

Avaliação de óleos compostos de soja (*Glycine max* L.) e amendoim (*Arachis hypogaea* L.) sob termoxidação

Maria Paula Fortuna Clara^[1], Carolina Médici Veronezi^[2], Neuza Jorge^[3]*

^[1] mp_fortuna@hotmail.com. Instituto de Biociências, Letras e Ciências Exatas, Universidade Estadual Paulista “Júlio de Mesquita Filho” (UNESP), São José do Rio Preto, São Paulo, Brasil. ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-9740-5976>.

^[2] cveronezi@hotmail.com. Instituto de Biociências, Letras e Ciências Exatas, Universidade Estadual Paulista “Júlio de Mesquita Filho” (UNESP), São José do Rio Preto, São Paulo, Brasil. ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-9737-6933>.

^[3] neuza.jorge@unesp.br. Instituto de Biociências, Letras e Ciências Exatas, Universidade Estadual Paulista “Júlio de Mesquita Filho” (UNESP), São José do Rio Preto, São Paulo, Brasil. ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-7166-0880>.

* autor correspondente

Resumo

A formulação de óleos compostos surge como uma estratégia viável para aprimorar a estabilidade oxidativa de óleos vegetais, reduzindo sua suscetibilidade à oxidação e preservando compostos bioativos. Assim, diante da hipótese de alteração do perfil lipídico e da promoção de um efeito protetor sinérgico entre antioxidantes naturais presentes em óleos, o objetivo deste trabalho foi investigar a contribuição da adição de óleo de amendoim em diferentes proporções ao óleo de soja, a partir do monitoramento de sua estabilidade oxidativa, sob ensaio de termoxidação. Os óleos de soja (S), amendoim (A) e os óleos compostos SA₁ (75:25 p/p) e SA₂ (50:50 p/p) foram analisados quanto às propriedades físico-químicas, bioativas e antioxidantes quando submetidos ao ensaio de termoxidação a 180 °C por 20 horas. O óleo de amendoim se destacou por apresentar menores teores de anisidina, valor Totox e compostos polares totais durante o aquecimento. Em contrapartida, quanto aos compostos bioativos, o óleo de soja apresentou maior teor de tocoferóis totais. Por outro lado, os óleos compostos, SA₁ e SA₂, se sobressaíram com maiores teores de compostos fenólicos, carotenoides e atividade antioxidante por DPPH ao longo do processo. Os achados deste estudo evidenciam o potencial do óleo de amendoim como alternativa viável para melhorar a qualidade nutricional e funcional de óleos vegetais. Portanto, a formulação desses óleos compostos representa uma estratégia promissora para aplicações industriais, contribuindo para maior estabilidade oxidativa e preservação dos compostos bioativos.

Palavras-chave: atividade antioxidante; óleos vegetais; propriedades físico-químicas; tocoferóis.

*Evaluation of compound oils from soybean (*Glycine max* L.) and peanut (*Arachis hypogaea* L.) under thermo-oxidation*

Abstract

The formulation of compound oils emerges as a viable strategy to improve the oxidative stability of vegetable oils, reducing their susceptibility to oxidation and preserving bioactive compounds. Given the hypothesis that blending oils alters the lipid profile and promotes a synergistic protective effect among natural antioxidants, this study aimed to investigate the impact of adding peanut oil to soybean oil at different ratios by monitoring oxidative stability under thermoxidation conditions. Soybean oil (S), peanut oil (A), and compound oils SA₁ (75:25 w/w) and SA₂ (50:50 w/w) were analyzed for their physicochemical, bioactive, and antioxidant properties when subjected to a thermoxidation test at 180 °C for 20 hours. Peanut oil stood out for presenting lower levels of anisidine, Totox value, and total polar compounds during heating. In contrast, regarding bioactive compounds, soybean oil presented a higher content of total tocopherols. On the other hand, the compound oils, SA₁ and SA₂, stood out with higher levels of phenolic compounds, carotenoids, and antioxidant activity by DPPH throughout the process. The findings of this study highlight the potential of peanut oil as a viable

alternative to improve the nutritional and functional quality of vegetable oils. Therefore, the formulation of these compound oils represents a promising strategy for industrial applications, contributing to greater oxidative stability and preservation of bioactive compounds.

Keywords: *antioxidant activity; physicochemical properties; tocopherols; vegetable oils.*

1 Introdução

A termoxidação é um processo amplamente utilizado para avaliar as características dos óleos vegetais sob elevadas temperaturas, simulando condições semelhantes às de fritura contínua, mas sem a interferência de alimentos no processo. Durante a termoxidação ocorre reação de hidrólise com formação de ácidos graxos livres e outros compostos de degradação, comprometendo a qualidade sensorial, nutricional e funcional do óleo (Barani; Bonetti; Parker, 2023). Estudos evidenciaram que a termoxidação também leva à degradação de compostos bioativos, como tocoferóis e fitoesteróis, além de promover o acúmulo de produtos tóxicos, como aldeídos e cetonas, que podem ter impactos na saúde humana (Kasprzak *et al.*, 2020).

Os óleos vegetais são largamente empregados na preparação de alimentos, principalmente em processo com elevadas temperaturas. Devido à suscetibilidade à degradação oxidativa, que resulta na formação de compostos tóxicos, como aldeídos e cetonas, e na alteração das propriedades sensoriais e nutricionais dos alimentos (Kaseke; Opara; Fawole, 2021; Machado *et al.*, 2023), alternativas tecnológicas têm sido desenvolvidas para melhorar a funcionalidade dos óleos. Entre elas estão os processos de hidrogenação e interesterificação. No entanto, ambos os processos resultam em produtos ainda não adequados para serem altamente consumidos (Pinheiro; Luzia; Jorge, 2022), pois a hidrogenação pode gerar gorduras *trans*, consideradas mais aterogênicas que os ácidos graxos saturados, enquanto a interesterificação pode deixar resíduos químicos contendo radicais livres (Silva *et al.*, 2020).

Uma vez que nenhum óleo refinado possui uma composição ideal de ácidos graxos e considerando as limitações dos métodos de hidrogenação e interesterificação, os óleos compostos surgiram como uma alternativa viável. A Agência Nacional de Vigilância Sanitária (Anvisa) define óleos e gorduras vegetais compostos como produtos obtidos pela mistura de óleos ou gorduras vegetais de duas ou mais espécies, podendo ser adicionados de especiarias ou outros ingredientes para fins de sabor, desde que não descaracterizem o produto como óleo ou gordura (Anvisa, 2021b).

Estudos recentes reforçam a relevância dos óleos compostos na melhoria da estabilidade oxidativa e funcionalidade, destacando seu potencial para aplicações diversas na indústria de alimentos. Lehnert *et al.* (2019) analisaram a qualidade e segurança de óleos compostos derivados de diferentes fontes vegetais, como misturas de óleos de sementes e frutos oleaginosos, demonstrando sua viabilidade como ingredientes em alimentos processados. O estudo destacou sua aplicabilidade em produtos que exigem maior estabilidade oxidativa e funcional em condições de armazenamento prolongado. Dhyani *et al.* (2022) investigaram misturas de óleos vegetais com o óleo de perilla e observaram um aumento expressivo na resistência à oxidação, atribuída à interação sinérgica entre os ácidos graxos insaturados e compostos bioativos presentes nas misturas.

Pattnaik e Mishra (2021) relataram que a incorporação de ácidos graxos poli-insaturados e óleos encapsulados com propriedades bioativas, não apenas melhorou a estabilidade oxidativa, mas também ampliou as aplicações industriais devido à proteção efetiva contra a degradação oxidativa em processos de alta temperatura. Da mesma forma, Grover *et al.* (2021) avaliaram diferentes combinações de óleos e demonstraram que ajustes precisos nas proporções das misturas permitem atender demandas específicas, como a produção de alimentos funcionais e o aprimoramento do perfil lipídico.

Em outro estudo, Kaseke, Opara e Fawole (2021) destacaram a combinação de óleo de girassol e óleo de sementes de romã como uma abordagem promissora. A mistura apresentou melhorias significativas na funcionalidade, estabilidade oxidativa e propriedades antioxidantes, tornando-a adequada para aplicações que exigem alto desempenho antioxidante. Complementarmente, Farag *et al.* (2021) mostraram que a otimização da composição de ácidos graxos por meio da mistura de óleos provenientes de diferentes fontes vegetais resultou em avanços notáveis na estabilidade oxidativa, aumentando a vida útil e preservando a qualidade nutricional dos óleos.

