

### Métodos Extrativos e Caracterização Química

José Galberto Martins da Costa; Ingrid Raiane Ferreira dos Santos; Jonas Felipe de Lima Pereira; Maria Alice Macêdo Ribeiro; Mariana Pereira da Silva; João Vitor Facundo Xenofonte; Gerson Javier Torres Salazar.

#### Métodos de Extração

Os métodos mais comuns para obtenção de óleos essenciais são hidrodestilação e destilação por arraste a vapor. Nas últimas décadas houve forte engajamento de métodos “verdes” e assistidos por energia, por exemplo, extração por fluido supercrítico, assistida por micro-ondas e assistida por ultrassom, com o objetivo de se obter maior rendimento, menor degradação térmica e redução do uso de solventes orgânicos. Essas técnicas modernas também permitem melhor seletividade e preservação de compostos termolábeis (UWINEZA e WAŚKIEWICZ, 2020).

#### Hidrodestilação

Estudos comparativos evidenciam que a extração por hidrodestilação (Figura 1) é mais eficiente na obtenção de compostos voláteis, favorecida pela ruptura do tecido vegetal por imersão em água, ocasionando a liberação de voláteis. Esse método contribui para a extração de perfil químico mais direcionado para a subclasse de monoterpenos e outras moléculas polares (MORADI-SADR *et al.* 2023). Em contrapartida, esse fator pode ocasionar a perda de compostos lábeis por hidrólise com o aumento da temperatura do meio.

No processo de hidrodestilação, o material vegetal é imerso em água e a mistura é aquecida até ebulição. O vapor de água arrasta os compostos voláteis contidos nas estruturas secretoras da planta, condensando e separado em duas fases, o óleo essencial (menos denso) e hidrolato. O óleo essencial é então coletado e purificado.

**Figura 1.** Sistema de extração de óleos essenciais por hidrodestilação em escala laboratorial. O aparato é constituído por uma manta de aquecimento com controle termostático, balão de fundo redondo contendo a biomassa vegetal e água.



**Fonte:** TECNAL. Destilador de Óleos Essenciais – TE-2761/20. Disponível em: [https://tecnal.com.br/pt-BR/produtos/detalhes/4095\\_destilador\\_de\\_oleos\\_essenciais](https://tecnal.com.br/pt-BR/produtos/detalhes/4095_destilador_de_oleos_essenciais). Acesso em: 13 out. 2025.

### **Destilação por Arraste a Vapor**

O método fundamenta-se na Lei das Pressões Parciais de Dalton, permitindo a extração de compostos voláteis a temperaturas inferiores aos seus pontos de ebulição individuais (Figura 2). O agente de arraste (vapor de água) permeia a matriz vegetal, volatizando seus compostos. Posteriormente, a mistura resultante entra em ebulição, promovendo extração a temperaturas mais baixas e evitando degradação térmica. Quando a pressão é aumentada, a energia de vapor penetra melhor na matriz vegetal rompendo a estrutura da célula que contém o óleo, o que promove maior rendimento (MARČAC *et al.*, 2023). Por não haver contato direto da água com o material, reações de hidrólise são minimizadas e sua composição química é preservada (RAZA *et al.*, 2024).

Contudo, a aplicabilidade do método encontra limitações em matrizes ricas em compostos com diferentes polaridades, como os fenólicos. A interação desses compostos com a água pode levar à formação de emulsões estáveis e difíceis de separar durante a fase de condensação e decantação. Esse fenômeno, motivado por diferenças eletrostáticas e de afinidade molecular, resulta no aprisionamento de parte do óleo na fase aquosa (hidrolato), impactando negativamente o rendimento final da extração (CHILEV; PESHEV, 2025).

**Figura 2.** Sistema de destilação por arraste a vapor em escala piloto ou semi-industrial. O equipamento é construído de aço inoxidável e composto por um vaso de extração pressurizado com um manômetro para monitoramento da pressão interna. O vapor é gerado e passa pela biomassa vegetal (não submersa), sendo então conduzido ao condensador tubular de alta capacidade e a uma unidade de coleta de óleo.



