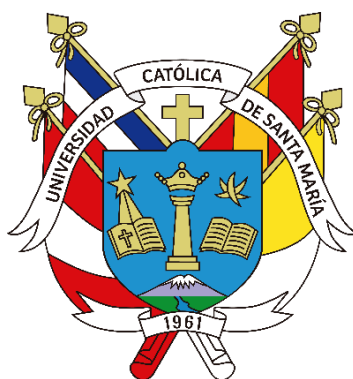


Universidad Católica de Santa María
Facultad de Ciencias Farmacéuticas, Bioquímicas y
Biotechnológicas
Escuela Profesional de Ingeniería Biotechnológica



**Estudio comparativo entre los métodos de extracción: Hidrodestilación
Convencional (HD) e Hidrodestilación Asistida por Microondas (MAHD)
para la extracción de aceite esencial - Revisión Sistemática según las
directrices PRISMA**

Tesis presentada por el Bachiller:

Rodriguez Villagras, Stephani Alejandra

ORCID: 0009-0008-3682-7778

para optar el Título Profesional de Ingeniera Biotecnóloga

Asesor (a):

Dr. Gomez Valdez, Badhin

ORCID: 0000-0001-6539-1207

Arequipa - Perú

2024

UNIVERSIDAD CATÓLICA DE SANTA MARÍA
INGENIERIA BIOTECNOLOGICA
TITULACIÓN CON TESIS
DICTAMEN APROBACIÓN DE BORRADOR

Arequipa, 26 de Junio del 2024

Dictamen: 007446-C-EPIB-2024

Visto el borrador del expediente 007446, presentado por:

2013224012 - RODRIGUEZ VILLAGRAS STEPHANI ALEJANDRA

Titulado:

**ESTUDIO COMPARATIVO ENTRE LOS MÉTODOS DE EXTRACCIÓN HIDRODESTILACIÓN
CONVENCIONAL (HD) E HIDRODESTILACIÓN ASISTIDA POR MICROONDAS (MAHD) PARA LA
EXTRACCIÓN DE ACEITE ESENCIAL: REVISIÓN SISTEMÁTICA SEGÚN LAS DIRECTRICES
PRISMA**

Nuestro dictamen es:

APROBADO

Título Profesional/Título de Segunda Especialidad/Grado Académico a optar:

INGENIERO BIOTECNOLOGO

**29213630 - CARDENAS GARCIA JAIME DANTE
DICTAMINADOR**



**42098888 - CORDOVA BARRIOS CINTHIA CAROL
DICTAMINADOR**



**43668681 - PAREDES FUENTES JULITZA LINDSEY
DICTAMINADOR**



ESTUDIO COMPARATIVO ENTRE LOS MÉTODOS DE EXTRACCIÓN HIDRODESTILACIÓN CONVENCIONAL (HD) E HIDRODESTILACIÓN ASISTIDA POR MICROONDAS (MAHD) PARA LA EXTRACCIÓN DE ACEITE ESENCIAL: REVISIÓN SISTEMÁTICA SEG

INFORME DE ORIGINALIDAD

22%	21%	12%	11%
INDICE DE SIMILITUD	FUENTES DE INTERNET	PUBLICACIONES	TRABAJOS DEL ESTUDIANTE

FUENTES PRIMARIAS

1	Submitted to University College London	4%
	Trabajo del estudiante	
2	www.medrxiv.org	1%
	Fuente de Internet	
3	sites.google.com	1%
	Fuente de Internet	
4	bibliotecavirtual.unl.edu.ar:8080	1%
	Fuente de Internet	
5	www.mdpi.com	1%
	Fuente de Internet	
6	Submitted to Universidad Católica de Santa María	1%
	Trabajo del estudiante	
7	www.researchgate.net	<1%
	Fuente de Internet	

DEDICATORIA

Dedico este trabajo a los pilares fundamentales en mi vida: a mi querida madre, cuyo amor, sacrificio y sabiduría han sido la luz que ha guiado mi camino. Gracias, mamá, por darme la oportunidad de crecer y evolucionar a tu lado, por enseñarme la importancia de la perseverancia y por ser el ejemplo de fortaleza y bondad que siempre aspiro a seguir. Tu apoyo incondicional ha sido mi refugio y mi fuente de inspiración en cada paso de este viaje.

This dedication is also for you, my beloved, who believed in me even when I doubted myself. Your unwavering faith in my abilities and your constant support have been fundamental in this stage of my life. Thank you for always being there, for your words of encouragement, for your love and for being my unconditional partner in every challenge and celebration.

A ambos, gracias por ser mi mayor motivación y por enseñarme el verdadero significado de amor y apoyo.

RESUMEN

Los aceites esenciales, extraídos de diversas plantas, han sido históricamente valorados por sus propiedades aromáticas, medicinales y conservantes. Su utilización en múltiples ámbitos de la vida humana se debe a su capacidad de preservar propiedades y activos durante un largo periodo, optimizando así el almacenamiento y facilitando la extracción. Estos aceites, siendo metabolitos secundarios de ciertas plantas, se diferencian notablemente de los aceites vegetales por su alta volatilidad, naturaleza lipofílica y textura no grasa, además de poseer un fuerte olor y ser solubles en disolventes orgánicos. La creciente demanda de aceites esenciales ha impulsado la búsqueda de métodos de extracción más eficientes y sostenibles, como la Hidrodestilación Asistida por Microondas (MAHD), que se ha convertido en una técnica clave en la industria por su eficiencia y menor impacto ambiental.

El avance en tecnologías de extracción como la MAHD ha marcado un hito significativo en la industria de los aceites esenciales. Esta técnica no solo mejora la calidad y el rendimiento de los aceites esenciales, sino que también reduce el tiempo de extracción y el impacto ambiental. La MAHD destaca por generar un perfil químico más deseable, enriquecido en compuestos oxigenados, lo que mejora las propiedades aromáticas, gustativas y terapéuticas de los aceites. Además, la metodología MAHD simplifica el proceso de extracción al omitir la necesidad de deshidratación previa, lo cual no afecta la calidad del extracto. Este enfoque más verde y eficiente en el proceso de extracción representa el futuro de la industria, equilibrando la eficiencia operativa con la responsabilidad ambiental.

Palabras clave: Aceites esenciales, Hidrodestilación Asistida por Microondas (MAHD), Extracción sostenible, Compuestos oxigenados

ABSTRACT

Essential oils, extracted from various plants, have historically been valued for their aromatic, medicinal and preservative properties. Their use in many areas of human life is due to their ability to preserve properties and active ingredients over a long period of time, thus optimising storage and facilitating extraction. These oils, being secondary metabolites of certain plants, differ significantly from vegetable oils due to their high volatility, lipophilic nature and non-greasy texture, as well as their strong odour and solubility in organic solvents. The growing demand for essential oils has driven the search for more efficient and sustainable extraction methods, such as Microwave Assisted Hydrodistillation (MAHD), which has become a key technique in the industry due to its efficiency and lower environmental impact.

Advances in extraction technologies such as MAHD have marked a significant milestone in the essential oils industry. This technique not only improves the quality and yield of essential oils, but also reduces extraction time and environmental impact. MAHD excels in generating a more desirable chemical profile, enriched in oxygenated compounds, which improves the aromatic, taste and therapeutic properties of the oils. In addition, the MAHD methodology simplifies the extraction process by omitting the need for prior dehydration, which does not affect the quality of the extract. This greener and more efficient approach to the extraction process represents the future of the industry, balancing operational efficiency with environmental responsibility.

Keywords: Essential oils, Microwave-Assisted Hydro distillation (MAHD), Sustainable extraction, Oxygenated compound

INDICE GENERAL

DEDICATORIA.....	3
RESUMEN.....	4
ABSTRACT.....	5
1 INTRODUCCIÓN:	12
2 METODOLOGIA	14
2.1 Título, resumen, introducción y pregunta inicial.....	15
2.2 Criterios de inclusión y exclusión en la búsqueda.....	16
2.3 Definición de los criterios de búsqueda.....	17
2.4 Organización de la información	18
2.5 Recogida de datos.....	19
3 CUERPO DE LA REVISION	20
3.1 Aceites esenciales	20
3.1.1 Definición	20
3.1.2 Composición Química:	22
3.1.3 Breve historia de su uso	33
3.1.4 Importancia en diversas industrias	34
3.2 Métodos de Extracción:.....	35
3.2.1 Métodos convencionales de extracción	36
3.2.2 Técnicas modernas de extracción	45
3.3 Revisión de estudios comparativos	56
3.3.1 Impacto en la calidad del aceite esencial	59

3.3.2	Rendimiento de extracción.....	64
3.3.3	Consideraciones ambientales y sostenibilidad.....	73
4	DISCUSION	75
5	CONCLUSIONES.....	77
6	REFERENCIAS BIBLIOGRAFICAS.....	79
ANEXOS.....		85



LISTA DE TABLAS

Tabla 1 Análisis del Marco estructural	16
Tabla 2 Tabla de criterios de inclusión y exclusión	17
Tabla 3 Comparación de rendimiento, calidad e impacto de la extracción de aceites mediante Hidrodestilación y Destilación asistida por microondas.....	57



LISTA DE FIGURAS

Figura 1	Flujo de información a través de las fases de una revisión sistemática	15
Figura 2	Estrategia de literatura	17
Figura 3	Búsqueda inicial en Google Scholar.....	18
Figura 4	Numero de publicaciones por año	19
Figura 5	Países en los que se publicaron los documentos.....	19
Figura 6	Patrón general de biosíntesis de metabolitos secundarios.	24
Figura 7	Biosíntesis de policétidos y lípidos	25
Figura 8	La biosíntesis de los policétidos	25
Figura 9	Fragmentación de grasas poliinsaturadas para dar aldehídos.	26
Figura 10	Biosíntesis del ácido shikímico.	27
Figura 11	Unidades de isopreno en algunos terpenoides comunes.....	28
Figura 12	Acoplamiento cabeza-cola de dos unidades de isopreno.....	28
Figura 13	Acoplamiento de unidades C5 en la biosíntesis de terpenoides.	29
Figura 14	Formación de esqueletos monoterpenoides.....	32
Figura 15	Representación esquemática del equipo de extracción de la prensa de tornillo – laboratorio.....	38
Figura 16	Representación esquemática del equipo de extracción turbo o vortical – escala laboratorio	39
Figura 17	Representación esquemática del equipo de extracción mediante decocción – laboratorio	40
Figura 18	Representación esquemática del equipo de extracción mediante destilación – laboratorio	43
Figura 19	Representación esquemática del equipo de extracción por arrastre de vapor Solventes – escala laboratorio.....	45

Figura 20	Representación esquemática del equipo de Extracción Asistida por Ultrasonidos.....	48
Figura 21	Representación esquemática del equipo de Extracción con fluidos supercríticos	50
Figura 22	Representación esquemática del equipo de Extracción asistida por microondas.....	53
Figura 23	<i>Comparación de rendimiento entre extracción por Hidrodestilación (HD) y asistida por microondas (MAHD).....</i>	<i>66</i>



LISTA DE ABREVIATURAS

EAE:	Extracción enzimática
EO/AE:	(Essential oils) Aceites esenciales
HD:	Hidrodestilación
MAE:	(Microwave assisted extraction) Extracción asistida por Microondas
MAD:	(Microwave assisted distillation) Destilación asistida por Microondas
MAHD/MHD:	(Microwave-Assisted Hydro-Distillation) Hidrodestilación asistida por microondas
MASD:	(Microwave-assisted steam distillation) Destilación al vapor asistida por microondas
MHG:	(Microwave Hydrodiffusion and Gravity) Hidrodifusión y gravedad asistida por microondas
MIS:	Extracción Soxhlet integrada por microondas
ODS:	Objetivos de Desarrollo Sostenible
ONU:	Organización de las Naciones Unidas
PEF:	(Pulsed electric field-assisted extraction) Extracción con Campo Eléctrico Pulsado
PLE:	(Pressure liquid extraction) Extracción Líquida Presurizada
SD:	Destilación por arrastre de vapor
SFE:	Extracción con fluido supercrítico
SFME:	Extracción por microondas sin solventes
UAE/EAU:	(Ultrasound-assisted extraction) Extracción asistida por ultrasonido
UMAE:	Extracción asistida por ultrasonido y microondas
VMHD:	Hidrodestilación por microondas al vacío

1 INTRODUCCIÓN:

Históricamente, las propiedades aromáticas, medicinales y conservantes de las plantas han sido valoradas y empleadas en diversos aspectos de la vida humana. Entre los múltiples compuestos que se pueden extraer de las plantas, los aceites esenciales han sido especialmente apreciados por su capacidad para conservar propiedades y activos durante largo tiempo, optimizar el almacenamiento y su fácil extracción. Estos aceites son metabolitos secundarios producidos por ciertos tipos de vegetación, caracterizados por su fuerte olor, altos puntos de ebullición, alto índice de refracción y de naturaleza lipofílica, es decir, baja solubilidad en sustancias acuosas o polares, pero solubles en disolventes orgánicos. Se diferencian de los aceites vegetales por su alta volatilidad y textura no grasa (1). En cuanto a su composición química, los aceites esenciales son mayoritariamente compuestos de baja masa molecular, principalmente terpenos, con presencia de alcoholes, ésteres, aldehídos o éteres, que son los responsables de los aromas o grupos activos de la molécula (2).

Las investigaciones iniciales sobre los componentes de los aceites esenciales fueron lideradas por figuras como M.J. Dumas y M. Berthelot en el siglo XIX, quienes analizaron y caracterizaron diversos compuestos naturales, empleando métodos como la destilación fraccionada y la reacción con reactivos inorgánicos. Sin embargo, fue O. Wallach, colaborador de Kekule, quien realizó avances significativos al darse cuenta de que muchos terpenos, descritos diferentemente según sus fuentes botánicas, eran químicamente idénticos, llevándolo a estudiar sus propiedades fundamentales y aislar los componentes individuales. Durante finales del siglo XIX y principios del XX, el conocimiento de los terpenos, como el pineno y el limoneno, creció exponencialmente. Este período también vio contribuciones significativas de otros químicos como A. von Baeyer, quien desarrolló la química estructural y realizó investigaciones importantes sobre los terpenos cíclicos y otros compuestos orgánicos, culminando en el reconocimiento de ambos con Premios Nobel de Química por sus respectivas investigaciones. El siglo XX trajo técnicas avanzadas como la cromatografía y la resonancia magnética nuclear (RMN), revolucionando la comprensión de la estructura de los terpenos y otros componentes de los aceites esenciales. Figuras como R.B. Woodward y J. Read jugaron roles cruciales en el desarrollo de metodologías para el análisis estructural detallado, utilizando la espectroscopia UV y otros métodos analíticos, lo que llevó a un crecimiento casi exponencial del conocimiento en este campo (3).

Según Stratakos & Koidis (4), se conocen como métodos convencionales de extracción de aceites esenciales al prensado en frío, utilizado principalmente en aceites cítricos; la extracción con disolventes, que no requiere altas temperaturas pero utiliza disolventes como hexanos, alcoholes o éteres, por lo que no es seguro para uso alimentario y se emplea en flores para la industria de la perfumería; y la extracción con gases supercríticos, que combina la destilación con disolventes a baja temperatura crítica, basándose en el manejo de la presión para reducir las temperaturas de ebullición y utilizando solventes no tóxicos como el CO₂ para evitar residuos en el resultado final, aunque requiere equipo especializado y una mayor inversión (5).

Así mismo la industria de extracción de aceites esenciales ha experimentado un aumento en la demanda, lo que ha impulsado la búsqueda de la optimización del proceso, no solo para mejorar la calidad sino también para encontrar alternativas "verdes"(6), entre estas tecnologías destacadas es la extracción asistida por microondas (MAE), que presenta un mecanismo de calentamiento único basado en la fricción; estudios indican que, comparada con los métodos convencionales, ofrece mayor rendimiento, tiempos de extracción más cortos y mejor selectividad. Avanzando un paso más, se combina la tecnología MAE con técnicas convencionales de extracción, dando lugar a métodos como la extracción de disolventes asistida por microondas, la hidrodestilación asistida por microondas (MAHD) y la destilación por vapor acelerada por microondas, entre otros(4). La hidrodestilación asistida por microondas (MAHD) es actualmente una de las tecnologías más utilizadas para la extracción de aceites esenciales e hidrolatos, gracias a su uso de agua como disolvente, su eficiencia y su menor impacto ambiental, ya que permite el uso de residuos sólidos para compostaje sin alteraciones en su composición y son biodegradables (5).

En la búsqueda científica para mejorar y optimizar las técnicas de extracción de aceites, se han realizado numerosos estudios que comparan la calidad y cantidad del aceite obtenido mediante diferentes métodos. Esta tendencia ha generado información en todo el mundo que podría ayudar en la implementación, elaboración y mejora de la calidad en la industria del aceite esencial. En esta era digital, donde el acceso a la información no es sinónimo de conocimiento, la creciente cantidad de estudios limita la capacidad de los investigadores para mantenerse actualizados, aumentando la frustración al recopilar información precisa y valiosa para un tema específico. En estos casos, las revisiones académicas son útiles para sintetizar e internalizar áreas delimitadas de información experimental, y su validez es uno de los aspectos que debe evaluarse cuidadosamente. Para garantizar una revisión sistemática correcta, se deben seguir ciertos pasos que aseguren la transparencia y la integridad de la publicación. Es por eso que

esta investigación se desarrollará siguiendo la declaración PRISMA 2020, que es una guía de 27 ítems que ayuda en la elaboración desde la búsqueda y clasificación de estudios hasta la discusión y síntesis de los resultados (7), con el fin de organizar los estudios de los últimos 5 años publicados y obtener la comparación entre el método de extracción de hidrodestilación convencional (HD) y la hidrodestilación asistida por microondas (MAHD).

Este estudio busca crear innovación tecnológica, que es clave para fomentar el desarrollo económico e industrial, comparando dos métodos de extracción de aceite para determinar las diferencias en calidad y sostenibilidad del proceso, con el objetivo de aumentar el acceso a esta información para pequeñas empresas dedicadas a este sector, para que puedan utilizar sus recursos con mayor eficacia. Asimismo, se busca fomentar el uso sostenible de recursos (agua potable, energía calorífica - ya sea de la combustión de gas o eléctrica - y materiales vegetales) y la reducción de desperdicios en el proceso de extracción, en línea con los Objetivos de Desarrollo Sostenible (ODS) que la ONU plantea para el 2030.

2 METODOLOGIA

Para el presente estudio se realizó una revisión sistemática la cual se caracteriza por analizar aspectos cualitativos esto con el objetivo de sintetizar información ya publicada pero que además pase por un riguroso filtro que garantice la transparencia y precisión de la misma, en este sentido para garantizar esta calidad esta investigación fue realizada bajo los parámetros de la metodología PRISMA 2020.

La metodología PRISMA fue publicada en 2009, siendo resultado de una modificación del filtro llamado QUOROM, lo que derivó en una lista de 27 ítems divididos en 4 fases (Figura 1), así como un documento de explicación también llamada guía PRISMA la cual proporciona una mayor orientación de cada ítem y su correcto uso (8). Desde entonces, ha sido altamente recomendada y aprobada por varias revistas y organizaciones que desarrollan revisiones sistemáticas, sin embargo, con el tiempo se vieron algunas deficiencias, así como avances tecnológicos que llevaron a algunos cambios como el uso de procesamiento de lenguaje, nuevos procedimientos de metaanálisis y nuevos procedimientos de evaluación del riesgo de sesgo que llevaron a una actualización en el año 2020 (7).

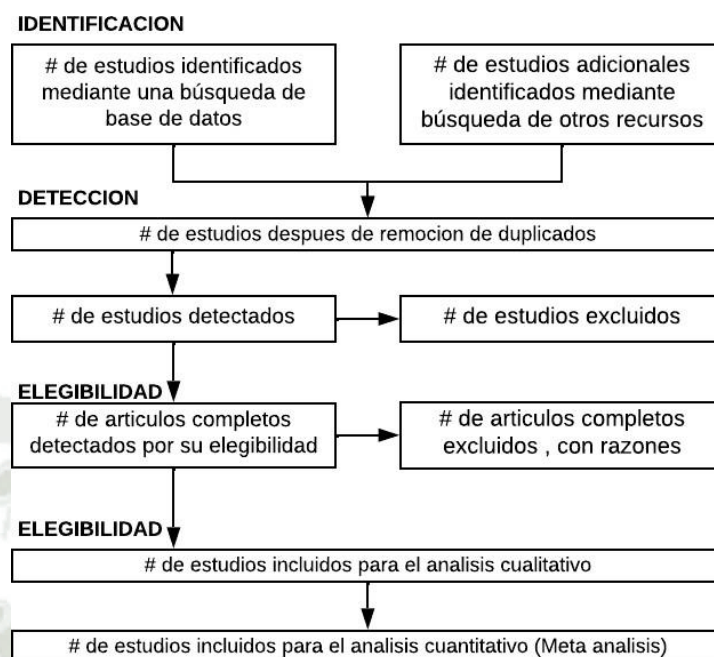


Figura 1 Flujo de información a través de las fases de una revisión sistemática

Nota: Información extraída de Moher et.al. (8)

PRISMA 2020 fue principalmente diseñada para revisiones sistemáticas de estudios acerca de los efectos en intervenciones de la salud, independientemente del diseño de los estudios incluidos, sin embargo, la guía ha demostrado ser igual de eficiente y para todo tipo de intervenciones como sociales o educativas, siendo posteriormente también reconocible para estudios de toda materia. El éxito de este método radica en la versatilidad de su uso pues logra integrar métodos de revisión cualitativa y cuantitativa, y permite dar resultados en ambos tipos de investigación.

En esta investigación se ha adaptado la metodología para ámbitos relacionados a la ingeniería biotecnológica minimizando los riesgos de sesgo en la etapa de inclusión y elegibilidad de artículos como en el posterior análisis. Para lograr eso se siguió la lista de verificación PRISMA 2020 (Anexo 1).

2.1 Título, resumen, introducción y pregunta inicial

El título de la investigación el cual está relacionado con la pregunta inicial según el método PRISMA 2020 fue formulado de acuerdo al objetivo principal de la revisión así mismo tiene las palabras revisión sistemática según como es recomendado para su acceso rápido en las búsquedas posteriores.

El resumen fue realizado de acuerdo a la lista de verificaciones PRISMA 2020 para resúmenes (Anexo 2), mientras que en la introducción se consideró la justificación principal de la investigación como una síntesis del contexto de la revisión como su importancia en el plano actual todo esto tomando en cuenta los objetivos principales. Es así que los ítems del 1 al 4 fueron cubiertos, aunque se fueron modificando mediante el proceso de investigación según se dieron los resultados.

2.2 Criterios de inclusión y exclusión en la búsqueda

Para alcanzar el objetivo principal de la investigación imparcial, veraz y representativamente se estableció primero el marco estructural mediante la metodología PICO (9) como se muestra en la Tabla 1.

Tabla 1 Análisis del Marco estructural

Elementos PICO		
P	Pacientes, grupo de intervención o problema (Patient)	Métodos de extracción de aceites esenciales por arrastre de vapor
I	Intervención, factor de estudio o exposición (Intervention)	Evaporación asistida por microondas
C	Comparación de la intervención (Comparison)	Eficiencia y calidad de aceites esenciales
O	Resultados esperados (Outcome)	Se espera el aumento de extracción y mejor calidad de aceites esenciales en la destilación MAHD
Otros	Tipo de estudio	Estudio de tipo cualitativo – no experimental

Nota: Los datos presentados fueron por elaboración propia y siguiendo el proceso PICO presentado por Leonardo R. (9)

Así mismo se definieron los criterios de inclusión y exclusión establecidos en la Tabla 2.