Bezerra *et al.* (2017) avaliaram os óleos de pracaxi, maracujá, gordura de cupuaçu e estearina de palma, que foram submetidos às análises físico-químicas e misturados em diferentes proporções para avaliar suas possíveis aplicações na indústria de alimentos. Os resultados sugerem que as misturas deste estudo podem ser aplicadas em margarinas, destacando-se as misturas de pracaxi-estearina e maracujá-estearina nas proporções 40:60 v/v e 50:50 v/v; pracaxi-cupuaçu nas 60:40 v/v e 70:30 v/v e maracujá-cupuaçu na 40:60 v/v, devido às suas propriedades físico-químicas e térmicas.

Além disso, ensaios clínicos em larga escala conduzidos por Devarajan *et al.* (2016a, 2016b) destacaram os benefícios para a saúde das misturas de óleos. Uma combinação de óleo de farelo de arroz e gergelim (80:20 v/v) foi eficaz na redução da pressão arterial e na melhora do perfil lipídico sanguíneo em hipertensos, além reduzir a hiperglicemia quando utilizado durante o preparo de alimentos e melhorar o perfil lipídico em pacientes com diabetes *mellitus* tipo 2. Esses resultados reforçam o potencial dos óleos compostos como uma ferramenta funcional na promoção da saúde.

Diante do exposto, este estudo teve como objetivo avaliar a contribuição do óleo de amendoim em diferentes proporções quando adicionado ao óleo de soja, com o intuito de monitorar sua estabilidade oxidativa sob ensaio de termoxidação. O trabalho encontra-se organizado em quatro seções: a Seção 2 apresenta os materiais e métodos utilizados na condução do experimento, incluindo a obtenção dos óleos, o experimento de termoxidação, as análises realizadas e o delineamento adotado; a Seção 3 reúne os resultados obtidos e sua respectiva discussão, com base na literatura pertinente; por fim, a Seção 4 apresenta as conclusões do estudo, destacando os principais achados.

2 Material e métodos

O experimento foi realizado na Universidade Estadual Paulista “Júlio de Mesquita Filho”, campus de São José do Rio Preto-SP, no Laboratório de Óleos e Gorduras pertencente ao Departamento de Engenharia e Tecnologia de Alimentos.

2.1 Obtenção dos óleos

Os óleos utilizados foram adquiridos no comércio local de São José do Rio Preto-SP, sendo o óleo de soja do tipo 1 e refinado, enquanto o de amendoim, óleo bruto obtido por extração a frio, sem processamento adicional. Os óleos de soja (S), amendoim (A) e compostos, SA₁ (75:25 p/p) e SA₂ (50:50 p/p), foram analisados quanto às propriedades físico-químicas, bioativas e antioxidantes quando submetidos ao ensaio de termoxidação.

2.2 Termoxidação

Os óleos (160 mL) foram submetidos à termoxidação de modo descontínuo em dois dias, empregando-se, em cada dia de aquecimento, 10 horas contínuas. A termoxidação foi conduzida em chapa aquecida a 180 ± 5 °C com 0,4/cm de superfície/volume. Amostras foram tomadas em 0, 10 e 20 horas de aquecimento, armazenadas em frascos de vidro âmbar, inertizadas com nitrogênio gasoso e acondicionadas à temperatura de -18 °C até o momento das análises (ácidos graxos livres, peróxidos, *p*-anisidina, compostos polares totais, estabilidade oxidativa, teor de tocoferóis, compostos fenólicos totais e carotenoides totais, além da atividade antioxidante por DPPH e FRAP).

2.3 Métodos

Foram realizadas as análises de propriedades físico-químicas, compostos bioativos e atividade antioxidante dos óleos submetidos a termoxidação. Foram analisados os ácidos graxos livres (método Ca 5a-40), o índice de peróxidos (método Cd 8-53) e o índice de *p*-anisidina (Cd 18-90), conforme a metodologia proposta pela American Oil Chemists' Society (AOCS, 2009). O valor total de oxidação (valor Totox) foi obtido por meio de uma equação matemática que integra os resultados dos índices de peróxidos e *p*-anisidina ($VT = 2 IP + IpA$). Este parâmetro indica a quantidade total de compostos formados durante o processo de auto-oxidação dos óleos (Shahidi, 2005).

A determinação dos compostos polares totais foi realizada utilizando o sensor do instrumento Testo (270, Testo, Campinas, Brasil), que foi inserido nas amostras dos óleos previamente aquecidos a 90 ± 5 °C. A leitura do teor de compostos polares foi exibida no display do aparelho, com o resultado em porcentagem sendo apresentado após 30 segundos de imersão, conforme o indicativo luminoso do dispositivo (Osawa; Gonçalves; Mendes, 2010). Antes da análise, o sensor foi calibrado utilizando

óleo fornecido pelo fabricante. Após cada medição, o equipamento foi higienizado com água morna, detergente neutro e devidamente seco.

O índice de estabilidade oxidativa, expresso em horas, foi determinado utilizando o equipamento Rancimat a 110 °C, com fluxo de ar de 20 L/h, segundo o método Cd 12b-92 proposto pela American Oil Chemists' Society (AOCS, 2009).

A análise dos teores de tocoferóis foi realizada pelo método Ce8-89 da American Oil Chemists' Society (AOCS, 2009) em cromatografia líquida de alta eficiência (CLAE), com detector de fluorescência. Os valores das concentrações foram calculados em base da área dos picos de excitação da leitura e expressos em valores de cada isômero separadamente. Uma curva padrão de tocoferóis foi elaborada para expressar o teor de tocoferóis em mg/kg. Os compostos fenólicos totais foram extraídos pelo método proposto por Parry *et al.* (2005) e quantificados por espectrofotometria utilizando reagente de Folin-Ciocalteu e curva padrão de ácido gálico conforme método descrito por Singleton e Rossi (1965), sendo expresso em mg/kg.

Os carotenoides totais foram analisados segundo metodologia descrita por Rodriguez-Amaya (2001) e para a quantificação foi utilizado o espectro de absorção UV-visível em 450 nm, e resultados expressos em mg β -caroteno/g de óleo. A atividade antioxidante foi realizada por três metodologias distintas. A Capacidade de eliminação do radical DPPH[•] foi determinada conforme a metodologia descrita por Kalantzakis *et al.* (2006). O óleo foi diluído em acetato de etila (1:10 v/v) e 1 mL desta solução foi adicionado 4 mL da solução de DPPH (40 μ g/mL). A mistura foi agitada imediatamente em agitador de tubos (Vortex, QL 901, Qilinbei Instruments Manufacture, China) e deixada em repouso a 25 °C no escuro por 30 min. Então, foi medida a absorvância a $\lambda = 517$ nm em espectrofotômetro. Além, disso, foi feita uma amostra controle, com acetato de etila e DPPH nas mesmas condições. A capacidade em sequestrar o radical DPPH foi determinada usando a seguinte equação: atividade antioxidante (%) = $[(A_0 - A_1)/A_0] \times 100$, onde A_0 representa a absorvância da amostra controle e A_1 a absorvância da amostra. Os resultados foram expressos em percentual de inibição do radical DPPH (%). O poder antioxidante de redução do ferro (FRAP) foi realizado pela metodologia descrita por Szydlowska-Czerniak *et al.* (2008), que é baseada na capacidade dos fenóis em reduzir o complexo Fe⁺³-TPTZ (férrico tripiridiltriazina) ao complexo Fe⁺²-TPTZ (ferroso tripiridiltriazina) em pH 3,6. Primeiramente, 20 mg do óleo foram misturados com 1.000 μ L de álcool etílico e agitado em agitador de tubos (QL 901, Qilinbei Instruments Manufacture, China). Então, 2.700 μ L do reagente FRAP (25 mL de tampão acetato 0,3 Mol/L, pH 3,6; 2,5 mL de solução de 10 mMol do complexo Fe⁺³-TPTZ em 40 mMol HCl mais 2,5 mL de FeCl₃.H₂O a 20 mMol) foram misturados com 90 μ L da amostra e 270 μ L de água destilada. Essa mistura foi mantida por 30 min em banho maria a 37 °C e a absorvância foi medida a $\lambda = 595$ nm em espectrofotômetro. Os resultados foram expressos em μ Mol Trolox/100 g.

2.4 Análise estatística

Empregou-se o delineamento inteiramente casualizado em esquema fatorial (óleos x tempos de aquecimento), cujos resultados obtidos das determinações analíticas, em duplicata, foram submetidos à análise de variância e as diferenças entre as médias, testadas a 5% de probabilidade pelo teste de Tukey, por meio do programa ESTAT, versão 2.0 (Banzato; Kronka, 2006).