**Fonte:** Adaptado de: ALIBABA. *Industrial Steam Distillation High Efficient Machine*. Disponível em: [https://www.alibaba.com/product-detail/Industrial-Steam-Distillation-High-Efficient-Machine\\_1601289336566.html](https://www.alibaba.com/product-detail/Industrial-Steam-Distillation-High-Efficient-Machine_1601289336566.html). Acesso em: 13 out. 2025.

### Extração por Fluido Supercrítico

A extração por fluido supercrítico representa técnica verde para extração de compostos de plantas que utilizem fluidos supercríticos, como exemplo, o dióxido de carbono como solvente. Esse processo é dividido em quatro estágios: i) Dessorção do analito da matriz, ii) solubilização do analito pelo fluido supercrítico, iii) arraste do analito para fora da célula de extração e iv) coleta do analito extraído.

O processo extrativo é valorizado pela alta pureza extrativa. O dióxido de carbono é facilmente removido, sem resíduos e pela preservação de compostos termolábeis, graças à operação em baixas temperaturas. A técnica é processo verde e oferece seletividade ajustável pela variação da pressão, e suas principais limitações são o alto custo inicial do equipamento de alta pressão e a baixa polaridade do dióxido de carbono, o que exige o uso de cossolventes para extrair compostos mais polares, aumentando a complexidade (DA SILVA *et al.* 2016).

O processo de extração começa com o bombeamento do solvente (fluido supercrítico) para a célula extratora que contém a amostra. O fluido é então pressurizado e aquecido até atingir as condições supercríticas desejadas. Na célula, ocorre o contato entre a matriz, o qual pode ser dinâmico (o fluido supercrítico passa continuamente) ou estático (quantidade fixa do fluido supercrítico permanece em contato). Após a obtenção, o óleo essencial obtido é levado a um restritor com controle de temperatura e pressão. Neste ponto, a despressurização separa o óleo do fluido, que retorna ao seu estado gasoso original. Finalmente, o óleo essencial é coletado usando métodos como solventes, sistemas criogênicos, retenção em fase sólida ou acoplamento *on-line* a sistema de análise (Figura 3). O solvente extrator é, em geral, recolhido e reciclado (PINTO *et al.*, 2018).

**Figura 3:** Sistema de extração com fluido supercrítico, caracterizado pela separação que utiliza fluidos em condições supercríticas como solvente para extrair um componente desejado de uma matriz.



**Fonte:** SUPERCRITICAL FLUID TECHNOLOGIES. Extrator de Fluido Supercrítico modelo SFT-110. 2025. Disponível em: <https://www.supercriticalfluids.com/products/sft-110-sfe-system/>. Acesso em: 13 out. 2025.

### Extração Assistida por Micro-ondas

O processo de extração assistida por micro-ondas baseia-se no impacto direto da radiação eletromagnética em material que pode absorver essa energia e convertê-la em calor. Essa energia traz muitas vantagens para o processo de extração, como menor consumo de solvente e energia, curto tempo de análise e rendimento mais elevado (MANDAL *et al.*, 2007). O aquecimento é o resultado do atrito que é produzido pela migração entre o meio e os íons em movimento. A rotação dipolar ocorre quando as moléculas dipolares tentam se adaptar ao campo elétrico alternado. Este fenômeno ocorre em ambiente no qual, as colisões ocorrem entre os dipolos e as moléculas circundantes (ZHANG *et al.*, 2011).

Existem dois processos principais para conduzir a extração assistida por micro-ondas, o primeiro utiliza temperatura e pressão controlada, e recipiente fechado é usado. O segundo modelo utiliza recipiente aberto, e a temperatura de extração depende do solvente a ser utilizado, por causa do ponto de ebulição dele. A amostra da planta passa por aquecimento dielétrico, devido à radiação eletromagnética entre 300 MHz e 300 GHz. Ambos os fenômenos produzem aumento na energia térmica, levando à extração eficiente (LÓPEZ-SALAZAR *et al.* 2023). Dessa forma, o procedimento de micro-ondas assistida é considerado tecnologia verde (BAGADE e PATIL 2021).