Tabla 2 Tabla de criterios de inclusión y exclusión

Criterios de inclusión / exclusión	Características
Periodo de publicaciones	Desde 01/01/2017 a 30/10/2023
Fecha de búsquedas	01/07/2022 y 01/12/2023
Tipo de Estudio	Artículos: revistas y actas de congresos
Palabras clave y sinónimos	Ver figura 2
Fuentes de información	Google Scholar
Idioma de la publicación	Inglés
Área de Conocimiento	Science technology
Modo de publicación	Exclusivamente Open Access

2.3 Definición de los criterios de búsqueda

Se identifico las posibles palabras claves para la búsqueda de los artículos estudiados

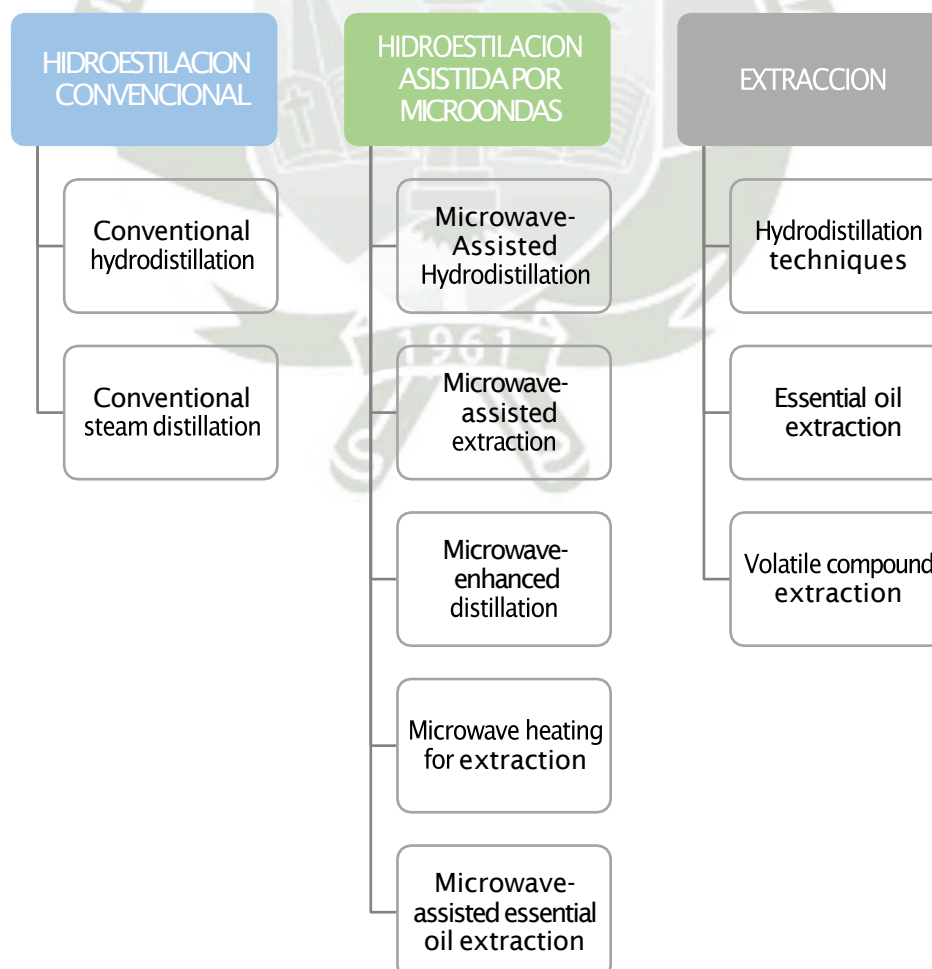


Figura 2 Estrategia de literatura

Las ecuaciones de búsqueda utilizadas fueron: TS=("Conventional hydrodistillation" OR "Conventional steam distillation") AND TS=(" Microwave-assisted extraction" OR "Microwave-Assisted Hydrodistillation" OR "Microwave-enhanced distillation" OR "Microwave heating for extraction" OR " Microwave-assisted essential oil extraction") AND TS=("comparison" OR "comparative" OR "contrast" OR "versus")

2.4 Organización de la información

En la fase inicial, se llevó a cabo una indagación exhaustiva en la base de datos de Google Scholar empleando la ecuación previamente expuesta. El propósito de este proceso fue garantizar la inclusión exclusiva de documentos de acceso abierto. Se identificaron un total de 114 estudios, excluyendo patentes o citas, comprendidos en el período de 2017 a 2023.

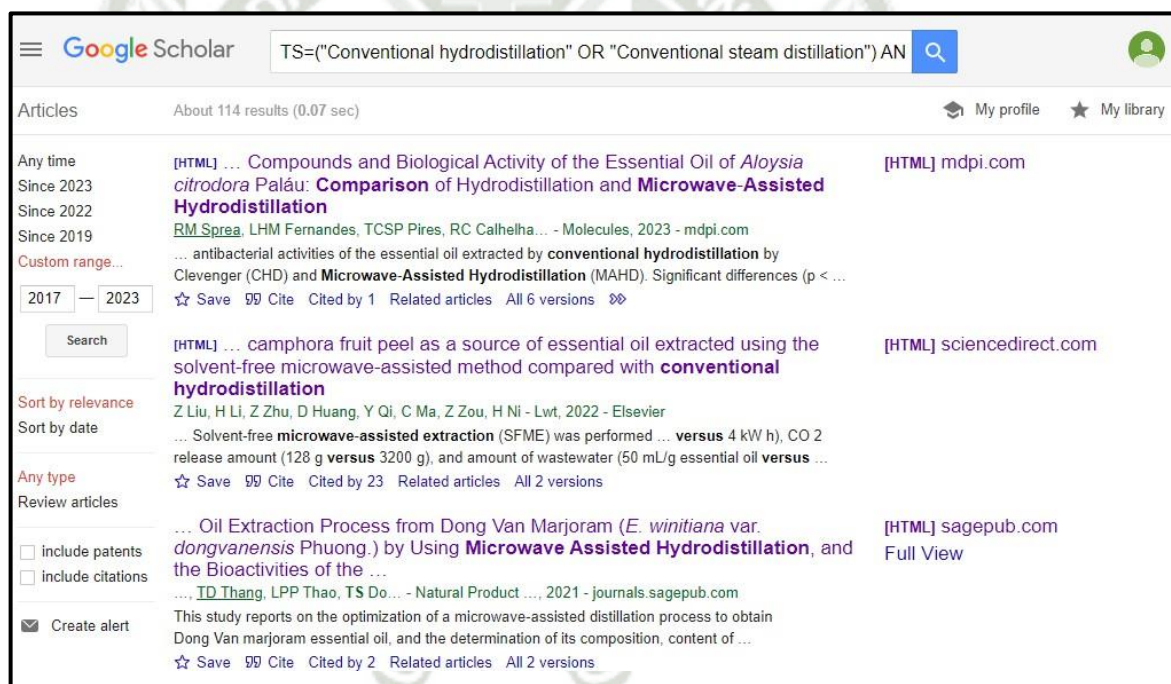


Figura 3 Búsqueda inicial en Google Scholar

Nota: Se considero el rango de tiempo desde 2017 hasta 2023 y se excluyeron citas y patentes.

Tras una minuciosa revisión de los resultados, se seleccionaron 17 documentos que cumplieran con los criterios establecidos, destacando por ser los únicos disponibles de manera gratuita y de índole comparativa.

2.5 Recogida de datos

Se optó por la utilización de la aplicación Mendeley para la organización eficiente de los documentos. Simultáneamente, se implementó una base de datos en Excel con el propósito de estructurar la información recopilada, destacando las características más relevantes para llevar a cabo la revisión sistemática.

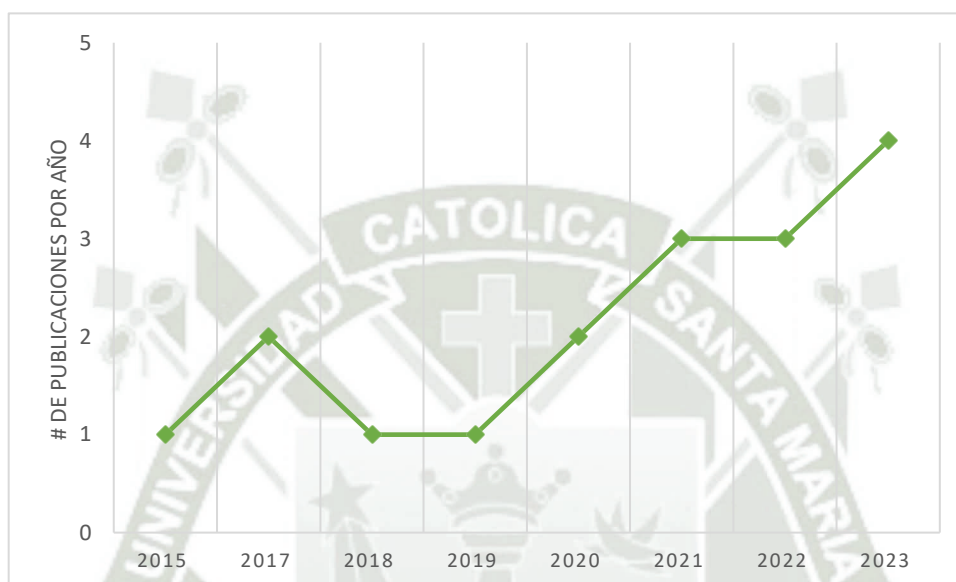


Figura 4 Numero de publicaciones por año

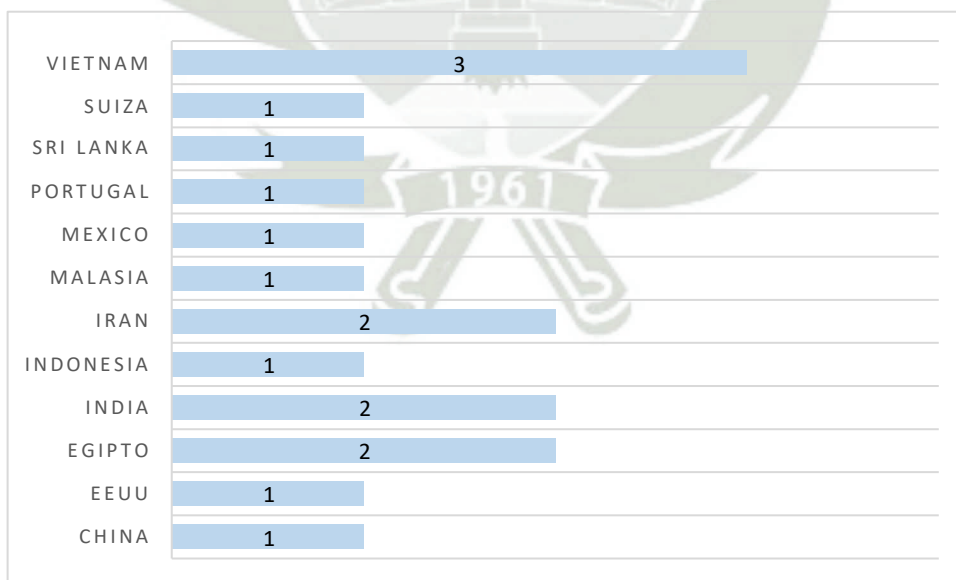


Figura 5 Países en los que se publicaron los documentos

La Figura 4 exhibe un aumento progresivo en la cantidad de publicaciones que contrastan los métodos de destilación clásica con la destilación asistida por microondas a lo largo de los años. Por otro lado, la Figura 5 detalla los distintos países donde se han llevado a

cabo investigaciones en este campo. Esta información puede resultar valiosa en la identificación de posibles colaboradores para futuras investigaciones.

3 CUERPO DE LA REVISION

3.1 Aceites esenciales

3.1.1 Definición

El término "aceite esencial" es una contracción del original "aceite quintaesencial". Procede de la idea aristotélica de que la materia se compone de cuatro elementos: fuego, aire, tierra y agua. El quinto elemento, o quintaesencia, se consideraba entonces el espíritu o fuerza vital. Se pensaba que la destilación y la evaporación eran procesos para extraer el espíritu de la planta, y esto también se refleja en nuestro lenguaje, ya que el término "aguardiente" se utiliza para describir bebidas alcohólicas destiladas como el brandy, el whisky y el aguardiente. El último de ellos vuelve a hacer referencia al concepto de extraer la fuerza vital de la planta. Hoy en día, por supuesto, sabemos que, lejos de ser espíritus, los aceites esenciales son de naturaleza física y están compuestos por complejas mezclas de sustancias químicas que encapsulan la esencia misma de la naturaleza

Los componentes químicos de los aceites esenciales son volátiles, ya que se eliminan de las plantas por destilación. Para tener puntos de ebullición lo suficientemente bajos como para permitir la destilación, y la destilación por vapor a presión atmosférica en particular, los componentes de los aceites esenciales deben tener pesos moleculares inferiores a 300 Da (masa molecular relativa al hidrógeno = 1) y suelen ser bastante hidrófobos (3).

Muchas de estas sustancias volátiles tienen diversas funciones ecológicas. Pueden actuar como mensajeros internos, como sustancias defensivas contra los herbívoros o como volátiles que no sólo dirigen a los enemigos naturales hacia estos herbívoros, sino que también atraen a los insectos polinizadores hacia su huésped. Su distinción respecto a otros aceites comunes radica en su naturaleza volátil y en la concentración de compuestos que los hace potentes y terapéuticos (10).

Todas las plantas poseen principalmente la capacidad de producir compuestos volátiles también denominados la "fuerza vital" de las plantas, aunque a menudo sólo en trazas (11). Las "plantas de aceites esenciales" en particular son aquellas especies vegetales que producen un aceite esencial de interés comercial. Dos circunstancias principales determinan que una planta pueda utilizarse como planta productora de aceites esenciales:

- Una mezcla única de volátiles como los aromas, estas producen y emiten inmediatamente los volátiles por las capas epidérmicas de sus pétalos. Por lo tanto, el rendimiento es muy bajo incluso en las flores de olor intenso, y además de la destilación hay que aplicar técnicas especiales, como por ejemplo el enfleurage, para recuperar los compuestos volátiles de la fragancia.
- Secreción y acumulación de volátiles en estructuras anatómicas especializadas. Éstas conducen a concentraciones más elevadas del aceite esencial en la planta. Dichas estructuras anatómicas de almacenamiento de aceites esenciales pueden ser idioblastos secretores (células secretoras), cavidades/conductos o tricomas glandulares.

Los idioblastos secretores son células individuales que producen un aceite esencial en grandes cantidades y retienen el aceite dentro de la célula. Las cavidades o conductos consisten en espacios de almacenamiento extracelular que se originan bien por esquizogenia (creada por la disolución de la lamela media entre las iniciales del conducto y la formación de un espacio intercelular) o por lisogenia (muerte programada y disolución de las células). En ambos casos, las células periféricas se convierten en células epiteliales muy activas en la síntesis y secreción de sus productos en las cavidades extracelulares. Los tricomas secretores (tricomas glandulares) pueden dividirse en dos categorías principales: tricomas peltados y capitados. Los peltados constan de una célula epidérmica basal, una célula pedunculada en el cuello y una cabeza secretora de 4-16 células con un gran espacio subcuticular en el ápice en el que se acumula el producto de secreción. Los tricomas capitados poseen sólo 1-4 células secretoras con un pequeño espacio subcuticular. Tales estructuras son típicas de las Lamiaceae (la familia de la menta), pero también de *Pelargonium sp* (3).

La concentración de aceites esenciales en estas plantas puede variar significativamente, oscilando entre el 0.01 % y el 10 % del peso total, lo que implica la necesidad de grandes cantidades de material vegetal para obtener pequeñas cantidades de aceite. Su singularidad radica en que, a diferencia de los compuestos sintéticos, solo los aceites puros poseen un espectro completo de compuestos que las imitaciones baratas no pueden replicar (11).

El creciente interés global en productos naturales ha elevado la demanda de plantas aromáticas, lo que se refleja en un resurgimiento en el uso de aceites esenciales (12). Estos compuestos no solo aportan aromas distintivos, sino que también exhiben propiedades medicinales, lo que los hace esenciales en prácticas como la Ayurveda y la medicina tradicional china (13). Su versatilidad se manifiesta en una variedad de ventajas terapéuticas, incluyendo actividades antioxidantes, antibacterianas, antifúngicas, antiinflamatorias, antitumorales y antivirales. Este amplio espectro de actividades ha posicionado a los aceites esenciales como sujetos prometedores en la investigación y desarrollo de fármacos, así como en aplicaciones industriales como enriquecedores alimentarios, potenciadores de alimentos, antioxidantes y agentes saborizantes y conservantes en la industria alimentaria (12).

La tecnología de producción de aceites esenciales es un aspecto crítico para mejorar el rendimiento y la calidad. Métodos tradicionales, como la destilación de agua, la destilación de vapor y la maceración, han resistido la prueba del tiempo y siguen siendo relevantes en diversas partes del mundo. Estos métodos, adaptados a diferentes materiales vegetales, ilustran la complejidad y la diversidad de las estructuras secretoras de aceite en las plantas. La composición de los aceites volátiles también se ve afectada por variables ontogénicas, estacionales y ambientales, enfatizando la importancia de técnicas de extracción que preserven la integridad del producto final (14).

3.1.2 Composición Química:

Los aceites esenciales (EOs) son productos de diversas estructuras diferenciadas, cuya cantidad y características varían ampliamente. La composición del aceite esencial suele cambiar entre las distintas partes de la planta como se explicó en el párrafo anterior, esto debido al polimorfismo fitoquímico que a menudo es

distintos entre los órganos de la misma como en los “pelos” o tricomas secretorios, células epidérmicas, células secretoras internas y bolsas secretoras para luego localizarse en el citoplasma como secreciones celulares, estas mezclas son complejas y pueden contener más de 300 compuestos diferentes.

La naturaleza ha proporcionado una gama asombrosamente rica y diversa de sustancias químicas, existen patrones de estructura molecular que dan pistas sobre cómo se construyeron las moléculas. Estas vías sintéticas han sido confirmadas ahora mediante experimentos y servirán para estructurar el contenido de este capítulo. Los compuestos principales respectivos se derivan principalmente de sólo tres vías biosintéticas, la vía del mevalonato que conduce a los sesquiterpenos, la vía del metil-eritritol que conduce a los mono- y diterpenos, y la vía del ácido shikímico en ruta hacia los fenilpropanos. Sin embargo, existe un número casi incontable de sustancias individuales y una enorme variación en la composición de los aceites esenciales (15).

Las sustancias químicas producidas por la naturaleza pueden clasificarse en dos grupos principales. Los metabolitos primarios son aquellos que son universales en toda la familia vegetal y animal y constituyen los componentes básicos de la vida. Los cuatro subgrupos de metabolitos primarios son las proteínas, los carbohidratos, los ácidos nucleicos y los lípidos. Estas familias de sustancias químicas contribuyen poco a los aceites esenciales, aunque algunos de sus componentes son productos de degradación de uno de estos grupos, siendo los lípidos los más significativos. Los metabolitos secundarios son los que se dan en unas especies y no en otras, y se suelen clasificar en terpenoides, shikimatos, policétidos y alcaloides. Los más importantes en lo que respecta a los aceites esenciales son los terpenoides y los shikimatos ocupan el segundo lugar. Hay varios policétidos de importancia en los aceites esenciales, pero muy pocos alcaloides. Los terpenoides, los shikimatos y los policétidos serán, por tanto, el tema principal de este capítulo(3).

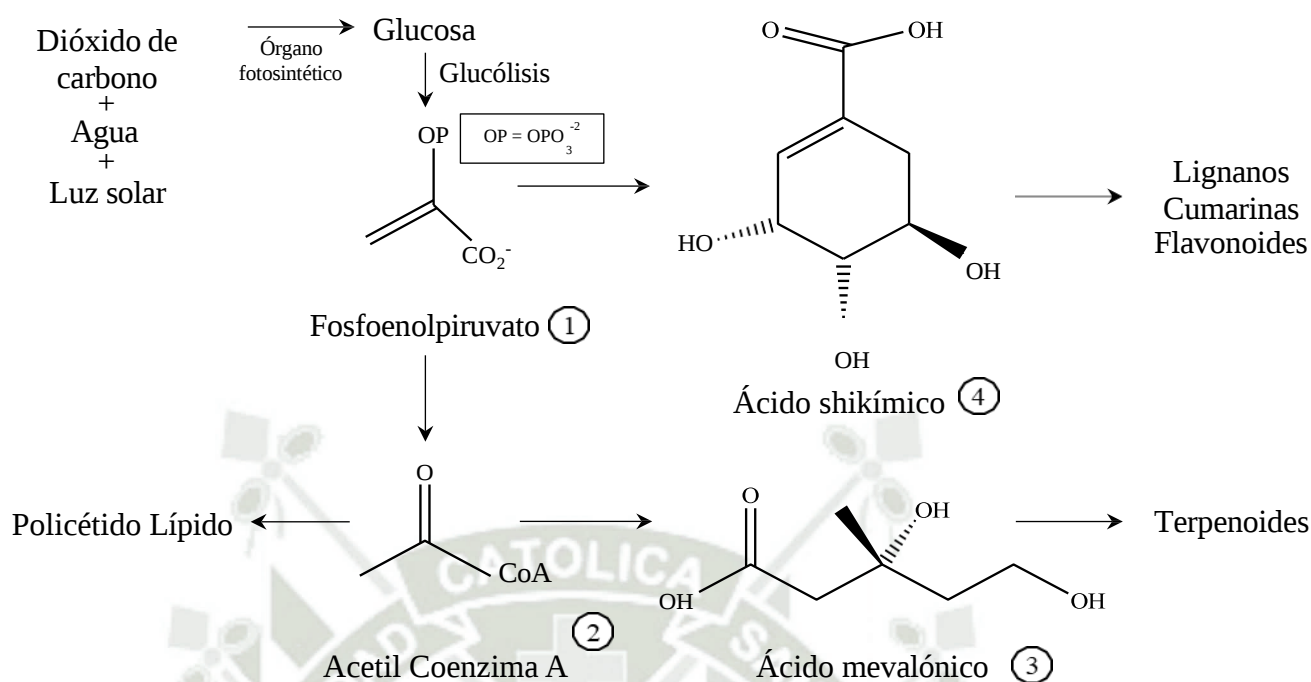


Figura 6 Patrón general de biosíntesis de metabolitos secundarios.

Nota: Esquema general de las reacciones biosintéticas, mediante la fotosíntesis se convierte el agua y dióxido de carbono en glucosa, la escisión de la glucosa produce fosfoenolpiruvato (1), bloque de construcción clave para la familia del shikimato (4) de productos naturales. La descarboxilación del fosfoenolpiruvato da la unidad de dos carbonos del acetato y éste se esterifica con la coenzima-A para dar acetil CoA (2). La autocondensación de esta especie da lugar a los policétidos y los lípidos. El acetil CoA es también un punto de partida para la síntesis del ácido mevalónico (3), que es el material de partida clave para los terpenoides.

