



Latin American Journal of Energy Research – Lajer (2025) v. 12, n. 3, p. 164–173
<https://doi.org/10.21712/lajer.2025.v12.n3.p164-173>

1º Encontro Interdisciplinar em Energia, Programa de Pós-graduação em Energia, Ufes



Adulteração de azeite de oliva e eficiência energética: inovações analíticas e perspectivas sustentáveis - uma revisão integrativa

Olive oil adulteration and energy efficiency: analytical innovations and sustainable perspectives - an integrative review

Felipe Ravelly Alves de Souza^{1,*}, Maristela de Araújo Vicente², Maria de Fátima Pereira dos Santos²

¹ Aluno do Programa de Pós-Graduação em Energia, Universidade Federal do Espírito Santo – Ufes, campus São Mateus, ES, Brasil

² Professor do Programa de Pós-Graduação em Energia, Universidade Federal do Espírito Santo – Ufes, campus São Mateus, ES, Brasil

*Autor para correspondência, E-mail: felipe.r.souza@ufes.br

Resumo: A adulteração do azeite de oliva representa um desafio crescente à autenticidade, segurança alimentar e sustentabilidade do setor. Esta revisão integrativa analisou 18 estudos publicados entre 2023 e 2025, conforme critérios PRISMA, com foco em métodos analíticos aplicados à detecção de fraudes e sua relação com a eficiência energética. Foram avaliadas técnicas ópticas, magnéticas, cromatográficas e multissensoriais, de acordo com a sensibilidade, consumo energético, geração de resíduos, automação e ciclo de vida dos equipamentos. Os métodos NIR, TD-NMR e o sistema multissensorial se destacaram como os mais eficientes do ponto de vista energético, de acordo com os parâmetros analisados, com precisão superior a 90% e limites de detecção entre 2% e 5%. Técnicas convencionais, embora precisas, exigem maior infraestrutura e demanda energética, além de gerarem resíduos químicos. A integração com inteligência artificial foi recorrente, ampliando a robustez dos modelos preditivos. Apesar dos avanços, ainda existem lacunas como a dependência de laboratórios complexos, necessidade de validação industrial e escassez de dispositivos portáteis com alta precisão. Diante dessas limitações, as perspectivas futuras apontam para o desenvolvimento de sensores miniaturizados e sistemas analíticos autônomos, capazes de realizar processamento local e viabilizar análises rápidas, precisas, eficientes e sustentáveis em diferentes contextos produtivos e regulatórios.

Palavras-chave: azeite de oliva; adulteração; eficiência energética; sustentabilidade; métodos analíticos.

Abstract: Olive oil adulteration represents a growing challenge to product authenticity, food safety, and sustainability. This integrative review analyzed 18 studies published between 2023 and 2025, selected according to PRISMA criteria, focusing on analytical methods applied to fraud detection and their relationship with energy efficiency. Optical, magnetic, chromatographic, and multisensor techniques were evaluated based on sensitivity, energy consumption, waste generation, automation, and equipment life cycle. The NIR and TD-NMR methods and the multisensor system were the most energy-efficient according to the parameters analyzed, achieving accuracies above 90% and detection limits between 2% and 5%. Conventional techniques, while accurate, require more infrastructure and higher energy input and generate chemical waste. Integration with artificial intelligence was recurrent, enhancing the robustness of predictive models. Despite progress, gaps remain, such as reliance on complex laboratories, the need for industrial validation, and the limited availability of portable devices with high precision. Considering these limitations, future perspectives point to the development of miniaturized sensors and autonomous

analytical systems capable of performing local data processing and enabling rapid, accurate, energy-efficient, and sustainable analyses across various production and regulatory contexts.

Keywords: olive oil; adulteration; energy efficiency; sustainability; analytical methods.

1 Introdução

De acordo com o Ministério da Agricultura, Pecuária e Abastecimento (MAPA, 2012, 2018), o azeite de oliva (xOO) pode ser classificado em diferentes categorias: azeite de oliva extravirgem (EVOO), caracterizado pela ausência de defeitos sensoriais, sabor e aroma impecáveis, acidez $\leq 0,8\%$ e obtenção exclusivamente por processos mecânicos (sem uso de solventes ou refino químico); azeite de oliva virgem (VOO), também obtido apenas por processos mecânicos, com acidez $\leq 2,0\%$, podendo apresentar leves defeitos sensoriais, mas ainda adequado para consumo direto; azeite de oliva virgem lampante (LOO), igualmente de origem mecânica, porém com acidez $> 2\%$ ou defeitos sensoriais acentuados, sendo impróprio para consumo direto; azeite de oliva refinado (ROO), obtido a partir do refino do azeite lampante, apresentando acidez $\leq 0,3\%$ e perfil sensorial neutro; azeite de oliva (OO), resultante da mistura de ROO com EVOO ou VOO, com acidez variável conforme a proporção da mistura, geralmente $\leq 1,0\%$; e óleo de bagaço de oliva (POO), produzido a partir do resíduo sólido da extração (bagaço ou alperujo), mediante o uso de solventes e subsequente refino.