3 Resultados e discussão

A pesquisa desenvolvida avaliou os óleos submetidos a termoxidação por meio das propriedades físico-químicas, compostos bioativos e atividade antioxidante e os resultados foram apresentados em tabelas e gráficos.

3.1 Propriedades físico-químicas

Os resultados da Tabela 1 evidenciam que, com o tempo de exposição à termoxidação, os teores de ácidos graxos livres apresentaram aumento, com exceção do óleo composto SA₁ que permaneceu estável. Inicialmente, por se tratar de um óleo refinado, o óleo de soja se destacou por manter menor teor de ácidos graxos livres, indicando maior resistência inicial à degradação hidrolítica. A partir de 10 horas de aquecimento não apresentou diferenças significativas em relação ao SA₁. A adição de 25% de óleo de amendoim ao óleo de soja (SA₁) não provocou um aumento significativo na hidrólise dos

triacilgliceróis ao longo do período observado. Em contrapartida, uma proporção maior de óleo de amendoim na formulação (SA₂) tem potencial para contribuir para uma maior susceptibilidade à oxidação.

Tabela 1 – Propriedades físico-químicas para os óleos submetidos à termoxidação

Óleos	Tempos (horas)		
	0	10	20
<i>Ácidos graxos livres (%)</i>			
S	0,17 ± 0,01 ^{bc}	0,19 ± 0,01 ^{bc}	0,33 ± 0,01 ^{aB}
A	0,48 ± 0,01 ^{bA}	0,59 ± 0,01 ^{aA}	0,53 ± 0,01 ^{abA}
SA ₁	0,31 ± 0,01 ^{aB}	0,28 ± 0,01 ^{aBC}	0,31 ± 0,01 ^{aB}
SA ₂	0,36 ± 0,01 ^{bB}	0,37 ± 0,01 ^{bB}	0,54 ± 0,01 ^{aA}
<i>Índice de peróxidos (meq/kg)</i>			
S	2,78 ± 0,17 ^{bAB}	4,99 ± 0,34 ^{aAB}	5,31 ± 0,17 ^{aA}
A	3,98 ± 0,18 ^{bA}	5,72 ± 0,01 ^{aA}	5,67 ± 0,01 ^{aA}
SA ₁	1,49 ± 0,8 ^{bc}	4,15 ± 0,29 ^{aB}	5,76 ± 0,20 ^{aA}
SA ₂	2,09 ± 0,32 ^{bBC}	4,36 ± 0,02 ^{aB}	5,33 ± 0,44 ^{aA}
<i>Anisidina</i>			
S	3,58 ± 0,01 ^{cA}	44,85 ± 3,46 ^{bB}	55,78 ± 14,36 ^{aA}
A	2,56 ± 0,01 ^{cA}	41,57 ± 0,70 ^{bB}	48,58 ± 1,41 ^{aB}
SA ₁	2,85 ± 0,01 ^{bA}	48,97 ± 0,78 ^{aA}	52,48 ± 1,05 ^{aAB}
SA ₂	3,2 ± 0,01 ^{bA}	50,77 ± 0,01 ^{aA}	52,79 ± 0,98 ^{aA}
<i>Totox</i>			
S	9,15 ± 0,72 ^{cA}	54,83 ± 0,49 ^{bAB}	66,41 ± 21,38 ^{aA}
A	10,51 ± 0,72 ^{cA}	53,00 ± 0,47 ^{bB}	59,92 ± 1,36 ^{aB}
SA ₁	5,83 ± 0,31 ^{cA}	57,27 ± 0,28 ^{bAB}	64,00 ± 3,67 ^{aAB}
SA ₂	7,37 ± 1,26 ^{bA}	59,49 ± 0,10 ^{aA}	63,44 ± 0,11 ^{aAB}
<i>Polares totais (%)</i>			
S	7,00 ± 0,01 ^{cA}	24,50 ± 0,01 ^{bA}	39,00 ± 0,01 ^{aA}
A	2,50 ± 0,01 ^{cD}	13,50 ± 0,01 ^{bD}	18,50 ± 0,01 ^{aD}
SA ₁	6,50 ± 0,01 ^{cB}	17,50 ± 0,01 ^{bB}	28,50 ± 0,01 ^{aB}
SA ₂	5,00 ± 0,01 ^{cC}	16,00 ± 0,01 ^{bC}	26,00 ± 0,01 ^{aC}
<i>Estabilidade oxidativa (h)</i>			
S	7,14 ± 0,00 ^{aD}	2,18 ± 0,02 ^{bB}	1,49 ± 0,00 ^{cA}
A	10,2 ± 0,12 ^{aA}	1,57 ± 0,00 ^{bC}	0,84 ± 0,00 ^{cB}
SA ₁	8,12 ± 0,00 ^{aC}	2,6 ± 0,00 ^{bA}	1,18 ± 0,01 ^{cAB}
SA ₂	8,86 ± 0,01 ^{aB}	2,18 ± 0,01 ^{bB}	1,22 ± 0,00 ^{cA}

S: soja; A: amendoim; SA₁: 75:25 p/p; SA₂: 50:50 p/p.

Médias ± desvios padrões das determinações seguidas pelas mesmas letras minúsculas nas linhas e maiúsculas nas colunas não diferem pelo teste de Tukey ($p > 0,05$).

Fonte: dados da pesquisa.

Os ácidos graxos livres são mais sensíveis ao processo de oxidação que os ácidos esterificados ao glicerol, pois estão mais acessíveis (Mamtani; Shahbaz; Farid, 2021). Com base na legislação brasileira e nas diretrizes do Codex Alimentarius (FAO, 2023), os teores de ácidos graxos livres são indicadores críticos da qualidade do óleo, com limites máximos estabelecidos para garantir a segurança alimentar. Para óleos e gorduras refinados, o limite é estabelecido em 0,6 mg KOH/g de óleo (0,3% de acidez), e para óleos prensados a frio e não refinados, o limite pode ser mais elevado, de 4,0 mg KOH/g de óleo (2% de acidez) (Anvisa, 2021a). Observa-se que o óleo de soja em 20 horas de aquecimento atingiu este limite, cujo valor foi de 0,33%.

Conforme a Tabela 1, observa-se que os óleos apresentaram aumento discreto e similar nos índices de peróxidos ao longo do aquecimento, permanecendo estáveis a partir de 10 horas. Ao final de 20 horas não diferiram estatisticamente entre si e mantiveram seus índices de peróxidos dentro dos limites, 10 meq O₂/kg e 15 meq O₂/kg para óleos refinados e brutos, respectivamente (FAO, 2023).

Os óleos não apresentaram variações significativas nos valores de ρ -anisidina no início do aquecimento. Ao longo do processo, esses valores aumentaram para os óleos, evidenciando o acúmulo de compostos secundários da oxidação. No entanto, as formulações contendo amendoim (SA₁ e SA₂) apresentaram valores estáveis a partir de 10 horas, indicando que sua inclusão não impediu totalmente a formação de compostos secundários, mas também desacelerou significativamente a degradação oxidativa. A partir de 10 horas, os óleos mantiveram seus índices elevados, evidenciando redução na resistência à oxidação. Sabe-se que quando o valor do índice de ρ -anisidina – que mede os produtos secundários – for inferior a 10, este pode ser considerado um óleo de boa qualidade (Guillén; Cabo, 2002).

Conforme Tabela 1, no tempo inicial, o óleo puro de soja e os compostos SA₁ e SA₂ apresentaram valores Totox inferiores a 10, indicando boa conservação da matéria graxa, segundo estudo de Ungureanu *et al.* (2020). Em relação ao comportamento dos óleos ao longo do tempo, os óleos puros de soja e amendoim e a mistura SA₁ apresentaram aumento progressivo nos valores de Totox, refletindo o acúmulo de produtos oxidativos primários e secundários. Esse comportamento é consistente com estudos como o de Zaunschirm *et al.* (2018), que demonstraram o impacto do aquecimento na formação de aldeídos e peróxidos.

Já o óleo composto SA₂ se manteve estável para os níveis de Totox a partir de 10 horas de aquecimento. Essa estabilização sugere uma interação positiva entre os componentes desse óleo composto, reduzindo a formação contínua de produtos oxidativos, o que está alinhado com estudos que destacam os efeitos benéficos das combinações de antioxidantes naturais (Ramroudi *et al.*, 2022).

Em 20 horas de aquecimento, o óleo de amendoim manteve menor valor de Totox em relação ao óleo de soja, acumulando menos produtos oxidativos. Essa maior estabilidade destacam a relevância de desenvolver formulações equilibradas em óleos compostos, visando retardar a oxidação e melhorar a estabilidade oxidativa durante o aquecimento prolongado (Ghosh *et al.*, 2019).