A. Policétidos y lípidos

La vía biosintética más sencilla de apreciar es la de los policétidos y lípidos, la secuencia de reacción clave se muestra en la figura 7. Dado que ésta es la ruta por la que se producen los ácidos grasos, se explica por qué los ácidos grasos son en su mayoría pares. Si se repite el proceso con este nuevo ácido como materia prima, se puede ver que se pueden construir varios polioxiácidos, cada uno de los cuales tendrá un grupo carbonilo en cada átomo de carbono alterno, de ahí el nombre de policétidos. Alternativamente, la función cetona puede reducirse al alcohol correspondiente y, a continuación, eliminarse e hidrogenarse el doble enlace. Esta secuencia de reacciones da un homólogo superior del ácido graso de partida, que contiene dos átomos de carbono más en la cadena. Los ácidos grasos de cadena larga, saturados o insaturados, son la base de los lípidos (15).

Existen tres vías principales por las que se forman los componentes de los aceites esenciales y otros extractos naturales en esta familia de metabolitos: las reacciones de condensación de los policétidos, la degradación de los lípidos y la ciclización del ácido araquidónico.

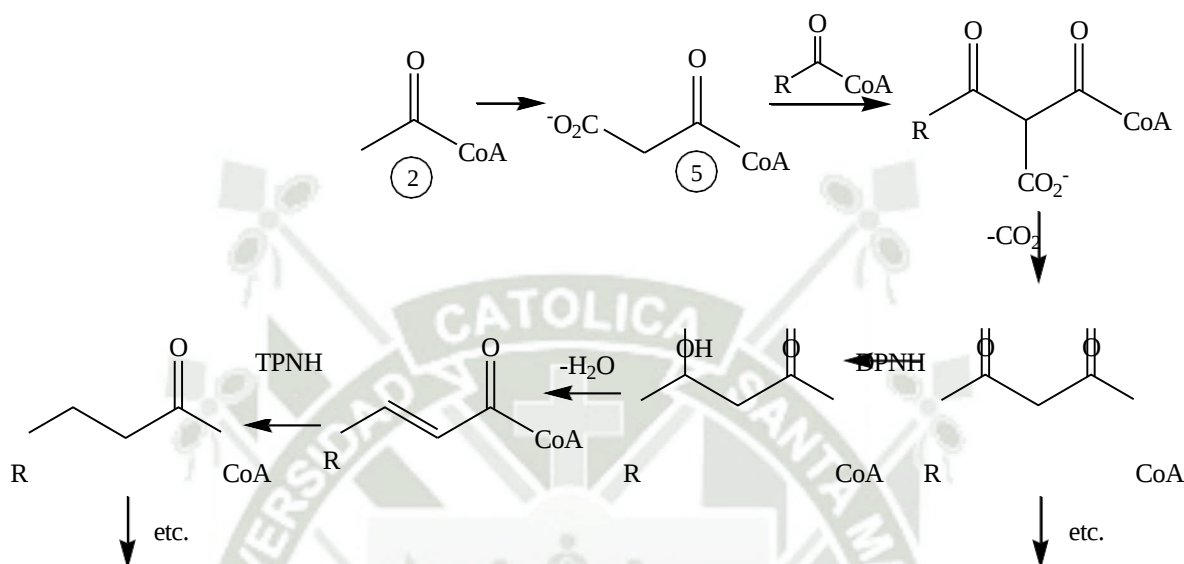


Figura 7 Biosíntesis de policétidos y lípidos

Nota: El acetil CoA (2) se carboxila para dar malonil CoA (5) y el anión de éste ataca al éster de CoA de un ácido graso. Obviamente, el ácido graso podría ser ácido acético, con lo que se trata de una segunda molécula de acetil CoA. Tras la descarboxilación, el producto es un b-cetoéster con un esqueleto que es dos átomos de carbono más largo que el primer ácido graso.

La figura 8 muestra cómo la condensación de los policétidos puede dar lugar a anillos fenólicos. Los fenoles de los policétidos pueden distinguirse de los sistemas fenólicos de los shikimatos por el hecho de que los primeros suelen conservar evidencias de oxigenación en átomos de carbono alternos, ya sea como ácidos, cetonas, fenoles o como uno de los extremos de un doble enlace(3).

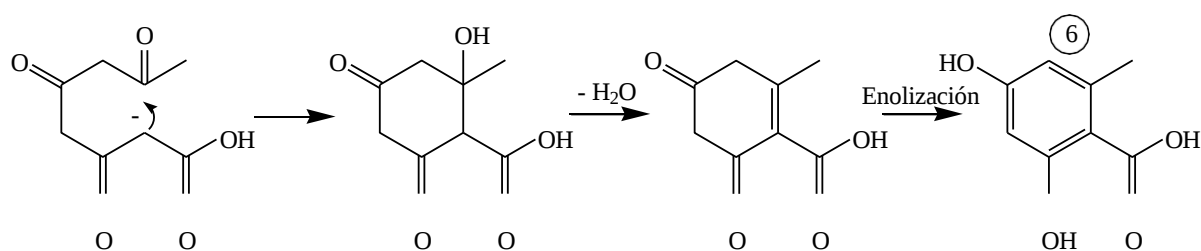


Figura 8 La biosíntesis de los policétidos

Nota: La condensación aldólica intramolecular del ácido tri-ceto-octanoico y la posterior enolización da lugar al ácido orsellínico (6).

La principal ruta metabólica de los ácidos grasos implica la β -oxidación y escisión dando acetato y un ácido graso con dos átomos de carbono menos que el ácido de partida, es decir, la reacción inversa de la biosíntesis. Sin embargo, también existen otras rutas de oxidación que dan lugar a nuevos metabolitos que no estaban en la ruta biosintética(3). Por ejemplo, la figura 10 muestra cómo la oxidación alílica de un ácido dienoico y su posterior escisión pueden dar lugar a la formación de un aldehído.

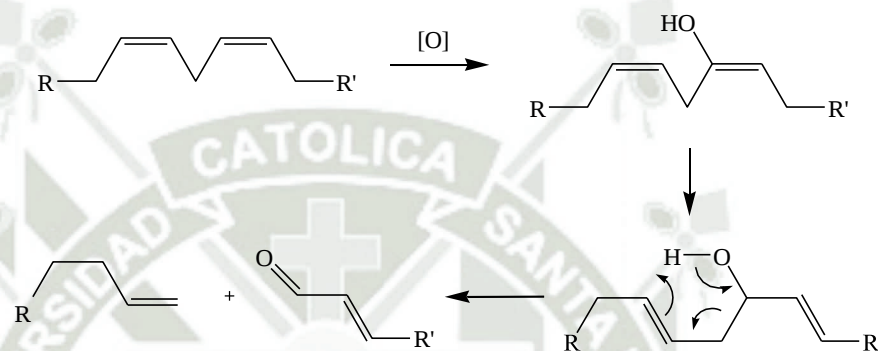


Figura 9 Fragmentación de grasas poliinsaturadas para dar aldehídos.

La oxidación alílica seguida de lactonización en lugar de escisión puede, obviamente, dar lugar a lactonas. La reducción de la función ácida a los alcoholes o aldehídos correspondientes también es posible, al igual que las reacciones de hidrogenación y eliminación. De este modo, se dispone de una amplia variedad de entidades alifáticas.

B. Derivados del ácido shikímico

El ácido shikímico es un intermediario sintético clave para las plantas, ya que es el precursor clave tanto de los flavonoides como de la lignina. Los flavonoides son importantes para las plantas como antioxidantes, colorantes, agentes protectores contra la luz ultravioleta y similares, y la lignina es un componente clave de los materiales estructurales de las plantas, especialmente de los tejidos leñosos. El ácido shikímico se sintetiza a partir de fosfoenolpiruvato y eritrosa 4-fosfato, como se muestra en la figura 11, por lo que su biosíntesis parte de la vía de los carbohidratos. Sus derivados suelen reconocerse por el patrón característico del shikimato de un anillo de seis miembros con un sustituyente de uno o tres carbonos en la posición uno y oxigenación en las posiciones tercera, y/o cuarta, y/o quinta. Sin embargo, los

átomos de oxígeno de los productos finales no son los del shikimato de partida, ya que éstos se pierden inicialmente y luego se sustituyen. En la biosíntesis del shikimato, a menudo es posible llegar a un producto dado mediante diferentes secuencias de las mismas reacciones, y la ruta exacta utilizada dependerá de la composición genética de la planta.

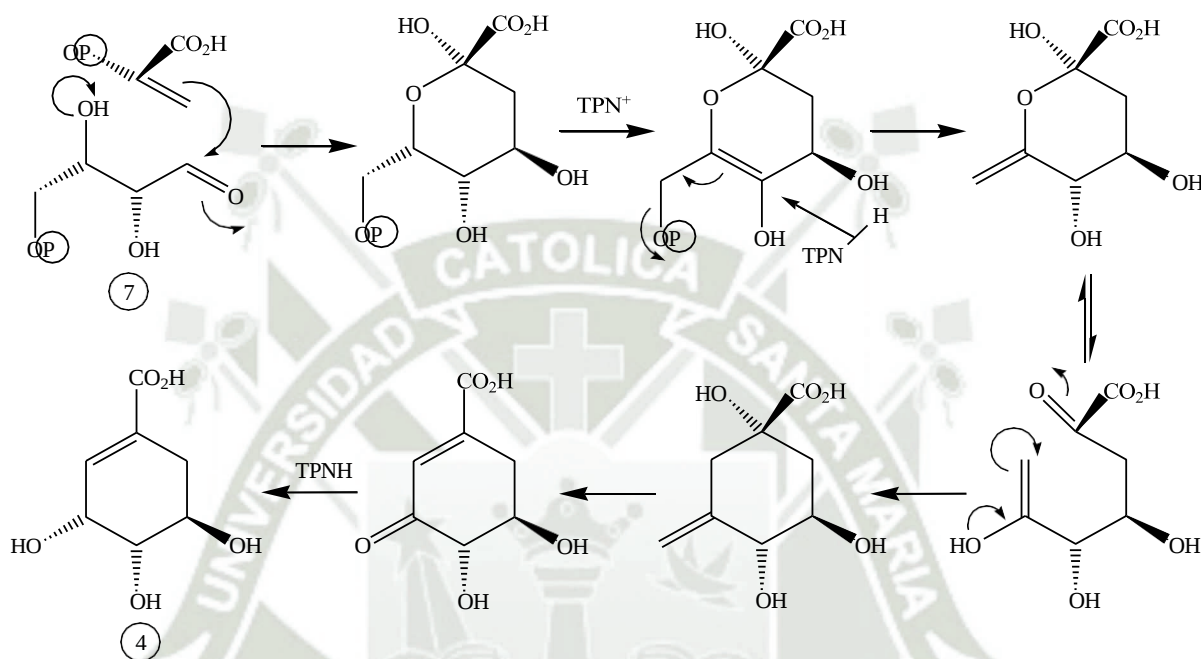


Figura 10 Biosíntesis del ácido shikímico.

Nota: El ácido shikímico (4) se sintetiza a partir de fosfoenolpiruvato (1) y eritrosa 4-fosfato (7)

La aromatización del ácido shikímico, sin adición de los tres átomos de carbono adicionales procedentes del fosfoenolpiruvato, da derivados del ácido benzoico. El propio ácido benzoico se encuentra en algunos aceites y sus ésteres están muy extendidos por ejemplo el alcohol bencílico, el benzaldehído y sus derivados. La hidroxilación o aminación del ácido benzoico da lugar a otra serie de productos naturales y algunos de los más significativos, en términos de olores de los aceites esenciales.

C. Terpenoides

Los terpenoides son, con diferencia, el grupo más importante de productos naturales en lo que a aceites esenciales se refiere. Algunos autores, sobre todo en la literatura más antigua, se refieren a ellos como terpenos, pero este término se restringe hoy en día a los hidrocarburos monoterpenoides. Se definen como

sustancias compuestas por unidades de isopreno (2-metilbutadieno). El isopreno no suele encontrarse en los aceites esenciales y en realidad no es un intermediario en la biosíntesis, pero el esqueleto de 2-metilbutano es fácilmente discernible en los terpenoides. La figura muestra las estructuras de algunos terpenoides. En el caso del geraniol, un extremo de una unidad de isopreno se une al extremo de otra formando una estructura lineal (2,6-dimetiloctano) (3).

En el guaiol, hay tres unidades de isopreno unidas para formar una molécula con dos anillos. Es fácil imaginar cómo las tres unidades se unieron primero formando una cadena y luego la formación de enlaces de un punto a otro de la cadena produjo los dos anillos. De forma similar, se utilizaron dos unidades de isopreno para formar la estructura bicíclica del α -pineno (16).

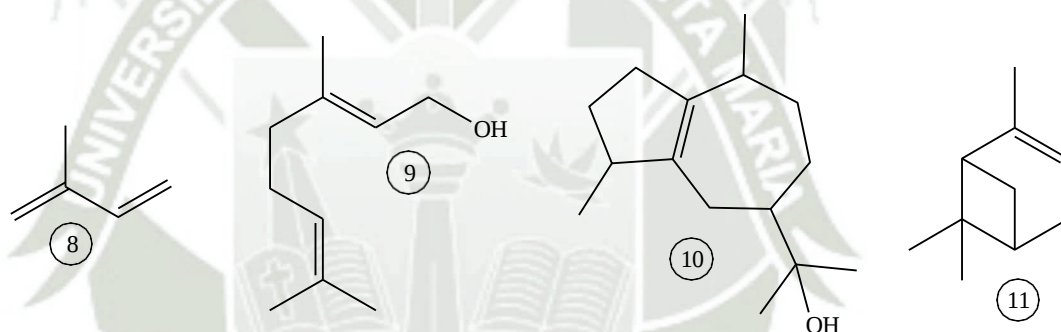


Figura 11 Unidades de isopreno en algunos terpenoides comunes.

Nota: Estructuras químicas de Isopreno (8), geraniol (9), guaiol (10) y α -pineno (11)

La dirección de acoplamiento de las unidades de isopreno es casi siempre en una dirección, el llamado acoplamiento cabeza-cola. Esto se muestra en la figura 12. El extremo ramificado de la cadena se denomina cabeza de la molécula y el otro, cola.

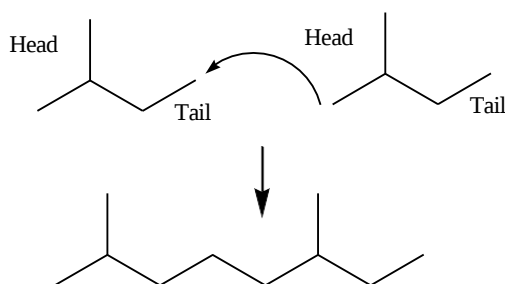


Figura 12 Acoplamiento cabeza-cola de dos unidades de isopreno.

Este patrón de acoplamiento se explica por la biosíntesis de los terpenoides. El intermediario clave es el ácido mevalónico, que se fabrica a partir de tres moléculas de acetyl CoA. La fosforilación del ácido mevalónico seguido de la eliminación del alcohol terciario y la descarboxilación concomitante del grupo ácido adyacente da pirofosfato de isopentenilo.

Del mecanismo mostrado en la figura 13 se deduce claramente que las estructuras terpenoides siempre contendrán un múltiplo de cinco átomos de carbono cuando se forman por primera vez. Los primeros terpenoides que se estudiaron contenían 10 átomos de carbono por molécula y se denominaron monoterpenoides. Esta nomenclatura se ha mantenido y así los que tienen 5 átomos de carbono se conocen como hemiterpenoides; los que tienen 15, sesquiterpenoides; los que tienen 20, diterpenoides; y así sucesivamente. En general, sólo los hemiterpenoides, monoterpenoides y sesquiterpenoides son lo suficientemente volátiles como para ser componentes de los aceites esenciales. Los productos de degradación de los terpenoides superiores sí aparecen en los aceites esenciales, por lo que se incluirán en este capítulo (3).

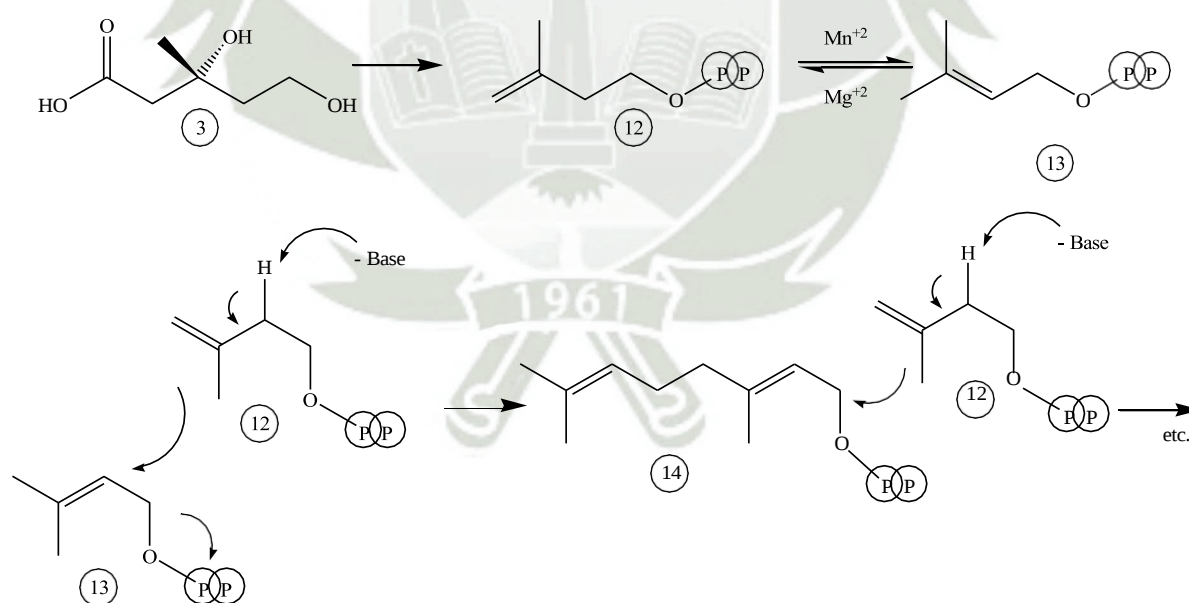


Figura 13 Acoplamiento de unidades C5 en la biosíntesis de terpenoides.

Nota: El pirofosfato de isopentenilo (12) puede isomerizarse para dar pirofosfato de prenilo (13). El acoplamiento de estas dos unidades de 5 carbonos da una unidad de 10 carbonos, el pirofosfato de geranilo (14) y nuevas adiciones de pirofosfato de isopentenilo (12) dan lugar a unidades de 15, 20, 25 y así sucesivamente.

D. Hemiterpenoides

Muchos alcoholes, aldehídos y ésteres, con un esqueleto de 2-metilbutano, aparecen como componentes menores en los aceites esenciales. No es sorprendente, en vista de la biosíntesis, que el patrón de oxidación más común sea el del prenol, es decir, 3-metilbut-2-eno-1-ol. Sin embargo, se ha observado oxidación en todas las posiciones. Ésteres como el acetato de prenilo confieren notas de salida afrutadas a los aceites que los contienen, y los tioésteres correspondientes contribuyen al olor característico del gálbano (16).

E. Monoterpenoides

El pirofosfato de geranilo es el precursor de los monoterpenoides. La heterólisis de su enlace carbono-oxígeno da lugar al carbocatión geranilo. En los sistemas naturales, éste y otros carbocationes discutidos en este capítulo no existen como iones libres sino como carbocationes incipientes retenidos en sitios activos de enzimas y esencialmente incitados a reacciones catiónicas por el acercamiento de un reactivo adecuado. Las reacciones se describen en términos químicos, pero todas están bajo control enzimático, y las enzimas presentes en la planta determinarán los terpenoides que producirá. Así, la composición del aceite esencial puede dar información sobre la composición genética de la planta. En la figura 14 se muestra una selección de algunas de las rutas biosintéticas clave hacia los monoterpenoides (16)..

Los hidrocarburos monoterpenoides, presentes habitualmente en los aceites esenciales, pueden ser artefactos del proceso de extracción, como el p-cimeno formado por ciclización y oxidación. El mirceno predomina en el lúpulo y las hierbas, mientras que el limoneno está presente sobre todo en los aceites de cítricos. El α -felandreno y el β -felandreno se encuentran en los aceites de eucalipto y pino. El α -pineno, el β -pineno y el 3-careno son componentes principales de la trementina.

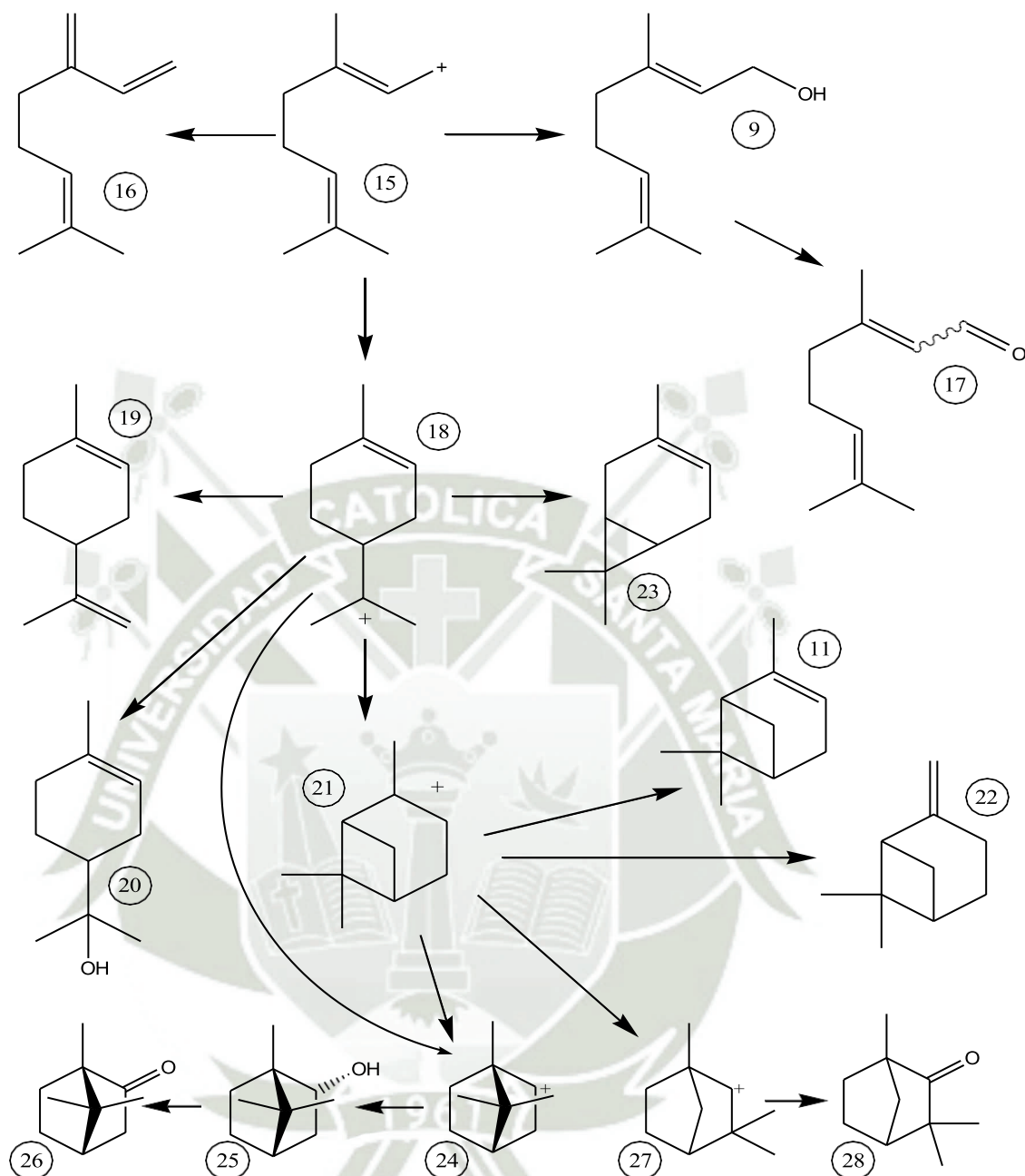


Figura 14 Formación de esqueletos monoterpénidos.