### Extração Assistida por Ultrassom

A extração assistida por ultrassom não é comumente utilizada na extração de óleos essenciais, porém há relatos na literatura sobre o seu uso. É um método sólido-líquido que utiliza a energia mecânica de ondas ultrassônicas aplicadas às amostras, que por meio de choques intensos formam

microbolhas no meio líquido (cavitação) (Figura 4). Essas estruturas implodem violentamente e geram altas temperaturas (cerca de 4500 °C) e pressões extremas (cerca de 50MPa) que causam rupturas na membrana celular (sonólise) e facilitam a transferência de massas, resultando em maior rendimento na extração de compostos desejados.

A extração assistida por ultrassom representa método ecologicamente correto. Apresenta como vantagens excepcionais, ao extrair compostos bioativos das plantas, a redução de tempo de extração, melhora a qualidade e o rendimento do extrato, além de possibilitar a preservação das características biológicas dos óleos, aumentando a potencialidade dos compostos bioativos desejados. Outra vantagem da técnica inclui a redução da temperatura (ZHANG *et al.*, 2018). Por outro lado, por utilizar temperaturas muito altas, pode ocorrer a degradação de compostos termossensíveis, alterando o perfil químico e a qualidade final do óleo essencial. Portanto, a otimização cuidadosa é a chave para que esse método se consolide como alternativa simples, rápida e sustentável aos métodos convencionais.

**Figura 4** Sistema de Extração Assistida por Ultrassom. O equipamento é composto por um ultrassonicador de sonda imerso em um reator de extração contendo o material vegetal e o solvente extrator. A energia ultrassônica fornecida pela ponta da sonda provoca o fenômeno de cavitação, facilitando a liberação dos compostos de interesse da matriz vegetal para o solvente. Após o tempo de irradiação, o extrato é separado do resíduo sólido por filtração ou centrifugação, sendo o passo inicial para a obtenção do produto.



**Fonte:** HIELSCHER ULTRASONICS. Processador ultrassônico UIP2000hdT para extração em batelada. 2024. Disponível em: <https://www.hielscher.com/uip2000hdt-2000-watts-powerful-industrial-ultrasonicator-for-full-process-control.htm>. Acesso em: 13 out. 2025.

### Caracterização Química

Para análises químicas qualitativa e quantitativa, o padrão-ouro continua sendo a cromatografia gasosa acoplada à espectrometria de massas (CG-EM, ou em inglês GC-MS) e, quando necessário para quantificação, a cromatografia gasosa acoplada ao detector de ionização de chama (CG-DIC, ou

em inglês GC-FID). Métodos avançados incluem Cromatografia gasosa bidimensional abrangente (CG×CG) e colunas quirais para separação de enantiômeros, além do uso de índices de retenção lineares (IRL) para identificação mais robusta. A preparação da amostra para a análise de voláteis evoluiu e técnicas como HS-SPME (Micro extração em fase sólida Headspace) permitem extração direta do headspace sem solventes, reduzindo artefatos e fornecendo perfis voláteis muito próximos do aroma “real” da matriz. A combinação HS-SPME/GC–MS é hoje amplamente usada para mapear o metaboloma volátil de plantas e óleos essenciais (GONZÁLEZ-MORENO *et al.*, 2025).

A literatura sobre estudos com óleos essenciais compara métodos de extração (rendimento, perfil químico, presença de artefatos) e protocolos analíticos (tipo de fibra SPME, condições de dessorção, coluna GC, biblioteca de espectros, uso de padrões e LRI), porque diferenças metodológicas explicam variações significativas nos perfis relatados. Revisões recentes e estudos comparativos demonstram que a escolha da técnica afeta tanto a composição relativa (percentuais) quanto a presença/ausência de compostos menores, o que é crucial quando se busca relacionar propriedades biológicas a componentes específicos (GONZÁLEZ-MORENO *et al.*, 2025).

