan un perfil fenólico relativamente consistente en estudios fitoquímicos recientes, caracterizado por la predominancia de unos pocos metabolitos principales. Entre ellos destacan el ácido rosmarínico, el ácido carnósico, el carnosol y diversos derivados del ácido cafeico, compuestos que constituyen la fracción mayoritaria de los polifenoles identificados en los extractos foliares de esta especie (Trivellini et al., 2016). La presencia de estos compuestos, así como su comparación con otras especies de la familia *Lamiaceae*, se resume en la Tabla 1.

Tabla 1. Principales compuestos fenólicos identificados en romero (*Salvia rosmarinus*) y en especies relacionadas de la familia *Lamiaceae*.

Especie	Ácidos predominantes	fenólicos representativos	Flavonoides representativos	Diterpenos fenólicos	Referencia
<i>Salvia rosmarinus</i> (romero)	Ácido derivados cafeico	rosmarínico, del ácido	Derivados de luteolina y genkwanina	Ácido carnosol	(Trivellini et al., 2016)

<i>Salvia officinalis</i> (salvia)	Ácido rosmarínico, derivados del ácido cafeico	Luteolina, apigenina	Derivados carnosol	de (Napoli et al., 2020)
<i>Origanum vulgare</i> (orégano)	Ácido rosmarínico, ácido cafeico	Flavonoides diversos	Baja proporción de diterpenos fenólicos	(Marc (Vlaic) et al., 2022)
<i>Thymus vulgaris</i> (tomillo)	Ácido rosmarínico, derivados del ácido cafeico	Flavonas diversas	Diterpenos fenólicos en menor proporción	(Masiala et al., 2024)

El ácido rosmarínico suele ser uno de los hidroxycinamatos predominantes en las hojas de romero y en otras especies de lamiáceas. Los análisis cromatográficos basados en LC-MS o UHPLC-MS/MS lo identifican sistemáticamente como uno de los componentes dominantes del metabolismo fenólico derivado de la vía de los fenilpropanoides, junto con otros derivados estructuralmente relacionados del ácido cafeico (Tzima et al., 2018).

Además de los ácidos fenólicos, las hojas de romero también acumulan diterpenos fenólicos característicos, en particular el ácido carnósico y el carnosol. Estos compuestos se detectan de forma recurrente en extractos vegetales y suelen ser entre los metabolitos predominantes en tejidos foliares, lo que contribuye a definir el perfil fitoquímico distintivo de esta especie entre las hierbas aromáticas mediterráneas (Mantzourani et al., 2023).

Las concentraciones de estos metabolitos pueden variar según el cultivar, las condiciones ambientales y los métodos de extracción empleados. No obstante, numerosos estudios coinciden en señalar al ácido rosmarínico, al ácido carnósico y al carnosol como los principales constituyentes fenólicos de las hojas de romero, aunque las concentraciones reportadas dependen del sistema analítico y del diseño experimental empleados (Mansinhos et al., 2024).

El perfil fenólico del romero presenta similitudes con el de otras especies aromáticas de la familia *Lamiaceae*. En *Salvia officinalis*, por ejemplo, se han descrito composiciones dominadas por ácido

rosmarínico, derivados del ácido cafeico y diterpenos fenólicos relacionados con el ácido carnósico y el carnosol, aunque las proporciones relativas pueden variar entre especies y condiciones de cultivo (Napoli et al., 2020).

En *Origanum vulgare*, el ácido rosmarínico y otros hidroxycinamatos derivados del ácido cafeico también constituyen componentes predominantes del perfil fenólico, aunque en esta especie se observa generalmente una mayor proporción de compuestos fenólicos hidrofílicos y una menor contribución relativa de los diterpenos fenólicos característicos del romero (Marc (Vlaic) et al., 2022).

En *Thymus vulgaris*, el ácido rosmarínico y los derivados del ácido cafeico forman parte igualmente del núcleo común de polifenoles de las hojas. Sin embargo, el perfil fitoquímico de esta especie se caracteriza, además, por una fracción importante de compuestos terpénicos volátiles en su aceite esencial, lo que genera diferencias en su composición química global dentro de la familia *Lamiaceae* (Masiala et al., 2024).

Las especies de lamiáceas comparten un núcleo común de compuestos fenólicos, dominado por el ácido rosmarínico y sus derivados del ácido cafeico. Dentro de este grupo, el romero se distingue por presentar proporciones relativamente elevadas de diterpenos fenólicos, como el ácido carnósico y el carnosol, en tejidos foliares, lo que contribuye a definir su perfil fitoquímico característico y su relevancia en aplicaciones relacionadas con la estabilidad oxidativa de alimentos (Quílez et al., 2020).

3. ACTIVIDAD ANTIOXIDANTE Y APLICACIONES EN SISTEMAS ALIMENTARIOS

Los compuestos fenólicos presentes en el romero (*Salvia rosmarinus*) y en otras especies de la familia *Lamiaceae* se reconocen por su capacidad para modular procesos oxidativos en matrices alimentarias. Esta actividad se atribuye principalmente a diterpenos fenólicos y ácidos fenólicos, capaces de interactuar con especies reactivas e intermediarios generados durante la oxidación lipídica. Entre los compuestos más relevantes destacan el ácido carnósico, el carnosol y el ácido rosmarínico, metabolitos ampliamente asociados con la estabilidad oxidativa de aceites, emulsiones y productos ricos en lípidos (Gharby et al., 2022).

En los sistemas alimentarios, la actividad antioxidante de estos compuestos se manifiesta mediante varios mecanismos químicos. Uno de los más importantes es la neutralización directa de radicales libres mediante transferencia de hidrógeno o de electrones, proceso que limita la propagación de reacciones



en cadena asociadas al deterioro oxidativo. Adicionalmente, estos compuestos pueden inhibir la peroxidación lipídica al reaccionar con radicales derivados de ácidos grasos, lo que reduce la formación de productos secundarios de oxidación, como hidroperóxidos y malondialdehído, indicadores comúnmente utilizados para evaluar el deterioro oxidativo en alimentos (Manassis et al., 2020).

La eficacia antioxidante también depende del comportamiento de estos compuestos en matrices alimentarias complejas. Los diterpenos fenólicos del romero presentan afinidad por fases lipídicas, mientras que compuestos más polares, como el ácido rosmarínico, pueden actuar en fases acuosas o en interfaces de emulsión. Esta distribución favorece su interacción con radicales generados en distintos microambientes del alimento, lo que contribuye a la protección frente a procesos oxidativos en sistemas heterogéneos como emulsiones aceite-en-agua, productos cárnicos o aceites vegetales (Senanayake, 2018).

3.1 Evaluación de la actividad antioxidante mediante ensayos *in vitro*

La actividad antioxidante de extractos de romero y otras lamiáceas se evalúa habitualmente mediante ensayos espectrofotométricos que miden diferentes mecanismos de interacción con especies reactivas. Entre los métodos más utilizados se encuentran DPPH, ABTS, FRAP y ORAC, que proporcionan información complementaria sobre la capacidad reductora y de captura de radicales de los compuestos fenólicos presentes en extractos vegetales (Ulewicz-Magulska & Wesolowski, 2023) (Tabla 2).

Tabla 2. Métodos comunes para evaluar la actividad antioxidante de extractos de plantas aromáticas.