Os óleos estudados apresentaram aumento nos teores de compostos polares com o decorrer do tempo de aquecimento, indicando a formação de produtos de oxidação, segundo Wei *et al.* (2023). Este aumento está de acordo com a literatura, que também observa uma elevação nos teores de compostos polares totais em óleos submetidos a altas temperaturas, indicando a degradação dos ácidos graxos insaturados, especialmente os poli-insaturados, como o ácido linoleico e α -linolênico, que são mais suscetíveis à oxidação térmica, resultando na formação de compostos polares (Pop; Semeniuc, 2022).

De acordo com o Informe Técnico nº 11, de 5 de outubro de 2004, da Anvisa, o limite máximo recomendado para compostos polares totais em óleos submetidos ao aquecimento é de 25% (Anvisa, 2004). Ao final das 20 horas de termoxidação, o óleo de soja obteve maior resultado (39%) e juntamente com os compostos ultrapassaram esse limite, evidenciando um nível de degradação oxidativa que compromete qualidade e segurança para o consumo. Esse parâmetro é amplamente aceito por legislações internacionais e respaldado por estudos como o de Li *et al.* (2022), que reforçam o uso dos compostos polares totais como indicador confiável da deterioração de óleos durante o aquecimento prolongado.

Independentemente do tempo de aquecimento, o óleo de amendoim e a formulação SA₂ apresentaram os menores teores de compostos polares totais, indicando maior estabilidade oxidativa, que pode estar atribuído à presença de antioxidantes naturais e à composição lipídica desses tratamentos, especialmente no que diz respeito ao grau de insaturação e ao tamanho das cadeias carbônicas dos ácidos graxos. Ácidos graxos monoinsaturados tendem a ser mais estáveis ao calor, enquanto os poli-insaturados, como o ácido linoleico, são mais suscetíveis à degradação térmica. A menor degradação dos compostos polares nas misturas SA₂ e SA₁ pode estar associada ao sinergismo entre os componentes dos óleos, favorecendo uma menor formação de compostos polares devido à proteção conferida pelos antioxidantes naturais presentes (Wang *et al.*, 2024).

Por outro lado, o óleo de soja apresentou os maiores teores de compostos polares totais, indicando uma maior degradação oxidativa. Esse resultado pode ser explicado pelo alto teor de ácidos

graxos poli-insaturados, especialmente ácido linoleico, que é mais suscetível à oxidação térmica (Chen; Sun, 2023). Estudos apontam que a degradação de óleos ricos em poli-insaturados ocorre de maneira acelerada sob altas temperaturas, levando ao aumento na formação de produtos polares secundários (Chen *et al.*, 2021).

Na Tabela 1 pode-se observar que os óleos submetidos à termoxidação apresentaram redução nos índices de estabilidade ao longo do aquecimento, indicando uma degradação oxidativa progressiva. Entre os óleos puros analisados, destacou-se o óleo de amendoim (A), que inicialmente apresentou o maior índice de estabilidade oxidativa (10,2 h), corroborando com os estudos de Zufarov e Serkayev (2023), que atribuíram essa resistência ao seu perfil de ácidos graxos monoinsaturados e presença de antioxidantes naturais.

As formulações SA₁ e SA₂ exibiram consideráveis índices de estabilidade oxidativa no início do experimento, com SA₂ demonstrando um desempenho superior a SA₁. Apesar da redução observada em ambos ao longo do aquecimento, apresentaram desempenho similar em 20 horas, mantendo um índice de estabilidade acima de 1 h.

Esses resultados estão alinhados com os estudos de Dhyani *et al.* (2022) e Ramroudi *et al.* (2022), que evidenciaram a importância da combinação de óleos para criar formulações mais estáveis. Tais estudos reforçam a necessidade de estudar as interações entre os componentes dos óleos compostos para otimizar suas propriedades oxidativas e atender demandas alimentícias e industriais.

3.2 Compostos bioativos e atividade antioxidante

Pela Tabela 2, observa-se que os óleos apresentaram degradação dos tocoferóis ao longo do tempo, efeito associado à exposição a temperaturas mais elevadas e presença de oxigênio, conforme relatado na literatura (Kmicik *et al.*, 2019). O α -tocoferol, reconhecido por sua alta atividade antioxidante, mas baixa estabilidade térmica (Tian *et al.*, 2024), apresentou os maiores teores iniciais no óleo de amendoim, seguido pelas formulações SA₂ e SA₁ (Figura 1).

Tabela 2 – Perfil de tocoferóis para os óleos submetidos à termoxidação

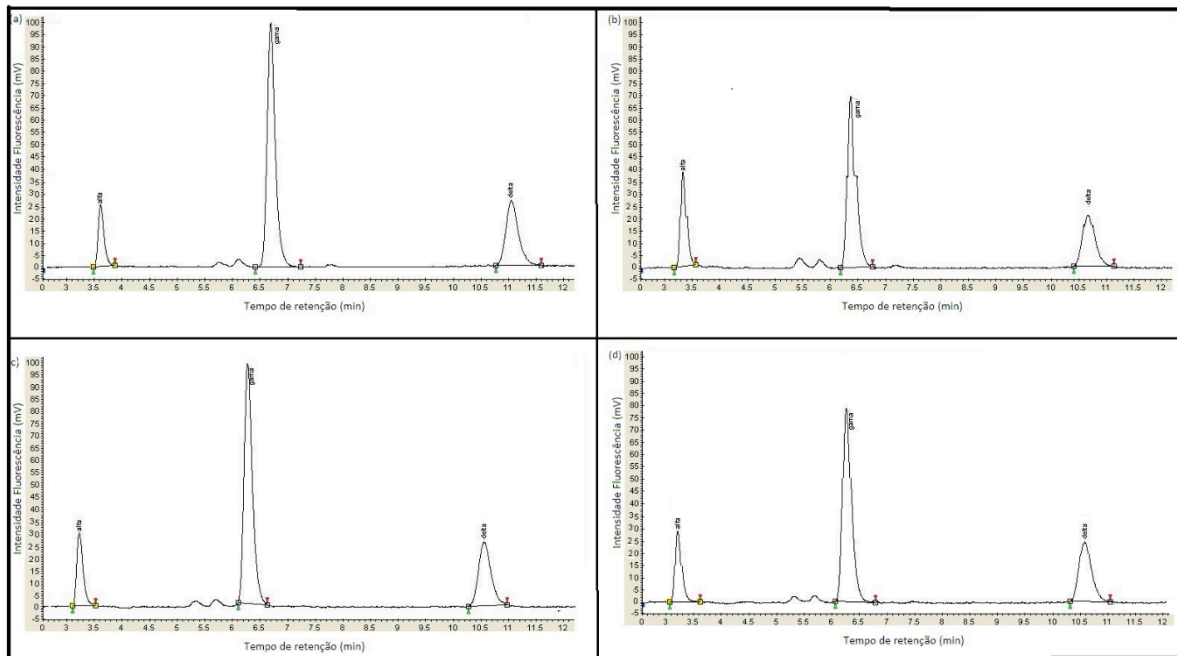
Óleos	Tempos (horas)		
	0	10	20
<i>α-tocoferol (mg/kg)</i>			
S	47,00 $\pm$ 0,01 ^{aD}	10,07 $\pm$ 0,01 ^{bC}	1,15 $\pm$ 0,05 ^{cB}
A	70,40 $\pm$ 0,01 ^{aA}	5,4 $\pm$ 0,02 ^{bD}	2,35 $\pm$ 0,01 ^{cA}
SA ₁	54,26 $\pm$ 0,01 ^{aC}	11,60 $\pm$ 0,01 ^{bA}	1,15 $\pm$ 0,04 ^{cB}
SA ₂	57,93 $\pm$ 0,01 ^{aB}	12,86 $\pm$ 0,01 ^{bA}	2,30 $\pm$ 0,01 ^{cA}
<i>γ-tocoferol (mg/kg)</i>			
S	186,95 $\pm$ 0,45 ^{aA}	33,60 $\pm$ 0,01 ^{bA}	3,99 $\pm$ 0,01 ^{cB}
A	127,01 $\pm$ 0,01 ^{aD}	10,70 $\pm$ 0,08 ^{bD}	2,65 $\pm$ 0,04 ^{cC}
SA ₁	169,38 $\pm$ 0,11 ^{aB}	26,60 $\pm$ 0,01 ^{bB}	5,50 $\pm$ 0,18 ^{cA}
SA ₂	149,54 $\pm$ 0,16 ^{aC}	13,51 $\pm$ 0,01 ^{bC}	2,59 $\pm$ 0,01 ^{cC}
<i>δ-tocoferol (mg/kg)</i>			
S	52,23 $\pm$ 0,01 ^{aA}	33,04 $\pm$ 0,01 ^{bA}	21,30 $\pm$ 0,00 ^{cA}
A	34,77 $\pm$ 0,01 ^{aD}	18,10 $\pm$ 0,00 ^{bD}	11,33 $\pm$ 0,01 ^{cD}
SA ₁	47,22 $\pm$ 0,01 ^{aB}	29,16 $\pm$ 0,01 ^{bB}	19,72 $\pm$ 0,01 ^{cB}
SA ₂	41,70 $\pm$ 0,03 ^{aC}	27,68 $\pm$ 0,01 ^{bC}	19,41 $\pm$ 0,01 ^{cC}
<i>Totais (mg/kg)</i>			
S	286,19 $\pm$ 0,67 ^{aA}	76,72 $\pm$ 0,00 ^{bA}	26,45 $\pm$ 0,04 ^{cA}
A	232,18 $\pm$ 0,00 ^{aD}	34,20 $\pm$ 0,20 ^{bD}	16,33 $\pm$ 0,08 ^{cC}
SA ₁	270,86 $\pm$ 0,09 ^{aB}	67,36 $\pm$ 0,00 ^{bB}	26,37 $\pm$ 0,31 ^{cA}
SA ₂	249,18 $\pm$ 0,34 ^{aC}	54,06 $\pm$ 0,00 ^{bC}	24,30 $\pm$ 0,01 ^{cB}