### **Cromatografia Gasosa acoplada à Espectrometria de Massas (CG-EM)**

O Cromatógrafo Gasoso acoplado a Espectrômetro de massas (Figura 5) é amplamente utilizado para identificar e quantificar compostos voláteis, de baixo peso molecular, em misturas complexas, separando e quantificando os componentes da amostra pela razão massa/carga ( $m/z$ ). A fase móvel é um gás inerte, como o hélio (He) ou hidrogênio ( $H_2$ ). Os íons formados após o bombardeamento de elétrons são acelerados e separados, enviando sinal para o detector. O tempo de retenção e o espectro de massas obtido contribuem para a identificação química do composto. Desse modo, evidências apontam que esse método é o mais utilizado para a análise de óleos essenciais e outras amostras voláteis, devido à capacidade única de separar e identificar compostos.

Embora a técnica seja excelente para caracterização química de compostos voláteis majoritários, as perdas de isômeros e outros componentes minoritários reforçam a necessidade do seu uso associado a técnicas complementares para caracterização completa. O uso de uma segunda coluna com seletividade diferente é Cromatografia gasosa bidimensional abrangente (CG x CG-EM), uma estratégia muito utilizada para análise de amostras complexas, sujeitas a co-eluição. Isso garante que os compostos muito próximos sejam separados e tenham seus espectros de massa coletados de forma pura (YU *et al.*, 2022). Concomitantemente, a “Two-Dimensional Gas Chromatography Time-of-Flight Mass Spectrometry” (GC × GC TOFMS) permite identificar componentes minoritários e isômeros, apresentando maior poder de separação e sensibilidade para perfis complexos do que a técnica original (SAHOO *et al.*, 2024).

O uso de Cromatografia líquida acoplada ao detector de espectrometria de massas (CL–EM) em complemento ao CG–EM, demonstrou que alguns constituintes termossensíveis oxidados ou polarizados são mais bem detectados por CL-EM, enquanto a técnica tradicional manteve-se eficiente na identificação de voláteis clássicos (monoterpenos, sesquiterpenos) (YANG *et al.*, 2024). A técnica tradicional é incapaz de caracterizar compostos não voláteis sem derivatizar a matriz. Outras



combinações como CG-QTOF-EM (Cromatografia gasosa acoplada a espectrometria de massas por tempo de voo/ transformada de Fourier) capaz de identificar e separar isômeros, e infusão direta em EM por TF-RCI (Ressonância ciclônica de íons por transformada de Fourier), que possui alta resolução de massa na ordem de milhões, possibilitaram a determinação de perfil químico abrangente, sobretudo da fração não volátil (GUO *et al.*, 2025). Desse modo, para elucidação química robusta faz-se necessário acoplar CG-EM a técnicas ortogonais como, Ressonância Magnética Nuclear acoplada a cromatografia líquida e espectrometria de massas (RMN, CL-EM), principalmente se as bibliotecas forem insuficientes (CUCINOTTA *et al.*, 2024).

Recente estudo mostrou que métodos combinados, tal como, Microextração em fase sólida por Headspace acoplada com cromatografia gasosa acoplada por espectrômetro de massas (HS-MEFS/CG-EM) apresentou capacidade de manter o perfil volátil do óleo de *Artemisia absinthium*, preservando a essência da composição química, sem a necessidade de extração líquida prévia. Apesar disso, a técnica possui limitações qualitativas que podem afetar a reprodutibilidade da análise (AATI *et al.*, 2024). Outro estudo revela que essa técnica é seletiva para compostos voláteis de cabeçalho e altamente voláteis sem produtos de transformação térmica (GABRIEL *et al.*, 2025). A integração com cromatografia líquida de ultra eficiência (UPLC/MS) permite a elucidação do perfil químico representativo do metaboloma vegetal, mesmo com suas diferentes polaridades. Esse fator é importante quando o óleo não possui frações totalmente voláteis e apolares, como também na busca por marcadores bioativos que não aparecem bem em CG (BANSAL *et al.*, 2024).