Método	Principio	Mecanismo evaluado	Aplicación común
DPPH	Reducción del radical DPPH•	Donación de H / electrones	Capacidad de captura de radicales
ABTS	Reducción del radical ABTS•	Captura de radicales hidrofílicos y lipofílicos	Extractos complejos
FRAP	Reducción $Fe^{3+} \rightarrow Fe^{2+}$	Poder reductor	Estimación de capacidad antioxidante
ORAC	Inhibición de radicales peroxilo	Protección frente a oxidación inducida	Sistemas biológicos y alimentarios

Los ensayos DPPH y ABTS se basan en la reducción de radicales estables mediante la transferencia de hidrógeno o de electrones desde compuestos antioxidantes, lo que permite estimar la capacidad de captura de radicales de los extractos vegetales. Por su parte, el método FRAP evalúa el poder reductor de una muestra mediante la conversión de Fe^{3+} a Fe^{2+} , mientras que el ensayo ORAC estima la capacidad de inhibir la oxidación inducida por radicales peroxilo en sistemas fluorescentes (Manassis et al., 2020). Dado que cada método se basa en mecanismos químicos distintos, ningún ensayo individual describe por completo el potencial antioxidante de un extracto en alimentos. Por esta razón, diversos estudios combinan estos ensayos con indicadores de oxidación lipídica, como valores de peróxidos o de TBARS, lo que permite relacionar los resultados analíticos con la estabilidad oxidativa observada en sistemas alimentarios reales (Yashin et al., 2017).

3.2 Evidencia reciente en matrices alimentarias y aplicaciones en sistemas alimentarios

Diversos estudios han demostrado que los extractos de romero pueden retardar la oxidación en aceites vegetales, emulsiones y productos cárnicos. Este efecto se atribuye principalmente a la acción combinada del ácido carnósico, el carnosol y el ácido rosmarínico, cuya actividad antioxidante se evidencia tanto en ensayos *in vitro* como en la reducción de los productos de oxidación lipídica en sistemas alimentarios (Gallego et al., 2013).

Resultados similares se han observado en otras especies de lamiáceas, como orégano, tomillo y salvia, cuyos extractos contienen compuestos fenólicos y monoterpenos con propiedades antioxidantes. En diversos estudios, la incorporación de estos extractos en matrices alimentarias ha reducido la formación de productos secundarios de oxidación, lo que respalda su uso como agentes antioxidantes naturales en formulaciones alimentarias (Singh, 2021).

La evidencia disponible indica que la actividad antioxidante de los extractos de lamiáceas depende tanto de la composición química del extracto como de las características de la matriz alimentaria, de la concentración de compuestos activos y de las condiciones de procesamiento o de almacenamiento (Manassis et al., 2020).

Los extractos fenólicos de romero y otras especies de lamiáceas han sido ampliamente investigados como antioxidantes naturales en productos alimentarios. Su capacidad para retardar la oxidación lipídica ha favorecido su aplicación en aceites comestibles, productos cárnicos, pescado y diversos alimentos



procesados, donde contribuye a mejorar la estabilidad oxidativa y prolongar la vida útil de los productos (Nieto et al., 2018).

En aceites vegetales y en sistemas ricos en lípidos, los extractos de romero han mostrado eficacia para reducir la formación de hidroperóxidos y otros productos de oxidación durante el almacenamiento o el calentamiento. Este efecto se atribuye principalmente a diterpenos fenólicos lipofílicos, como el ácido carnósico y el carnosol, capaces de interrumpir las reacciones en cadena de la peroxidación lipídica (Plaskova & Mlcek, 2023).

En productos cárnicos y pesqueros, la incorporación de extractos de romero se ha asociado con menores niveles de oxidación lipídica y proteica durante el almacenamiento, además de contribuir a la estabilidad del color y de otros parámetros de calidad. Estas propiedades han impulsado su estudio como alternativa natural a los antioxidantes sintéticos utilizados tradicionalmente en la industria alimentaria (Gutiérrez-del-Río et al., 2021).

Además de su incorporación directa en alimentos, los compuestos antioxidantes del romero también se han incorporado en recubrimientos comestibles, sistemas de encapsulación y materiales de envasado activo. Estas estrategias permiten mejorar la estabilidad de los compuestos fenólicos y modular su liberación durante el almacenamiento, contribuyendo a mantener la calidad oxidativa del alimento sin alterar significativamente sus características sensoriales (Oreopoulou & Tsironi, 2021).

La evidencia disponible indica que los compuestos fenólicos del romero y de otras especies de lamiáceas pueden actuar como antioxidantes naturales eficaces en diversos sistemas alimentarios, aunque su desempeño depende de factores como la composición de la matriz, la concentración del extracto y las condiciones de procesamiento y almacenamiento.

4. INFLUENCIA DE LA MATRIZ VEGETAL Y EL PROCESAMIENTO

La matriz vegetal y las condiciones de procesamiento influyen de manera determinante en la estabilidad, disponibilidad y recuperación de los compuestos fenólicos. En tejidos vegetales, estos metabolitos se encuentran asociados a estructuras celulares, paredes vegetales o compartimentos subcelulares, por lo que su liberación depende en gran medida de la integridad estructural del tejido y de las transformaciones inducidas durante el procesamiento (Toydemir et al., 2022).

Procesos tecnológicos como el secado, el almacenamiento o los tratamientos físicos previos pueden



modificar la microestructura del tejido vegetal, alterar la actividad enzimática y generar cambios químicos que afectan la estabilidad de los compuestos fenólicos. Como resultado, el contenido fenólico detectado en materiales vegetales procesados refleja un equilibrio dinámico entre la liberación de compuestos de la matriz celular, la transformación química y la degradación de compuestos sensibles al calor o al oxígeno (Raveendran et al., 2022).

4.1 Material vegetal fresco frente a material seco

Los materiales vegetales, tanto frescos como deshidratados, presentan entornos fisicoquímicos contrastantes que condicionan el comportamiento de los compuestos fenólicos. En tejidos frescos, el elevado contenido de agua favorece la actividad metabólica y enzimática, incluyendo la acción de enzimas oxidativas como la polifenol oxidasa, que pueden catalizar la transformación o degradación de compuestos fenólicos durante el almacenamiento postcosecha (Chua, Chua, Figiel, Chong, Wojdyło, Szumny, & Choong, 2019).

La deshidratación reduce la actividad del agua y limita la actividad enzimática, lo que generalmente contribuye a una mayor estabilidad de los compuestos fenólicos durante el almacenamiento. Sin embargo, el proceso de secado también puede inducir cambios estructurales en el tejido vegetal que modifican la disponibilidad de dichos compuestos. La ruptura de las paredes celulares y la formación de espacios intercelulares facilitan la difusión de metabolitos fenólicos previamente retenidos en la matriz vegetal, lo que incrementa su extractabilidad en el material seco (De Arruda et al., 2023).

Al mismo tiempo, las condiciones térmicas y oxidativas asociadas al secado pueden provocar la degradación o la transformación de compuestos fenólicos termolábiles. Dependiendo de la intensidad del tratamiento, pueden producirse reacciones de oxidación, hidrólisis o formación de derivados fenólicos, lo que, en algunos casos, conduce a incrementos aparentes del contenido fenólico total debido a la liberación de compuestos previamente ligados a la matriz celular (Toydemir et al., 2022).

La comparación entre materiales frescos y secos refleja la interacción entre los procesos de liberación, estabilidad y degradación. Mientras que los tejidos frescos presentan mayor actividad enzimática y mayor susceptibilidad a la oxidación, los materiales deshidratados muestran menor actividad de agua y mayor disrupción estructural, condiciones que pueden favorecer la estabilidad y la extractabilidad de compuestos fenólicos, dependiendo de las condiciones de procesamiento.



4.2 Efecto de los procesos de secado

Los procesos de secado constituyen una etapa tecnológica clave tanto en la conservación de matrices vegetales como en la estabilidad de los compuestos fenólicos. Durante la eliminación de agua se producen cambios microestructurales, térmicos y oxidativos que afectan tanto la liberación como la degradación de estos metabolitos (Toydemir et al., 2022).