S: soja; A: amendoim; SA₁: 75:25 p/p; SA₂: 50:50 p/p.

Médias $\pm$ desvios padrões das determinações seguidas pelas mesmas letras minúsculas nas linhas e maiúsculas nas colunas não diferem pelo teste de Tukey ($p > 0,05$).

Fonte: dados da pesquisa.

Figura 1 – Cromatogramas dos perfis de tocoferóis dos óleos de soja (a), amendoim (b), SA₁ (c) e SA₂ (d).



S: soja; A: amendoim; SA₁: 75:25 p/p; SA₂: 50:50 p/p.

Fonte: dados da pesquisa.

Como observado, o α -tocoferol foi rapidamente degradado em todos os óleos. Os óleos puros de soja e amendoim apresentaram perdas superiores a 96% desse isômero em 20 horas de termoxidação, corroborando com outros estudos que apontam a rápida degradação do α -tocoferol em temperaturas mais elevadas (Kmieciak *et al.*, 2019). Este comportamento reflete sua menor capacidade antioxidante em condições de aquecimento prolongado (Caño-Ochoa; Ruiz-Aracama; Guillén, 2022; Syamila *et al.*, 2019). Segundo Martins (2006), sua estabilidade diminui pela metade a cada 10 °C acima de 40 °C. No presente estudo, o aquecimento a 180 °C intensificou a degradação, evidenciando sua alta sensibilidade térmica.

As formulações SA₁ e SA₂ apresentaram retenções muito baixas, 2,1% e 3,9%, respectivamente, valores similares aos dos óleos puros de soja (2,4%) e amendoim (3,3%). Esses resultados indicam que a adição de óleo de amendoim não proporcionou uma proteção significativa contra a degradação térmica do α -tocoferol.

O isômero γ -tocoferol foi majoritário em todos os óleos e apresentou maior resistência térmica. Por outro lado, novamente as formulações SA₁, SA₂ apresentaram retenções muito baixas, cerca de 3% e 2%, respectivamente, indicando que a adição do óleo de amendoim também não proporcionou uma proteção significativa contra a degradação térmica do γ -tocoferol.

Independentemente do tempo de aquecimento o δ -tocoferol se destacou na seguinte ordem: S>SA₁>SA₂>A. Ao final do processo, óleos S e SA₁ apresentaram retenções similares de aproximadamente 41% e 42%, indicando que esses óleos possuem maior capacidade de preservação desse isômero durante a termoxidação. Essa retenção pode estar associada à composição lipídica e à presença de outros compostos antioxidantes, que auxiliam na mitigação das perdas oxidativas (Gharby *et al.*, 2017).

Os teores totais de tocoferóis diminuíram significativamente em todos os óleos ao longo do aquecimento. As misturas SA₁, e SA₂ apresentaram retenções cerca de 9%, valores próximos ao óleo de soja puro (9,2%), sugerindo que a adição de óleos de amendoim não proporcionou proteção adicional significativa aos tocoferóis durante o aquecimento.

Observa-se na Tabela 3 que, ao longo do processo de termoxidação, os teores de compostos fenólicos totais apresentaram diferentes comportamentos entre os tratamentos. Enquanto os óleos de soja e SA₁ demonstraram aumento nos teores de compostos fenólicos, os óleos de amendoim e SA₂ mantiveram-se estáveis até 10 horas e, em seguida, apresentaram redução significativa até 20 horas.

Tabela 3 – Compostos bioativos e atividade antioxidante para os óleos submetidos à termoxidação

Óleos	Tempos (horas)		
	0	10	20
<i>Compostos fenólicos totais (mg/kg)</i>			
S	122,69 ± 12,50 ^{cC}	162,37 ± 7,45 ^{bB}	189,56 ± 9,53 ^{aA}
A	136,12 ± 9,55 ^{aB}	142,37 ± 13,60 ^{aC}	101,44 ± 3,12 ^{bB}
SA ₁	147,37 ± 0,20 ^{bA}	175,81 ± 7,03 ^{aA}	181,12 ± 0,20 ^{aA}
SA ₂	121,75 ± 0,19 ^{aC}	121,75 ± 1,77 ^{aD}	66,12 ± 0,20 ^{bC}
<i>Carotenoides (mg β-caroteno/g)</i>			
S	5,60 ± 0,01 ^{aC}	5,65 ± 0,14 ^{aC}	8,57 ± 0,13 ^{aB}
A	57,31 ± 2,83 ^{aB}	55,66 ± 0,33 ^{aB}	9,04 ± 0,13 ^{bB}
SA ₁	58,38 ± 0,89 ^{aB}	50,34 ± 3,61 ^{bB}	51,41 ± 0,31 ^{abA}
SA ₂	66,48 ± 2,20 ^{aA}	69,76 ± 4,76 ^{aA}	58,66 ± 1,87 ^{bA}
<i>DPPH (%)</i>			
S	82,39 ± 2,02 ^{aA}	52,13 ± 0,15 ^{bA}	31,17 ± 0,02 ^{cA}
A	76,86 ± 2,93 ^{aB}	19,96 ± 0,49 ^{bD}	12,78 ± 0,28 ^{cD}
SA ₁	83,05 ± 0,40 ^{aA}	45,40 ± 0,21 ^{bB}	27,78 ± 6,34 ^{cB}
SA ₂	77,61 ± 0,62 ^{aB}	33,92 ± 0,02 ^{bC}	24,54 ± 0,05 ^{cC}
<i>FRAP (μMol Trolox/100 g)</i>			
S	113,99 ± 1,44 ^{cC}	125,24 ± 3,38 ^{bB}	164,69 ± 6,84 ^{aA}
A	107,39 ± 0,84 ^{cD}	152,99 ± 0,12 ^{aA}	134,04 ± 0,18 ^{bC}
SA ₁	131,14 ± 0,72 ^{cA}	152,79 ± 5,44 ^{aA}	141,24 ± 1,62 ^{bB}
SA ₂	122,04 ± 0,32 ^{cB}	149,14 ± 0,20 ^{aA}	132,24 ± 2,42 ^{bC}

S: soja; A: amendoim; SA₁: 75:25 p/p; SA₂: 50:50 p/p.

Médias ± desvios padrões das determinações seguidas pelas mesmas letras minúsculas nas linhas e maiúsculas nas colunas não diferem pelo teste de Tukey (p > 0,05).

Fonte: dados da pesquisa.

Inicialmente, a formulação SA₁ destacou-se com maior concentração de compostos fenólicos (147,37 mg/kg), seguido pelo óleo de amendoim (136,12 mg/kg), possivelmente devido à presença natural de antioxidantes fenólicos característicos de sua composição e por ser um óleo não refinado. Em contrapartida, os óleos de soja e SA₂ registraram os menores teores iniciais, em média 122,22 mg/kg. Essa variação inicial reflete a composição fenólica distinta dos óleos, que pode impactar diretamente sua estabilidade oxidativa durante a termoxidação (Rekik *et al.*, 2021).