**Figura 5:** Cromatógrafo Gasoso acoplado a Espectrômetro de Massas (CG-EM), utilizado para a separação, identificação e quantificação dos constituintes voláteis de óleos essenciais com base em seus tempos de retenção e espectros de massas.



### **Cromatografia Gasosa acoplada ao Detector de Ionização de Chama (CG-DIC)**

Cromatografia gasosa com detector de ionização por chama (CG-DIC) representa técnica analítica adequada para a análise quantitativa do óleo essencial, pois oferece alta sensibilidade, grande estabilidade e uma faixa dinâmica linear excepcionalmente alta que permite a análise de componentes voláteis como o óleo essencial em concentrações muito baixas ou em níveis de traços (SFETSAS *et al.*, 2011).

A CG-DIC oferece grande sensibilidade a variedade de compostos orgânicos voláteis, além de ser relativamente simples de operar. No entanto, apesar das suas vantagens, a identificação de compostos ativos pelo CG-FID tem limitação inerente, pois o detector fornece apenas informações de quantidade (massa) e tempo de retenção.

Em análises com CG-DIC a identidade de um pico é muitas vezes presumida com base em índices de retenção e comparação com padrões, o que pode ser insuficiente para amostras complexas, limitando a identificação a informações sobre seus índices de retenção e seus picos. É por essa razão que, para a confirmação estrutural inequívoca de componentes específicos, a técnica frequentemente requer o acoplamento a um detector complementar, como o espectrômetro de massas (CG-EM), que adiciona uma dimensão de informação qualitativa fundamental (SHUTTLEWORTH e JOHNSON, 2022).

**Figura 6:** Cromatógrafo Gasoso acoplado a Detector de Ionização de Chama (CG-DIC), empregado na separação e quantificação de constituintes voláteis com base em seus tempos de retenção e resposta de massa.



## Outros Métodos Analíticos

Outros métodos analíticos têm sido amplamente empregados para a caracterização detalhada de amostras. Entre eles, destaca-se a espectroscopia de fluorescência, técnica sensível e não destrutiva utilizada para investigar a interação entre moléculas e analisar compostos que apresentam capacidade de emissão de luz quando excitados por radiação eletromagnética.

Os compostos químicos presentes em óleos essenciais, como terpenóides e, principalmente, fitoquímicos aromáticos (cumarinas e polifenóis), possuem anéis aromáticos ou duplas ligações conjugadas, que são estruturas capazes de fluorescer quando excitadas por luz em comprimentos de onda específicos. Ao analisar a intensidade de fluorescência em diferentes comprimentos de onda de excitação é possível identificar a pureza do óleo e perfis espectrais sutis podem distinguir óleos



essenciais extraídos de diferentes espécies de plantas ou de diferentes regiões geográficas (MOURÃO *et al.*, 2024).

Por outro lado, a literatura relata que as tecnologias digitais exercem grande influência sobre as inovações em inteligência artificial (IA) (SIRCAR *et al.*, 2021). A pesquisa por novos compostos bioativos de origem natural, conhecidos como fitoquímicos, é campo de vital importância para as indústrias farmacêutica, nutracêutica e agrícola. A identificação, caracterização estrutural e avaliação das propriedades funcionais desses compostos – como bioatividade, toxicidade ou comportamento metabólico – dependem de processos laboratoriais caros, demorados e de alto rendimento. A necessidade de acelerar esse ciclo de descoberta e, ao mesmo tempo, gerenciar o crescente volume de dados químicos e biológicos impulsionou a adoção de abordagens computacionais avançadas.

A IA e o Aprendizado de Máquina (ML) surgiram como ferramentas revolucionárias, estabelecendo um novo paradigma na fitoquímica. Modelos preditivos, que utilizam algoritmos como Redes Neurais Artificiais (RNA), Máquinas de Vetores de Suporte (SVM) e Aprendizado Profundo (Deep Learning), são capazes de processar grandes volumes de dados, incluindo informações genômicas, espectrais, estruturais moleculares e resultados de ensaios biológicos (NAYAK *et al.*, 2025).