Nota: La reacción del carbocatión geranilo (15) con agua da geraniol (9) que posteriormente puede oxidarse a citral (17). La pérdida de un protón del geranilo da mirceno (16) y éste puede isomerizarse a otros hidrocarburos acíclicos. Una reacción de adición intramolecular electrofílica del geranilo da el carbocatión monocíclico (18) que puede eliminar un protón para dar limoneno (19) o añadir agua para dar a-terpineol (20). Una segunda adición intramolecular da el carbocatión pinilo (21) que puede perder un protón para dar α-pineno (11) o β-pineno (22). El carbocatión pinilo (21) también se puede alcanzar directamente a partir del carbocatión mentilo (18). El careno (23), otro material bicíclico, puede producirse mediante reacciones similares. El reordenamiento del carbocatión pinilo (21) da el carbocatión bornilo (24). La adición de agua a éste da borneol (25) y éste puede oxidarse a alcanfor (26). Un reordenamiento alternativo del pinilo da el esqueleto fenquilo (27) del que se deriva la fencona (28).

El geraniol y el nerol, derivados del pirofosfato de geranilo, son comunes en los aceites esenciales, predominando el geraniol en la *Monarda fistulosa* y la palmarosa. El citronelol se encuentra en los aceites de rosa, geranio y citronela. Estos alcoholes, conocidos como alcoholes de rosa, son la clave del olor a rosa y suelen encontrarse como ésteres en los aceites esenciales(3).

El linalol, producido por hidrólisis del pirofosfato de geranilo, abunda en la hoja de azufaifo y otras plantas. Su acetato es importante en los aceites de lavanda y de hojas de cítricos. α -Terpineol, terpinen-4-ol y mentol destacan por su amplia presencia y su efecto refrescante, especialmente en los aceites de menta. El borneol y el isoborneol están presentes en varios aceites esenciales, y el timol tiene propiedades antimicrobianas. Los éteres monoterpenoides como el cineol son significativos en el aceite de eucalipto, el mentofuran en el de menta y el óxido de rosa en los aceites de rosa y geranio. Los aldehídos monoterpénicos, el citral (geranial y neral) y el citronelal, destacan por su olor a limón, con altas concentraciones en la hierba limón y el *Eucalyptus citriodora*(3).

Las cetonas monoterpenoides comunes incluyen la carvona, presente en la menta verde y la alcaravea, la mentona en la menta y la salvia, y la pulegona en el poleo. El alcanfor y la fenchona contribuyen a los olores de la lavanda, la salvia, el romero y el hinojo (3).

F. Sesquiterpenoides

Los sesquiterpenoides, que contienen 15 átomos de carbono, tienen menor volatilidad y puntos de ebullición más altos que los monoterpenoides. Aunque son menos los que contribuyen al olor de los aceites esenciales, los que lo hacen suelen tener umbrales de olor bajos y sirven como importantes endógenos y fijadores de los componentes volátiles. El farnesol es el precursor de todos los sesquiterpenoides, sintetizado a partir de pirofosfato de isopentenilo y pirofosfato de geranilo. El carbocatión farnesilo da lugar a diversas estructuras cíclicas, como el bisabolano y el khusano. El farnesol y el nerolidol tienen varios isómeros que se encuentran en la naturaleza. El α -bisabolol, presente en el *Myoporum crassifolium*, la manzanilla, la lavanda y el romero, tiene propiedades antiinflamatorias (3).

Entre los más famosos sesquiterpenoides están los cariofileno y el α -humuleno, siendo el clavo y el lúpulo fuentes notables. También se encuentran el longifoleno, se encuentra en la trementina india, y el guaicol y el bulnesol en el aceite de madera de guayaco. El guaiazuleno y el camazuleno tienen propiedades antiinflamatorias y son de color azul, importantes en el aceite de manzanilla. Los carotenoides son tetraterpenoides, y el β -caroteno forma iononas y damasconas por degradación. Las iononas y las damasconas tienen olores intensos, contribuyendo significativamente a los aromas de los aceites esenciales. El safranal y otros productos de degradación de carotenoides también influyen en los olores de los aceites esenciales. Las iononas, derivadas del triterpenoide iripallidal en los rizomas del iris, difieren estructuralmente de las iononas, pero contribuyen a la fragancia distintiva del iris (3).

3.1.3 Breve historia de su uso

Desde tiempos inmemoriales, los aceites esenciales (EOs) han sido parte integral de diversas culturas en todo el mundo, desempeñando roles tanto prácticos como espirituales (17). Se desconoce si inicialmente se usaban con fines curativos o domésticos, pero hoy en día se les otorga gran consideración por su eficacia en procedimientos clínicos.

Antiguo Egipto, China, India y Grecia: Los egipcios antiguos, aproximadamente en el 4500 a.C., utilizaban aceites aromáticos en cosméticos y ungüentos, fusionando preparaciones herbales como anís, cedro, cebolla, mirra y uvas en perfumes o medicinas (17). En China e India, entre el 3000 y el 2000 a.C., se registró el uso de más de 700 sustancias, incluyendo canela, jengibre y sándalo, con propiedades curativas. La influencia se extendió a Grecia, donde Hipócrates, padre de la medicina griega, prescribía "un baño perfumado y un masaje aromático todos los días para una buena salud" (17)

Antigua Roma y Medio Oriente: En Roma, los aceites esenciales se utilizaban profusamente para aromatizar todo, desde camas hasta ropa, cortinas y más. Dioscórides, médico griego empleado por el ejército romano, documentó extensamente el uso de aceites esenciales en medicina. En el Medio Oriente, las referencias bíblicas destacan el uso de mirra y frankincienso, y fueron los árabes quienes desarrollaron métodos de destilación rentables y comerciales (17).

Edad Media Europea: En Europa, la introducción de aceites esenciales se retrasó hasta después de las Cruzadas, cuando veteranos retornados compartieron el conocimiento de destilación y perfumería. Sin embargo, la asociación religiosa entre la elaboración de hierbas y la brujería ralentizó su aceptación. Durante la Peste Negra, se quemaban ocasionalmente pino y frankincienso para alejar a los "espíritus malignos" (17).

Siglo XX: El verdadero auge de la aromaterapia comenzó en el siglo XX. En 1910, el químico cosmético francés Gattefosse, al quemarse la mano, descubrió accidentalmente las propiedades curativas del aceite esencial de lavanda. A partir de este incidente, nació el término "aromaterapia" cuando Gattefosse publicó su libro en 1928 (18). Durante la Guerra de Indochina (1948-1959), el médico francés Jean Valnet descubrió las propiedades antisépticas de los aceites esenciales, lo que llevó a un mayor interés y reconocimiento global. En la década de 1980, el Dr. Daniel Péroël y el bioquímico Pierre Franchomme documentaron las propiedades médicas de más de 270 aceites esenciales (18).

3.1.4 Importancia en diversas industrias

La versatilidad de los EOs, a pesar de su alta volatilidad y susceptibilidad a la oxidación, ha llevado a su aplicación en diversas industrias gracias a desarrollos tecnológicos emergentes, en la actualidad, la investigación científica ha explorado y capitalizado su eficacia natural, especialmente en los sectores de alimentos y salud pública. Distintos EOs han demostrado una amplia gama de actividades biológicas, desde propiedades antimicrobianas hasta funciones antioxidantes. En el ámbito alimentario, donde la resistencia antimicrobiana plantea desafíos, los EOs han surgido como candidatos potentes con actividad antimicrobiana contra diversas bacterias contaminantes (19).

En la industria alimentaria, los EOs no solo se utilizan como aditivos para mejorar el sabor y aroma de los alimentos, sino que también actúan como agentes conservantes debido a sus componentes antimicrobianos, mostrando eficacia a concentraciones mínimas. Además, en la agricultura, se han realizado estudios recientes que se centran en los EOs y sus extractos como alternativas naturales a los productos químicos sintéticos para el control de plagas (20).

La nanoencapsulación ha revolucionado la aplicación de EOs al mejorar su estabilidad física y protegerlos contra factores ambientales. Este avance se refleja en la preservación de alimentos y la prevención de la producción de micotoxinas causadas por hongos. Además, los EOs se utilizan como aditivos y potenciadores de sabor en alimentos, ganando popularidad por la variedad de aromas que aportan (19).

En el ámbito farmacéutico y biomédico, la aplicación de sistemas de nanotransporte de EOs ha demostrado eficacia, ofreciendo características como liberación controlada de fármacos y protección contra factores ambientales. La combinación sinérgica de EOs y nanopartículas ha mejorado significativamente la actividad antimicrobiana, abriendo posibilidades prometedoras en la lucha contra enfermedades infecciosas (20).

Además de su impacto en la industria alimentaria y farmacéutica, los EOs se exploran como alternativas ecológicas en la agricultura, sustituyendo pesticidas químicos. También se investiga su aplicación en textiles antimicrobianos, con microencapsulación de EOs que brindan propiedades antimicrobianas a tejidos, especialmente en el ámbito médico. En conclusión, la relevancia de los EOs en diversas industrias se destaca por su versatilidad y múltiples aplicaciones. La información proporcionada se basa en estudios científicos, y para obtener detalles específicos, se hace referencia a las fuentes correspondientes (19) (20)

3.2 Métodos de Extracción:

La elección del método de extracción desempeña un papel crucial en la calidad y pureza final de los aceites esenciales obtenidos. La transferencia de uno o más componentes de un recurso biológico desde su material de origen a una fase fluida, seguida de la separación de la fase fluida y la recuperación del componente o componentes del fluido, se conoce como extracción.

Estos métodos se pueden clasificar en dos categorías principales: métodos clásicos / convencionales, y técnicas innovadoras / no tradicionales. Según el principio de extracción, la extracción con disolventes, la destilación, el prensado y la sublimación son algunos de los procesos de extracción más utilizados siendo el primero el método más utilizado. La extracción de productos naturales se realiza por etapas:

- A. El disolvente penetra a través de la matriz sólida
- B. El soluto se disuelve en el disolvente
- C. El soluto se difunde fuera de la matriz sólida
- D. Se recogen los solutos extraídos

Cualquier factor que mejore la difusividad y la solubilidad en los pasos anteriores facilitará la extracción. Las propiedades del disolvente de extracción, el tamaño de las partículas de las materias primas, la relación disolvente/sólido, la temperatura de extracción y la duración de la extracción afectarán también a la eficacia de la extracción

3.2.1 Métodos convencionales de extracción

El objetivo principal de cualquier técnica de extracción es optimizar la recuperación de los compuestos objetivo a partir de una muestra, garantizando al mismo tiempo la integridad de los compuestos de interés y minimizando la coextracción de contaminantes no deseados o sustancias químicas no deseadas. La industria y los investigadores siguen confiando en los procedimientos de extracción tradicionales o con disolventes. En estos procedimientos tradicionales se utilizan métodos de extracción sólido-líquido como formas específicas de destilación al vapor, maceración y extracción Soxhlet para extraer sustancias químicas de una matriz sólida utilizando disolventes. Cabe destacar que estos procedimientos suelen llevar mucho tiempo y requieren cantidades considerables de disolventes orgánicos peligrosos, lo que plantea problemas de seguridad para el personal en contacto con estas sustancias químicas, así como para los consumidores. Estas preocupaciones por la seguridad, junto con los nuevos deseos de los consumidores de artículos alimentarios más sostenibles y naturales, han ayudado al desarrollo de varias tecnologías y procesos industriales potenciales. Las tecnologías tradicionales, por otro lado, se siguen utilizando y modificando para adaptar los equipos tradicionales a las demandas del mercado

A. Extracción por prensado

El prensado es un proceso sin disolventes para extraer aceite comestible de diversas fuentes, como frutos secos y semillas. El proceso de extracción por prensado se divide en dos etapas: la preparación de la muestra y la extracción. El término "preparación de la muestra" se refiere al proceso de aplicar diferentes pretratamientos a una muestra antes de la extracción con el fin de

mejorar la eficacia de la extracción. Las actividades de limpieza, rotura, trituración y calentamiento, por ejemplo, pueden formar parte del proceso de preparación de la muestra. El calentamiento de las muestras suele realizarse a una temperatura de 90-115°C. El paso de pretratamiento tiene como objetivo degradar o ablandar la estructura celular de la muestra y disminuir el contenido de humedad, lo que puede mejorar la eficacia de la etapa de extracción posterior (21).

El procedimiento de extracción se llevará a cabo utilizando un equipo de prensa de tornillo tras la fase de calentamiento. Durante la fase de prensado pueden obtenerse rendimientos de aceite de hasta el 71%-82% (21). Aunque la extracción por prensado es ineficiente, sigue siendo la única técnica de extracción en ciertas regiones rurales. Debido a la importante cantidad de aceite que queda en la torta de prensado, que suele ser del 20%-30%, el proceso suele continuar con la extracción con disolventes. Los límites de la extracción por prensado podrían ser que es difícil hacerlo a gran escala y que varias variables influyen en el rendimiento de la recuperación, como el tipo de muestra, la selección de la expulsora, la temperatura de extracción a presión y el tiempo (22).

Existen dos formas de extracción por prensado: el prensado en frío y el prensado en caliente. La diferencia fundamental entre ambos procedimientos es que el prensado en frío no utiliza más calor que el creado por la fricción durante la operación de prensado. El prensado en frío es la técnica preferida de las dos porque puede generar productos oleaginosos de mayor calidad, además que, dado que el aceite es un producto sensible al calor, el calor utilizado en el proceso de prensado en caliente puede acelerar la oxidación del aceite, disminuyendo su calidad. En cambio, el prensado en frío tiene un rendimiento de extracción menor que el prensado en caliente, pero se prefiere, sobre todo en la industria de alimentos. Debido a su alta calidad, el aceite prensado en frío suele tener un precio superior en el mercado. Dado que el prensado en frío se emplea a menudo para extraer aceite de alta calidad, una menor producción de aceite se convierte en un problema que debe abordarse, como resultado, la industria ha intentado mejorar el proceso de extracción

utilizando diferentes formas de equipos de prensado, como prensas hidráulicas.

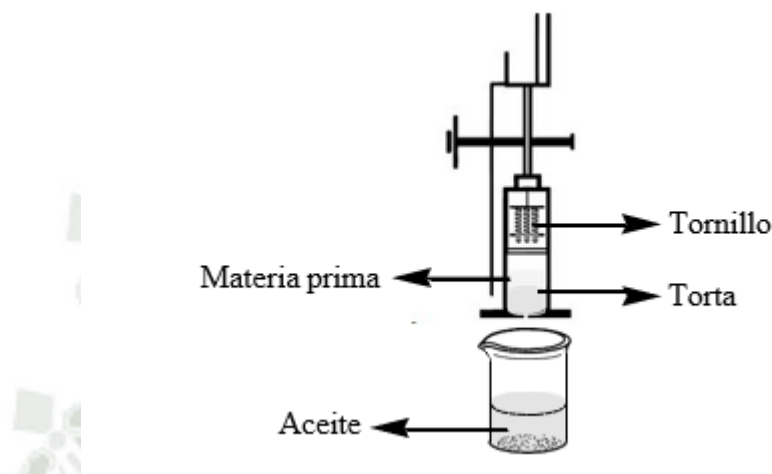


Figura 15 Representación esquemática del equipo de extracción de la prensa de tornillo – escala laboratorio.

Nota: Imagen inspirada en la representación de Riayatsyah, T. M. I., Sebayang, A. H., Silitonga, A. S., Padli, Y., Fattah, I. M. R., Kusumo, F., ..., Mahlia, T. M. I. (22)

B. Extracción vortical o turbo

Una técnica de extracción moderada es una maceración básica sin embargo se han hecho muchos intentos para reducir el tiempo necesario. Aunque la agitación y la mezcla proporcionan el mismo rendimiento que la maceración motora, la extracción vortical o turbo es más rápida puesto que utiliza una batidora rápida o un homogeneizador como consecuencia, el equilibrio de maceración se alcanza considerablemente más rápido y en un periodo de tiempo asombrosamente corto. La energía producida por la rápida mezcla y trituración de la materia prima eleva la temperatura en la extracción, lo que no es deseable debido al riesgo de degradación de los componentes termolábiles. En consecuencia, la elevación de la temperatura debe mantenerse al mínimo y se conseguir deteniendo la operación o enfriando el recipiente. Se ha demostrado que, en contraste con la maceración y la permeación, la turbo extracción es mejor que la maceración y está a la par con la permeación cuando se emplea el enfoque vortical (25).

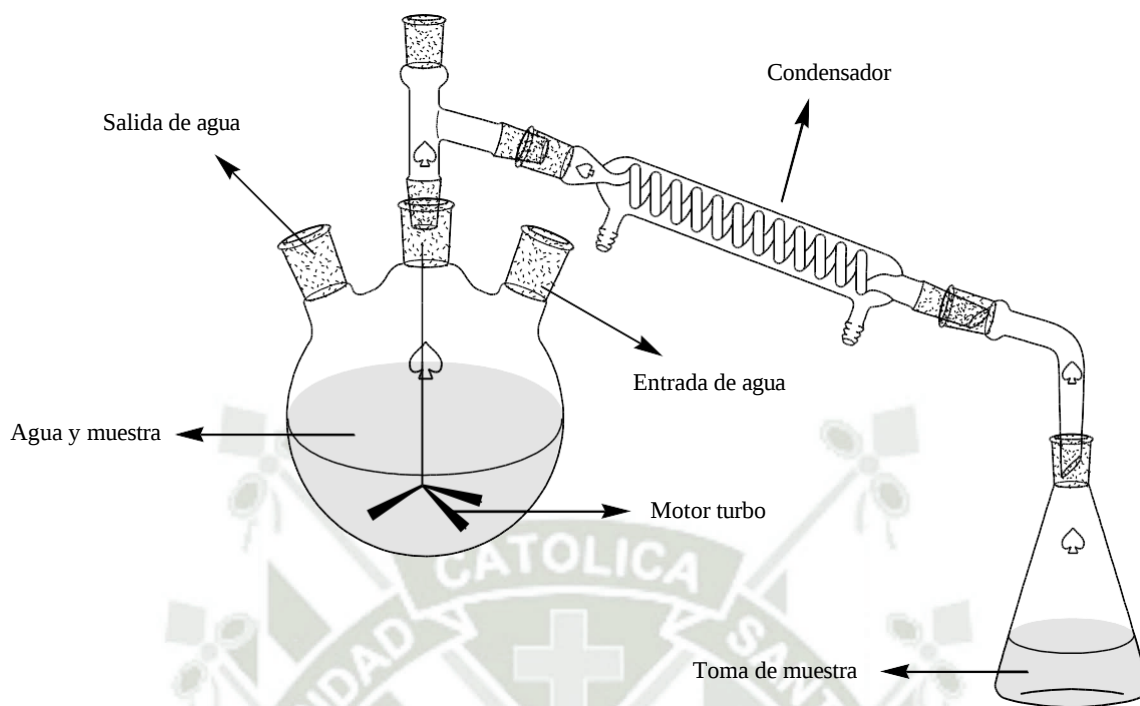


Figura 16 Representación esquemática del equipo de extracción turbo o vortical – escala laboratorio

Nota: Imagen inspirada en la representación de Mahawer, S. K., Himani, Arya, S., Kumar, R., & Prakash, O. (25)

C. Decocción

La decocción es un método excelente para extraer componentes solubles en agua que no se dañan con el calor. La decocción es un método de extracción de sustancias químicas activas mediante agua, la preparación líquida se realiza hirviendo los componentes con agua. La decocción es el método de elección cuando se trabaja con plantas duras y fibrosas, cortezas y raíces, y plantas que contienen compuestos solubles en agua.

Tanto la decocción como la maceración se basan en el remojo en agua fría o hirviendo. El agua se utiliza como menstruum en este método, y los ingredientes se pican en trozos pequeños antes de cocerlos durante 10-15min. Una vez hervido, enfriado y filtrado el líquido, se vierte más agua para obtener el volumen deseado (3). La elaboración de decocciones se ha descrito de diversas maneras. En forma de yavakuta (pequeños trozos), la muestra cruda se coloca en ollas de barro o recipientes de cobre estañado con arcilla en el exterior según la técnica ayurvédica, conocida históricamente como kwatha.

Se vierte agua en la olla, que luego se cuece a fuego abierto. Si la sustancia es blanda, utilice 4 veces la cantidad de agua por cada parte de muestra; si es moderadamente dura, utilice 8 veces la cantidad de agua; y si es extremadamente dura, utilice 16 veces la cantidad de agua. A continuación, la combinación se reduce a una cuarta parte de su volumen original en la maceración suaves y a una octava parte en las sustancias moderada o extremadamente duras mediante ebullición a fuego lento. Tras enfriar y colar el extracto, el filtrado se recoge en recipientes limpios (21).

Aunque muchos componentes de las plantas, como los carbohidratos, los poliglucósidos flavonoides, los alcaloides cuaternarios, las saponinas y los taninos, son solubles en agua, rara vez se extraen utilizando agua. Los extractos de metanol y agua se utilizan habitualmente para extraer tales sustancias químicas.

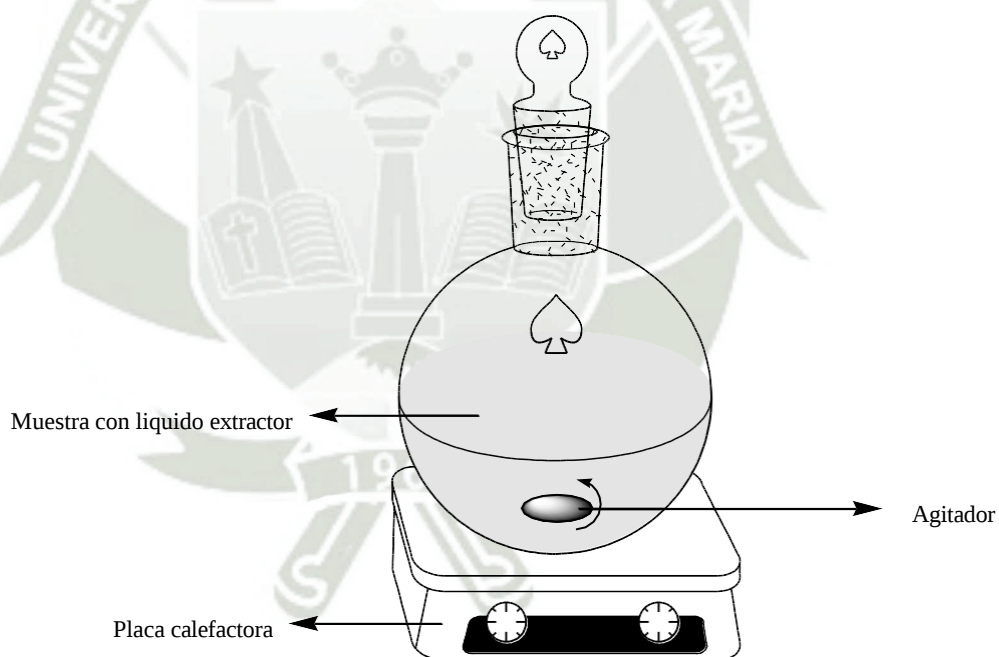


Figura 17 Representación esquemática del equipo de extracción mediante decocción – escala laboratorio

Nota: Imagen inspirada en la representación de Miralrio & Vázquez (26).