Em 20 horas, o óleo de soja apresentou o maior teor de compostos fenólicos totais (189,56 mg/kg), não diferindo significativamente do SA₁ (181,12 mg/kg), evidenciando a influência positiva do óleo de soja nessa formulação. Além disso, os óleos citados apresentaram retenção superior a 100%, fenômeno que pode ser parcialmente atribuído ao fato do óleo de amendoim ser bruto ou à superestimação dos compostos fenólicos totais. Esse efeito ocorre porque o reagente de Folin-Ciocalteu reage não apenas com compostos fenólicos, mas também com outros agentes redutores, como antioxidantes degradados, resultantes da decomposição térmica. O molibdênio presente no reagente é reduzido por esses compostos degradados, resultando na formação de complexos azulados que elevam artificialmente as leituras dos compostos fenólicos totais (Abril *et al.*, 2019; Torres *et al.*, 2024). Esse comportamento pode levar a uma interpretação excessiva do conteúdo fenólico total, uma vez que o ensaio mede a capacidade total de redução, e não apenas os fenólicos específicos (Rizvi *et al.*, 2023).

Michiu *et al.* (2022) ressaltaram que os compostos fenólicos exercem uma função antioxidante fundamental e que sua detecção pode ser ampliada em determinadas condições de aquecimento. Özcan e Köse (2023) também relataram aumento nos compostos fenólicos totais em óleos de girassol durante a termoxidação, demonstrando a influência da degradação oxidativa na elevação dos valores obtidos por análises espectrofotométricas. Ainda, Rekik *et al.* (2021) identificaram que óleos de oliva podem apresentar aumento nos compostos fenólicos totais durante a termoxidação, corroborando com os achados do presente estudo.

Observa-se que os carotenoides apresentaram algumas variações entre os tratamentos ao longo do processo de termoxidação (Tabela 3). O óleo de soja manteve teores estáveis ao longo do tempo de aquecimento. Por outro lado, o óleo de amendoim e SA₂ mantiveram estáveis até 10 horas e, em seguida, apresentaram redução significativa em 20 horas. Em relação aos óleos puros, inicialmente o óleo de amendoim apresentou o maior teor de carotenoides. Em 20 horas de termoxidação, estes óleos apresentaram os menores teores, não diferindo significativamente entre si, evidenciando maior degradação térmica desses compostos ao longo do aquecimento.

Entre os óleos compostos, inicialmente, SA₂ apresentou o maior teor de carotenoides, porém, ao final da termoxidação, os óleos compostos apresentaram valores estatisticamente semelhantes e retenções superiores a 88%, evidenciando o papel dessas combinações na preservação dos carotenoides. Esse comportamento pode estar relacionado à interação entre antioxidantes presentes nas formulações, como carotenoides e compostos fenólicos, que atuam na proteção contra a degradação térmica. Estudos indicam que a presença de múltiplos compostos bioativos pode potencializar a estabilidade oxidativa dos óleos vegetais, reduzindo a degradação de carotenoides durante o aquecimento (Fadda *et al.*, 2022; Machado *et al.*, 2023).

Entre os óleos puros, o óleo de soja apresentou maior capacidade de eliminação do radical DPPH ao longo do processo (Tabela 3). Em 20 horas de termoxidação apresentou retenção de aproximadamente 38% da sua capacidade inicial. Em contraste, o óleo de amendoim apresentou a menor capacidade de eliminação do radical DPPH em todos os tempos analisados, com perda superior a 83% ao final do aquecimento. A composição antioxidante dos óleos influencia diretamente sua estabilidade térmica. O óleo de soja manteve atividade antioxidante relevante, enquanto o óleo de amendoim apresentou a menor capacidade antioxidante ao final do experimento, o que pode ser explicado pela rápida degradação de tocoferóis e carotenoides durante o aquecimento (Mba; Dumont; Ngadi, 2017). Entre os óleos compostos, o SA₁ apresentou a maior capacidade de eliminação do radical DPPH ao longo da termoxidação, influenciado pela maior proporção de óleo de soja (75:25 p/p).

Ao longo da termoxidação, o óleo de soja apresentou aumento progressivo na capacidade antioxidante pelo método FRAP, o que pode estar associado à formação de compostos antioxidantes secundários durante a degradação térmica dos compostos primários (Grebenteuch *et al.*, 2021). Já os óleos de amendoim, SA₁ e SA₂ apresentaram comportamento oscilatório, sugerindo uma interação dinâmica entre compostos pró-oxidantes e antioxidantes, o que pode levar a uma recuperação momentânea da capacidade antioxidante ao longo do aquecimento (Chelghoum *et al.*, 2020).

Estudos prévios confirmam que a degradação térmica afeta de forma significativa a estabilidade oxidativa dos óleos. Rabiej-Kozioł *et al.* (2023) relataram que a atividade antioxidante medida pelo FRAP em óleos prensados a frio variou entre 185,36 e 396,63 µmol Trolox/100 g, apresentando reduções consideráveis ao longo do aquecimento, o que reforça a importância da estabilidade térmica na preservação da qualidade oxidativa.

4 Conclusões

Quanto às propriedades físico-químicas, o óleo de amendoim mostrou boa estabilidade inicial e se destacou por apresentar menores teores de compostos primários e secundários de oxidação durante o processo de termoxidação. Já, quanto aos compostos bioativos e antioxidantes, os óleos compostos, SA₁ e SA₂, se sobressaíram com maiores teores de compostos fenólicos, carotenoides e atividade antioxidante por DPPH ao longo do processo.

Assim, a formulação de óleos compostos mostrou-se uma estratégia viável para aprimorar a estabilidade oxidativa do óleo de soja, reduzindo sua suscetibilidade à oxidação e contribuindo para a

preservação de compostos bioativos. Porém, estudos futuros devem ser conduzidos a fim de ajustar as proporções dos componentes nas misturas e condições dos ensaios experimentais.

Financiamento

Esta pesquisa não recebeu financiamento.

Conflito de interesses

Os autores declaram não haver conflito de interesses.

Nota

Este artigo é derivado de tese do curso de Doutorado em Engenharia e Ciência de Alimentos da Universidade Estadual Paulista “Júlio de Mesquita Filho” (UNESP), campus de São José do Rio Preto-SP, disponível em: <https://hdl.handle.net/11449/315677>.

Contribuição ao artigo

CLARA, M. P. F.: concepção da pesquisa; análise e interpretação dos dados. **VERONEZI, C. M.:** análise e interpretação dos dados. **JORGE, N.:** revisão final com participação crítica e intelectual no manuscrito. Todos os autores participaram da escrita, discussão, leitura e aprovação da versão final do artigo.

Referências

ABRIL, D.; MIRABAL-GALLARDO, Y.; GONZÁLEZ, A.; MARICAN, A.; DURÁN-LARA, E. F.; SILVA SANTOS, L.; VALDÉS, O. Comparison of the oxidative stability and antioxidant activity of extra-virgin olive oil and oils extracted from seeds of *Colliguaya integerrima* and *Cynara cardunculus* under normal conditions and after thermal treatment. *Antioxidants*, v. 8, n. 10, 470, 2019. DOI: <https://doi.org/10.3390/antiox8100470>.

ANVISA – AGÊNCIA NACIONAL DE VIGILÂNCIA SANITÁRIA. **Informe Técnico n.º 11, de 5 de outubro de 2004.** Dispõe sobre a utilização e descarte de óleos e gorduras utilizados para fritura. Brasília, DF: Anvisa, 2004. Disponível em: https://www.gov.br/anvisa/pt-br/assuntos/alimentos/informes/copy_of_11de2004. Acesso em: 19 jun. 2024.

ANVISA – AGÊNCIA NACIONAL DE VIGILÂNCIA SANITÁRIA. **Instrução Normativa n.º 87, de 15 de março de 2021.** Estabelece a lista de espécies vegetais autorizadas, as designações, a composição de ácidos graxos e os valores máximos de acidez e de índice de peróxidos para óleos e gorduras vegetais. Brasília, DF: Anvisa, 2021a. Disponível em: https://anvisa.gov.br/legis/datalegis.net/action/UrlPublicasAction.php?acao=abrirAtoPublico&num_ato=00000087&sgl_tipo=INM&sgl_orgao=DC/ANVISA/MS&vlr_ano=2021&seq_ato=000&cod_modulo=134&cod_menu=1696. Acesso em: 19 jun. 2024.