O uso da IA transforma a fitoquímica, de um processo baseado em tentativa, para abordagem guiada por dados. Esta integração não apenas aumenta a eficiência e reduz os custos de pesquisa, mas também pavimentam o caminho para a descoberta e o desenvolvimento mais rápidos de novos fármacos e ingredientes funcionais de origem natural.

## Referências

- AATI, H.Y. *et al.* Phytochemical Characterization Utilizing HS-SPME/GC-MS: Exploration of the Antioxidant and Enzyme Inhibition Properties of Essential Oil from Saudi *Artemisia absinthium* L. **Pharmaceuticals** 17:1460. 2024. <https://doi.org/10.3390/PH17111460/S1>
- BAGADE, S.B. e PATIL, M. Recent Advances in Microwave Assisted Extraction of Bioactive Compounds from Complex Herbal Samples: A Review. **Crit Rev Anal Chem.** 51:138–149. 2021. <https://doi.org/10.1080/10408347.2019.1686966>
- BANSAL, Y. *et al.* Integrated GC-MS and UPLC-ESI-QTOF-MS based untargeted metabolomics analysis of *in vitro* raised tissues of *Digitalis purpurea* L. **Front Plant Sci**, 15:1433634. 2024. <https://doi.org/10.3389/FPLS.2024.1433634/BIBTEX>
- CHILEV, C. e PESHEV, D. Hydro-distillation versus steam distillation for clove oil production. **Journal of Chemical Technology and Metallurgy.** 60:311–318, 2025. <https://doi.org/10.59957/JCTM.V60.I2.2025.13>
- CUCINOTTA, L. *et al.* Gas chromatographic techniques and spectroscopic approaches for a deep characterization of *Piper gaudichaudianum* Kunth essential oil from Brazil. **J Chromatogr A.** 1732:465208. 2024. <https://doi.org/10.1016/J.CHROMA.2024.465208>

- DA SILVA, R.P.F.F. *et al.* Supercritical fluid extraction of bioactive compounds. **TrAC Trends in Analytical Chemistry**. 76:40–51. 2016. <https://doi.org/10.1016/J.TRAC.2015.11.013>
- GABRIEL, M.B.; PINHEIRO, G.P.; HANTAO, L.W.; SAWAYA, A.C.H.F. Comparison of Hydrodistillation and Headspace Solid-Phase Microextraction to Analyze Volatiles from Brazilian Propolis by GC-MS. **Chemosensors**. 13:322, 322. 2025. <https://doi.org/10.3390/CHEMOSENSORS13090322>
- GONZÁLEZ-MORENO, B. J. *et al.* Quantificação simultânea dos principais componentes do óleo essencial de *Thymus vulgaris* em revestimento comestível formado a partir de nanocápsulas utilizando HS-SPME-GC-FID. **Acta Chromatographica**. 37:3, 318-325. 2025. <https://doi.org/10.1556/1326.2024.01257>
- GUO J, M. M. and JÄNIS, J. Comprehensive chemical profiling of citrus peel essential oils by directinfusion ultrahighresolution FTICR MS and highresolution GC–QTOF MS. **Journal of Food Composition and Analysis**. 148. 2025. <https://doi.org/10.1016/J.JFCA.2025.108204>
- LÓPEZ-SALAZAR, H. *et al.* Microwave-assisted Extraction of Functional Compounds from Plants: A Review. **Bioresources**. 18:6614–6638, 2023.
- MANDAL, V. *et al.* Microwave Assisted Extraction-An Innovative and Promising Extraction Tool for Medicinal Plant Research. **Pharmacogn Ver**. 1, 2007.
- MARČAC, N. *et al.* Hydrodistillation and Steam Distillation of Fennel Seeds Essential Oil: Parameter Optimization and Application of Cryomilling Pretreatment. **Processes**. 11, 2023. <https://doi.org/10.3390/PR11082354>
- MORADI-SADR J.; EBADI M.T.; AYYARI M. Steps to achieve carvone-rich spearmint (*Mentha spicata* L.) essential oil: a case study on the use of different distillation methods. **Front Plant Sci**. 14, 2023. <https://doi.org/10.3389/FPLS.2023.1292224/FULL>
- MOURÃO R.S. *et al.* Espectroscopia de fluorescência: dos fundamentos à influência dos parâmetros instrumentais para análises de corantes orgânicos e nanopartículas inorgânicas. **Quim Nova**. 47:e-20230095. 2024. <https://doi.org/10.21577/0100-4042.20230095>
- NAYAK, S. *et al.* Unlocking the potential of essential oils in aromatic plants: a guide to recovery, modern innovations, regulation and AI integration. **Plants**. 262:1 262:1–23. 2025. <https://doi.org/10.1007/S00425-025-04724-Y>
- PINTO, G.M.F.; PINTO, J.F. e JARDIM, I.C.S.F. Extração com fluido supercrítico. **Revista Chemkeys**. 1–13. 2018. <https://doi.org/10.20396/CHEMKEYS.V0I4.9603>
- RAZA, M.H. *et al.* Comparative Study of Essential Oils Extracted From *Foeniculum vulgare* Miller Seeds Using Hydrodistillation, Steam Distillation, and Superheated Steam Distillation. **Food Sci Nutr**. 12:10535. 2024. <https://doi.org/10.1002/FSN3.4593>
- SAHOO, B.C. *et al.* Comparative Metabolomics of High and Low Essential Oil Yielding Landraces of Betelvine (*Piper betle* L.) by Two-Dimensional Gas Chromatography Time-of-Flight Mass Spectrometry (GC × GC TOFMS). **Anal Lett**. 57:694–710. 2024. <https://doi.org/10.1080/00032719>