No contexto global, o EVOO é reconhecido não apenas como um alimento funcional, mas também como um elemento cultural e econômico de grande relevância para os países produtores e consumidores. Seu perfil lipídico, caracterizado por altas concentrações de ácidos graxos monoinsaturados, compostos fenólicos e antioxidantes, confere benefícios nutricionais amplamente comprovados cientificamente (Breschi et al., 2025; Khtira, Gharby e Sakar, 2025).

A valorização econômica do azeite, principalmente o azeite de oliva extravirgem, aliada ao crescimento da demanda internacional, tem tornado o produto um alvo recorrente de adulterações, com aumento estimado de 87 % na última década (Khtira, Gharby e Sakar, 2025). Essa prática fraudulenta representa um dos principais desafios para a autenticidade e a qualidade do EVOO. As fraudes podem ocorrer de diversas formas, incluindo a mistura com óleos vegetais mais baratos (como soja, girassol, canola), a adição de azeites de menor qualidade (virgem ou lampante), a falsificação da origem geográfica ou da classificação de qualidade na rotulagem (Barros et al., 2023; Zaroual et al., 2025). Tais práticas comprometem não apenas as características sensoriais e nutricionais do azeite, mas também sua segurança alimentar, a confiança do consumidor e a credibilidade do setor produtivo.

O problema da adulteração de azeites, contudo, está intrinsecamente relacionado à questão da sustentabilidade, uma vez que o aprimoramento das técnicas de detecção, embora fundamental para assegurar a autenticidade do produto, pode demandar elevado consumo energético, infraestrutura laboratorial sofisticada e mão de obra qualificada. Assim, a otimização desses recursos constitui uma oportunidade para o desenvolvimento de abordagens analíticas mais eficientes do ponto de vista energético. Dessa forma, o presente trabalho tem como objetivo analisar e comparar, por meio de uma revisão integrativa da literatura, as metodologias utilizadas na detecção de adulterações nos azeites de oliva e suas relações com a eficiência energética e a sustentabilidade dos processos analíticos.

2 Metodologia

Essa revisão integrativa foi conduzida de acordo com as diretrizes do *Preferred Reporting Items for Systematic Reviews and Meta-Analyses* (PRISMA), para reunir e analisar criticamente as evidências disponíveis sobre a adulteração dos azeites de oliva (xOO) e a eficiência energética das técnicas analíticas recentemente desenvolvidas frente à sustentabilidade (Page et al., 2021).

2.1 Especificação da pergunta de pesquisa

Na etapa de definição da pergunta que norteou a pesquisa utilizou-se da estratégia PICO, na qual foram atribuídas as seguintes informações: P = azeites de oliva adulterados; I = técnicas de detecção de adulteração / métodos analíticos; C = métodos convencionais x métodos sustentáveis; O = Eficiência energética, sustentabilidade e autenticidade. O que resultou na seguinte pergunta:

Quais métodos analíticos têm sido utilizados para detectar adulterações no azeite de oliva, e como esses métodos se relacionam com a eficiência energética e sustentabilidade?

2.2 Seleção dos trabalhos

A Scopus, Web Of Science (WOS) e FSTA - Food Science and Technology Abstracts (EBSCO) foram utilizadas como fontes de informação e base de dados e o código: ("olive oil" OR "extra virgin olive oil") AND ("adulteration" OR "fraud" OR "authenticity" OR "mislabeling" OR "food fraud") AND ("detection" OR "analysis" OR "characterization" OR "identification") AND (("energy efficiency" OR "efficient energy use" OR "energy saving" OR "low energy consumption") OR ("sustainability" OR "sustainable" OR "environmental impact" OR "green chemistry" OR "eco-friendly")), como estratégia de busca. Limitando-se a artigos publicados em três idiomas: português, inglês e espanhol, no período entre 01/01/2023 e 19/09/2025.

A triagem dos estudos foi realizada com o auxílio da plataforma Rayyan, que permite a seleção e exclusão de artigos de forma semiautomatizada (Ouzzani et al., 2016), para isso foram estabelecidos dois critérios principais:

- Critérios de inclusão: artigos originais, de acesso aberto, que desenvolvem métodos analíticos para investigar a prática da adulteração no azeite de oliva ou do azeite de oliva extravirgem ou classificar os diferentes tipos de azeite.
- Critérios de exclusão: artigos de revisão, anais de eventos, teses, dissertações, trabalhos que fujam da temática estabelecida ou que não se conectem com a pergunta de pesquisa.

Após aplicação dos critérios, os dados foram extraídos e organizados e procedeu-se com a síntese, análise, comparação e apresentação dos resultados.

2.3 Coleta e padronização dos dados

Para avaliação da eficiência energética dos métodos analíticos desenvolvidos nos diferentes trabalhos selecionados, levou-se em consideração 6 parâmetros e esses foram coletados em ambos os estudos.