D. Destilación – Hidrodestilación

Los procedimientos de destilación se utilizan para separar mezclas líquidas binarias y multicomponentes empleando los puntos de ebullición particulares

de cada componente seguidos de etapas de condensación. Este método de extracción y separación se ha utilizado durante más de 5000 años, y las primeras publicaciones que combinaban numerosos procedimientos y protocolos de destilación para crear "aguas destiladas" de plantas y animales se publicaron en 1481 y 1525, respectivamente. La destilación es el proceso más común para aislar moléculas volátiles de otras combinaciones de sustancias químicas o de numerosas matrices biológicas, incluidas las macroalgas, para extraer productos naturales (3). El agua, el vapor de agua y la destilación al vapor son los tres principales procesos de extracción utilizados para extraer los aceites esenciales de las plantas, siendo este último el más utilizado.

La destilación al vapor es un método de extracción de aceites esenciales de una matriz mediante la introducción de vapor en un tanque que contiene las muestras. A continuación, el vapor y los vapores de los aceites esenciales se enfrían y se condensan, dando lugar a una combinación de aceite y agua que se separa fácilmente. Cuando se trata de extraer sustancias químicas volátiles, la destilación al vapor es actualmente el método más utilizado en la industria alimentaria. Sin embargo, dado que la destilación al vapor de los volátiles lleva mucho tiempo, estas técnicas de extracción son operaciones de alto consumo energético. Además, la exposición prolongada a sustancias químicas volátiles a altas temperaturas durante la extracción puede provocar cambios químicos y afectar a las características de los componentes extraídos.

En el ámbito convencional, el método de destilación por vapor o agua (28) destaca como el más común. La duración de este proceso, que puede variar entre 1 y 10 horas, influye directamente en la cantidad y calidad de los aceites esenciales. Durante la destilación, los materiales vegetales se exponen al vapor de agua, liberando los aceites esenciales por evaporación. La hidrólisis de ésteres durante la destilación puede tener implicaciones significativas en aceites con altas concentraciones de ésteres, y algunos aceites esenciales requieren rectificación para eliminar impurezas indeseadas. Estos procesos resaltan la complejidad y la necesidad de cuidado en la extracción de aceites esenciales por destilación.

Se han introducido varias mejoras en los equipos de destilación al vapor para

solucionar los principales defectos de esta tecnología y adaptarla a diversas aplicaciones industriales. La invención del equipo de extracción por destilación al vapor (SDE), que permite la condensación simultánea de un destilado al vapor y un disolvente de extracción inmiscible, surgió del acoplamiento de las técnicas de destilación al vapor y de extracción con disolventes. El equipo de microondas también se utilizó en diversos diseños técnicos, como la hidrodestilación por microondas, la destilación al vapor acelerada por microondas y la destilación al vapor por microondas, por nombrar algunos. Se han investigado nuevos extractores de destilación al vapor para diversas aplicaciones y ahora se consideran métodos de extracción respetuosos con el medio ambiente. En comparación con los equipos estándar de destilación al vapor, los procesos innovadores de destilación al vapor son muy eficientes en la recuperación de sustancias químicas importantes a la vez que minimizan el tiempo, los ciclos de extracción y el uso de energía (29)

La hidrodestilación es un método tradicional de extracción de los componentes de las plantas que no implica el uso de disolventes orgánicos. Los materiales vegetales se introducen en un compartimento de destilación, se añade agua en cantidad adecuada y la mezcla se calienta hasta que hierve. Como alternativa, se introduce vapor directamente en la muestra vegetal. Los principales elementos que influyen en los componentes bioactivos libres del crudo vegetal son el agua caliente y el vapor. La combinación de vapor de agua y aceite se condensa debido al enfriamiento indirecto con agua. La hidrodestilación tiene el potencial de ser una tecnología beneficiosa para extraer aceites esenciales de una gran variedad de plantas y componentes. El rendimiento se ve afectado por varios factores, como el peso de la materia prima, el volumen de agua utilizado, el tamaño de la materia prima y el tipo de materia prima. Los tres procesos fisicoquímicos principales que intervienen en la hidrodestilación son la hidrodifusión, la hidrólisis y la descomposición por calor. Algunos componentes volátiles pueden perderse a altas temperaturas de extracción. Debido a esta limitación, sólo puede utilizarse para extraer compuestos termolábiles (30).

El método de hidrodestilación (HD) siguiendo un enfoque similar a la destilación por arrastre de vapor (SD), emplea un aparato tipo Clevenger. La extracción siempre es seguida de un proceso de decantación de los aceites

esenciales recolectados a intervalos específicos. Este método se monitorea con precisión mediante software diseñado y medición del consumo de energía. Los aceites esenciales resultantes se almacenan a 4 °C para investigaciones posteriores (30).

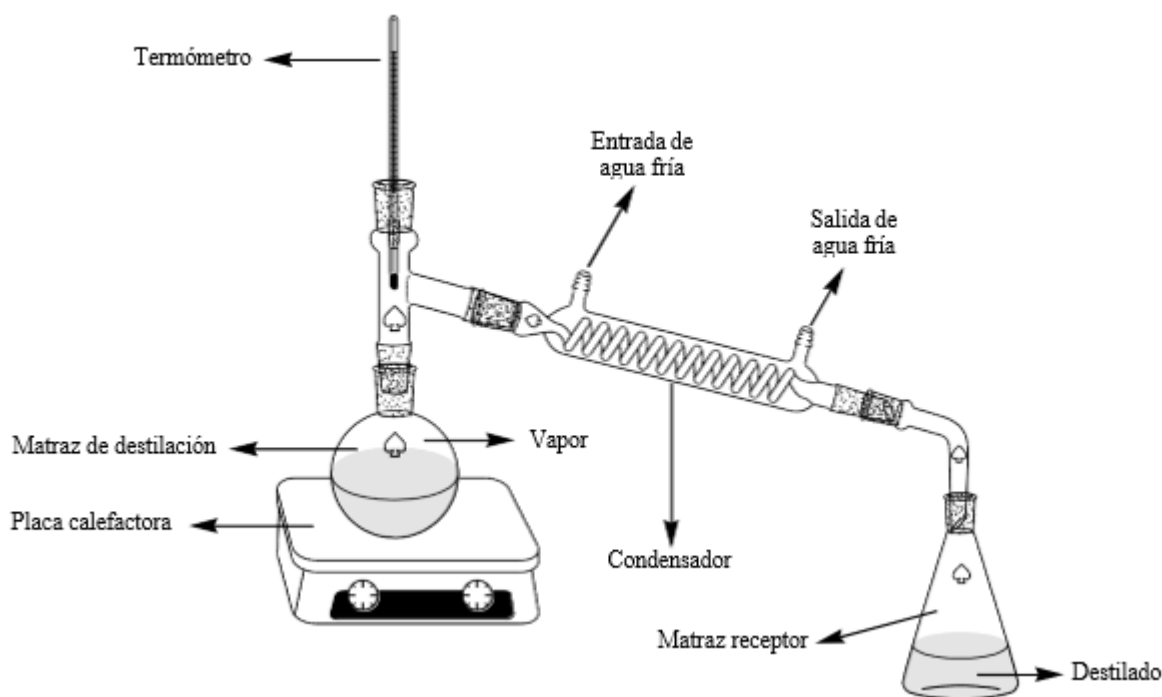


Figura 18 Representación esquemática del equipo de extracción mediante destilación – escala laboratorio

E. Extracción por solventes

Otro método utilizado con frecuencia en la industria para extraer aceite comestible u otros productos químicos es la extracción con disolventes. Se ha utilizado en el tratamiento de residuos, la ingeniería alimentaria, los productos farmacéuticos y la hidrometalurgia, entre otras industrias. La extracción con disolventes es un método de separación que utiliza un disolvente químico para extraer líquido de una muestra sólido-líquida. No importa si el disolvente es polar o no polar. El hexano, el etanol, el metanol, el cloroformo, el éter dietílico, el éter de petróleo y la acetona son disolventes habituales en la industria. La extracción con disolvente es un método de transferencia de masa que incluye la transferencia de aceite de una muestra a un disolvente. La muestra sólida y el disolvente pueden absorber el disolvente al mismo tiempo. Ambos acontecimientos tienen lugar al mismo tiempo hasta que se alcanza el

equilibrio. El procedimiento de extracción puede llevarse a cabo de forma continua o por lotes. Por ejemplo, en un proceso continuo se utiliza la extracción por etapas o a contracorriente; pero en un proceso por lotes se utiliza la extracción en columna fija o Soxhlet (28). Durante la etapa de preparación de la muestra, ésta se tritura en trozos más pequeños para aumentar su superficie. Esto mejora el rendimiento del aceite de extracción al aumentar el área de contacto entre el disolvente y la muestra. Además, algunas de las muestras se cuecen para ablandar o romper los tejidos celulares. Este procedimiento facilita la posterior penetración del disolvente en la muestra (31). El área de contacto entre la muestra y el disolvente puede aumentarse utilizando un patrón de flujo en contracorriente. Así se puede aprovechar mejor el disolvente y, en consecuencia, aumentar la cantidad de producto extraído.

La torta, también conocida como harina desgrasada, se recoge en un extremo del proceso de extracción, mientras que la solución de disolvente y aceite se recoge en el otro. Para separar el aceite del disolvente, es necesario separar aún más la solución. Normalmente, la separación se realiza evaporando el disolvente mediante el calentamiento de la solución a 80°C. Simultáneamente, se introduce vapor para evaporar el disolvente de la solución. El disolvente restante en la solución se reduce a aproximadamente un 5% tras el procedimiento. A continuación, el disolvente residual se separa aún más mediante una técnica de extracción con vapor a 110°C al vacío (31).

El disolvente recuperado se vuelve a añadir al proceso de extracción. Además, la harina desgrasada, una harina rica en proteínas, se refina aún más a 60°C utilizando un tostador para eliminar el disolvente absorbido. La harina desgrasada se seca en la secadora una vez eliminado el disolvente hasta que el nivel de humedad es satisfactorio. La harina seca se guarda en un almacén antes de ser enviada a la industria para su uso en otras industrias, incluido el sector de la alimentación y las bebidas, para fabricar productos consumibles ricos en proteínas (3).

Aunque un disolvente adecuado puede proporcionar un mayor rendimiento de extracción de aceite, este método presenta desventajas como la contaminación ambiental y los residuos de disolvente en los productos finales, lo que limita el uso del aceite en aplicaciones culinarias y medicinales, sin embargo, cuando

se emplea alcohol como solvente, el aceite esencial se considera de calidad "grado alimenticio" y seguro para el consumo. Esta técnica encuentra aplicaciones frecuentes en la industria del perfume, donde la pureza del aceite esencial es esencial y la presencia residual del solvente no presenta inconvenientes significativos (28).

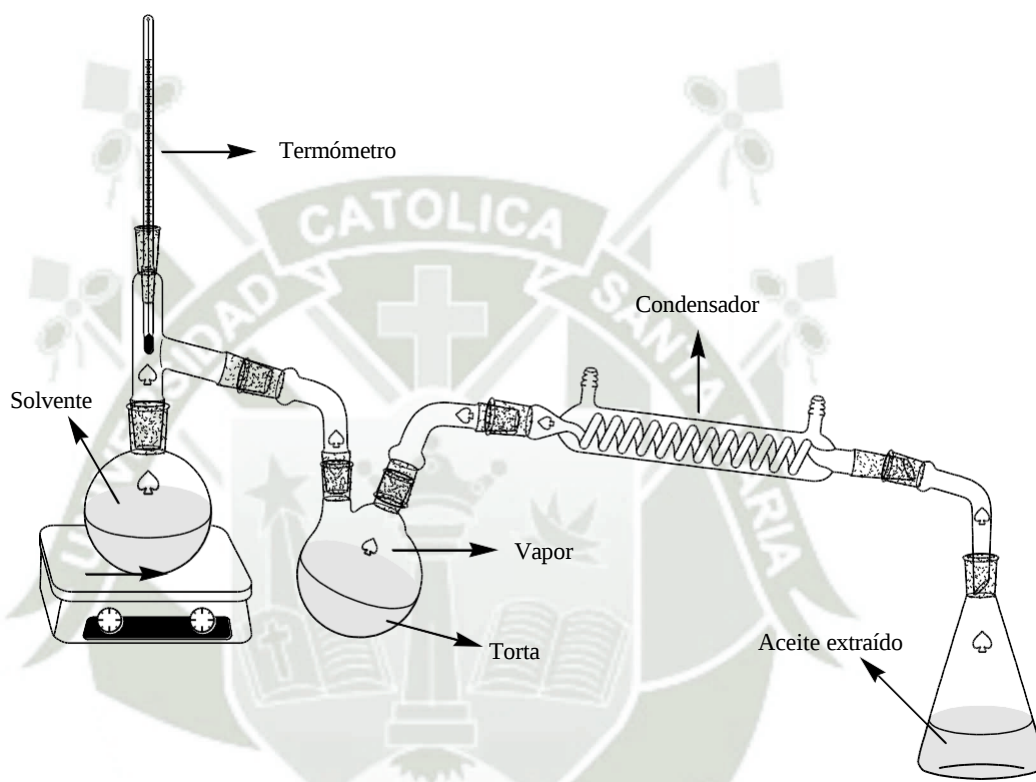


Figura 19 Representación esquemática del equipo de extracción por arrastre de vapor mediante Solventes – escala laboratorio

3.2.2 Técnicas modernas de extracción

Los métodos tradicionales como la extracción líquido-líquido, la extracción sólido-líquido y la extracción térmica se han realizado desde hace siglos para conseguir la solubilidad deseada de los compuestos y una transferencia de masa eficiente, ya sea con la ayuda de disolventes o con la ayuda de energía térmica.

Pero los métodos convencionales de extracción se convierten en un proceso arduo, ya que consumen una enorme cantidad de disolvente y requieren la mayor parte del tiempo para la extracción (preparación) de la muestra, lo que conlleva un aumento del coste del análisis. De ahí que la necesidad de técnicas más exactas y precisas para la extracción haya allanado el camino para el desarrollo de nuevas técnicas analíticas para la extracción eficaz de los componentes polares y no polares.

Algunas de las técnicas modernas de extracción son la extracción asistida por microondas (MAE), la extracción asistida por ultrasonidos (UAE), la extracción con fluidos supercríticos (SFE), la extracción con disolventes a presión (PSE), la extracción a alta presión (HPE), la extracción asistida por calentamiento óhmico (OHAE) y la extracción asistida por campos eléctricos pulsados. Estas técnicas suponen una mayor comodidad debido a la disminución del tiempo de extracción, la mejora de la velocidad de extracción, la reducción del uso de disolvente orgánico, la pérdida mínima de compuestos termosensibles, el menor coste del análisis y el proceso de análisis totalmente automatizado.

A. Extracción asistida por ultrasonidos (EAU)

El uso de ultrasonidos en la extracción es una de las técnicas más prometedoras e innovadoras desde finales del siglo XX, con innumerables aplicaciones en el campo del procesado y la tecnología alimentaria. Los ultrasonidos, una rama de la ciencia acústica, son ondas elásticas (mecánicas) que se propagan con la ayuda de un medio y que tienen frecuencias que se extienden más allá del rango audible normal de los humanos (20Hz-20kHz). Son ondas sonoras de alta frecuencia con frecuencias comprendidas entre 20kHz y 10MHz, que pueden atravesar gases, sólidos y líquidos. Una onda ultrasónica se produce por la transferencia continua de energía de una partícula del medio a otra debido a la vibración constante que produce la partícula. Este proceso depende de variables físicas como la potencia de los ultrasonidos (W), la frecuencia (Hz), la longitud de onda (cm) y la intensidad ($W\text{ cm}^{-2}$). Según la frecuencia de las ondas ultrasónicas, éstas pueden clasificarse en dos tipos, que son los más utilizados en la industria. Los ultrasonidos de baja potencia, o de diagnóstico, o de alta frecuencia, o de baja intensidad tienen frecuencias entre

100kHz y 1MHz e intensidad $<1\text{Wcm}^{-2}$ aplicadas a la evaluación no destructiva de la calidad de la muestra. Los ultrasonidos de alta potencia o baja frecuencia utilizan frecuencias bajas (10-100kHz) e intensidades altas superiores a 1Wcm^{-2} (hasta 1000Wcm^{-2}) y tienen efectos significativos sobre las propiedades físicas y químicas de la materia vegetal, lo que facilita y acelera la preparación de las muestras (32).

La extracción asistida por ultrasonidos (EAU) funciona basándose en dos fenómenos importantes, a saber, la difusión y la cavitación. Cuando las ondas ultrasónicas atraviesan líquidos se crean ciclos alternativos de las regiones de compresión (alta presión) y rarefacción (baja presión). Debido al gradiente de presión en el medio, se crean burbujas de gas que se agrandan y colapsan en ciclos posteriores por el proceso de difusión (gases disueltos en el medio), teniendo allí una mayor superficie en la región de rarefacción. Posteriormente, las burbujas de gas alcanzan un tamaño crítico y se produce un colapso instantáneo (cavitación) de las burbujas de gas, creando así puntos calientes (ondas de choque) y microchorros en la superficie sólida. Las regiones de ondas de choque presentan temperaturas muy elevadas de aproximadamente 5000°K y presiones de aproximadamente 100MPa, lo que acelera la reactividad química del medio y favorece mayores tasas de transferencia de calor y masa. Debido al fenómeno de cavitación, la corriente líquida de alta velocidad en movimiento (microchorro) y los puntos calientes inducen una tensión mecánica, que provoca el pelado de la superficie, la erosión, la rotura de las partículas, la disrupción de la pared celular y, finalmente, la penetración del disolvente en las células, lo que aumenta la solubilidad de los componentes presentes en el medio. Esto favorece la fácil liberación de los bioactivos o de un componente de la matriz biológica; por último, la extracción se consigue mediante un mecanismo de difusión interna sin que se produzcan cambios físicos en la estructura y la función de los extractos (32).

Este efecto presenta numerosas ventajas: mayor rendimiento de extracción, mejor recuperación del disolvente, aumento de las tasas de transferencia de masa y difusión, menor consumo de tiempo y mejor recuperación de los compuestos termoestables. La EAU se lleva a cabo utilizando instrumentos ultrasónicos (ultrasonidos), que comprenden un generador de ultrasonidos, que

produce energía mecánica; un transductor, que ayuda a convertir las ondas mecánicas en ondas sonoras de frecuencias ultrasónicas; y un sistema de aplicación, también llamado emisor, que amplifica y transfiere las ondas ultrasónicas a la muestra. Las ondas ultrasónicas utilizadas en el proceso de extracción pueden aplicarse directa o indirectamente a la muestra. Aunque existen diferentes tipos de transductores en el mercado, el más utilizado es el piezoeléctrico, que está hecho de materiales cerámicos y tiene una eficacia excelente del 80%-95% que otros tipos (33).

Para que la EAU tenga éxito, los factores que influyen en la eficacia de la extracción son muy importantes. Pueden ser factores intrínsecos, como la frecuencia, la longitud de onda y la amplitud, o parámetros extrínsecos, como la potencia y la intensidad ultrasónicas, el tiempo, la temperatura, el tipo de disolvente, el diseño del reactor y el diseño de la sonda.

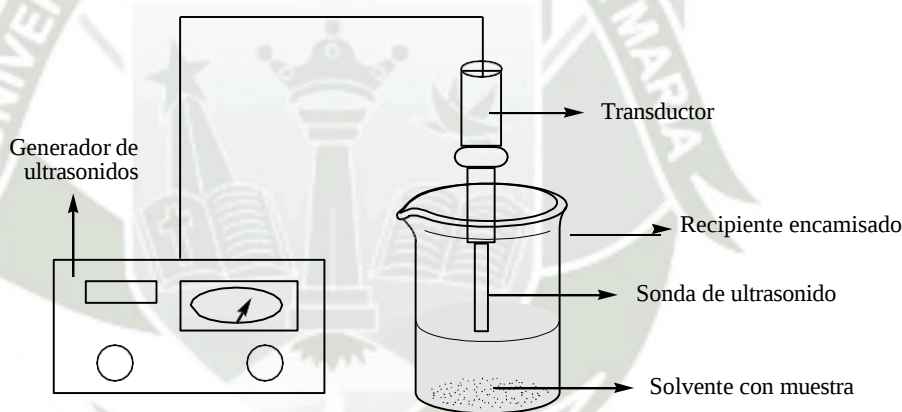


Figura 20 Representación esquemática del equipo de Extracción Asistida por Ultrasonidos

B. Extracción con fluidos supercríticos (SFE)

La extracción con fluidos supercríticos es una de las tecnologías ecológicas más novedosas y prometedoras, que se está utilizando para la recuperación de compuestos puros en las industrias alimentaria, farmacéutica y cosmética consiguiendo sostenibilidad, respeto al medio ambiente, no toxicidad y rentabilidad. La tecnología supercrítica comenzó a introducirse en la escala industrial a partir de principios de la década de 1960, desde que el barón Charles Cagniard de la Tour introdujo el concepto de "punto crítico" en 1822

(3). Los fluidos supercríticos son los fluidos de un estado homogéneo que tiene características críticas (temperatura, presión, densidad) por encima de las cuales no se produce un cambio de fase al aumentar la temperatura o la presión. Se trata de un estado por encima del punto crítico en el diagrama de fases, que se comporta tanto como líquido y gas. Por ejemplo, un aumento de la temperatura superior a la temperatura crítica de la muestra puede dominar las perturbaciones intermoleculares (fuerza) provocadas por la energía cinética de las moléculas presentes en la muestra para licuar o condensar la muestra en su fase líquida. Al mismo tiempo, el aumento de la presión por encima de su presión crítica no permitirá que la muestra experimente un cambio de fase a partir de una fase gaseosa pura. Por lo tanto, mediante un equilibrio adecuado entre los dos fenómenos mencionados, existe un tercer estado homogéneo entre un estado líquido y gaseoso puro que tiene propiedades únicas ejemplares útiles para la extracción eficaz de compuestos de una matriz (28)

Las mayores difusividades de la SFE indican mayores propiedades de transferencia/transporte de masa de soluto en una matriz sólida que en una matriz líquida y, por lo tanto, posee fuerza disolvente para extraer el soluto de la matriz sólida, que también depende de la temperatura y la presión (las difusividades aumentan con la temperatura mientras que disminuyen con un aumento de la presión), por lo que se aprovecha al máximo en el proceso de extracción. Por lo tanto, a medida que la sustancia se acerca a la región supercrítica, reconoce toda la singularidad del super fluido, facilitando así una extracción excelente y eficaz de los componentes polares y no polares de los alimentos. El Superfluido más utilizado es el dióxido de carbono debido a sus excelentes propiedades: punto crítico más alto, químicamente inactivo, no tóxico, respetuoso con el medio ambiente y generalmente reconocido como seguro (33).