SFETSAS, T. *et al.* Qualitative and quantitative analysis of pyrolysis oil by gas chromatography with flame ionization detection and comprehensive two-dimensional gas chromatography with time-of-flight mass spectrometry. **J Chromatogr A** 1218:3317–3325. 2011. <https://doi.org/10.1016/J.CHROMA.2010.10.034>

SHUTTLEWORTH, A.; JOHNSON, S.D. GC-MS/FID/EAD: A method for combining mass spectrometry with gas chromatography-electroantennographic detection. **Front Ecol Evol.** 10:1042732. 2022. <https://doi.org/10.3389/FEVO.2022.1042732/BIBTEX>

SIRCAR, A. *et al.* Application of machine learning and artificial intelligence in oil and gas industry. **Petroleum Research** 6:379–391. 2021. <https://doi.org/10.1016/J.PTLRS.2021.05.009>

UWINEZA, P.A.; WAŚKIEWICZ, A. Recent Advances in Supercritical Fluid Extraction of Natural Bioactive Compounds from Natural Plant Materials. **Molecules.** 25(17):3847. 2020. doi: 10.3390/molecules25173847

YANG, H. *et al.* Identification and variation analysis of the composition and content of essential oil and fragrance compounds in Phoebe zhennan wood at different tree ages. **Front Plant Sci.** 15:1368894. 2024. <https://doi.org/10.3389/FPLS.2024.1368894/FULL>

YU, M. *et al.* Research progress in comprehensive two-dimensional gas chromatography-mass spectrometry and its combination with olfactometry systems in the flavor analysis field. **Journal of Food Composition and Analysis.** 114:104790. 2022. <https://doi.org/10.1016/J.JFCA.2022.104790>

ZHANG, H.F.; YANG, X.H.; WANG, Y. Microwave assisted extraction of secondary metabolites from plants: Current status and future directions. **Trends Food Sci Technol.** 22:672–688. 2011. <https://doi.org/10.1016/J.TIFS.2011.07.003>

ZHANG, Q.W. ; LIN, L.G. ; YE W.C. Techniques for extraction and isolation of natural products: A comprehensive review. **Chinese Medicine (United Kingdom).** 13:1–26. 2018. <https://doi.org/10.1186/S13020-018-0177-X/FIGURES/13>