Com exceção do PMC, que era apresentado de forma clara nos trabalhos incluídos, atribuiu-se uma nota (0 ou 1) como indicativo de desempenho para mensurar a eficiência energética do método. Essa nota foi atribuída de forma qualitativa para cada um dos 5 parâmetros estudados (GME, GPA, AAQ, EM e CT), após uma análise crítica da metodologia desenvolvida em cada estudo:

- i. Parâmetros medidores de confiança (PMC), ou métricas de desempenho e confiabilidade - informa o grau de confiança que se pode ter nos resultados apresentados;
- ii. GME - gastos com desenvolvimento/aquisição/manutenção e operação do equipamento e tempo analítico (de médio a baixo custo = 0; alto custo = 1);
- iii. GPA - preparo da amostra (uso de solventes e reagentes) e geração de resíduos (0 = Sem necessidade de preparo complexo, com baixa geração de resíduo; 1 = Preparo de amostra oneroso com geração de resíduos);
- iv. AAQ - automação/necessidade de analista qualificado (0 = método de fácil replicação ou processo automatizado; 1 = necessidade de analista qualificado para análise e interpretação dos resultados);
- v. EM - Escala da amostra ou miniaturização (0 = método de pequena escala, com pequenos volumes de amostra ou miniaturizado; 1 = método com médios ou grandes volumes de amostra);
- vi. CT - Ciclo de vida da técnica/equipamento, ou impacto energético da fabricação e descarte do equipamento (0 = ciclo de vida longo; 1 = ciclo de vida curto).

Os valores atribuídos de ii a vi foram somados para obtenção de um parâmetro (SEE - Eficiência energética ou potencial sustentável do método analítico) em comum a todos os métodos analíticos e possibilitar a comparação do potencial sustentável e da eficiência energética entre as diferentes metodologias utilizadas. Representado matematicamente pela Eq. 1, o resultado desse somatório permite aferir as seguintes afirmações: SEE = 5 - baixa eficiência energética ou não sustentável; SEE = 3 - média eficiência energética ou parcialmente sustentável; SEE = 1 - Alta eficiência energética ou sustentável.

$$SEE = \sum_{i=2}^6 x_i, \quad (1)$$

3 Resultados e discussões

Após a aplicação dos critérios de inclusão e exclusão, descritos no tópico 2.2 deste trabalho, foram selecionados 18 artigos para compor a revisão integrativa, a partir de um total de 1047 registros inicialmente identificados, conforme apresentado na Figura 1.

A partir dos dados analisados desses 18 trabalhos, resumidos na Tabela 1, foi possível observar que a produção científica sobre a otimização e o desenvolvimento de metodologias para identificar adulteração no azeite de oliva (xOO) apresentou uma evolução significativa nos últimos 3 anos, com destaque para o ano de 2025 (50%). Essa tendência reforça o caráter emergente e contemporâneo do tema, possivelmente impulsionado pela demanda crescente por métodos analíticos mais sustentáveis e eficientes.

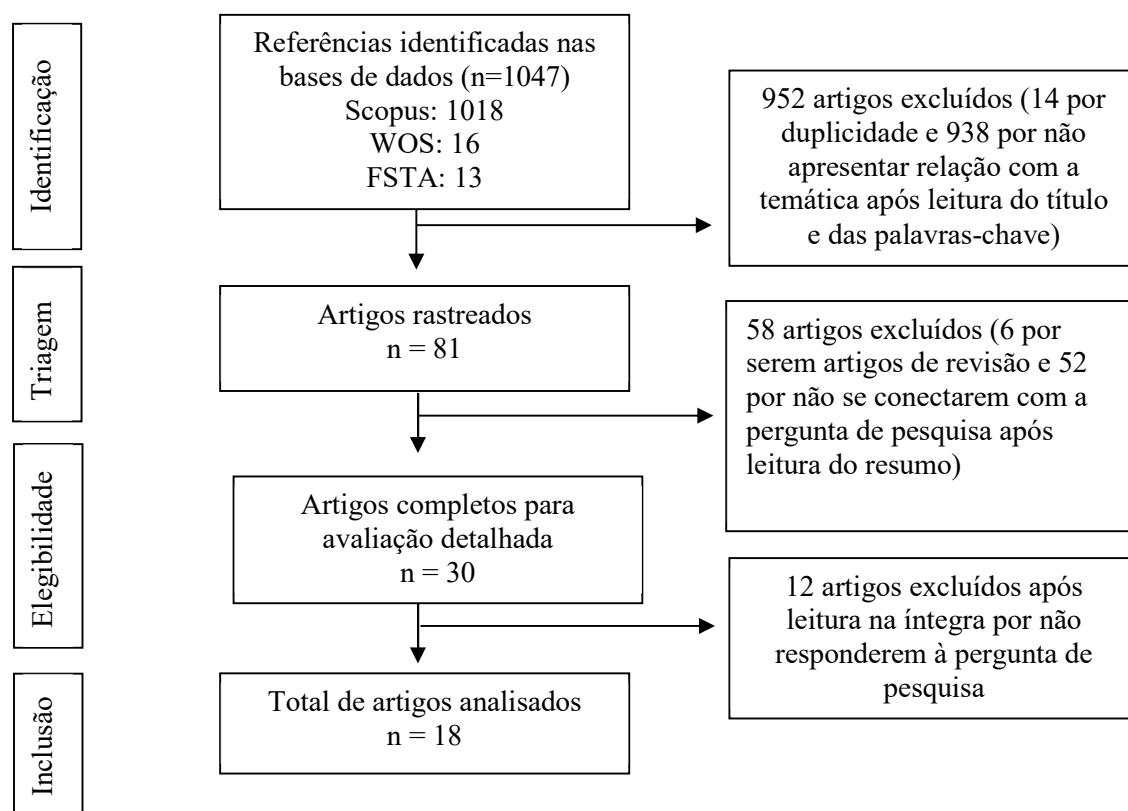


Figura 1. Fluxograma PRISMA do processo de seleção dos estudos incluídos na revisão integrativa.