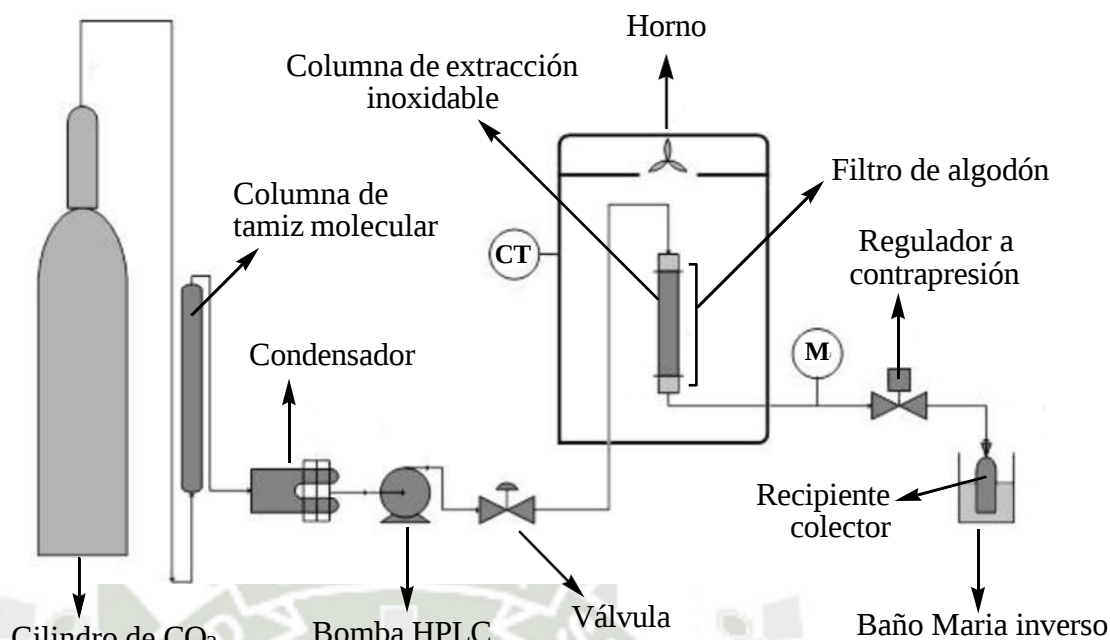


Figura 21 Representación esquemática del equipo de Extracción con fluidos supercríticos

Nota: Imagen inspirada en la representación de Hartati, Salleh, Che Yunus & Aziz(34)

C. Extracción asistida por microondas (MAE)

La extracción asistida por microondas es un método de extracción novedoso, que ha ganado una enorme popularidad en comparación con los métodos de extracción tradicionales debido a su menor tiempo de extracción y a la menor utilización de disolventes. Las microondas son ondas electromagnéticas no ionizantes, que tiene frecuencias entre 300MHz y 300GHz teniendo una longitud de onda en aire o vacío entre 1m y 1mm. Se sitúan entre los rayos X y los infrarrojos en el espectro electromagnético (35).

La MAE se fundamenta en la transferencia directa de energía a través de interacciones moleculares con el campo electromagnético, convirtiendo la energía electromagnética en energía térmica. Las microondas están formadas por dos campos perpendiculares oscilantes, el eléctrico y el magnético, que sirven como portadores de comunicación y energía. Esta transformación electromagnética en energía calorífica puede tener lugar por un doble mecanismo: la conducción iónica y la rotación dipolar tanto en la muestra como en el disolvente. La aplicación directa de las ondas sobre los materiales provoca la capacidad de

convertir una parte de la energía absorbida en energía calorífica sin prácticamente ninguna pérdida de calor en el entorno. Este mecanismo de calentamiento único reduce el tiempo de extracción en comparación con las técnicas de extracción convencionales (3).

La MAE funciona en función de la humedad presente en el material. Cuando se aplican microondas al material, la humedad se calienta y se evapora, lo que crea una acumulación masiva de presión en la pared celular. En consecuencia, se produce la hinchazón y ruptura de la célula, con la consiguiente lixiviación de todos los fitoconstituyentes. La MAE inducirá la interrupción de los enlaces de hidrógeno y la migración de los solutos (iones disueltos), lo que se traduce en una mayor penetración del disolvente en la matriz, facilitando así la extracción de los compuestos objetivo. Este enfoque contrasta con los métodos convencionales de transferencia de calor por convección, conducción y radiación a través de la superficie externa del material (3).

Existen dos tipos principales de sistemas MAE: los de recipiente abierto y los de recipiente cerrado. En los sistemas cerrados, la extracción se lleva a cabo a temperatura y presión controladas, mientras que en los abiertos se realiza en condiciones atmosféricas, el diseño cerrado además protege compuestos sensibles a la luz de la oxidación, y optimiza la penetración uniforme de calor, especialmente para partículas grandes o aglomerados (11).. En general, tanto los sistemas MAE abiertos como los cerrados constan de los siguientes componentes: un generador de microondas, que tiene un magnetrón que genera energía de microondas, una guía de ondas para propagar las microondas desde la fuente hasta la cavidad de microondas, una cavidad donde se coloca la muestra y un circulador, que permite que las ondas se muevan sólo en la dirección de avance.

Una ventaja clave de la MAE es su naturaleza verde y su simplicidad de uso. Notablemente, el contenido de agua in situ dentro de las células vegetales puede actuar como solvente propio, reduciendo o eliminando la necesidad de solventes adicionales. Esto no solo disminuye los costos y tiempos de extracción, sino que también hace que el método sea más sostenible al reducir el consumo de solventes, especialmente solventes orgánicos. La MAE permite controlar varios parámetros, como tipo de solvente, relación sólido-líquido, tamaño de partícula,

contenido de humedad, potencia de microondas, tiempo de extracción, ciclos de radiación, forma y tamaño del recipiente, presión y temperatura de extracción.

Naturaleza del disolvente: Los disolventes de mayor constante dieléctrica (disolventes polares) se consideran muy superiores para la MAE, ya que los disolventes no polares son transparentes a las microondas y, por tanto, no se calientan.

Tiempo de extracción: La cantidad de analitos extraídos puede incrementarse aumentando el tiempo de extracción. Se utilizan diferentes rangos de tiempo en función del metabolito de interés.

Potencia de las microondas: Tiene una relación inversa con el tiempo de irradiación. Una exposición más prolongada a niveles de potencia más bajos se ha considerado más adecuada en la mayoría de las extracciones. Los niveles de potencia más elevados provocan la ruptura repentina de las células, lo que puede afectar a la calidad del analito aislado.

Temperatura: La temperatura está estrechamente relacionada con el proceso de extracción. A medida que aumenta la temperatura, también aumenta la presión, lo que provoca un problema de seguridad. Si la temperatura está bajo control, se puede mejorar la eficacia del proceso aumentando la capacidad del disolvente al disminuir su viscosidad o al disminuir su tensión superficial.

Una variante de la MAE es la extracción por microondas sin solventes (SFME) (13). Esta técnica combina la irradiación de microondas con la destilación, realizándose generalmente a presión normal. En SFME, se colocan materiales vegetales frescos o previamente humedecidos directamente en un aparato de extracción por microondas, sin solvente adicional. La radiación calienta el agua in situ en los materiales vegetales, aumenta la presión interna de las células y provoca la ruptura de la pared celular, liberando así el aceite esencial. SFME se destaca por la eliminación de solventes, alta eficiencia de extracción, calidad del aceite obtenido y su impacto seguro y ecológico en comparación con la hidrodestilación tradicional (HD) (13).

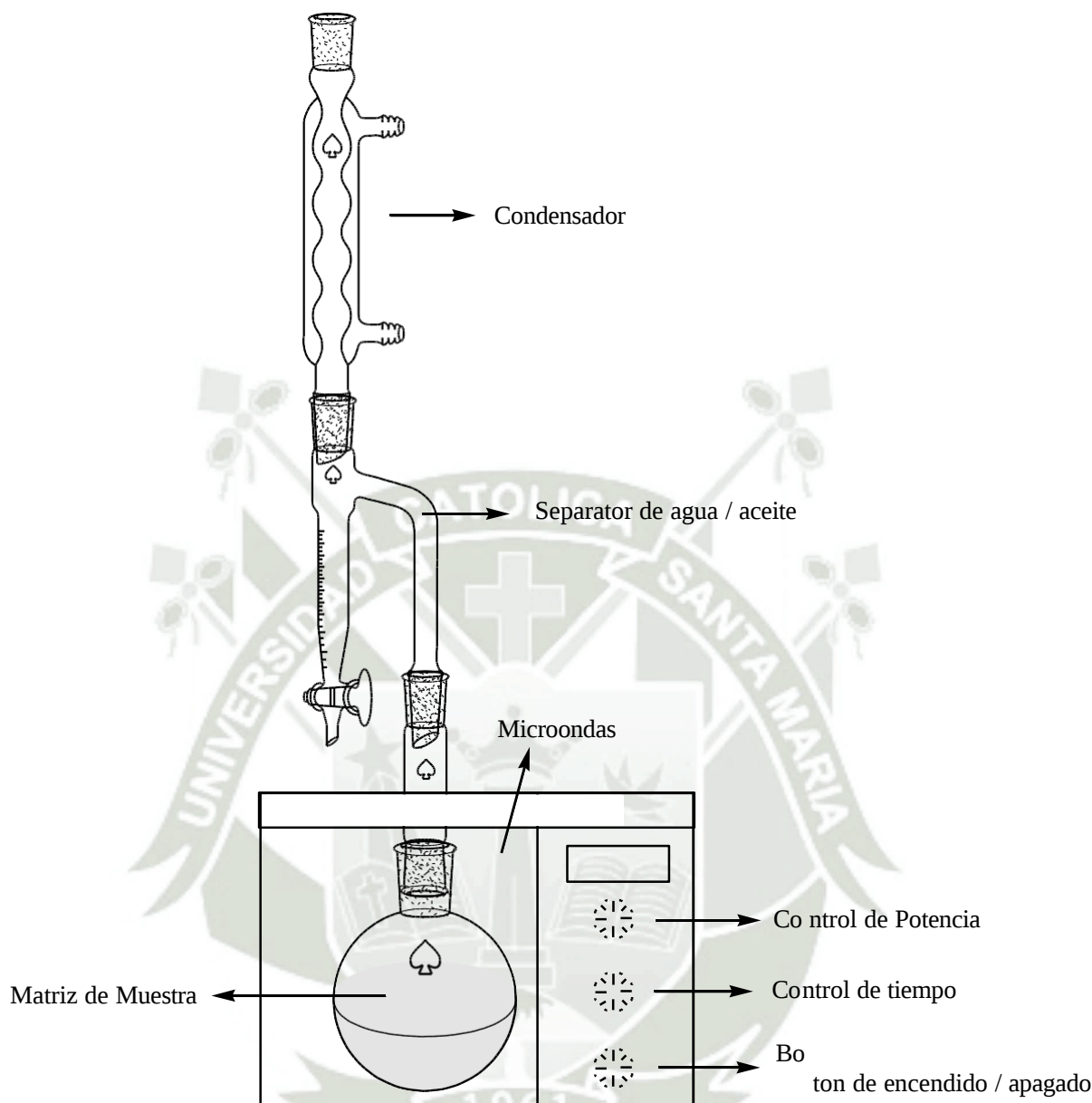


Figura 22 Representación esquemática del equipo de Extracción asistida por microondas

Nota: Imagen inspirada en la representación de Liu & et. al.(13)

D. Extracción asistida por campo eléctrico pulsado (PEF)

La PEF es una innovadora tecnología no térmica, muy conocida por su extracción de componentes intracelulares. Esta técnica se basa en la aplicación directa de pulsos de alto voltaje (kV) durante periodos de duración muy cortos (micro/milisegundos). Este pulso genera un campo eléctrico cuyas intensidades dependen de la distancia entre los dos electrodos y del voltaje suministrado. Los dos mecanismos del PEF son la electroporación y la ruptura eléctrica. Cuando la

intensidad del campo eléctrico es alta, se produce un fenómeno de disrupción celular por electroporación, que mejora la permeabilidad de la membrana citoplasmática y facilita la extracción de compuestos polares y no polares (3). Tras superar un valor umbral de alrededor de 1V de potenciales transmembrana, se desarrolla una repulsión en la parte débil de la membrana, que es responsable de un aumento significativo de la permeabilidad.

El sistema de extracción PEF consta de un generador de impulsos, una cámara de tratamiento, un sistema de manejo de fluidos, un sistema de monitorización y un sistema de control de la temperatura (33). El PEF puede funcionar en modo continuo o discontinuo, dependiendo de la configuración de la cámara de tratamiento. La eficacia de la extracción por PEF depende estrictamente de la intensidad del campo eléctrico de los parámetros del proceso, la entrada de energía específica, el número de pulsos, la temperatura de tratamiento y las propiedades de los materiales a tratar. El aumento de los tiempos de tratamiento se traduce en un aumento de la energía específica global cuando el campo eléctrico se mantiene constante. El aumento de la intensidad de estos factores suele mejorar la electroporación (33).

El PEF puede aumentar la transferencia de masa durante la extracción destruyendo la estructura de la membrana de los materiales vegetales para mejorar la extracción y disminuir el tiempo de extracción. La PEF se ha aplicado para mejorar la liberación de compuestos intracelulares del tejido vegetal con la ayuda del aumento de la permeabilidad de la membrana celular. En comparación con los métodos convencionales antes mencionados, la aplicación de PEF para la extracción no sólo puede aumentar la transferencia de masa durante el proceso de extracción de crudo y mejorar la calidad de los extractos, sino que también es más respetuosa con el medio ambiente y altamente eficiente debido a la menor cantidad de productos químicos sintéticos y orgánicos utilizados en la reacción con un tiempo operativo corto (3).

E. Extracción de líquidos a presión (PLE)

La PLE es una técnica que implica el uso de disolvente a temperaturas elevadas (por encima de su punto de ebullición y por debajo de su punto crítico) y a una presión suficiente para mantenerlo en estado líquido. Este proceso mejora el

proceso de extracción, que se lleva a cabo a temperatura ambiente o a presión atmosférica. Esta técnica también se denomina extracción acelerada de disolventes (ASE), extracción de líquidos a presión (PFE), extracción de disolventes en caliente (PHSE), extracción de disolventes a alta presión (HPSE), extracción de disolventes a alta presión (HPHTSE), así como extracción subcrítica de disolventes (SSE) (3).

La presión ayuda a aumentar la interacción entre el fluido de extracción y la muestra, mientras que la temperatura contribuye a romper la unión del analito con la matriz. Una presión elevada permite que la celda de extracción se llene más rápidamente y ayuda a forzar la penetración del líquido en la matriz sólida; y un aumento de la temperatura acelerará el proceso de extracción de modo que sea posible una extracción segura y rápida. Debido al aumento de las condiciones de temperatura y presión, disminuyen los cambios fisicoquímicos en las propiedades del disolvente, como el aumento de la transferencia de masa, la tensión superficial del disolvente y la viscosidad, y mejora la solubilidad de los analitos (36).

En general, un sistema de extracción PLE consta de un depósito de disolvente, una bomba, un horno (celda de extracción), válvulas, restrictores y un vial de recogida. Puede funcionar en dos modos de configuración: estática y dinámica. En una configuración dinámica, el disolvente de extracción se bombea continuamente a través del recipiente de extracción. En el caso de la configuración de tipo estático, el proceso de extracción comprende varios ciclos con la sustitución del disolvente entre ciclos. La eficacia de la extracción depende tanto de parámetros cinéticos como termodinámicos. Tres elementos conectados afectan a la eficacia de la extracción: el efecto matriz, la transferencia de masa y la solubilidad. Estas diversas características en la PLE están limitadas por varios aspectos, como la selección del caudal, la presión, la temperatura y el tiempo empleados durante la extracción. En comparación con las técnicas tradicionales, se observó que la PLE disminuye el tiempo de extracción con uso de disolventes. Dado que es la más utilizada para la extracción de productos naturales, ha sido reconocida como una técnica de extracción ecológica (36).

3.3 Revisión de estudios comparativos

La elección entre la extracción por microondas y la hidrodestilación no es trivial, y la literatura disponible ha explorado esta dicotomía desde múltiples perspectivas. La creciente necesidad de métodos de extracción más eficientes y respetuosos con el medio ambiente ha avivado la llama de este debate, generando un cuerpo sustancial de investigación que arroja luz sobre los pros y contras de ambas técnicas. A medida que la industria busca optimizar la obtención de aceites esenciales sin sacrificar calidad, este capítulo busca consolidar los hallazgos clave y discernir las tendencias emergentes en la investigación comparativa.

Para poder evaluar y comparar de manera objetiva la calidad, rendimiento e impacto de los aceites esenciales se utilizan diferentes métodos, en el caso del rendimiento es muy común evaluar el porcentaje de volumen de aceite extraído por peso de muestra. Para la calidad se suele utilizar un estudio cromatográfico de gases para obtener los diferentes compuestos químicos en la muestra, así como el porcentaje de cada uno dentro del aceite. Mientras que el impacto ambiental o energético es más complicado de evaluar puesto que no hay una prueba estandarizada para ello, sin embargo, en este tipo de estudios se le pone mucha importancia al tiempo de extracción puesto que el uso de solvente y energía está directamente proporcional al tiempo que la muestra utiliza para llegar a su pico máximo de rendimiento sin devaluar la calidad del aceite.

Utilizando las categorías descritas en el párrafo anterior, en la Tabla 3 se puede observar un resumen de los diferentes resultados en los documentos analizados para esta investigación. Nótese que para el rendimiento se compararon los porcentajes final con los parámetros óptimos de extracción en cada estudio; en el caso de la calidad se evaluaron los porcentajes de terpenos oxigenados e hidrocarburos terpenicos, así como los componentes principales característicos de cada muestra (o aquellos de mayor valor industrial) y se compararon sus porcentajes finales dentro del 100% de componentes en el aceite.

Tabla 3 Comparación de rendimiento, calidad e impacto de la extracción de aceites mediante Hidrodestilación y Destilación asistida por microondas

Especie	Método	Tiempo (min)	Rendimiento	Componentes químicos			Referencia
				TO	HT	Componentes principales	
Mentha arvensis L	HD (Hojas secas)	120	0.0510 mL g ⁻¹	93.34%	6.69%	(-)-mentol 62.80% Trans-mentona 20.19% Cis-metona 4.62% Piperitone 3.17%	T Bui-Phuc, T NhuTrang & N Cong-Hau (37)
	MAE (Hojas frescas)	20	0.0832 mL g ⁻¹	95.29%	3.16%	(-)-mentol 70.60% Trans-mentona 13.75% Cis-metona 4.81% Germacreno D 1.62%	
Curcuma alismatifolia	HD	420	0.25% v/w	69.29%	23.82%	Curzerenone 40.60% Germacrone 8.63% 1,8 cineole 6.47% Camphor 3.78%	
	SFME	240	0.43% v/p	76.10%	18.25%	Curzerenone 26.47% Germacrone 12.35% 1,8 cineole 16.60% Camphor 9.61%	
Curcuma aromatica	HD	420	0.43% v/p	66.41%	26.71%	β-turmerone 14.19% Germacrone 6.69% 1,8 cineole 13.02% Camphor 8.45% Xanthorrhizol 6.76%	Swagat Mohanty, Asit Ray, Naik et al (12)
	SFME	240	0.68% v/p	83.37%	11.60%	β-turmerone 12.31% Germacrone 16.44% 1,8 cineole 7.60% Camphor 14.04% Xanthorrhizol 13.07%	
Curcuma xanthorrhiza	HD	420	0.35% v/p	76.21%	14.44%	Curzerenone 56.34% Xanthorrhizol 6.23% Germacrone 4.21% Camphor 3.33%	
	SFME	240	0.52% v/p	79.04%	14.22%	Curzerenone 62.81% Xanthorrhizol 2.84% Germacrone 4.44% Camphor 2.71%	
Citrus grandis L.	HD	180	4.45% v/p	62.92%	37.08%	Limoneno 97.31% α-Pineno 0.64% β-Myrceno 1.35% α- Felandreno 0.47% Sabineno 0.23%	Ngan T, Hien T, Phat D,et al. (38)
	MAHD	50	4.47% v/p	96.54%	5.12%	Limoneno 96.92% α-Pineno 0.65% β-Myrceno 1.09% α- Felandreno 1.05% Sabineno 0.19%	
Rosmarinus officinalis L	HD	90	1.3 cm ³	50.88%	47.36%	Borneol 10.39% α-Pineno 24.24% Caanfeno 7.51% 1,8-Cineolo 8.79% Linalol 10.98%	Sara Moradi, Alireza Fazlali & Hamid Hamedi (39)
	MAHD	30	1.5 cm ³	59.46%	39.26%	Borneol 15.38% α-Pineno 17.95% Caanfeno 5.35% 1,8-Cineolo 8.84% Linalol 12.19%	

Especie	Método	Tiempo (min)	Rendimiento	Componentes químicos			Referencia	
				TO	HT	Componentes principales		
Vitis vinifera L.	HD	75	58.8 mg GAE/g	40.26%	59.74%	Malvidin 3,5-diglucoside	0.00%	Pinton (35)
						procyanidin B2	0.02%	
						kaempferol	0.14%	
	MAHD	20	91.3 mg GAE/g	50.54%	49.46%	p -Coumaric acid	1.06%	
						Miricitrina	13.09%	
						Malvidin 3,5-diglucoside	0.03%	
Stachys aegyptiaca	HD	180	0.9% v/p	39.14%	60.68%	procyanidin B2	17.93%	Shaheen A, Saleh I, ElKashoury E et. al. (40)
						kaempferol	0.20%	
						p -Coumaric acid	5.23%	
	MAHD	60	1.4% v/p	29.92%	69.39%	Miricitrina	5.83%	
						α -Pineno	24.65%	
						Trans-cariofileno	14.65%	
Cinnamomum cassia	HD Soxhlet	360	68.74%	76.25%	35.80%	6-epi-shyobunol	14.61%	Kamaruddin & Mohd Nadzir (33)
						α -cadinol	11.08%	
						δ -cadinene	5.75%	
	MAHD	120	86.67%	89.90%	11.59%	α -Pineno	41.14%	
						Trans-cariofileno	8.63%	
						6-epi-shyobunol	11.15%	
Cinnamomum camphora	HD	360	75.19 mg/g	74.62%	17.29%	α -cadinol	5.55%	Liu Z, Li H et al (13)
						δ -cadinene	2.39%	
						Cinamaldehído	59.65%	
	MAHD	120	80.35 mg/g	88.74%	8.36%	2-metoxycinamaldehído	11.20%	
						2-hidroxycinamaldehído	8.54%	
						Cinamaldehído	67.21%	
Pogostemon cablin	HD	240	0.42%			2-metoxycinamaldehído	15.90%	Tjie K, N, Tua M, et al (41)
						2-hidroxycinamaldehído	9.50%	
						Methyleugenol	37.71%	
	MAHD	8	0.25%			Safrole	6.05%	
						Eucalyptol	10.12%	
						Methyleugenol	50.52%	
Ocimum basilicum	HD	240	0.40%			Safrole	13.42%	El-Kersh, Eissa & Rasheed (14)
						Eucalyptol	5.28%	
						PA	26.32%	
	MAHD	8	0.10%			PA	61.53%	
						1,8 Cineole (Eucalyptol)	4.82%	
						β -Linalool	24.75%	
Ocimum africanum	HD	240	0.18%			Estragol	36.70%	El-Kersh, Eissa & Rasheed (14)
						1,8 Cineole (Eucalyptol)	11.12%	
						β -Linalool	76.93%	
	MAHD	8	0.16%			Estragol	10.18%	
						1,8 Cineole (Eucalyptol)	9.40%	
						β -Linalool	72.20%	
Ocimum americanum	HD	240	0.16%			Estragol	10.06%	El-Kersh, Eissa & Rasheed (14)
						1,8 Cineole (Eucalyptol)	13.71%	
						β -Linalool	12.63%	
	MAHD	8	0.16%			Estragol	0.57%	
						(E)-Methyl cinnamate	46.16%	
						1,8 Cineole (Eucalyptol)	6.44%	
Ocimum minimum	HD	240	0.16%			β -Linalool	14.00%	El-Kersh, Eissa & Rasheed (14)
						Estragol	33.58%	
						(E)-Methyl cinnamate	14.96%	
	MAHD	8				Geranial	18.70%	

Especie	Método	Tiempo (min)	Rendimiento	Componentes químicos				Referencia
				TO	HT	Componentes principales		
Aloysia citrodora	HD	180	1.05%	49.70%	50.30%	Neral	15.30%	Sprea R, Fernandez L, Pires et. Al.(42)
						Spathulenol	7.20%	
						óxido de cariofileno	5.30%	
	MAHD	15	1.29%	53.00%	47.00%	Geranial	21.10%	
						Neral	16.20%	
						Spathulenol	8.70%	
						óxido de cariofileno	5.60%	

Nota: HD = Hidrodestilación, SFME = Destilación libre de solvente asistida por microondas, MAE = Extracción asistida por microondas, MAHD = Hidrodestilación asistida por microondas, WBD = Destilación “Burbuja de agua”, TO = Terpenos oxigenados, HT = Hidrocarburos terpénicos.