Entre las tecnologías de secado más empleadas se encuentran el secado convectivo con aire caliente, la liofilización y el secado asistido por microondas o en vacío. Cada uno de estos métodos genera condiciones distintas de transferencia de calor y de masa, lo que repercute en la estabilidad de los compuestos fenólicos (Tabla 3).

Tabla 3. Efecto de diferentes métodos de secado sobre la estabilidad de compuestos fenólicos en matrices vegetales.

Método de secado	Principio del proceso	Efecto sobre compuestos fenólicos	Referencia
Aire (convectivo)	Transferencia de calor por aire caliente	Puede favorecer liberación por ruptura celular, pero también degradación térmica	(Raveendran et al., 2022)
Liofilización	Sublimación del agua a baja temperatura y presión	Alta retención de compuestos fenólicos	(Chua, Chua, Figiel, Chong, Wojdyło, Szumny, & Choong, 2019)
Microondas microondas-vacío	/Calentamiento volumétrico rápido	Mayor extractabilidad por ruptura celular; posible degradación si el tratamiento es intenso	(De Bruijn et al., 2016)

El secado convectivo con aire caliente es uno de los métodos más utilizados en matrices vegetales. La exposición prolongada a temperaturas moderadas o elevadas puede favorecer la desorganización estructural del tejido vegetal y la liberación de compuestos fenólicos asociados a la pared celular. Sin

embargo, tratamientos térmicos intensos o prolongados pueden promover procesos de oxidación o degradación de compuestos sensibles al calor (Raveendran et al., 2022).

La liofilización elimina el agua mediante la sublimación a baja temperatura y bajo presión. Estas condiciones minimizan las reacciones térmicas y permiten conservar en mayor medida la estructura celular y los compuestos fenólicos presentes en el tejido vegetal, por lo que este método suele asociarse con una mayor retención de compuestos bioactivos (Chua, Chua, Figiel, Chong, Wojdyło, Szumny, & Lech, 2019).

El secado asistido por microondas combina calentamiento volumétrico con una rápida transferencia de humedad, lo que puede favorecer la ruptura celular y aumentar la extractabilidad de compuestos fenólicos. No obstante, el calentamiento localizado puede provocar la degradación de compuestos fenólicos si las condiciones de operación no se controlan adecuadamente (De Bruijn et al., 2016).

Además del tipo de tecnología empleada, variables de proceso como la temperatura, el tiempo de exposición y la velocidad de secado influyen de manera determinante en la estabilidad final de los compuestos fenólicos. Las temperaturas moderadas pueden facilitar la liberación de compuestos ligados a la matriz vegetal, mientras que exposiciones prolongadas al calor y al oxígeno favorecen procesos de degradación química (Toydemir et al., 2022).

Los procesos de secado generan un equilibrio entre la liberación de compuestos fenólicos desde la matriz vegetal y su posible degradación térmica u oxidativa. Las diferencias observadas entre tecnologías y condiciones operativas reflejan la interacción entre la microestructura del tejido vegetal, la intensidad del tratamiento térmico y la disponibilidad de oxígeno durante el procesamiento.

5. EXTRACCIÓN DE COMPUESTOS FENÓLICOS DE MATRICES VEGETALES

La recuperación de compuestos fenólicos a partir de matrices vegetales depende de la interacción entre la naturaleza química de los metabolitos, la estructura del tejido y las condiciones de transferencia de masa entre la fase sólida y el solvente. En este proceso, la polaridad del solvente, la temperatura, el tiempo de extracción, la relación sólido-solvente y el tamaño de partícula influyen directamente en la solubilización y la difusión de los compuestos fenólicos, así como en su estabilidad durante el proceso (Alara et al., 2021).



5.1 Técnicas convencionales de extracción de compuestos fenólicos

Las técnicas convencionales de extracción sólido-líquido siguen utilizándose ampliamente por su simplicidad operativa y por requerir equipamiento accesible. Entre los métodos más comunes se encuentran la maceración, la extracción por reflujo y el método de Soxhlet, que siguen siendo referencias frecuentes para comparar la eficiencia de tecnologías más recientes (Kumar et al., 2023).

La maceración consiste en mantener el material vegetal en contacto prolongado con un solvente, generalmente a temperatura ambiente o moderada. Su principal ventaja es la posibilidad de preservar compuestos sensibles al calor; sin embargo, suele requerir tiempos de extracción prolongados y puede favorecer la coextracción de compuestos no deseados, lo que limita la selectividad del proceso (Sridhar et al., 2021).

El método Soxhlet y la extracción por reflujo emplean solventes calientes, ya sea en recirculación o en ebullición moderada, lo que incrementa la difusión y la solubilización de compuestos fenólicos en comparación con la maceración estática. No obstante, la exposición prolongada al calor puede inducir transformaciones o la degradación de compuestos fenólicos termolábiles, por lo que el aumento del rendimiento no siempre se traduce en una mejor preservación del perfil fenólico original (Waseem et al., 2023).

La eficiencia de estos métodos depende de variables operativas bien conocidas. El aumento de la temperatura suele mejorar la extracción al favorecer la solubilidad y la difusión, aunque también incrementa el riesgo de degradación oxidativa o térmica. De forma similar, tiempos prolongados pueden favorecer la recuperación, pero también promover cambios químicos no deseados. La relación sólido-solvente regula la disponibilidad de solvente para solubilizar los compuestos extraíbles, mientras que la reducción del tamaño de partícula incrementa el área superficial y mejora la transferencia de masa (Sridhar et al., 2021).

Además de estos parámetros, la estructura de la matriz vegetal condiciona fuertemente el proceso. Una parte de los compuestos fenólicos puede encontrarse libre, mientras que otra permanece asociada a componentes de la pared celular o a macromoléculas, lo que limita su disponibilidad en el solvente. Por ello, aunque las técnicas convencionales son robustas y ampliamente utilizadas, presentan limitaciones relacionadas con el consumo de solvente, los tiempos de procesamiento y la posible pérdida de



compuestos sensibles, lo que ha impulsado el desarrollo de tecnologías de extracción más eficientes y selectivas (Alara et al., 2021).

5.2. Tecnologías emergentes de extracción

En los últimos años, las tecnologías emergentes de extracción han cobrado interés por su capacidad para intensificar la transferencia de masa, reducir el consumo de solventes y mejorar la recuperación de compuestos fenólicos a partir de matrices vegetales y de subproductos agroindustriales. Entre las más estudiadas se encuentran la extracción asistida por ultrasonido, la extracción asistida por microondas, la extracción con líquidos presurizados y el uso de solventes eutécticos profundos (DES/NADES) (Boateng, 2023). Las principales técnicas utilizadas para la recuperación de compuestos fenólicos y sus características generales se resumen en la Tabla 4.

Tabla 4. Principales técnicas de extracción de compuestos fenólicos a partir de matrices vegetales.

Técnica	Principio	Ventajas	Limitaciones	Referencia
Maceración	Contacto prolongado sólido-solvente	Simplicidad, temperatura	baja Tiempo largo, selectividad	menor (Sridhar et al., 2021)
Soxhlet / reflujo	Solvente caliente en recirculación	Mayor rendimiento que maceración	Riesgo de degradación térmica, alto consumo de solvente	(Waseem et al., 2023)
Ultrasonido (UAE)	Cavitación acústica	Menor tiempo, mayor transferencia de masa	Requiere optimización de variables	(Fierascu et al., 2019)
Microondas (MAE)	Calentamiento dieléctrico	Extracción rápida, menor uso de solvente	Riesgo de sobrecalentamiento	(Zuin & Ramin, 2018)
Líquidos presurizados (PLE)	Alta temperatura y presión	Alta eficiencia, menor consumo de solvente	Posible degradación de compuestos sensibles	(Siddique et al., 2024)
DES / NADES	Solventes eutécticos ajustables	Mayor sostenibilidad y selectividad	Alta viscosidad, necesidad de ajuste del sistema	(Zhou et al., 2023)

La extracción asistida por ultrasonido se basa en la cavitación acústica, un fenómeno que genera microburbujas capaces de alterar la integridad del tejido vegetal y de facilitar la penetración del solvente. Como resultado, esta técnica suele reducir el tiempo de extracción y aumentar la liberación de compuestos fenólicos en comparación con métodos convencionales, especialmente cuando se optimizan variables como el tiempo de sonicación, la temperatura y la relación sólido-solvente (Fierascu et al., 2019).