No primeiro trabalho (SEE = 3), o desenvolvimento de um ressonador aninhado retangular duplo a partir de um material flexível de ferrite de Mn-Co permitiu a identificação na adulteração do azeite de oliva com óleo de palma com sensibilidade de 95% (Rabbani et al., 2025).

A metodologia desenvolvida com CG-FID (SEE = 3) e utilização de ferramentas quimiométricas, possibilitaram a identificação de adulteração do azeite de oliva com óleo de soja e girassol em concentrações a partir de 2% (Khtira, Gharby e Sakar, 2025).

No trabalho de Zaroual e colaboradores (2025) foi apresentado que o uso da técnica de espectroscopia de fluorescência frontal combinada com a análise de componentes principais, análise discriminante fatorial e análise discriminante de mínimos quadrados parciais (SEE = 2) permitiu identificar as amostras de acordo com sua pureza, com 100% de precisão. Como também foi capaz de predizer a adulteração, mesmo com VOO a 5%, o que demonstra a alta capacidade analítica da metodologia utilizada. Já Garrido-Cuevas et al. (2025) conseguiram desenvolver um método que correlaciona NIR com métodos probabilísticos bayseianos (SEE = 1) para classificar os azeites de oliva, com precisão maior que 90%. Entretanto, ao tentarem replicar o método com um instrumento NIR portátil, essa precisão cai para 66,7%.

Azcarate et al. (2025), reportou que o uso de ^1H NMR combinado com análises quimiométricas (SEE = 2) permitiu distinguir diferentes tipos de azeites, com potencial para predizer possíveis adulterações com base no perfil de ácidos graxos da amostra com precisão superior a 90%.

Tabela 1. Caracterização dos estudos incluídos na revisão integrativa.

Principal técnica analítica	PMC	Eficiência Energética e sustentabilidade						Referência	
		GME	GPA	AAQ	EM	CT	SEE		
Medição dielétrica	Sensibili dade	95 %	0	1	1	0	1	3	(Rabbani et al., 2025)
	GC-FID	R ²	0,98	1	1	1	0	3	(Khtira et al., 2025)
Fluorometria	Erro	R ²	0,99	0	1	1	0	2	(Zaroual et al., 2025)
		1,09 %							
NIR	Precisão	80-90 %	0	0	1	0	0	1	(Garrido-Cuevas et al., 2025)
¹ H NMR	Precisão	> 90 %	1	0	1	0	0	2	(Azcarate et al., 2025)
Fibra óptica	R ²	0,98	0	0	0	0	1	1	(Pal et al., 2025)
	Precisão	94,2 %	0	0	1	0	0	1	(Jiao et al., 2025)
FHSI	R ²	0,99	0	0	1	0	0	1	
SORS	Precisão	91 %	0	0	1	0	0	1	(Horns et al., 2025)
NIR+EEFM	Seletivi dade	100 %	0	0	1	0	0	1	(Lozano et al., 2025)
	LD	25-50 Kg/g	1	1	1	0	0	3	(Ran et al., 2024)
HPLC-UV	LQ	50-100 Kg/g							
	Precisão	100 %	0	0	1	0	0	1	(Klinar et al., 2024)
NIR	R ²	≥ 0,95							
Transmissão de microondas	-	-	0	0	1	0	1	2	(Viskadourakis et al., 2024)
OIRD	Precisão	> 95 %	0	0	1	0	0	1	(Sun et al., 2024)
HPIMS	Precisão	68,9 / 88,3 %	0	1	1	0	0	2	(Adelantado et al., 2024)
	LD	1 %							
HPLC-DAD	Precisão	94,4 / 100 %	1	1	1	0	0	3	(Lu et al., 2023)
DSC	RMSE	≤ 9,55%	0	0	1	0	0	1	(Pereira et al., 2023)
TD NMR	R ²	0,93 - 0,96	0	0	1	0	0	1	(Maraşlı et al., 2023)
Sistema multissensorial	Precisão	100 %	0	0	1	0	0	1	(Mirhoseini- Moghaddam et al., 2023)

A metodologia que analisou a adulteração do azeite com óleo de palma necessitou do desenvolvimento de um dispositivo de fibra óptica (SEE = 1), mas apresentaram resultados insatisfatórios, uma vez que foi necessário alterações de pelo menos 20% v/v para uma detecção precisa. Apesar de demonstrarem um potencial na identificação de adulteração do azeite de oliva com óleo de palma, para que esse dispositivo

seja de fato utilizável comercialmente, carecem melhorias que visem o aumento da precisão, sensibilidade e limite de detecção, uma vez que alguns azeites são adulterados com volumes inferiores a concentrações de 20 % v/v (Pal, Stephen e Mathew, 2025).