3.3.1 Impacto en la calidad del aceite esencial

Al comparar la extracción asistida por microondas con la hidrodestilación convencional se observa una mínima diferencia en la composición de los aceites esenciales obtenidos por estos métodos. Sin embargo, el aceite esencial extraído mediante el método de Hidrodestilación Asistida por Microondas (MAHD) tiende a presentar una mayor proporción de compuestos oxigenados y una menor proporción de hidrocarburos terpénicos en comparación con el método de Hidrodestilación (HD). Este fenómeno se explica por dos razones principales: los compuestos oxigenados, en comparación con los hidrocarburos terpénicos, tienden a interactuar más eficientemente con las microondas debido al momento dipolar; así mismo, el menor tiempo de calentamiento en MAHD podría prevenir o reducir la descomposición térmica e hidrolítica de los compuestos oxigenados. Esta diferencia puede ser una gran ventaja para el método MAHD puesto que los compuestos oxigenados son valorados por sus propiedades aromáticas, gustativas y terapéuticas, un aumento en su concentración en el método MAHD sugiere una mejora en la calidad del aceite esencial, en contraste con los hidrocarburos monoterpénicos, que son menos valiosos para la fragancia del aceite esencial. A continuación, se analizaron la calidad de los aceites esenciales presentados en la tabla 3:

Esto se observa por ejemplo en la investigación conducida por Bui-Phuc (37) y colaboradores sobre la Menta japonesa (*Mentha Arvensis*), se reportaron pequeñas variaciones en la composición química de los aceites esenciales

obtenidos por Hidrodestilación (HD) e Extracción asistida por microonda (MAE), con 95,29% de monoterpenos oxigenados en el método MAE, en contraste con el 93,34% obtenido por HD. Además, se da una gran importancia al (-)-mentol como compuesto principal del aceite de menta, siendo el de mayor valor industrial, encontrándose un 70,6% para MAE y un 62,80% para HD se concluye entonces que el método MAE.

En la investigación de Ngan et al. (38), también se analizó los componentes químicos extraídos de la cáscara de Pomelo (*Citrus grandis L.*), el contenido de limoneno (97,318% - 96,929%) fue ligeramente superior al obtenido por MAHD, seguido de α -Pinen (0,636% - 0,652%), β -Mirceno (1,350% - 1,093%), α -Felandreno (0,469% - 1,054%) y Sabineno (0,227% - 0,19%); aunque los datos son similares en general si se observó una gran desigualdad en los terpenos oxigenados de 62,92% a 96,54% (HD y MAHD respectivamente), en este documento también se plantea que el rápido calentamiento en MAHD podría haber causado cambios químicos en los componentes, como la conversión a β -pineno (0.082%), un componente que solo se encontró en el aceite extraído por MAHD, concluye entonces que la calidad no varía entre métodos puesto que el porcentaje de limoneno, compuesto de mayor importancia por su uso en desinfectantes y de fuerte fragancia, fue prácticamente el mismo.

Siguiendo con la línea de investigación presentada, el estudio de Kok (41) se enfocó en la extracción de aceite de Pachouli (*Pogostemon cablin*). En este estudio, se concluyó que la calidad del aceite se ve significativamente afectada al considerar su componente principal, el alcohol sesquiterpénico de pachulí (PA), el cual es notable por su actividad farmacológica, incluyendo propiedades antioxidantes y antibacterianas, además de su característico aroma utilizado en aromaterapia. Al comparar los métodos de extracción de hidrodestilado convencional (HD) y asistido por microondas (MAHD), se observó que la concentración de PA en el método HD fue mucho menos (26,32 %) en comparación con el MAHD (61,53 %).

El estudio de Sprea et al. (42) analizó los aceites esenciales de Hierba Luisa (*Aloysia citrodora*) y concluyó que se obtuvo el mismo perfil cualitativo con los dos métodos de hidrodestilación evaluados. Sin embargo, se encontraron diferencias pequeñas, pero estadísticamente significativas ($p < 0,05$) en cuanto a

la abundancia de 23 de los 69 compuestos. Los isómeros geranial (18,7-21,1%) y neral (15,3-16,2%) se identificaron como los compuestos principales, seguidos por espathulenol (7,2-8,7%), óxido de cariofileno (5,3-5,6%), limoneno (5,0-5,4%) y ar-curcumenol (4,7-5,3%).

Un caso similar se reportó en la investigación de Moradi, Fazlali y Hamedí (39) sobre la extracción de aceite esencial de Romero (*Rosmarinus officinalis* L.) usando hidrodestilación simple y asistida con microondas. Se concluyó que los componentes principales como α -pineno, canfeno, 1,8-cineol, linalol, alcanfor y borneol al estar presentes en ambos métodos no variaron cualitativamente, pero si cuantitativamente, como se observa en la tabla 3. Sin embargo, el estudio se centra más en la importancia del aumento de compuestos oxigenados de 50,88% (HD) a 59,46% (MAHD), puesto que además se realizó un segundo caso experimental donde se incrementó la energía de microondas y se agregó sal al solvente con este mismo propósito, incrementando aún más los compuestos oxigenados.

En la investigación acerca del aceite de cúrcuma, estudiado por Mohanty et al. (12), se compararon los componentes de tres diferentes especies de cúrcuma. En general, se encontró una mayor concentración de sesquiterpenos oxigenados y monoterpenos oxigenados en los aceites extraídos mediante el método de destilación libre de solventes asistida por microondas (MAHD), en comparación con la Hidrodestilación (HD). Aunque no se observaron variaciones cualitativas en los aceites esenciales entre los métodos de extracción de cada especie, el estudio también evaluó la capacidad antioxidante, antitirosinasa y anticancerígena de los aceites de las tres especies de cúrcuma. Los resultados mostraron que el aceite esencial extraído mediante MAHD poseía una potente actividad sequestradora, inhibiendo más radicales libres que el HD a concentraciones más bajas, y presentando un valor IC₅₀ bajo en todas las especies de Cúrcuma. La significativa mejora en la propiedad antioxidante del aceite extraído mediante MAHD en comparación con el HD podría deberse a factores como la temperatura y el tiempo de extracción, ya que un tiempo de extracción prolongado y una temperatura elevada podrían causar la descomposición de moléculas antioxidantes. Se sugiere que un cambio en la concentración de ciertas

moléculas podría influir considerablemente en la expresión de las propiedades antioxidantes y biológicas de los aceites.

La actividad antioxidante mejorada de los aceites esenciales derivados de MAHD puede atribuirse a la presencia de una mayor concentración de compuestos oxigenados en *C. alismatifolia* (69,29% frente a 76,1% para HD frente a MAHD), *C. aromatica* (66,41% frente a 83,37% para HD frente a MAHD) y *C. xanthorrhiza* (76,01% frente a 79,04% para HD frente a MAHD), respectivamente. Además, aunque las propiedades anticancerígenas de los aceites esenciales no se vieron significativamente influenciadas por el proceso de extracción, los aceites extraídos con MAHD mostraron ser ligeramente mejores que los extraídos con HD, debido a sus bajos valores de IC50. Aunque hay pocos informes sobre el efecto de las propiedades anticancerígenas de los aceites aislados mediante distintos métodos de extracción, en este caso particular no se pudo establecer una correlación clara entre los métodos de extracción y la actividad anticancerígena.(12)

En el estudio de El-Kersh, Eissa y Rasheed (14), se realizó una comparativa detallada de los aceites de diferentes especies de albahaca (*Ocimum*). Este estudio reveló que el número de compuestos volátiles detectados en los aceites extraídos mediante Hidrodestilación Asistida por Microondas (MAHD) era menor que aquellos obtenidos por destilación convencional. En el caso específico de *O. basilicum*, la especie de albahaca más comúnmente utilizada, la muestra de aceite obtenida por el método MAHD contenía únicamente 4 compuestos volátiles, una cantidad significativamente menor en comparación con los 38 volátiles identificados mediante la técnica de Hidrodestilación (HD). Notablemente, el β -linalol, un compuesto principal en los aceites de albahaca y lavanda y conocido por sus propiedades antibacterianas, antioxidantes, citotóxicas y anticonvulsivas, se encontraba en una concentración mucho mayor (76,9%) en las muestras extraídas mediante MAHD en comparación con las obtenidas por HD (24,7%). Tanto en los aceites de *O.basilicum* como en los de *O. africanum* extraídos por MAE, se observó un enriquecimiento significativo en el contenido de β -linalol (76,9% y 72,2%, respectivamente), en comparación con los métodos de destilación. Por otro lado, el porcentaje de estragol, un compuesto conocido como metil chavicol o p-allylanisol y catalogado como "carcinógeno genotóxico", fue

menor en los aceites de *O. basilicum* y *O. africanum* obtenidos por MAHD (aproximadamente 10% para ambos) en comparación con los métodos de destilación (36,7% y 10,30 % para HD y 10,18% y 10,06% para MAHD, respectivamente). Se observa que en el caso de las extracciones MAHD no se encuentran todos los compuestos (el caso de *Ocimum americanum* y *Ocimum minimum*) o disminuyen en comparación a su símil con HD como el estragol por ejemplo, que se encuentra naturalmente en las especies de *Ocimum* y otros miembros de la familia Lamiaceae, pero se sugiere que los períodos de extracción prolongados y la aplicación de calor pueden incrementar su contenido; en este caso el tiempo de extracción con MAHD fue de 8 min lo que claramente influyó, el autor recomienda para futuros estudios evaluar el tiempo y potencia óptimas de extracción para incrementar la calidad del aceite.

De manera similar, el estudio de Zaizhi et al. (13) examinó la composición del aceite esencial de la cáscara del fruto del Arbol de alcanfor (*Cinnamomum camphora*), los principales componentes del aceite esencial de la cáscara del fruto de *C. camphora* extraído mediante MAHD fueron el metileugenol (50,52%), el safrol (13,42%) y el eucaliptol (5,28%). Por otro lado, en el aceite esencial obtenido por HD, los principales constituyentes fueron metileugenol (37,71%), eucaliptol (10,12%) y safrol (6,05%). Se destacó que el aceite esencial extraído por MAHD contenía proporciones más altas de terpenos oxigenados en comparación con el obtenido por HD (88,74% - 74,62%), sugiriendo diferencias significativas en la composición química y, potencialmente, en las propiedades y aplicaciones de estos aceites, dependiendo del método de extracción utilizado.

En el caso de la Casia (*Cinnamomum cassia*) se analizó también los componentes químicos extraídos siendo el Cinamaldehído el compuesto e mayor valor farmacéutico y de fragancia, se observa que en el caso de MAHD se obtuvo mayor porcentaje (67,21%) en contraste de HD (59,65%). Mismo efecto en el caso de 2-metoxycinamaldehído (15,90% - 11,20%) y 2-hidroxycinamaldehído (9,50% - 8,54%) por lo que claramente el método asistido con microondas tiene una mayor calidad con respecto al mercado industrial.

Por último, el caso del aceite extraído de la Uva común (*Vitis vinifera* L.) tiene un caso interesante pues si existe una clara ventaja de calidad entre la extracción

MAHD y HD, puesto que el compuesto mayoritario encontrado en el aceite de HD es la Miricitrina (13,09%) la cual no tiene un amplio rango de propiedades, mientras que en el MAHD se ve una mayor cantidad de Procyanidin B2 (17,93%) la cual es parte del complejo antioxidante de la uva, por lo que es más diversa en utilidad.

Con el trabajo de Shaheen y colaboradores (40) se encuentra un resultado un poco alejado a lo visto anteriormente por la fuerte variación entre los aceites resultantes, se examinó la composición química del aceite extraído de Ortiga (*Stachys aegyptiaca*) siendo el incremento en el porcentaje de α -pineno mediante MAHD (41,14% frente a 24,65% en HD), una ventaja adicional de este método debido a las propiedades biológicas del compuesto. Los resultados revelan que hubo variaciones cualitativas y cuantitativas en la composición de los aceites extraídos, por ejemplo, el α -terpineol (1,23%), presente en el aceite extraído mediante HD, no se encontraba en el aceite obtenido por microondas. Sin embargo, se identificaron ciertos componentes en el aceite MAHD ausentes en el HD, como β -mirceno, 3-careno, α -terpineno, o-cimeno, limoneno, γ -terpineno, fenchona, α -thujona, β -thujona, isopinocarveol, cis-verbenol, trans-verbenol, terpinen-4-ol, cis-p-mentha-1(7),8-dien-2-ol, acetato de crisantenilo, carvacrol, limonen-6-ol, pivalato, óxido de ledeno-(II) y β -selinenol; si bien los aceites son bastante alejados en composición uno del otro aun se puede afirmar que el extraído mediante microondas es de mejor calidad considerando su valor en el uso industrial y farmacéutico.

3.3.2 Rendimiento de extracción

La revisión exhaustiva de la literatura científica en el ámbito de la extracción de aceites esenciales arroja una conclusión contundente y uniforme: la eficacia en la obtención de aceites esenciales es sistemáticamente superior al emplear la técnica de Hidrodestilación Asistida por Microondas (MAHD) en comparación con la Hidrodestilación convencional (HD).

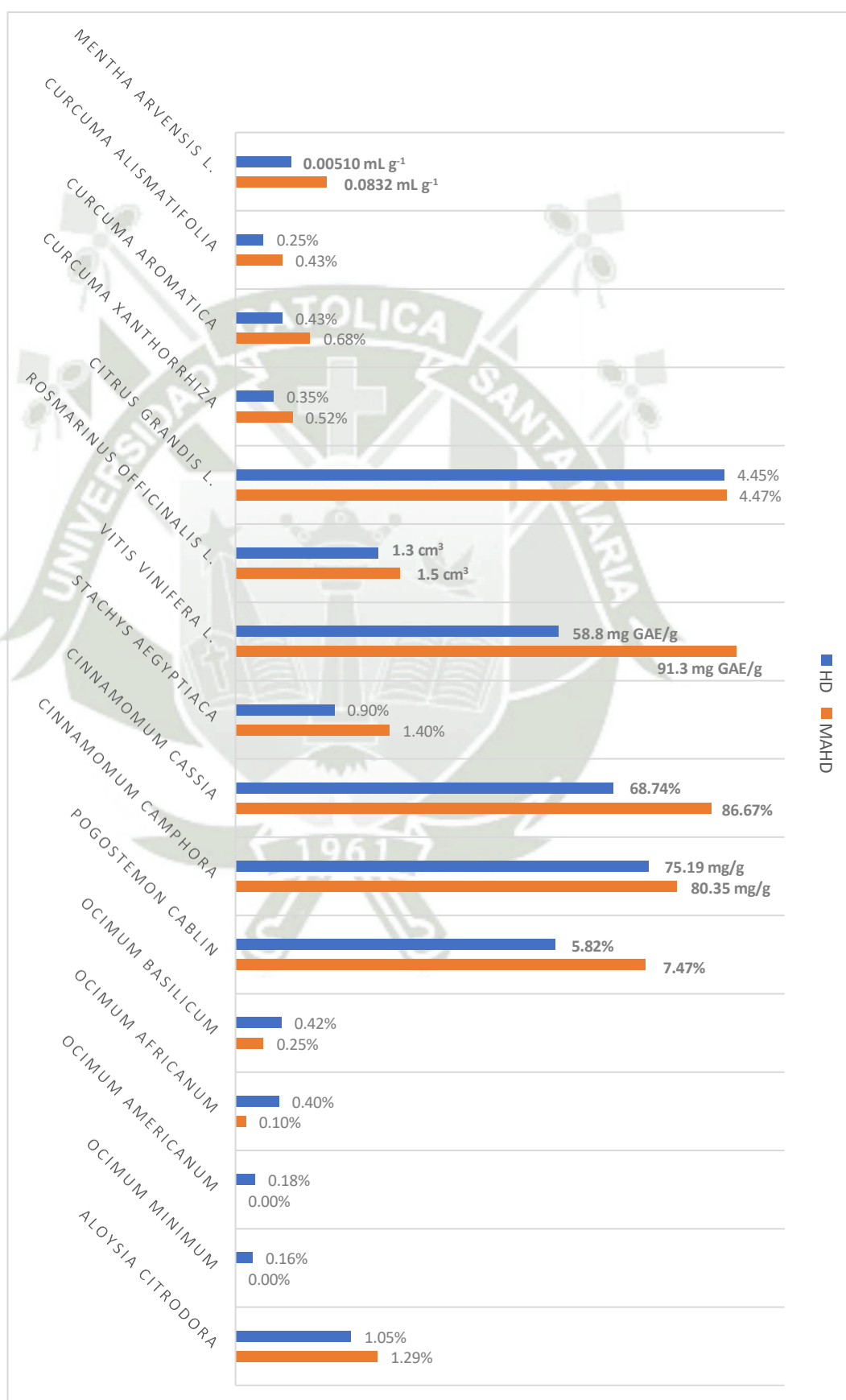
Para ilustrar este punto, la Tabla 3 presenta la comparación del rendimiento de extracción de ambos procedimientos en diversos recursos vegetales. Es importante destacar que, aunque todas las extracciones realizadas mediante MAHD muestran rendimientos superiores a los obtenidos por HD, la magnitud

de esta superioridad varía. En algunos casos, la diferencia es sustancialmente significativa, mientras que, en otros, aunque todavía favorable, la ventaja de MAHD sobre HD no es tan pronunciada.

Esta variabilidad puede atribuirse a factores como la naturaleza específica del material vegetal, las condiciones exactas de extracción utilizadas en cada método y las diferencias intrínsecas en la composición química de las plantas. No obstante, la tendencia general favorece claramente a la técnica de MAHD, subrayando su eficacia en la mejora tanto de la cantidad como de la calidad del aceite extraído. Además, esta técnica refleja un enfoque más sostenible y energéticamente eficiente, alineándose con las prácticas de producción modernas que buscan optimizar los recursos y minimizar el impacto ambiental. En resumen, los datos presentados en la Figura 26 corroboran la superioridad de la Hidrodestilación Asistida por Microondas como método preferente para la extracción de aceites esenciales en términos de rendimiento y eficiencia.

Existe una excepción en el estudio de El-Kersh, Eissa y Rasheed (14) donde se observa que el rendimiento de extracción de la albahaca (*Ocimum*) con HD es mayor a comparación del obtenido con MAHD, este es si embargo porque en este estudio el objetivo nunca fue la comparación de rendimiento, sino que la comparación cualitativa, por ese motivo solo se extrajo con MAHD por 8 min para obtener una mínima muestra para correr en la cromatografía. Así mismo se concluyo que al no haberse estandarizado el proceso, la extracción no fue satisfactoria, aunque si se pudo analizar los componentes principales como se tenia planeado, por ultimo el autor recomienda realizar el estudio nuevamente con un mayor tiempo de extracción y menor potencia eléctrica.

Figura 23 Comparación de rendimiento entre extracción por Hidrodestilación (HD) y asistida por microondas (MAHD)



3.3.3 Consideraciones ambientales y sostenibilidad

La superioridad del método MAHD se manifiesta no solo en términos de mayor rendimiento, sino también en la eficiencia del proceso. La Hidrodestilación Asistida por Microondas ha demostrado ser más rápida, lo que reduce significativamente el tiempo de procesamiento. Además, se ha observado que esta técnica es más eficaz en la extracción de una gama más amplia de compuestos, incluyendo aquellos con propiedades farmacológicas importantes. La capacidad de MAHD para operar a temperaturas más bajas en comparación con la HD tradicional también sugiere que hay menos degradación térmica de los compuestos sensibles al calor, lo que podría explicar el incremento en el rendimiento y la calidad de los aceites esenciales obtenidos.

Otra ventaja relevante de la técnica MAHD radica en su sostenibilidad ambiental. Al requerir menos energía y tiempo para la extracción, esta metodología se alinea mejor con los principios de la química verde y la sostenibilidad industrial. Esto no solo mejora la eficiencia del proceso, sino que también reduce la huella de carbono asociada con la producción de aceites esenciales.

En el contexto del estudio de Moradi (39) en la extracción de aceite de Romero, la metodología de Hidrodestilación Asistida por Microondas (MAHD) presenta claras ventajas en términos de reducción de costes, tiempo y energía. Un dato relevante es que el tiempo necesario para la extracción completa del aceite esencial de romero mediante MAHD fue de solo 30 minutos, en comparación con los 90 minutos requeridos por la Hidrodestilación convencional (HD). Esto representa una disminución significativa del tiempo de extracción, en torno al 67%, cuando se utilizan microondas. Además, el impacto ambiental asociado con cada método de extracción es notablemente diferente. Se calcula que la cantidad de dióxido de carbono liberado a la atmósfera durante el proceso de HD es considerablemente mayor (1200 g de CO₂) en comparación con la MAHD (144 g de CO₂). Estos cálculos se basan en la premisa establecida en la literatura de que la generación de 1 kWh de electricidad a partir de carbón u otro combustible fósil resulta en la emisión de aproximadamente 800 g de CO₂.

Un estudio adicional realizado por Liu et al. (13) refuerza esta conclusión, demostrando que la MAHD tiene un menor impacto ambiental en comparación

con la HD convencional. Los parámetros evaluados incluyen el consumo de electricidad (0,16 kW h para MAHD frente a 4 kW h para HD), la cantidad de CO₂ liberado (128 g frente a 3200 g) y la generación de aguas residuales (50 mL/g de aceite esencial frente a 722 mL/g de aceite esencial). Estos datos corroboran el potencial de la MAHD como una alternativa más sostenible a los métodos convencionales de extracción de aceites esenciales, particularmente en términos de emisiones de CO₂ y generación de aguas residuales para la extracción de 1 g de aceite esencial de la cáscara del fruto de *Cinnamomum camphora*.

Por consiguiente, se propone la MAHD como un método de extracción respetuoso con el medio ambiente, idóneo para la obtención de aceites esenciales. La eficiencia del proceso se debe al calor generado por el calentamiento por microondas, que crea un alto gradiente de presión dentro del producto. Las microondas interactúan selectivamente con las moléculas de agua libres presentes en los tejidos glandulares y vasculares, provocando un calentamiento localizado. Como resultado de este sobrecalentamiento interno, se produce una expansión significativa, que lleva a la ruptura de las paredes celulares y facilita la liberación del aceite esencial. En resumen, la MAHD no solo mejora la eficiencia y reduce los costes, sino que también representa un enfoque más sostenible y ecológicamente responsable en la extracción de aceites esenciales de plantas.