La extracción asistida por microondas utiliza el calentamiento dieléctrico para producir un incremento rápido de la temperatura en el solvente y en la matriz vegetal. Este calentamiento volumétrico favorece la ruptura celular y acelera la difusión de compuestos fenólicos, lo que permite reducir los tiempos de proceso y el volumen de solvente. Sin embargo, el control de la potencia y del tiempo de tratamiento resulta decisivo para evitar la degradación de compuestos termolábiles (Zuin & Ramin, 2018).

La extracción con líquidos presurizados emplea solventes sometidos a temperaturas y presiones elevadas, lo que mejora su difusividad y su capacidad de solvatación. Este enfoque permite obtener extracciones más rápidas y, en muchos casos, con menor consumo de solvente que los métodos tradicionales. Su eficiencia depende principalmente de la temperatura, la composición del solvente y el tiempo de residencia, parámetros que deben ajustarse cuidadosamente para equilibrar el rendimiento y la estabilidad química (Siddique et al., 2024).

Además de estas tecnologías, los solventes eutécticos profundos y sus variantes naturales han surgido como una alternativa prometedora por su baja toxicidad y la posibilidad de modular su polaridad y su capacidad de solvatación. Estos sistemas han mostrado una recuperación eficiente de ácidos fenólicos, flavonoides y otros polifenoles, especialmente cuando se combinan con ultrasonido o microondas, lo que mejora la transferencia de masa y reduce la duración del proceso (Zhou et al., 2023).

La literatura reciente también destaca configuraciones híbridas que integran varias estrategias de intensificación, como combinaciones de ultrasonido, microondas y solventes verdes. Estos enfoques permiten adaptar el proceso a la matriz vegetal y al perfil fenólico de interés y se han aplicado con particular éxito en la valorización de subproductos agroindustriales como orujo de uva, residuos cítricos, bagazo de café y subproductos del procesamiento de aceituna (Bernini et al., 2024).

Las tecnologías emergentes han ampliado las posibilidades de recuperar compuestos fenólicos de



manera más eficiente y sostenible que los métodos convencionales. No obstante, su desempeño depende de una adecuada selección de la tecnología, del solvente y de las condiciones operativas, así como de las características estructurales y químicas de la matriz vegetal.

6. ESTRATEGIAS DE OPTIMIZACIÓN DE PROCESOS EN LA EXTRACCIÓN FENÓLICA

La optimización de los procesos de extracción de compuestos fenólicos se ha convertido en un elemento clave para mejorar la eficiencia, la selectividad y la sostenibilidad de los sistemas de recuperación de metabolitos bioactivos a partir de matrices vegetales. Estos procesos dependen de múltiples variables operativas que influyen simultáneamente en la transferencia de masa, la estabilidad de los compuestos y el rendimiento del extracto. En este sentido, los diversos enfoques estadísticos y computacionales se han incorporado para modelar y optimizar sistemas de extracción multifactoriales.

6.1 Metodología de Superficie de Respuesta (RSM)

La metodología de superficie de respuesta (*Response Surface Methodology, RSM*) es uno de los enfoques más utilizados para optimizar procesos de extracción de compuestos fenólicos. Este método combina el diseño experimental y el modelado estadístico para evaluar simultáneamente el efecto de múltiples variables operativas sobre respuestas experimentales asociadas al rendimiento de extracción o a la actividad antioxidante (Weremfo et al., 2023).

La aplicación de RSM se basa en diseños experimentales estructurados que permiten explorar el espacio experimental mediante un número limitado de ensayos. Entre los diseños más empleados se encuentran el diseño Box–Behnken, el diseño central compuesto (CCD) y las matrices de Doehlert, que permiten analizar de forma eficiente la influencia de los factores y sus interacciones en el sistema estudiado (Belwal et al., 2018).

Los resultados experimentales obtenidos mediante estos diseños se ajustan generalmente a modelos polinomiales de segundo orden que incluyen términos lineales, cuadráticos y de interacción. Este tipo de modelos permite describir relaciones no lineales entre las variables del proceso y las respuestas experimentales, lo que facilita la identificación de condiciones operativas que maximizan la recuperación de compuestos fenólicos o la capacidad antioxidante de los extractos (Weremfo et al., 2023).



Las variables independientes consideradas en estos modelos suelen corresponder a parámetros que rigen la transferencia de masa entre la matriz vegetal y el solvente. Entre las más estudiadas se encuentran la temperatura de extracción, el tiempo de proceso, la composición del solvente, la relación sólido-líquido y el tamaño de partícula del material vegetal. En sistemas de extracción asistida también pueden incorporarse variables como la potencia ultrasónica o la energía de microondas (Anaya-Esparza et al., 2023).

Diversos estudios han mostrado que estas variables pueden presentar interacciones significativas que influyen en la eficiencia global del proceso. Por ejemplo, la combinación entre la temperatura y la composición del solvente, o entre el tiempo de extracción y la relación sólido-líquido, puede modificar la solubilización y la difusión de los compuestos fenólicos desde la matriz vegetal hacia el solvente.

La optimización mediante RSM suele considerar múltiples respuestas experimentales de manera simultánea, como el contenido fenólico total, el rendimiento de extracción o la actividad antioxidante evaluada mediante ensayos como DPPH, ABTS o FRAP. En estos casos, se utilizan funciones de deseabilidad para identificar condiciones experimentales que equilibren diferentes criterios de desempeño del extracto (Tsegay et al., 2024).

Debido a su capacidad para modelar procesos complejos, identificar interacciones entre variables y predecir condiciones óptimas dentro del dominio experimental estudiado, la metodología RSM se ha consolidado como una herramienta ampliamente utilizada en la optimización de procesos de extracción de compuestos fenólicos tanto en métodos convencionales como en tecnologías asistidas.

6.2. Enfoques de optimización multiobjetivo

Además de los enfoques estadísticos tradicionales, la optimización multiobjetivo se ha incorporado como estrategia para abordar problemas complejos en los que deben considerarse simultáneamente varios criterios de desempeño del proceso. En la extracción de compuestos fenólicos, estos criterios pueden incluir la maximización del contenido fenólico total o de la actividad antioxidante, junto con la minimización del tiempo de proceso, del consumo de solvente o de la energía requerida.

Para resolver este tipo de problemas se han utilizado algoritmos evolutivos multiobjetivos basados en el concepto de dominancia de Pareto, que permiten identificar conjuntos de soluciones óptimas no dominadas dentro de un espacio de decisión complejo (Aydin et al., 2023).



Entre estos algoritmos, el *Non-dominated Sorting Genetic Algorithm II* (NSGA-II) se ha convertido en uno de los métodos más utilizados para la optimización de procesos alimentarios y de extracción de metabolitos naturales. Este algoritmo genera poblaciones de soluciones que representan diferentes compromisos entre objetivos potencialmente conflictivos, manteniendo simultáneamente la convergencia hacia el frente de Pareto y la diversidad entre las soluciones obtenidas (Lubida et al., 2019).