ANVISA – AGÊNCIA NACIONAL DE VIGILÂNCIA SANITÁRIA. **Resolução RDC n.º 481, de 15 de março de 2021.** Dispõe sobre os requisitos sanitários para óleos e gorduras vegetais. Brasília, DF: Anvisa, 2021b. Disponível em: https://anvisa.gov.br/legis/datalegis.net/action/UrlPublicasAction.php?acao=abrirAtoPublico&num_ato=00000481&sgl_tipo=RDC&sgl_orgao=RDC/DC/ANVISA/MS&vlr_ano=2021&seq_ato=000&cod_modulo=310&cod_menu=9434. Acesso em: 4 fev. 2023.

AOCS – AMERICAN OIL CHEMISTS’ SOCIETY. **Official Methods and Recommended Practices of the American Oil Chemists Society.** 6. ed. Champaign: AOCS Press, 2009.

BANZATO, D. A.; KRONKA, S. N. **Experimentação agrícola.** 4. ed. Jaboticabal: FUNEP, 2006. 237 p.

BARANI, M.; BONETTI, R.; PARKER JUNIOR, W. O. Thermal oxidation of model molecules to reveal vegetable oil polymerization studied by NMR spectroscopy and self-diffusion. **Journal of the American Oil Chemists' Society**, v. 100, n. 7, p. 551-560, 2023. DOI: <https://doi.org/10.1002/aocs.12704>.

BEZERRA, C. V.; RODRIGUES, A. M. C.; OLIVEIRA, P. D.; SILVA, D. A.; SILVA, L. H. M. Technological properties of amazonian oils and fats and their applications in the food industry. **Food Chemistry**, v. 221, p. 1466-1473, 2017. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.foodchem.2016.11.004>.

CAÑO-OCHOA, S. D.; RUIZ-ARACAMA, A.; GUILLÉN, M. D. Alpha-tocopherol, a powerful molecule, leads to the formation of oxylipins in polyunsaturated oils differently to the temperature increase: a detailed study by proton nuclear magnetic resonance of walnut oil oxidation. **Antioxidants**, v. 11, n. 4, 604, 2022. DOI: <https://doi.org/10.3390/antiox11040604>.

CHELGHOU, M.; GUENANE, H.; HARRAT, M.; YOUSFI, M. Total tocopherols, carotenoids, and fatty acids content variation of *Pistacia atlantica* from different organs' crude oils and their antioxidant activity during development stages. **Chemistry & Biodiversity**, v. 17, n. 9, e2000117, 2020. DOI: <https://doi.org/10.1002/cbdv.202000117>.

CHEN, J.; ZHANG, L.; LI, Y.; ZHANG, N.; GAO, Y.; YU, X. The formation, determination and health implications of polar compounds in edible oils: current status, challenges and perspectives. **Food Chemistry**, v. 364, 130451, 2021. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.foodchem.2021.130451>.

CHEN, X.; SUN, S. Color reversion of refined vegetable oils: a review. **Molecules**, v. 28, n. 13, 5177, 2023. DOI: <https://doi.org/10.3390/molecules28135177>.

DEVARAJAN, S.; CHATTERJEE, B.; URATA, H.; ZHANG, B.; ALI, A.; SINGH, R.; GANAPATHY, S. A blend of sesame and rice bran oils lowers hyperglycemia and improves the lipids. **The American Journal of Medicine**, v. 129, n. 7, p. 731-739, 2016a. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.amjmed.2016.02.044>.

DEVARAJAN, S.; SINGH, R.; CHATTERJEE, B.; ZHANG, B.; ALI, A. A blend of sesame oil and rice bran oil lowers blood pressure and improves the lipid profile in mild-to-moderate hypertensive patients. **Journal of Clinical Lipidology**, v. 10, n. 2, p. 339-349, 2016b. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.jacl.2015.12.011>.

DHYANI, A.; SINGH, P. K.; CHOPRA, R.; GARG, M. Enhancement of oxidative stability of perilla seed oil by blending it with other vegetable oils. **Journal of Oleo Science**, v. 71, n. 8, p. 1135-1144, 2022. DOI: <https://doi.org/10.5650/jos.ess22013>.

FADDA, A.; SANNA, D.; SAKAR, E. H.; GHARBY, S.; MULAS, M.; MEDDA, S.; YESILCUBUK, N. S.; KARACA, A. C.; GOZUKIRMIZI, C. K.; LUCARINI, M.; LOMBARDI-BOCCIA, G.; DIACONEASA, Z.; DURAZZO, A. Innovative and sustainable technologies to enhance the oxidative stability of vegetable oils. **Sustainability**, v. 14, n. 2, 849, 2022. DOI: <https://doi.org/10.3390/su14020849>.

FAO – FOOD AND AGRICULTURE ORGANIZATION OF THE UNITED NATIONS. **Codex Alimentarius**: Standard for named vegetable oils (CXS 210-1999). Alterado em 2023. Rome: FAO, 2023. v. 8.

FARAG, R. S.; HASHEM, H. A.; NASER, A.; MOHAMED, M. A. Optimization of fatty acid composition by of cooking oils blending of different plant oils. **International Research Journal of**

Pure and Applied Chemistry, v. 22, n. 1, p. 47-58, 2021. DOI: <https://doi.org/10.9734/irjpac/2021/v22i130371>.

GHARBY, S.; HARHAR, H.; BOUZOUBAA, Z.; ASDADI, A.; EL YADINI, A.; CHARROUF, Z. Chemical characterization and oxidative stability of seeds and oil of sesame grown in Morocco. **Journal of the Saudi Society of Agricultural Sciences**, v. 16, n. 2, p. 105-111, 2017. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.jssas.2015.03.004>.

GHOSH, M.; UPADHYAY, R.; MAHATO, D. K.; MISHRA, H. N. Thermal and oxidative stability assessment of synergistic blends of sunflower and sesame oils tailored for nutritionally stable composition of omega fatty acids. **Journal of Thermal Analysis and Calorimetry**, v. 135, n. 1, p. 2389-2398, 2019. DOI: <https://doi.org/10.1007/s10973-018-7342-4>.

GREBENTEUCH, S.; KROH, L. W.; DRUSCH, S.; ROHN, S. Formation of secondary and tertiary volatile compounds resulting from the lipid oxidation of rapeseed oil. **Foods**, v. 10, n. 10, 2417, 2021. DOI: <https://doi.org/10.3390/foods10102417>.

GROVER, S.; KUMARI, P.; KUMAR, A.; SONI, A.; SEHGAL, S.; SHARMA, V. Preparation and quality evaluation of different oil blends. **Letters in Applied NanoBioScience**, v. 10, n. 2, p. 2126-2137, 2021. DOI: <https://doi.org/10.33263/LIANBS102.21262137>.

GUILLÉN, M. D.; CABO, N. Fourier transform infrared spectra data versus peroxide and anisidine values to determine oxidative stability of edible oils. **Food Chemistry**, v. 77, n. 4, p. 503-510, 2002. DOI: [https://doi.org/10.1016/S0308-8146\(01\)00371-5](https://doi.org/10.1016/S0308-8146(01)00371-5).

KALANTZAKIS, G.; BLEKAS, G.; PEGKLIDOU, K.; BOSKOU, D. Stability and radical-scavenging activity of heated olive oil and other vegetable oils. **European Journal of Lipid Science and Technology**, v. 108, n. 4, p. 329-335, 2006. DOI: <https://doi.org/10.1002/ejlt.200500314>.

KASEKE, T.; OPARA, U. L.; FAWOLE, O. A. Blending of sunflower oil with pomegranate seed oil from blanched seeds: impact on functionality, oxidative stability, and antioxidant properties. **Processes**, v. 9, n. 4, 635, 2021. DOI: <https://doi.org/10.3390/pr9040635>.

KASPRZAK, M.; RUDZIŃSKA, M.; PRZYBYLSKI, R.; KMIECIK, D.; SIGER, A.; OLEJNIK, A. The degradation of bioactive compounds and formation of their oxidation derivatives in refined rapeseed oil during heating in model system. **LWT - Food Science and Technology**, v. 123, 109078, 2020. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.lwt.2020.109078>.

KMIECIK, D.; FEDKO, M.; SIGER, A.; KULCZYŃSKI, B. Degradation of tocopherol molecules and its impact on the polymerization of triacylglycerols during heat treatment of oil. **Molecules**, v. 24, n. 24, 4555, 2019. DOI: <https://doi.org/10.3390/molecules24244555>.

LEHNERT, S.; KHOMENKO, O.; DUBININA, A.; VINNIKOVA, V.; TATAR, L. Quality and safety of new blended oils. **Food Science and Technology**, v. 13, n. 3, p. 112-117, 2019. DOI: <https://doi.org/10.15673/fst.v13i3.1479>.