Jiao et al. (2025) apresentou um método baseado em imagem hiperespectral de fluorescência (FHSI; SEE = 1) e os resultados comparados com uma técnica padrão (FTIR) para a identificação de adulterações no azeite de oliva. A técnica conseguiu atingir uma boa precisão (94,2%) e limite de detecção (5%) em relação ao FTIR (99,1% e 2,5%), evidenciando que enquanto o FTIR é mais adequado para detecção de alta precisão, o método desenvolvido é mais adequado para análise em larga escala devido aos seus recursos eficientes de processamento em lote.

Horns et al. (2025) desenvolveram um equipamento portátil baseado em espectroscopia Raman com deslocamento espacial (SORS; SEE = 1) para autenticação de azeite de oliva e detecção de adulterações com óleo de girassol, o que permitiu medições não invasivas, através de diferentes tipos de embalagens, como vidro e plástico, sem necessidade de abrir o produto. Obteve-se uma precisão de 91 % na classificação, mas só foi capaz de identificar 60 % das amostras adulteradas com 10 % e 80 % das adulteradas com 30 % de óleo de girassol.

Em outro trabalho (Lozano et al., 2025) desenvolveram uma metodologia que utiliza espectroscopia de infravermelho próximo (NIR; SEE = 1) em conjunto com espectroscopia de Matriz de Emissão de Fluorescência (EEFM) e obtiveram uma seletividade de 100 % na avaliação e separação entre as classes genuínas e adulteradas.

No estudo publicado por Ran et al. (2024), foi apresentado um método baseado em HPLC-UV (SEE = 3) para identificar adulterações de azeite e óleo de camélia com óleo de gergelim e óleo de arroz com limites de detecção de 25–50 mg/kg e limites de quantificação de 50–100 mg/kg. A adulteração mínima detectável foi de 2% para óleo de gergelim e 5% para óleo de arroz, sendo adequado para controle de qualidade e fiscalização.

A NIR (SEE = 1), tanto em bancada quanto em dispositivos portáteis, demonstrou alta eficácia na detecção de adulterações entre 1 % e 15 % com óleo de girassol ou azeite comum, atingindo coeficientes de determinação superiores a 0,95, além disso apresentou uma precisão de 100 % em análises qualitativas para composição de ácidos graxos (Klinar et al., 2024).

O artigo de Viskadourakis et al. (2024) investigou o uso de ressonadores de anel dividido complementares gravados por usinagem CNC como sensores de micro-ondas para identificação de óleos comestíveis e possíveis adulterações. Embora o artigo não tenha usado métricas como precisão, R^2 , erro ou outros parâmetros já relatados, foram fornecidos dados quantitativos robustos que demonstram a capacidade dos sensores em detectar adulterações com base em variações eletromagnéticas mensuráveis.

Na espectroscopia de refletância oblíqua (OIRD; SEE = 1), combinada com algoritmos de aprendizado de máquina, foi possível obter uma precisão superior a 95 % na classificação de óleos, na qual foi atribuído 45,7 % da importância preditiva ao sinal óptico OIRD, o que destaca a sua sensibilidade (Sun et al., 2024).

A espectrometria de mobilidade iônica de alto desempenho (HPIMS; SEE = 2), aplicada após extração líquido-líquido, foi capaz de classificar amostras comerciais de azeite (EVOO, VOO e LOO) com taxa de acerto de 88,3 % em modelos binários e 68,9 % em modelos ternários, com tempo de análise inferior a 30 segundos (Adelantado et al., 2024). Já a cromatografia líquida de alta eficiência acoplada a um detector de arranjo de diodos (HPLC-DAD; SEE = 3), focada na composição de pigmentos, identificou adulterações de apenas 1 % com óleo de colza ou milho, atingindo uma precisão de 94,44 % nos testes e 100 % na fase de treinamento com SVM (Máquina de Vetores de Suporte) (Lu et al., 2023).

Na calorimetria diferencial de varredura (DSC; SEE = 1), combinada com regressão por mínimos quadrados parciais (PLS), detectou adulterações por óleo de soja, milho e girassol com RMSE (raiz do erro quadrático médio) de calibração entre 2,34 % e 4,02 % e RMSE de predição entre 3,36 % e 9,55 %, além de apresentar correlação linear entre o deslocamento térmico e o nível de adulteração (Pereira et al., 2023).

A ressonância magnética de baixo campo (TD-NMR), incluiu um dispositivo caseiro desenvolvido com ímãs permanentes e bobina de radiofrequência e foi capaz de detectar adulterações por óleo de girassol com alta correlação com dispositivos comerciais ($R^2 = 0,93$ a 0,96) (Maraşlı et al., 2023).

Por fim, sistemas multissensoriais compostos por nariz eletrônico (e-nose; SEE = 1) e visão computacional demonstraram capacidade de detectar adulterações de até 5 % com precisão de 100% em modelos PCA-QDA (análise de componentes principais – análise discriminante quadrática). O sistema utilizou 13 sensores MOS (semicondutor de óxido metálico) e extração de parâmetros como MSR (resposta máxima do sensor), AUC (área sob a curva) e Smax (resposta máxima do sensor), além de aplicar RSM (metodologia de superfície de resposta) para otimização dos parâmetros de cor, indicando que até 0,1% de

impureza já altera significativamente a composição óptica do azeite (Mirhoseini-Moghaddam, Yamaghani e Bakhshipour, 2023).