En los estudios de extracción de compuestos fenólicos, este tipo de algoritmos permite explorar combinaciones de variables de proceso que equilibran el rendimiento y la eficiencia operativa. De esta manera, es posible identificar configuraciones experimentales que maximicen la recuperación de metabolitos bioactivos sin incrementar excesivamente el consumo de recursos ni el tiempo de operación. Recientemente, la optimización multiobjetivo se ha combinado con modelos predictivos basados en el aprendizaje automático. En estos enfoques híbridos, modelos como redes neuronales artificiales o regresiones basadas en *kriging* se utilizan para estimar la respuesta del sistema, mientras que algoritmos evolutivos exploran el espacio de soluciones posibles (Ma et al., 2023).

Este tipo de estrategias permite reducir el número de experimentos necesarios para evaluar el comportamiento del sistema y facilita la exploración de espacios de decisión de alta dimensionalidad. En sistemas de extracción de metabolitos vegetales, estos modelos híbridos se han utilizado para optimizar simultáneamente variables de proceso y respuestas relacionadas con la actividad antioxidante y con el contenido de compuestos fenólicos (Sevindik et al., 2024).

Un elemento central de estos análisis es la representación del frente de Pareto, en la que cada punto corresponde a una solución no dominada que constituye un equilibrio distinto entre los objetivos considerados. La selección de una condición operativa final suele requerir criterios adicionales de decisión que permitan elegir una solución representativa del conjunto de alternativas generadas.

Los enfoques de optimización multiobjetivo amplían las posibilidades del modelado estadístico tradicional al permitir analizar simultáneamente múltiples criterios de desempeño del proceso. La integración de algoritmos evolutivos, modelos predictivos y herramientas de decisión multicriterio representa actualmente una de las principales tendencias en la optimización de los procesos de extracción de compuestos bioactivos a partir de matrices vegetales.



7. BRECHAS DE INVESTIGACIÓN Y DIRECCIONES FUTURAS

Aunque el romero (*Salvia rosmarinus*) ha sido ampliamente estudiado como fuente de compuestos fenólicos con potencial antioxidante, aún persisten vacíos importantes en torno a la estandarización de su extracción y a la transferencia de este conocimiento a aplicaciones alimentarias. Uno de los principales es la escasa comparación sistemática entre el material fresco y el seco, pese a que el estado de la matriz vegetal puede modificar directamente la extractabilidad, la estabilidad y el perfil de los compuestos recuperados (Irakli et al., 2023; Qiu et al., 2024). A ello se suma que la mayoría de los estudios de optimización continúa centrada en maximizar una sola respuesta, mientras que, en términos de proceso, resulta necesario equilibrar simultáneamente el rendimiento, la actividad antioxidante, el consumo de solvente, el tiempo y la energía. En este sentido, los enfoques de optimización multiobjetivo siguen siendo poco explorados en sistemas específicos de romero (Plawgo et al., 2024a).

Otra limitación relevante es que, aunque las tecnologías de extracción asistida y los solventes compatibles con alimentos han mostrado ventajas frente a los métodos convencionales, su evaluación suele detenerse en el rendimiento analítico del extracto, sin integrar de forma suficiente criterios de sostenibilidad, recuperación de solventes, costo operativo y factibilidad de escalamiento (Calderón-Oliver & Ponce-Alquicira, 2021; Plaskova & Mlcek, 2023). Por ello, las investigaciones futuras deberían orientarse hacia modelos más integrados que consideren el estado de la materia prima, la optimización multiobjetivo y la validación a escala piloto o industrial. Este enfoque permitiría avanzar desde la caracterización química de los extractos hasta el diseño de procesos viables para su aplicación en química y tecnología de alimentos.

Estas necesidades de investigación muestran que el avance en la extracción de compuestos fenólicos de romero requiere enfoques más integrados y orientados a la aplicación, como se resume en la Tabla 5.



Tabla 5. Brechas actuales y prioridades de investigación para la extracción de compuestos fenólicos de romero en aplicaciones alimentarias.

Área crítica	Situación actual	Implicación para el proceso	Prioridad futura	Referencias
Estado de la materia prima	Existe evidencia dispersa sobre diferencias entre romero fresco y seco, pero faltan comparaciones sistemáticas bajo condiciones equivalentes	Dificulta establecer criterios comparativos consistentes para seleccionar la matriz vegetal más adecuada	Diseñar estudios controlados que integren la estado de la materia prima, perfil fenólico y desempeño extractivo	(Irakli et al., 2023; Qiu et al., 2024)
	Predominan estudios centrados en una sola respuesta, como contenido fenólico total o antioxidante	Limita la selección de condiciones operativas viables desde una perspectiva de proceso	Incorporar enfoques de optimización multiobjetivo que integren rendimiento, calidad del extracto y eficiencia operativa	(Plawgo et al., 2024b; Podetti et al., 2023)
Solventes y sostenibilidad	Se utilizan ampliamente mezclas hidroalcohólicas, pero aún hay evaluación limitada de solventes verdes en condiciones aplicables a alimentos	Restringe la transición hacia procesos sostenibles compatibles con escalamiento	Comparar solventes convencionales y verdes considerando eficiencia e inocuidad, recuperación y costo	(Calderón-Oliver & Ponce-Alquicira, 2021; Plaskova & Mlcek, 2023)

	Reduce	la	Validar procesos a
Escalamiento industrial	La mayor parte de la transferencia tecnológica se concentra en escala de laboratorio o piloto en la industria alimentaria	Validar procesos a escala piloto e integrar análisis técnico-económicos y de sostenibilidad	(Cardoso et al., 2013; Qiu et al., 2024)
Reproducibilidad del extracto	La composición del extracto varía según origen vegetal, funcional secado, solvente y tecnología empleada	Dificulta la estandarización del en compuestos para uso marcadores alimentario	Establecer criterios de estandarización basados en compuestos (Irakli et al., 2023; Sridhar y et al., 2021)
Integración en alimentos	Existen estudios sobre actividad antioxidante, pero desde menos evidencia analítica sobre comportamiento en matrices tecnológicas alimentarias reales concretas	Limita la extrapolación hacia aplicaciones tecnológicas específicas	Evaluar estabilidad, eficacia y efectos sensoriales del extracto en sistemas alimentarios (Dupas et al., 2020; Himed-Idir et al., 2021)
Enfoque interdisciplinario	Los estudios suelen abordar la extracción desde una sola perspectiva experimental	Impide una visión integral del proceso y de su viabilidad de aplicación	Integrar química de alimentos, ingeniería de procesos, modelado y evaluación ambiental (Cardoso et al., 2013; Sridhar et al., 2021)



8. CONCLUSIONES Y PERSPECTIVAS

La evidencia revisada permitió establecer que el romero (*Salvia rosmarinus*) y otras especies de lamiáceas constituyeron una fuente relevante de compuestos fenólicos con actividad antioxidante asociada a su estructura química. Entre los metabolitos más representativos del romero destacaron el ácido rosmarínico, el ácido carnósico y el carnosol, cuya capacidad redox explicó su participación en la estabilización de radicales libres y en la modulación de procesos de oxidación lipídica en matrices alimentarias. En este sentido, la actividad antioxidante de los extractos no dependió de un único compuesto, sino de la interacción entre distintas clases fenólicas presentes simultáneamente en la matriz vegetal.

El análisis también mostró que la recuperación de estos metabolitos estuvo fuertemente condicionada por la matriz vegetal y las condiciones de procesamiento. Factores como el estado del material, la estructura tisular, el contenido de agua, el secado y la temperatura influyeron en la liberación, la estabilidad y la transformación de los compuestos fenólicos, lo que modificó la composición final del extracto. De manera paralela, la eficiencia de extracción dependió de la interacción entre variables como el solvente, la temperatura, el tiempo y la relación sólido-líquido, lo que explicó las limitaciones de los enfoques de optimización basados en la evaluación aislada de factores. En este contexto, metodologías multivariantes como RSM y otros enfoques computacionales ofrecieron herramientas útiles para modelar el proceso e identificar condiciones operativas más favorables para aplicaciones en química y tecnología de alimentos.