4 DISCUSION

La Hidrodestilación, como técnica clásica en la extracción sólido-líquido, ha sido durante mucho tiempo una de las metodologías más utilizadas en este campo. Este método, que implica la concentración del extracto tras la evaporación del solvente, depende en gran medida de las características de la planta y del tamaño de las partículas. Un aspecto crucial de este proceso es que la difusión interna puede ser el paso limitante durante la extracción. Además, las temperaturas de extracción y evaporación ejercen una influencia directa sobre la calidad de los productos finales. Aunque es una técnica general y bien establecida, supera en rendimiento a otras técnicas de extracción convencionales en un campo limitado de aplicaciones, particularmente en la extracción de compuestos termolábiles. Sin embargo, presenta desventajas como la extracción insuficiente de lípidos, largos tiempos de operación, alto consumo de solvente y la necesidad de operar en el punto de ebullición del solvente.

Con el tiempo, se ha desarrollado una combinación de Extracción Asistida por Microondas (MAE) con hidrodestilación, conocida como Hidrodestilación Asistida por Microondas (MAHD). Por su parte, la MAHD es un método de extracción de analitos de una matriz de muestra a un solvente mediante energía de microondas. Los mecanismos de conducción iónica y rotación dipolar son fundamentales para convertir las microondas en energía calorífica. Las microondas generan calor al interactuar con los componentes polares de la matriz vegetal, produciendo un calentamiento cercano a la superficie del material y una transferencia de calor por conducción. La rotación dipolar de las moléculas, debilitando los enlaces de hidrógeno y facilitando la penetración del solvente en la matriz, es una consecuencia de la perturbación electromagnética provocada por las microondas. El agua es considerada el mejor solvente para MAHD debido a su alta constante dieléctrica. La potencia de irradiación de las microondas es crucial para evitar la degradación de los componentes volátiles y la destrucción del material.

La técnica de MAHD está siendo cada vez más utilizada para optimizar procesos de extracción en términos de calidad, rendimiento, tiempo y uso de recursos. Su bajo costo de inversión y fácil acceso a los mecanismos necesarios la han convertido en la técnica preferida de pequeñas y medianas empresas de extracción de aceites. El proceso de calentamiento mediante microondas permite preservar los componentes intactos de las plantas y evitar subproductos de la descomposición térmica u oxidativa.

La combinación de Extracción Asistida por Ultrasonidos (UAE) con MAE es un método híbrido eficaz (UMAE). Aunque la UMAE ha sido objeto de estudio, su capacidad total aún no se ha aprovechado completamente. El ultrasonido mejora significativamente la extracción a través de la cavitación, facilitando la disrupción de las paredes celulares y permitiendo el acceso de los solventes al material celular. La irradiación simultánea produce efectos sinérgicos adicionales en el fenómeno de extracción.

Se ha desarrollado otro nuevo método llamado destilación al vapor asistida por microondas (MASD) para superar las limitaciones del MAHD. En MASD, los materiales vegetales se separan del agua, permitiendo una extracción más eficiente de los componentes no volátiles. El agua se calienta y se convierte en vapor, que luego pasa a través de los materiales vegetales y extrae los componentes volátiles o aceites esenciales. Además, la MAE ha demostrado ser más eficiente en la extracción de compuestos bioactivos en comparación con técnicas convencionales como Soxhlet y métodos avanzados como UAE, PLE y SFE. Con los años, los procedimientos basados en la MAE han reemplazado a algunos métodos de extracción convencionales y han sido adoptados tanto en laboratorios como en la industria.

Finalmente, los avances en la extracción por microondas han dado lugar a otras categorías de técnicas, como la destilación asistida por microondas (MAD), la hidrodifusión por microondas y gravedad (MHG), la hidrodestilación por microondas al vacío (VMHD), la extracción Soxhlet integrada por microondas (MIS) y la extracción por microondas sin disolventes (SFME). Estas técnicas, si se exploran científicamente, pueden demostrar ser tecnologías de extracción eficaces para garantizar la calidad de los medicamentos a base de plantas a nivel mundial.

5 CONCLUSIONES

- Primera.** – Aunque se observa una mínima diferencia en la composición de los aceites esenciales obtenidos por ambos métodos, el aceite esencial extraído mediante MAHD tiende a presentar una mayor proporción de compuestos oxigenados y una menor proporción de hidrocarburos terpénicos. Este fenómeno se debe a la interacción más eficiente de los compuestos oxigenados con las microondas debido a su momento dipolar y al menor tiempo de calentamiento que previene la descomposición térmica e hidrolítica de estos compuestos. La mayor concentración de compuestos oxigenados en los aceites obtenidos por MAHD es particularmente beneficiosa, ya que estos compuestos son altamente valorados por sus propiedades aromáticas, gustativas y terapéuticas.
- Segunda.** –La revisión de la literatura científica y los experimentos realizados indican que la técnica MAHD es sistemáticamente superior en términos de rendimiento de extracción comparada con la HD convencional. Los rendimientos de extracción mediante MAHD son consistentemente superiores, aunque la magnitud de esta superioridad varía entre diferentes recursos vegetales.
- Tercera.** – La técnica MAHD es más rápida, reduciendo significativamente el tiempo de procesamiento. Esta eficiencia no solo mejora la productividad, sino que también permite la extracción de una gama más amplia de compuestos, incluyendo aquellos con propiedades farmacológicas importantes.
- Cuarta.** – La capacidad de MAHD para operar a temperaturas más bajas en comparación con la HD tradicional sugiere una menor degradación térmica de los compuestos sensibles al calor, lo que contribuye al incremento en el rendimiento y la calidad de los aceites esenciales obtenidos.
- Quinta.** – La técnica MAHD es más sostenible ambientalmente al requerir menos energía y tiempo para la extracción. Esto se alinea con los principios de la química verde y la sostenibilidad industrial, reduciendo la huella de carbono asociada con la producción de aceites esenciales.
- Sexta.** – En conclusión, la Hidrodestilación Asistida por Microondas (MAHD) no solo ofrece ventajas en términos de rendimiento y eficiencia de la extracción, sino que también produce aceites esenciales de mayor calidad debido a la mayor proporción de

compuestos oxigenados. Además, su menor impacto ambiental y mayor alineación con los principios de la sostenibilidad la convierten en una opción preferible para la industria de los aceites esenciales. Estas ventajas sugieren que la adopción de MAHD podría mejorar significativamente tanto la eficiencia del proceso como la calidad del producto final en comparación con los métodos convencionales de Hidrodestilación.



6 REFERENCIAS BIBLIOGRAFICAS

1. Pino JA, Aragüez Y. Conocimientos actuales acerca de la encapsulación de aceites esenciales Current knowledge about the encapsulation of essential oils. Rev CENIC Cienc Quím. 2021 Jun;52(1):010–25.
2. Casado Villaverde I. Optimización de la extracción de aceites esenciales por destilación en corriente de vapor - Archivo Digital UPM [Internet]. [Madrid]: E.T.S.I. Industriales (UPM); 2018 [cited 2022 May 27]. Available from: <https://oa.upm.es/49669/>
3. Baser KHC, Buchbauer G. Handbook of Essential Oils. 3rd ed. Handbook of Essential Oils. CRC Press; 2020.
4. Stratakos AC, Koidis A. Methods for extracting essential oils. Essential Oils in Food Preservation, Flavor and Safety. 2016;31–8.
5. Darío Guarín O, Fernando Barajas-Solano A. Hidrodestilación asistida con microondas (MWHF) para la extracción de hidrolatos de plantas aromáticas. Revista Politécnica. 2015;11(21):51–5.
6. Lucchesi ME, Chemat F, Smadja J. Solvent-free microwave extraction of essential oil from aromatic herbs: Comparison with conventional hydro-distillation. J Chromatogr A. 2004 Jul 23;1043(2):323–7.
7. Yepes-Nuñez JJ, Urrútia G, Romero-García M, Alonso-Fernández S. The PRISMA 2020 statement: an updated guideline for reporting systematic reviews. Rev Esp Cardiol. 2021 Sep 1;74(9):790–9.
8. Moher D. Preferred Reporting Items for Systematic Reviews and Meta-Analyses: The PRISMA Statement. Ann Intern Med. 2009 Aug 18;151(4):264.
9. Roever L. PICO: Model for Clinical Questions. Evidence Based Medicine and Practice [Internet]. 2018 [cited 2023 Oct 20];3(2):115–6. Available from: <http://pubmedhh.nlm.nih.gov/nlmd/pico/piconew.php>
10. Esquivel Bombhore H. Protocolos prácticos para la aplicación de Aceites Esenciales [Internet]. Bombhore Media LLC; 2022 [cited 2023 Nov 28]. 5–10 p. Available from:

https://www.google.ae/books/edition/Protocolos_pr%C3%A1cticos_para_la_aplicaci%C3%B3n/8zRYEAAAQBAJ?hl=en&gbpv=0&kptab=overview

11. Movaliya SK. Extraction of essential oil by Microwave-assisted extraction: A review. International Journal of advance Research Innovative Ideas in Education [Internet]. 2017 [cited 2023 Nov 9];3(2):5006. Available from: https://ijariie.com/AdminUploadPdf/Extraction_of_essential_oil_by_Microwave_assisted_extraction_A_review_ijariie5006.pdf
12. Mohanty S, Ray A, Naik PK, Sahoo A, Jena S, Das PK, et al. Variation in Yield, Chemical Composition and Biological Activities of Essential Oil of Three Curcuma Species: A Comparative Evaluation of Hydrodistillation and Solvent-Free Microwave Extraction Methods. Molecules [Internet]. 2023 Jun 1 [cited 2023 Nov 10];28(11). Available from: [/pmc/articles/PMC10254477/](https://pubmed.ncbi.nlm.nih.gov/41254477/)
13. Liu Z, Li H, Zhu Z, Huang D, Qi Y, Ma C, et al. Cinnamomum camphora fruit peel as a source of essential oil extracted using the solvent-free microwave-assisted method compared with conventional hydrodistillation. LWT. 2022 Jan 1;153:112549.
14. El-Kersh DM, Eissa M, Rasheed DM. Impact of Extraction Technique on the Volatile Oil Contents and Composition of four Ocimum Species; Microwave Assisted Extraction versus Distillation Study. Journal of Advanced Pharmacy Research [Internet]. 2019 Jul 1 [cited 2023 Nov 9];3(3):134–42. Available from: https://aprj.journals.ekb.eg/article_40279.html
15. Dhifi W, Bellili S, Jazi S, Bahloul N, Mnif W, Nahar L, et al. Essential Oils' Chemical Characterization and Investigation of Some Biological Activities: A Critical Review. Medicines 2016, Vol 3, Page 25 [Internet]. 2016 Sep 22 [cited 2023 Nov 28];3(4):25. Available from: <https://www.mdpi.com/2305-6320/3/4/25/htm>
16. Moghaddam M, Mehdizadeh L. Chemistry of Essential Oils and Factors Influencing Their Constituents. Soft Chemistry and Food Fermentation. 2017 Jan 1;379–419.

17. Elshafie HS, Camele I. An Overview of the Biological Effects of Some Mediterranean Essential Oils on Human Health. Biomed Res Int [Internet]. 2017 [cited 2023 Nov 28];2017. Available from: /pmc/articles/PMC5694587/
18. Boswell S. HYSSES. 2019 [cited 2023 Nov 28]. Essential Oils in History. Available from: <https://hysses.com/blogs/tips/essential-oils-in-history>
19. Jugreet BS, Suroowan S, Rengasamy RRR, Mahomoodally MF. Chemistry, bioactivities, mode of action and industrial applications of essential oils. Trends Food Sci Technol. 2020 Jul 1;101:89–105.
20. Ni ZJ, Wang X, Shen Y, Thakur K, Han J, Zhang JG, et al. Recent updates on the chemistry, bioactivities, mode of action, and industrial applications of plant essential oils. Trends Food Sci Technol. 2021 Apr 1;110:78–89.
21. Mathews A, Arbal AV, Kaarunya A, Jha PK, Le-Bail A, Rawson A. Conventional vs modern extraction techniques in the food industry. Extraction Processes in the Food Industry. 2024 Jan 1;97–146.
22. Riayatsyah TMI, Sebayang AH, Silitonga AS, Padli Y, Fattah IMR, Kusumo F, et al. Current Progress of Jatropha Curcas Commoditisation as Biodiesel Feedstock: A Comprehensive Review. Front Energy Res. 2022 Jan 14;9.
23. Zakeri A, Bahmani E, Sabour A, Aghdam R. Plant extracts as sustainable and green corrosion inhibitors for protection of ferrous metals in corrosive media: A mini review. Corrosion Communications [Internet]. 2022 [cited 2024 May 21];5:25–38. Available from: www.elsevier.com/locate/corcom
24. Safdar MN, Kausar T, Nadeem M. Comparison of Ultrasound and Maceration Techniques for the Extraction of Polyphenols from the Mango Peel. J Food Process Preserv. 2017 Aug 1;41(4).
25. Kumar Mahawer S, Himani, Arya S, Kumar R, Prakash O. Extractions Methods and Biological Applications of Essential Oils. 2022 Jun 23 [cited 2024 May 21]; Available from: https://www.researchgate.net/publication/360964258_Extractions_Methods_and_Biological_Applications_of_Essential_Oils

26. Miralrio A, Vázquez AE. Plant Extracts as Green Corrosion Inhibitors for Different Metal Surfaces and Corrosive Media: A Review. *Processes*. 2020 Aug 1;8(8).
27. Mukherjee PK. Extraction and Other Downstream Procedures for Evaluation of Herbal Drugs. *Quality Control and Evaluation of Herbal Drugs*. 2019 Jan 1;195–236.
28. Stratakis AC, Koidis A. Methods for Extracting Essential Oils. *Essential Oils in Food Preservation, Flavor and Safety*. 2016 Jan 1;31–8.
29. Garcia-Vaquero M, Rajauria G, Tiwari B. Conventional extraction techniques: Solvent extraction. *Sustainable Seaweed Technologies: Cultivation, Biorefinery, and Applications*. 2020 Jan 1;171–89.
30. Gavahian M, Farhoosh R, Farahnaky A, Javidnia, Shahidi. Comparison of extraction parameters and extracted essential oils from *Mentha piperita* L. using hydrodistillation and steamdistillation. *Int Food Res J* [Internet]. 2015 [cited 2023 Nov 10];22(1):283–8. Available from: [http://www.ifrj.upm.edu.my/22%20\(01\)%202015/\(41\).pdf](http://www.ifrj.upm.edu.my/22%20(01)%202015/(41).pdf)
31. Geow CH, Tan MC, Yeap SP, Chin NL. A Review on Extraction Techniques and Its Future Applications in Industry. *European Journal of Lipid Science and Technology* [Internet]. 2021 Apr 1 [cited 2024 May 22];123(4):2000302. Available from: <https://onlinelibrary.wiley.com/doi/full/10.1002/ejlt.202000302>
32. Dallagi H, Jha PK, Faille C, Le-Bail A, Rawson A, Benezech T. Removal of biocontamination in the food industry using physical methods; an overview. *Food Control*. 2023 Jun 1;148:109645.
33. Meng Hong S, Harun Kamaruddin A, Mohd Nadzir M. A Review on Extraction, Antimicrobial Activities and Toxicology of *Cinnamomum cassia* in Future Food Protection. *Biointerface Res Appl Chem* [Internet]. 2023 [cited 2023 Nov 9];13(6):581. Available from: <https://biointerfaceresearch.com/>
34. Goleroudbary MG, Ghoreishi SM. Response surface optimization of Safranal and Crocin extraction from *Crocus sativus* L. via supercritical fluid technology. *Journal of Supercritical Fluids*. 2016 Feb 1;108:136–44.

- 83

conferences.org/articles/e3sconf/abs/2023/11/e3sconf_3rdnrls2023_00036/e3sconf_3rdnrls2023_00036.html

42. Sprea RM, Fernandes LHM, Pires TCSP, Calhelha RC, Rodrigues PJ, Amaral JS. Volatile Compounds and Biological Activity of the Essential Oil of *Aloysia citrodora* Paláu: Comparison of Hydrodistillation and Microwave-Assisted Hydrodistillation. *Molecules* [Internet]. 2023 Jun 1 [cited 2023 Nov 9];28(11):4528. Available from: <https://www.mdpi.com/1420-3049/28/11/4528/htm>



ANEXOS

Anexo 1 Lista de verificación PRISMA 2020

Section and Topic	Item #	Checklist item	Location where item is reported.
TITLE			
Title	1	Identify the report as a systematic review.	X
ABSTRACT			
Abstract	2	See the PRISMA 2020 for Abstracts checklist.	X
INTRODUCTION			
Rationale	3	Describe the rationale for the review in the context of existing knowledge.	X
Objectives	4	Provide an explicit statement of the objective(s) or question(s) the review addresses.	X
METHODS			
Eligibility criteria	5	Specify the inclusion and exclusion criteria for the review and how studies were grouped for the syntheses.	X
Information sources	6	Specify all databases, registers, websites, organisations, reference lists and other sources searched or consulted to identify studies. Specify the date when each source was last searched or consulted.	X
Search strategy	7	Present the full search strategies for all databases, registers and websites, including any filters and limits used.	X
Selection process	8	Specify the methods used to decide whether a study met the inclusion criteria of the review, including how many reviewers screened each record and each report retrieved, whether they worked independently, and if applicable, details of automation tools used in the process.	X
Data collection process	9	Specify the methods used to collect data from reports, including how many reviewers collected data from each report, whether they worked independently, any processes for obtaining or confirming data from study investigators, and if applicable, details of automation tools used in the process.	X
Data items	10a	List and define all outcomes for which data were sought. Specify whether all results that were compatible with each outcome domain in each study were sought (e.g. for all measures, time points, analyses), and if not, the methods used to decide which results to collect.	X
	10b	List and define all other variables for which data were sought (e.g. participant and intervention characteristics, funding sources). Describe any assumptions made about any missing or unclear information.	X
Study risk of bias assessment	11	Specify the methods used to assess risk of bias in the included studies, including details of the tool(s) used, how many reviewers assessed each study and whether they worked independently, and if applicable, details of automation tools used in the process.	X
Effect measures	12	Specify for each outcome the effect measure(s) (e.g. risk ratio, mean difference) used in the synthesis or presentation of results.	X
Synthesis methods	13a	Describe the processes used to decide which studies were eligible for each synthesis (e.g. tabulating the study intervention characteristics and comparing against the planned groups for each synthesis (item #5)).	X
	13b	Describe any methods required to prepare the data for presentation or synthesis, such as handling of missing summary statistics, or data conversions.	X
	13c	Describe any methods used to tabulate or visually display results of individual studies and syntheses.	X
	13d	Describe any methods used to synthesize results and provide a rationale for the choice(s). If meta-analysis was performed, describe the model(s), method(s) to identify the presence and extent of statistical heterogeneity, and software package(s) used.	X
	13e	Describe any methods used to explore probable causes of heterogeneity among study results (e.g. subgroup analysis, meta-regression).	X
	13f	Describe any sensitivity analyses conducted to assess robustness of the synthesized results.	X
Reporting bias assessment	14	Describe any methods used to assess risk of bias due to missing results in a synthesis (arising from reporting biases).	X

Section and Topic	Item #	Checklist item	Location where item is reported.
Certainty assessment	15	Describe any methods used to assess certainty (or confidence) in the body of evidence for an outcome.	X
RESULTS			
Study selection	16a	Describe the results of the search and selection process, from the number of records identified in the search to the number of studies included in the review, ideally using a flow diagram.	X
	16b	Cite studies that might appear to meet the inclusion criteria, but which were excluded, and explain why they were excluded.	X
Study characteristics	17	Cite each included study and present its characteristics.	X
Risk of bias in studies	18	Present assessments of risk of bias for each included study.	X
Results of individual studies	19	For all outcomes, present, for each study: (a) summary statistics for each group (where appropriate) and (b) an effect estimates and its precision (e.g. confidence/credible interval), ideally using structured tables or plots.	X
Results of syntheses	20a	For each synthesis, briefly summarise the characteristics and risk of bias among contributing studies.	X
	20b	Present results of all statistical syntheses conducted. If meta-analysis was done, present for each the summary estimate and its precision (e.g. confidence/credible interval) and measures of statistical heterogeneity. If comparing groups, describe the direction of the effect.	X
	20c	Present results of all investigations of probable causes of heterogeneity among study results.	X
	20d	Present results of all sensitivity analyses conducted to assess the robustness of the synthesized results.	X
Reporting biases	21	Present assessments of risk of bias due to missing results (arising from reporting biases) for each synthesis assessed.	X
Certainty of evidence	22	Present assessments of certainty (or confidence) in the body of evidence for each outcome assessed.	X
DISCUSSION			
Discussion	23a	Provide a general interpretation of the results in the context of other evidence.	X
	23b	Discuss any limitations of the evidence included in the review.	X
	23c	Discuss any limitations of the review processes used.	X
	23d	Discuss implications of the results for practice, policy, and future research.	X
OTHER INFORMATION			
Registration and protocol	24a	Provide registration information for the review, including register name and registration number, or state that the review was not registered.	X
	24b	Indicate where the review protocol can be accessed, or state that a protocol was not prepared.	X
	24c	Describe and explain any amendments to information provided at registration or in the protocol.	X
Support	25	Describe sources of financial or non-financial support for the review, and the role of the funders or sponsors in the review.	X
Competing interests	26	Declare any competing interests of review authors.	X
Availability of data, code and other materials	27	Report which of the following are publicly available and where they can be found template data collection forms; data extracted from included studies; data used for all analyses; analytic code; any other materials used in the review.	X

From: Page MJ, McKenzie JE, Bossuyt PM, Boutron I, Hoffmann TC, Mulrow CD, et al. The PRISMA 2020 statement: an updated guideline for reporting systematic reviews. BMJ 2021;372: n71. doi: 10.1136/bmj. n71

For more information, visit: <http://www.prisma-statement.org/>

Anexo 2 Lista de verificación PRISMA 2020 para resúmenes estructurados

Section and Topic	Item #	Checklist item	Reported (Yes/No)
TITLE			
Title	1	Identify the report as a systematic review.	
BACKGROUND			
Objectives	2	Provide an explicit statement of the main objective(s) or question(s) the review addresses.	
METHODS			
Eligibility criteria	3	Specify the inclusion and exclusion criteria for the review.	
Information sources	4	Specify the information sources (e.g. databases, registers) used to identify studies and the date when each was last searched.	
Risk of bias	5	Specify the methods used to assess risk of bias in the included studies.	
Synthesis of results	6	Specify the methods used to present and synthesise results.	
RESULTS			
Included studies.	7	Give the total number of included studies and participants and summarise relevant characteristics of studies.	
Synthesis of results	8	Present results for main outcomes, preferably indicating the number of included studies and participants for each. If meta-analysis was done, report the summary estimate and confidence/credible interval. If comparing groups, indicate the direction of the effect (i.e. which group is favoured).	
DISCUSSION			
Limitations of evidence	9	Provide a brief summary of the limitations of the evidence included in the review (e.g. study risk of bias, inconsistency and imprecision).	
Interpretation	10	Provide a general interpretation of the results and important implications.	
OTHER			
Funding	11	Specify the primary source of funding for the review.	
Registration	12	Provide the register name and registration number.	

From: Page MJ, McKenzie JE, Bossuyt PM, Boutron I, Hoffmann TC, Mulrow CD, et al. The PRISMA 2020 statement: an updated guideline for reporting systematic reviews. BMJ 2021;372: n71. doi: 10.1136/bmj. n71

For more information, visit: <http://www.prisma-statement.org/>