Com base nos resultados apresentados, e a partir da análise comparativa foi possível constatar que os métodos ópticos, magnéticos e multissensoriais são os mais sustentáveis e eficientes energeticamente. Além disso, as técnicas como espectroscopia NIR (Klinar et al., 2024; Garrido-Cuevas et al., 2025; Lozano et al., 2025), TD-NMR portátil (Maraşlı et al., 2023), OIRD (Sun et al., 2024) e o sistema multissensorial com e-nose e visão computacional (Mirhoseini-Moghaddam, Yamaghani e Bakhshipour, 2023) demonstraram alta eficiência energética e não requerem reagentes, permitindo análises rápidas e não destrutivas. O sensor óptico com fibra (Pal, Stephen e Mathew, 2025) e o sistema multissensorial com FHSI (Jiao et al., 2025) também se destacaram por sua portabilidade e precisão. O sensor metamaterial flexível (Rabbani et al., 2025) e o método baseado em micro-ondas (Viskadourakis et al., 2024) apresentaram boa sensibilidade eletromagnética, com potencial de uso em campo e miniaturização, mas ainda depende de gravação CNC e controle de frequência, o que pode limitar sua aplicabilidade em ambientes com restrições energéticas.

Em contrapartida, técnicas como HPLC-UV (Ran et al., 2024), HPLC-DAD (Lu et al., 2023), DSC (Pereira et al., 2023) e análises físico-químicas convencionais (Khtira, Gharby e Sakar, 2025; Zaroual et al., 2025) mostraram alta precisão na detecção de adulterantes específicos, mas exigem maior infraestrutura laboratorial e geram resíduos químicos. A espectrometria HPIMS (Adelantado et al., 2024), embora mais eficiente energeticamente que a cromatografia, ainda requer extração química e uso de solventes e a espectroscopia Raman com deslocamento espacial (Horns et al., 2025) permitiu análise direta em embalagens, com boa aplicabilidade em inspeções.

Integração com inteligência artificial foi uma abordagem recorrente: modelos como PCA (análise de componentes principais), PCA-QDA (PCA seguido de análise discriminante quadrática), PLS (mínimos quadrados parciais), SVM (máquinas de vetores de suporte), CNN (redes neurais convolucionais), MLR (regressão linear múltipla) e DD-SIMCA (modelagem independente suave por analogia de classe com distância de decisão) foram aplicados (Lu et al., 2023; Mirhoseini-Moghaddam, Yamaghani e Bakhshipour, 2023; Pereira et al., 2023; Adelantado et al., 2024; Klinar et al., 2024; Ran et al., 2024; Sun et al., 2024; Azcarate et al., 2025; Garrido-Cuevas et al., 2025; Jiao et al., 2025; Lozano et al., 2025), alcançando precisão de até 100 %, limites de detecção entre 2 % e 5 % e erros médios de previsão inferiores a 3 %. A fusão de dados espectroscópicos (Lozano et al., 2025) e o uso de marcadores químicos específicos (Ran et al., 2024) reforçaram a robustez dos modelos preditivos.

Em síntese, os resultados indicam que os métodos analíticos mais promissores para o controle de qualidade do azeite de oliva são aqueles que aliam alta sensibilidade, baixo consumo energético e integração com inteligência artificial. Técnicas como espectroscopia NIR (Klinar et al., 2024), TD-NMR portátil (Maraşlı et al., 2023) e sistemas multissensoriais com e-nose e visão computacional (Mirhoseini-Moghaddam, Yamaghani e Bakhshipour, 2023) representam avanços significativos rumo a práticas analíticas mais sustentáveis, com potencial de aplicação em inspeções industriais, certificações regulatórias e monitoramento automatizado da autenticidade de óleos vegetais.

No entanto, persistem lacunas importantes que limitam a adoção ampla e sustentável dessas tecnologias, especialmente em contextos industriais, regulatórios e de inspeção em campo. Uma das principais lacunas observadas refere-se à dependência de infraestrutura laboratorial complexa em métodos tradicionais como cromatografia líquida e técnicas termoanalíticas como DSC. Embora esses métodos ofereçam alta precisão e detalhamento químico, seu elevado consumo energético, uso de reagentes tóxicos e geração de resíduos dificultam a aplicação em ambientes com restrições operacionais ou em sistemas de controle descentralizados.

Outra limitação recorrente está na baixa portabilidade de equipamentos como NMR de alta resolução e GC-FID, que exigem gases especiais, calibração rigorosa e operadores especializados. Isso contrasta com a crescente demanda por soluções rápidas, acessíveis e automatizadas, capazes de operar em tempo real e com mínima intervenção humana.

Além disso, embora a integração com algoritmos de inteligência artificial tenha sido amplamente explorada, muitos estudos ainda dependem de conjuntos de dados limitados, com amostras restritas a determinadas regiões ou tipos de adulterantes. Isso compromete a generalização dos modelos preditivos e exige validações adicionais em cenários mais diversos e realistas.