Por lo tanto, la literatura permitió integrar la química de los compuestos fenólicos, la influencia de la matriz vegetal y la optimización del proceso de extracción en un mismo marco conceptual. Como perspectiva, se requiere avanzar hacia estudios que incorporen conjuntamente el efecto del estado de la materia prima, tecnologías de extracción compatibles con aplicaciones alimentarias, solventes más sostenibles y estrategias de optimización multiobjetivo. La incorporación de herramientas metabolómicas y modelos predictivos podría fortalecer la comprensión de la transformación de los compuestos fenólicos durante el procesamiento y facilitar el diseño de extractos de romero con un mayor potencial de aplicación en sistemas alimentarios reales.



REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Alara, O. R., Abdurahman, N. H., & Ukaegbu, C. I. (2021). Extraction of phenolic compounds: A review. *Current Research in Food Science*, 4, 200–214. <https://doi.org/10.1016/j.crfs.2021.03.011>
- Anaya-Esparza, L. M., Aurora-Vigo, E. F., Villagrán, Z., Rodríguez-Lafitte, E., Ruvalcaba-Gómez, J. M., Solano-Cornejo, M. Á., Zamora-Gasga, V. M., Montalvo-González, E., Gómez-Rodríguez, H., Aceves-Aldrete, C. E., & González-Silva, N. (2023). Design of Experiments for Optimizing Ultrasound-Assisted Extraction of Bioactive Compounds from Plant-Based Sources. *Molecules*, 28(23), 7752. <https://doi.org/10.3390/molecules28237752>
- Andrade, M. A., Barbosa, C. H., Ribeiro-Santos, R., Tomé, S., Fernando, A. L., Silva, A. S., & Vilarinho, F. (2025). Emerging Trends in Active Packaging for Food: A Six-Year Review. *Foods*, 14(15), 2713. <https://doi.org/10.3390/foods14152713>
- Aydin, E., Turgut, S., Aydin, S., Cevik, S., Ozcelik, A., Aksu, M., Ozcelik, M., & Ozkan, G. (2023). A New Approach for the Development and Optimization of Gluten-Free Noodles Using Flours from Byproducts of Cold-Pressed Okra and Pumpkin Seeds. *Foods*, 12(10), 2018. <https://doi.org/10.3390/foods12102018>
- Belwal, T., Ezzat, S. M., Rastrelli, L., Bhatt, I. D., Daglia, M., Baldi, A., Devkota, H. P., Orhan, I. E., Patra, J. K., Das, G., Anandharamakrishnan, C., Gomez-Gomez, L., Nabavi, S. F., Nabavi, S. M., & Atanasov, A. G. (2018). A critical analysis of extraction techniques used for botanicals: Trends, priorities, industrial uses and optimization strategies. *TrAC Trends in Analytical Chemistry*, 100, 82–102. <https://doi.org/10.1016/j.trac.2017.12.018>
- Bernini, R., Campo, M., Cassiani, C., Fochetti, A., Ieri, F., Lombardi, A., Urciuoli, S., Vignolini, P., Villanova, N., & Vita, C. (2024). Polyphenol-Rich Extracts from Agroindustrial Waste and Byproducts: Results and Perspectives According to the Green Chemistry and Circular Economy. *Journal of Agricultural and Food Chemistry*, 72(23), 12871–12895. <https://doi.org/10.1021/acs.jafc.4c00945>
- Blasi, F., & Cossignani, L. (2020). An Overview of Natural Extracts with Antioxidant Activity for the Improvement of the Oxidative Stability and Shelf Life of Edible Oils. *Processes*, 8(8), 956.



<https://doi.org/10.3390/pr8080956>

- Boateng, I. D. (2023). Recent advances in combined Avant-garde technologies (thermal-thermal, non-thermal-non-thermal, and thermal-non-thermal matrix) to extract polyphenols from agro byproducts. *Journal of Food and Drug Analysis*, 31(4). <https://doi.org/10.38212/2224-6614.3479>
- Brewer, M. S. (2011). Natural Antioxidants: Sources, Compounds, Mechanisms of Action, and Potential Applications. *Comprehensive Reviews in Food Science and Food Safety*, 10(4), 221–247. <https://doi.org/10.1111/j.1541-4337.2011.00156.x>
- Calderón-Oliver, M., & Ponce-Alquicira, E. (2021). Environmentally Friendly Techniques and Their Comparison in the Extraction of Natural Antioxidants from Green Tea, Rosemary, Clove, and Oregano. *Molecules*, 26(7), 1869. <https://doi.org/10.3390/molecules26071869>
- Cardoso, L., Serrano, C., Quintero, E., López, C., Antezana, R., & Martínez De La Ossa, E. (2013). High Pressure Extraction of Antioxidants from *Solanum stenotomum* Peel. *Molecules*, 18(3), 3137–3151. <https://doi.org/10.3390/molecules18033137>
- Chan, E. W. C., Wong, S. K., & Chan, H. T. (2021). An overview of the chemistry and anticancer properties of rosemary extract and its diterpenes. *Journal of Herbmед Pharmacology*, 11(1), 10–19. <https://doi.org/10.34172/jhp.2022.02>
- Chua, L. Y. W., Chua, B. L., Figiel, A., Chong, C. H., Wojdyło, A., Szumny, A., & Choong, T. S. Y. (2019). Antioxidant Activity, and Volatile and Phytosterol Contents of *Strobilanthes crispus* Dehydrated Using Conventional and Vacuum Microwave Drying Methods. *Molecules*, 24(7), 1397. <https://doi.org/10.3390/molecules24071397>
- Chua, L. Y. W., Chua, B. L., Figiel, A., Chong, C. H., Wojdyło, A., Szumny, A., & Lech, K. (2019). Characterisation of the Convective Hot-Air Drying and Vacuum Microwave Drying of *Cassia alata*: Antioxidant Activity, Essential Oil Volatile Composition and Quality Studies. *Molecules*, 24(8), 1625. <https://doi.org/10.3390/molecules24081625>
- De Arruda, G. M. P., Rupert Brandão, S. C., Da Silva Júnior, E. V., Da Silva, E. M., Barros, Z. M. P., Da Silva, E. S., Shinohara, N. K. S., & Azoubel, P. M. (2023). Influence of ultrasound and ethanol as a pretreatment on papaya infrared and convective drying characteristics and quality



- parameters. *Journal of Food Process Engineering*, 46(3), e14255.
<https://doi.org/10.1111/jfpe.14255>
- De Bruijn, J., Rivas, F., Rodriguez, Y., Loyola, C., Flores, A., Melin, P., & Borquez, R. (2016). Effect of Vacuum Microwave Drying on the Quality and Storage Stability of Strawberries: Vacuum Microwave Drying of Strawberries. *Journal of Food Processing and Preservation*, 40(5), 1104–1115. <https://doi.org/10.1111/jfpp.12691>
- Dupas, C., Métoyer, B., El Hatmi, H., Adt, I., Mahgoub, S. A., & Dumas, E. (2020). Plants: A natural solution to enhance raw milk cheese preservation? *Food Research International*, 130, 108883. <https://doi.org/10.1016/j.foodres.2019.108883>
- Fierascu, R. C., Fierascu, I., Avramescu, S. M., & Sieniawska, E. (2019). Recovery of Natural Antioxidants from Agro-Industrial Side Streams through Advanced Extraction Techniques. *Molecules*, 24(23), 4212. <https://doi.org/10.3390/molecules24234212>
- Gallego, M. G., Gordon, M. H., Segovia, F. J., Skowyra, M., & Almajano, M. P. (2013). Antioxidant Properties of Three Aromatic Herbs (Rosemary, Thyme and Lavender) in Oil-in-Water Emulsions. *Journal of the American Oil Chemists' Society*, 90(10), 1559–1568. <https://doi.org/10.1007/s11746-013-2303-3>
- Gharby, S., Oubannin, S., Ait Bouzid, H., Bijla, L., Ibourki, M., Gagour, J., Koubachi, J., Sakar, E. H., Majourhat, K., Lee, L.-H., Harhar, H., & Bouyahya, A. (2022). An Overview on the Use of Extracts from Medicinal and Aromatic Plants to Improve Nutritional Value and Oxidative Stability of Vegetable Oils. *Foods*, 11(20), 3258. <https://doi.org/10.3390/foods11203258>
- Gutiérrez-del-Río, I., López-Ibáñez, S., Magadán-Corpas, P., Fernández-Calleja, L., Pérez-Valero, Á., Tuñón-Granda, M., Miguélez, E. M., Villar, C. J., & Lombó, F. (2021). Terpenoids and Polyphenols as Natural Antioxidant Agents in Food Preservation. *Antioxidants*, 10(8), 1264. <https://doi.org/10.3390/antiox10081264>
- Hcini, K., Sotomayor, J. A., Jordan, M. J., & Bouzid, S. (2013). Identification and Quantification of Phenolic Compounds of Tunisian *Rosmarinus officinalis* L. *Asian Journal of Chemistry*, 25(16), 9299–9301. <https://doi.org/10.14233/ajchem.2013.15449>
- Himed-Idir, H., Mouhoubi, K., Siar, E., Boudries, H., Mansouri, H., Adjeroud, N., Madani, K., &



- Boulekbache-Makhlouf, L. (2021). Effect of rosemary (*Rosmarinus officinalis* L.) supplementation on fresh cheese: Physicochemical properties, antioxidant potential, and sensory attributes. *Journal of Food Processing and Preservation*, 45(1). <https://doi.org/10.1111/jfpp.15057>
- Irakli, M., Skendi, A., Bouloumpasi, E., Christaki, S., Biliaderis, C. G., & Chatzopoulou, P. (2023). Sustainable Recovery of Phenolic Compounds from Distilled Rosemary By-Product Using Green Extraction Methods: Optimization, Comparison, and Antioxidant Activity. *Molecules*, 28(18), 6669. <https://doi.org/10.3390/molecules28186669>
- Kumar, A., P, N., Kumar, M., Jose, A., Tomer, V., Oz, E., Proestos, C., Zeng, M., Elobeid, T., K, S., & Oz, F. (2023). Major Phytochemicals: Recent Advances in Health Benefits and Extraction Method. *Molecules*, 28(2), 887. <https://doi.org/10.3390/molecules28020887>
- Lourenço, S. C., Moldão-Martins, M., & Alves, V. D. (2019). Antioxidants of Natural Plant Origins: From Sources to Food Industry Applications. *Molecules*, 24(22), 4132. <https://doi.org/10.3390/molecules24224132>
- Lubida, A., Veysipanah, M., Pilesjo, P., & Mansourian, A. (2019). LAND-USE PLANNING FOR SUSTAINABLE URBAN DEVELOPMENT IN AFRICA: A SPATIAL AND MULTI-OBJECTIVE OPTIMIZATION APPROACH. *Geodesy and Cartography*, 45(5), 1–15. <https://doi.org/10.3846/gac.2019.6691>
- Luca, S. V., Skalicka-Woźniak, K., Mihai, C.-T., Gradinaru, A. C., Mandici, A., Ciocarlan, N., Miron, A., & Aprotosoiaie, A. C. (2023). Chemical Profile and Bioactivity Evaluation of *Salvia* Species from Eastern Europe. *Antioxidants*, 12(8), 1514. <https://doi.org/10.3390/antiox12081514>
- Ma, J., Yao, J., Ren, X., Dong, Y., Song, R., Zhong, X., Zheng, Y., Shan, D., Lv, F., Li, X., Deng, Q., He, Y., Yuan, R., & She, G. (2023). Machine learning-assisted data-driven optimization and understanding of the multiple stage process for extraction of polysaccharides and secondary metabolites from natural products. *Green Chemistry*, 25(8), 3057–3068. <https://doi.org/10.1039/D2GC04574E>
- Manassis, G., Kalogianni, A. I., Lazou, T., Moschovas, M., Bossis, I., & Gelasakis, A. I. (2020). Plant-Derived Natural Antioxidants in Meat and Meat Products. *Antioxidants*, 9(12), 1215.



<https://doi.org/10.3390/antiox9121215>

- Mansinhos, I., Gonçalves, S., & Romano, A. (2024). How climate change-related abiotic factors affect the production of industrial valuable compounds in *Lamiaceae* plant species: A review. *Frontiers in Plant Science*, 15, 1370810. <https://doi.org/10.3389/fpls.2024.1370810>
- Mantzourani, C., Tarantilis, P. A., & Kokotou, M. G. (2023). Carnosic Acid and Carnosol: Analytical Methods for Their Determination in Plants, Foods and Biological Samples. *Separations*, 10(9), 481. <https://doi.org/10.3390/separations10090481>
- Marc (Vlaic), R. A., Mureșan, V., Mureșan, A. E., Mureșan, C. C., Tanislav, A. E., Pușcaș, A., Martiș (Petruț), G. S., & Ungur, R. A. (2022). Spicy and Aromatic Plants for Meat and Meat Analogues Applications. *Plants*, 11(7), 960. <https://doi.org/10.3390/plants11070960>
- Masiála, A., Vingadassalon, A., & Aurore, G. (2024). Polyphenols in edible plant leaves: An overview of their occurrence and health properties. *Food & Function*, 15(13), 6847–6882. <https://doi.org/10.1039/D4FO00509K>
- Mena, P., Cirlini, M., Tassotti, M., Herrlinger, K., Dall'Asta, C., & Del Rio, D. (2016). Phytochemical Profiling of Flavonoids, Phenolic Acids, Terpenoids, and Volatile Fraction of a Rosemary (*Rosmarinus officinalis* L.) Extract. *Molecules*, 21(11), 1576. <https://doi.org/10.3390/molecules21111576>
- Napoli, E., Siracusa, L., & Ruberto, G. (2020). New Tricks for Old Guys: Recent Developments in the Chemistry, Biochemistry, Applications and Exploitation of Selected Species from the *Lamiaceae* Family. *Chemistry & Biodiversity*, 17(3), e1900677. <https://doi.org/10.1002/cbdv.201900677>
- Nieto, G., Ros, G., & Castillo, J. (2018). Antioxidant and Antimicrobial Properties of Rosemary (*Rosmarinus officinalis*, L.): A Review. *Medicines*, 5(3), 98. <https://doi.org/10.3390/medicines5030098>
- Oreopoulou, V., & Tsironi, T. (2021). Plant Antioxidants and Antimicrobials in Edible and Non-edible Active Packaging Films. In H. M. Ekiert, K. G. Ramawat, & J. Arora (Eds.), *Plant Antioxidants and Health* (pp. 1–24). Springer International Publishing. https://doi.org/10.1007/978-3-030-45299-5_29-1