Diante dessas lacunas, as perspectivas futuras para o desenvolvimento de métodos analíticos mais sustentáveis devem se concentrar em cinco direções estratégicas:

- i) Miniaturização e portabilidade de sensores: o avanço de tecnologias como TD-NMR de baixo campo, espectroscopia NIR portátil e sistemas multissensoriais aponta para a viabilidade de

- dispositivos compactos, energeticamente eficientes e aplicáveis em campo, com potencial para integração em linhas de produção ou pontos de venda;
- ii) Integração com plataformas digitais e IoT: a incorporação de sensores inteligentes em redes conectadas pode permitir o monitoramento contínuo da autenticidade do azeite, com transmissão de dados em tempo real para sistemas de rastreabilidade e controle remoto;
- iii) Desenvolvimento de modelos preditivos robustos e generalizáveis: a ampliação dos bancos de dados, com amostras de diferentes origens, cultivares e tipos de adulterantes, é essencial para fortalecer a confiabilidade dos algoritmos de classificação e regressão, especialmente em aplicações regulatórias;
- iv) Validação interlaboratorial e padronização de protocolos: a ausência de normas harmonizadas para métodos emergentes limita sua aceitação por órgãos reguladores. Estudos colaborativos entre instituições públicas e privadas podem acelerar a validação e regulamentação de técnicas sustentáveis;
- v) Educação e capacitação técnica: a disseminação de conhecimento sobre métodos analíticos sustentáveis, especialmente entre pequenos produtores e agentes de fiscalização, é fundamental para ampliar o uso dessas tecnologias e fortalecer a cadeia de valor do azeite de oliva.

Dessa forma, o futuro do controle de autenticidade do azeite de oliva está intimamente ligado à convergência entre inovação tecnológica, eficiência energética, sustentabilidade operacional e inteligência computacional. A superação das lacunas identificadas exige esforços multidisciplinares e colaborativos, capazes de transformar o cenário atual em um sistema de controle mais ético, eficiente e ambientalmente responsável.

4 Conclusões

A presente revisão integrativa permitiu mapear e comparar criticamente 18 estudos recentes que abordam métodos analíticos aplicados à detecção de adulteração em azeite de oliva, com foco na eficiência energética e no potencial sustentável das abordagens. Os resultados evidenciam uma transição clara da dependência de técnicas laboratoriais convencionais (como cromatografia), para métodos mais ágeis, portáteis e ambientalmente responsáveis, como espectroscopia NIR, TD-NMR de baixo campo e sistemas multissensoriais integrados com inteligência artificial.

As técnicas ópticas e magnéticas destacaram-se por sua alta sensibilidade, baixo consumo energético e aplicabilidade em campo, enquanto os sistemas multissensoriais demonstraram capacidade de detecção precisa mesmo em baixos níveis de adulteração, com precisão superior a 95%. A integração com algoritmos de aprendizado de máquina, como PCA-QDA, SVM e PLS, foi um diferencial estratégico, permitindo automação, predição robusta e classificação eficiente das amostras.

Apesar dos avanços, persistem lacunas importantes, como a necessidade de validação interlaboratorial, padronização de protocolos e ampliação dos bancos de dados para modelos preditivos mais generalizáveis. Além disso, métodos tradicionais ainda apresentam limitações quanto à sustentabilidade, reforçando a urgência por soluções analíticas que conciliem precisão, acessibilidade e responsabilidade ambiental.

Por fim, esse trabalho pode evidenciar que o futuro das análises de óleos comestíveis, especialmente o azeite, aponta para o desenvolvimento de tecnologias analíticas miniaturizadas, conectadas e inteligentes, capazes de operar em tempo real e com mínima intervenção humana, uma vez que a consolidação dessas abordagens poderá transformar o controle de autenticidade do azeite de oliva em um processo mais ético, eficiente do ponto de vista energético e sustentável, fortalecendo a confiança do consumidor e a integridade da cadeia produtiva.

Agradecimentos

Os autores agradecem à Fundação de Amparo à Pesquisa e Inovação do Espírito Santo (FAPES) pelo apoio financeiro, e ao Programa de Pós-Graduação em Energia (PPGEN) da Universidade Federal do Espírito Santo (UFES) pela infraestrutura disponibilizada para a realização desta pesquisa.

Referências bibliográficas

- Adelantado C, Salatti-Dorado JA, Herrera C, Arce L and Cardador MJ (2024) 'Discrimination amongst olive oil categories by means of high performance-ion mobility spectrometry: A step forward on food authentication', *Food Control*, 158, <http://doi.org/10.1016/j.foodcont.2023.110208>.
- Azcarate SM, Segura-Borrego MP, Ríos-Reina R and Callejón RM (2025) '¹H-NMR Spectroscopy and Chemometric Fingerprinting for the Authentication of Organic Extra Virgin Olive Oils', *Chemosensors*, 13(5), <http://doi.org/10.3390/chemosensors13050162>.
- Garrido-Cuevas M del M, Garrido-Varo AM, Marini F, Sánchez MT and Pérez-Marín D (2025) 'Enhancing virgin olive oil authentication with Bayesian probabilistic models and near infrared spectroscopy', *Journal of Food Engineering*, 391, <http://doi.org/10.1016/j.jfoodeng.2024.112443>.
- Horns AL, Barmbold SM, Weidner M and Bachmann R (2025) 'Spatially offset Raman spectroscopy (SORS) for sustainable olive oil authentication – Tackling the challenges in on-site food control', *Food Research International*, 202, <http://doi.org/10.1016/j.foodres.2025.115742>.
- Jiao Z, Song L, Zhang Y, Dai J, Liu Y, Zhang Q, Qin W and Yan J (2025) 'A comparative study of fluorescence hyperspectral imaging and FTIR spectroscopy combined with chemometrics for the detection of extra virgin olive oil adulteration', *Journal of Food Measurement and Characterization*, 19(3):1761–1776, <http://doi.org/10.1007/s11694-024-03069-6>.
- Khtira A, Gharby S and Sakar EH (2025) 'Physicochemical and sensory induced changes in olive oil (cv "Moroccan Picholine") sourced from various extraction technologies and blended with refined soybean and sunflower oils. A chemometric comparative study', *Journal of Food Composition and Analysis*, 145, <http://doi.org/10.1016/j.jfca.2025.107755>.
- Klinar M, Benković M, Jurina T, Jurinjak Tušek A, Valinger D, Tarandek SM, Prskalo A, Tonković J and Gajdoš Kljusurić J (2024) 'Fast Monitoring of Quality and Adulteration of Blended Sunflower/Olive Oils Applying Near-Infrared Spectroscopy', *Chemosensors*, 12(8), <http://doi.org/10.3390/chemosensors12080150>.
- Lozano VA, Jiménez Carvelo AM, Olivieri AC, Kucheryavskiy S V., Rodionova OY and Pomerantsev AL (2025) 'Authentication of Argentinean extra-virgin olive oils using three-way fluorescence and two-way near-infrared data fused with multi-block DD-SIMCA', *Food Chemistry*, 463, <http://doi.org/10.1016/j.foodchem.2024.141127>.
- Lu CH, Li BQ, Jing Q, Pei D and Huang XY (2023) 'A classification and identification model of extra virgin olive oil adulterated with other edible oils based on pigment compositions and support vector machine', *Food Chemistry*, 420, <http://doi.org/10.1016/j.foodchem.2023.136161>.
- Maraşlı A, Okay C, Karataş Ö, Mozzhukhin G and Rameev B (2023) 'Comparison of homemade TD-NMR device and commercial devices for detection of oil adulteration', *European Physical Journal Plus*, 138(5), <http://doi.org/10.1140/epjp/s13360-023-03980-9>.
- Mirhoseini-Moghaddam SM, Yamaghani MR and Bakhshipour A (2023) 'Application of Electronic Nose and Eye Systems for Detection of Adulteration in Olive Oil based on Chemometrics and Optimization Approaches', *JUCS - Journal of Universal Computer Science*, 29(4):300–325, <http://doi.org/10.3897/jucs.90346>.
- Pal P, Stephen J and Mathew J (2025) 'Fiber Optic Device for the Detection of Adulteration of Olive Oil With Palm Oil', *Microwave and Optical Technology Letters*, 67(5), <http://doi.org/10.1002/mop.70210>.
- Pereira LH, Pereira J, Garcia JS and Trevisan MG (2023) 'Seed oil detection in extra virgin olive oil by differential scanning calorimetry', *Journal of Thermal Analysis and Calorimetry*, 148(14):6833–6843, <http://doi.org/10.1007/s10973-023-12178-1>.
- Rabbani MG, Islam MT, Alawad MA, Misran N, Alkhrijah Y and Alenezi AM (2025) 'Development and analysis of flexible Mn–Co ferrite material incorporating dual-Rectangular nested resonator (DRNR) for enhanced oil impurity sensing', *Journal of Science: Advanced Materials and Devices*, 10(3), <http://doi.org/10.1016/j.jsamd.2025.100948>.

Ran D, Chang X, Wang H, Hu L, Li B, Zhang Y, Xie F, He S, Wang M and He P (2024) ‘Targeted identification of camellia oil and olive oil adulterated with sesame or rice oil based on characteristic substances by HPLC-UV’, *Journal of Food Composition and Analysis*, 133, <http://doi.org/10.1016/j.jfca.2024.106432>.

Sun X, Hu Y, Liu C, Zhang S, Yan S, Liu X and Zhao K (2024) ‘Characterizing Edible Oils by Oblique-Incidence Reflectivity Difference Combined with Machine Learning Algorithms’, *Foods*, 13(9), <http://doi.org/10.3390/foods13091420>.

Viskadourakis Z, Theodosi A, Katsara K, Sevastaki M, Fanourakis G, Tsilipakos O, Papadakis VM and Kenanakis G (2024) ‘Engraved Split-Ring Resonators as Potential Microwave Sensors for Olive Oil Quality Control’, *ACS Applied Electronic Materials*, 6(5):3846–3856, <http://doi.org/10.1021/acsaelm.4c00430>.

Zaroual H, El Hadrami EM, Farah A, Ez zoubi Y, Chénè C and Karoui R (2025) ‘Detection and quantification of extra virgin olive oil adulteration by other grades of olive oil using front-face fluorescence spectroscopy and different multivariate analysis techniques’, *Food Chemistry*, 479, <http://doi.org/10.1016/j.foodchem.2025.143736>.