- Peixoto, J. A. B., Álvarez-Rivera, G., Alves, R. C., Costa, A. S. G., Machado, S., Cifuentes, A., Ibáñez, E., & Oliveira, M. B. P. P. (2021). Comprehensive Phenolic and Free Amino Acid Analysis of Rosemary Infusions: Influence on the Antioxidant Potential. *Antioxidants*, 10(3), 500. <https://doi.org/10.3390/antiox10030500>
- Plaskova, A., & Mlcek, J. (2023). New insights of the application of water or ethanol-water plant extract rich in active compounds in food. *Frontiers in Nutrition*, 10, 1118761. <https://doi.org/10.3389/fnut.2023.1118761>
- Plawgo, M., Kocira, S., & Bohata, A. (2024a). Multi-Criteria Optimization Conditions for the Recovery of Bioactive Compounds from *Levisticum officinale* WDJ Koch Roots Using Green and Sustainable Ultrasound-Assisted Extraction. *Processes*, 12(2), 275. <https://doi.org/10.3390/pr12020275>
- Plawgo, M., Kocira, S., & Bohata, A. (2024b). Optimizing Microwave-Assisted Extraction from *Levisticum officinale* WDJ Koch Roots Using Pareto Optimal Solutions. *Processes*, 12(5), 1026. <https://doi.org/10.3390/pr12051026>
- Podetti, C., Riveros-Gomez, M., Román, M. C., Zalazar-García, D., Fabani, M. P., Mazza, G., & Rodríguez, R. (2023). Polyphenol-Enriched Pectin from Pomegranate Peel: Multi-Objective Optimization of the Eco-Friendly Extraction Process. *Molecules*, 28(22), 7656. <https://doi.org/10.3390/molecules28227656>
- Putnik, P., Lorenzo, J., Barba, F., Roohinejad, S., Režek Jambrak, A., Granato, D., Montesano, D., & Bursać Kovačević, D. (2018). Novel Food Processing and Extraction Technologies of High-Added Value Compounds from Plant Materials. *Foods*, 7(7), 106. <https://doi.org/10.3390/foods7070106>
- Qiu, K., Wang, S., Duan, F., Sang, Z., Wei, S., Liu, H., & Tan, H. (2024). Rosemary: Unrevealing an old aromatic crop as a new source of promising functional food additive—A review. *Comprehensive Reviews in Food Science and Food Safety*, 23(1), e13273. <https://doi.org/10.1111/1541-4337.13273>
- Quílez, M., Ferreres, F., López-Miranda, S., Salazar, E., & Jordán, M. J. (2020). Seed Oil from Mediterranean Aromatic and Medicinal Plants of the *Lamiaceae* Family as a Source of Bioactive



- Components with Nutritional. Antioxidants, 9(6), 510. <https://doi.org/10.3390/antiox9060510>
- Raveendran, D., Bhagwat, M., Chidanand, D. V., Anandakumar, S., & Sunil, C. K. (2022). Highlight on drying fruit slices with better retention of bioactive compounds. *Journal of Food Process Engineering*, 45(8), e14048. <https://doi.org/10.1111/jfpe.14048>
- Senanayake, S. P. J. N. (2018). Rosemary extract as a natural source of bioactive compounds. *Journal of Food Bioactives*, 51–57. <https://doi.org/10.31665/JFB.2018.2140>
- Sevindik, M., Gürgen, A., Krupodorova, T., Uysal, İ., & Koçer, O. (2024). A hybrid artificial neural network and multi-objective genetic algorithm approach to optimize extraction conditions of *Mentha longifolia* and biological activities. *Scientific Reports*, 14(1), 31403. <https://doi.org/10.1038/s41598-024-83029-8>
- Shan, B., Cai, Y. Z., Sun, M., & Corke, H. (2005). Antioxidant Capacity of 26 Spice Extracts and Characterization of Their Phenolic Constituents. *Journal of Agricultural and Food Chemistry*, 53(20), 7749–7759. <https://doi.org/10.1021/jf051513y>
- Siddique, F., Ali, Z., Arshad, M., Mubeen, K., & Ghazala, A. (2024). Exploration of novel eco-friendly techniques to utilize bioactive compounds from household food waste: Special reference to food applications. *Frontiers in Food Science and Technology*, 4, 1388461. <https://doi.org/10.3389/frfst.2024.1388461>
- Singh, S. (2021). Antioxidants properties of some spices with their chemistry and mechanism of action. *MOJ Biology and Medicine*, 6(1), 33–35. <https://doi.org/10.15406/mojbm.2021.06.00126>
- Sridhar, A., Ponnuchamy, M., Kumar, P. S., Kapoor, A., Vo, D.-V. N., & Prabhakar, S. (2021). Techniques and modeling of polyphenol extraction from food: A review. *Environmental Chemistry Letters*, 19(4), 3409–3443. <https://doi.org/10.1007/s10311-021-01217-8>
- Tocai (Moțoc), A. C., Rosan, C. A., Teodorescu, A. G., Venter, A. C., & Vicas, S. I. (2025). Multifunctional Roles of Medicinal Plants in the Meat Industry: Antioxidant, Antimicrobial, and Color Preservation Perspectives. *Plants*, 14(17), 2737. <https://doi.org/10.3390/plants14172737>
- Toydemir, G., Gultekin Subasi, B., Hall, R. D., Beekwilder, J., Boyacioglu, D., & Capanoglu, E. (2022). Effect of food processing on antioxidants, their bioavailability and potential relevance to human



- health. *Food Chemistry*: X, 14, 100334. <https://doi.org/10.1016/j.fochx.2022.100334>
- Trivellini, A., Lucchesini, M., Maggini, R., Mosadegh, H., Villamarin, T. S. S., Vernieri, P., Mensuali-Sodi, A., & Pardossi, A. (2016). *Lamiaceae* phenols as multifaceted compounds: Bioactivity, industrial prospects and role of “positive-stress.” *Industrial Crops and Products*, 83, 241–254. <https://doi.org/10.1016/j.indcrop.2015.12.039>
- Tsegay, Z. T., Agriopoulou, S., Chaari, M., Smaoui, S., & Varzakas, T. (2024). Statistical Tools to Optimize the Recovery of Bioactive Compounds from Marine Byproducts. *Marine Drugs*, 22(4), 182. <https://doi.org/10.3390/md22040182>
- Tzima, K., Brunton, N., & Rai, D. (2018). Qualitative and Quantitative Analysis of Polyphenols in *Lamiaceae* Plants—A Review. *Plants*, 7(2), 25. <https://doi.org/10.3390/plants7020025>
- Ulewicz-Magulska, B., & Wesolowski, M. (2023). Antioxidant Activity of Medicinal Herbs and Spices from Plants of the *Lamiaceae*, *Apiaceae* and *Asteraceae* Families: Chemometric Interpretation of the Data. *Antioxidants*, 12(12), 2039. <https://doi.org/10.3390/antiox12122039>
- Waseem, M., Majeed, Y., Nadeem, T., Naqvi, L. H., Khalid, M. A., Sajjad, M. M., Sultan, M., Khan, M. U., Khayrullin, M., Shariati, M. A., & Lorenzo, J. M. (2023). Conventional and advanced extraction methods of some bioactive compounds with health benefits of food and plant waste: A comprehensive review. *Food Frontiers*, 4(4), 1681–1701. <https://doi.org/10.1002/fft2.296>
- Weremfo, A., Abassah-Oppong, S., Adulley, F., Dabie, K., & Seidu-Larry, S. (2023). Response surface methodology as a tool to optimize the extraction of bioactive compounds from plant sources. *Journal of the Science of Food and Agriculture*, 103(1), 26–36. <https://doi.org/10.1002/jsfa.12121>
- Yashin, A., Yashin, Y., Xia, X., & Nemzer, B. (2017). Antioxidant Activity of Spices and Their Impact on Human Health: A Review. *Antioxidants*, 6(3), 70. <https://doi.org/10.3390/antiox6030070>



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), 6852. <https://doi.org/10.3390/molecules28196852>

Zuin, V. G., & Ramin, L. Z. (2018). Green and Sustainable Separation of Natural Products from Agro-Industrial Waste: Challenges, Potentialities, and Perspectives on Emerging Approaches. *Topics in Current Chemistry*, 376(1), 3. <https://doi.org/10.1007/s41061-017-0182-z>