LI, X.; WANG, Z.; XING, C.; CHEN, Z.; SUN, W.; SUN, C.; XU, G.; WANG, X. Feasibility of total polar compound and its five components to evaluate the deterioration of heated and fried oil: aspect of regulations of various countries. **LWT - Food Science and Technology**, v. 171, 114153, 2022. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.lwt.2022.114153>.

MACHADO, M.; RODRIGUEZ-ALCALÁ, L. M.; GOMES, A. M.; PINTADO, M. Vegetable oils oxidation: mechanisms, consequences and protective strategies. **Food Reviews International**, v. 39, n. 7, p. 4180-4197, 2023. DOI: <https://doi.org/10.1080/87559129.2022.2026378>.

MAMTANI, K.; SHAHBAZ, K.; FARID, M. M. Glycerolysis of free fatty acids: A review. **Renewable and Sustainable Energy Reviews**, v. 137, 110501, 2021. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.rser.2020.110501>.

MARTINS, P. F. **Estudos e experimentos para a concentração de tocoferóis e fitosteróis por meio da destilação molecular**. 224 f. Tese (Doutorado em Engenharia Química) – Faculdade de Engenharia Química, Universidade Estadual de Campinas, Campinas, 2006. DOI: <https://doi.org/10.47749/T/UNICAMP.2006.362337>.

MBA, O. I.; DUMONT, M.-J.; NGADI, M. Thermostability and degradation kinetics of tocopherols and carotenoids in palm oil, canola oil and their blends during deep-fat frying. **LWT - Food Science and Technology**, v. 82, p. 131-138, 2017. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.lwt.2017.04.027>.

MICHIU, D.; SOCACIU, M.-I.; FOGARASI, M.; JIMBOREAN, A. M.; RANGA, F.; MUREȘAN, V.; SEMENIUC, C. A. Implementation of an analytical method for spectrophotometric evaluation of total phenolic content in essential oils. **Molecules**, v. 27, n. 4, 1345, 2022. DOI: <https://doi.org/10.3390/molecules27041345>.

OSAWA, C. C.; GONÇALVES, L. A. G.; MENDES, F. M. Avaliação dos óleos e gorduras de fritura de estabelecimentos comerciais da cidade de Campinas/SP. As boas práticas de fritura estão sendo atendidas? **Alimentos e Nutrição**, Araraquara, v. 21, n. 1, p. 47-55, 2010. Disponível em: <https://openurl.ebsco.com/EPDB%3Agcd%3A3%3A1051267/detailv2?sid=ebsco%3Aocu%3Arecord&id=ebsco%3Agcd%3A61059367>. Acesso em: 23 set. 2026.

ÖZCAN, M. M.; KÖSE, N. Monitoring of changes in physico-chemical properties, fatty acids and phenolic compounds of unroasted and roasted sunflower oils obtained by enzyme and ultrasonic extraction systems. **Journal of Food Measurement and Characterization**, v. 17, n. 1, p. 849-862, 2023. DOI: <https://doi.org/10.1007/s11694-022-01626-5>.

PARRY, J. W.; SU, L.; LUTHER, M.; ZHOU, K.; YURAWECZ, M. P.; WHITTAKER, P.; YU, L. Fatty acid composition and antioxidant properties of cold-pressed marionberry, boysenberry, red raspberry, and blueberry seed oils. **Journal of Agricultural and Food Chemistry**, Easton, v. 53, n. 3, p. 566-573, 2005. DOI: <https://doi.org/10.1021/jf048615t>.

PATTNAIK, M.; MISHRA, H. N. Oxidative stability of ternary blends of vegetable oils: A chemometric approach. **LWT - Food Science and Technology**, v. 142, 111018, 2021. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.lwt.2021.111018>.

PINHEIRO, A. A.; LUZIA, D. M. M.; JORGE, N. Avaliação da qualidade de óleos de soja (*Glycine max* L.), girassol (*Helianthus annuus* L.) e coco (*Cocos nucifera* L.) sob aquecimento. In: VERONEZI, C. M.; SILVA, A. C.; FREITAS, I. R.; JORGE, N. (org.). **Óleos vegetais: propriedades físico-químicas, bioativas e antioxidantes**. 1. ed. Jardim de Seridó: Agron Food Academy, 2022. v. 1, p. 126-140. Disponível em: <https://agronfoodacademy.com/wp-content/uploads/2022/12/Livro-oleos-e-gorduras.pdf>. Acesso em: 23 set. 2026.

POP, F.; SEMENIUC, C. A. Oxidative stability of avocado and peanut oils under different heating temperatures. **Revista de Chimie**, v. 73, n. 1, p. 1-8, 2022. Disponível em: https://www.researchgate.net/publication/358328233_Oxidative_Stability_of_Avocado_and_Peanut_Oils_Under_Different_Heating_Temperatures. Acesso em: 6 out. 2026.

RABIEJ-KOZIOŁ, D.; MOMOT-RUPPERT, M.; STAWICKA, B.; SZYDŁOWSKA-CZERNIAK, A. Health benefits, antioxidant activity, and sensory attributes of selected cold-pressed oils. **Molecules**, v. 28, n. 14, 5484, 2023. DOI: <https://doi.org/10.3390/molecules28145484>.

RAMROUDI, F.; ARDAKANI, S. A. Y.; DEGHANI-TAFTI, A.; SADRABAD, E. K. Investigation of the physicochemical properties of vegetable oils blended with sesame oil and their oxidative stability during frying. **International Journal of Food Science**, v. 2022, 3165512, 2022. DOI: <https://doi.org/10.1155/2022/3165512>.

REKIK, O.; MANSOUR, A. B.; SILVA, M. D. R. G.; BOUAZIZ, M. Identification of trace volatile and phenolic compounds in olive oils with trees growing in different area conditions: using SPME/GC-MS. **Food Analytical Methods**, v. 14, n. 12, p. 2494-2510, 2021. DOI: <https://doi.org/10.1007/s12161-021-02061-w>.

RIZVI, N. B.; FATIMA, A.; BUSQUETS, R.; KHAN, M. R.; ASHRAF, S.; KHAN, M. S.; OZ, F. Effect of the media in the Folin-Ciocalteu assay for the analysis of the total phenolic content of olive products. **Food Analytical Methods**, v. 16, n. 11-12, p. 1627-1634, 2023. DOI: <https://doi.org/10.1007/s12161-023-02527-z>.

RODRIGUEZ-AMAYA, D. B. **A guide to carotenoids analysis in food**. 1. ed. Washington: ILSI Press, 2001. 64 p.

SHAHIDI, F. (ed.). **Bailey's industrial oil & fats products**. 6 ed. New York: John Wiley & Son, 2005. DOI: <https://doi.org/10.1002/047167849X>.

SILVA, N. R. F.; PEREZ, V. H.; FERREIRA, K. S.; SILVEIRA, T. C.; SILVA, M. B. The increase of atherogenic index on fatty acids composition as a consequence of *trans* fat acids reduction in industrialized foods: the Brazilian scenery. **Brazilian Journal of Food Technology**, v. 23, e2019268, 2020. DOI: <https://doi.org/10.1590/1981-6723.26819>.

SINGLETON, V. L.; ROSSI, J. A. Colorimetry of total phenolics with phosphomolybdic-phosphotungstic acid reagents. **American Journal of Enology and Viticulture**, Davis, v. 16, n. 3, p. 144-158, 1965. DOI: <https://doi.org/10.5344/ajev.1965.16.3.144>.

SYAMILA, M.; GEDI, M. A.; BRIARS, R.; AYED, C.; GRAY, D. A. Effect of temperature, oxygen and light on the degradation of β -carotene, lutein and α -tocopherol in spray-dried spinach juice powder during storage. **Food Chemistry**, v. 284, p. 188-197, 2019. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.foodchem.2019.01.055>.

SZYDŁOWSKA-CZERNIAK, A.; KARLOVITS, G.; DIANOCZKI, C.; RECSEG, K.; SZŁYK, E. Comparison of two analytical methods for assessing antioxidant capacity of rapeseed and olive oils. **Journal of the American Oil Chemists' Society**, v. 85, n. 2, p. 141-149, 2008. DOI: <https://doi.org/10.1007/s11746-007-1178-6>.

TIAN, H.; LI, Y.-F.; JIAO, G.-L.; SUN, W.-Y.; HE, R.-R. Unveiling the antioxidant superiority of α -tocopherol: Implications for vitamin E nomenclature and classification. **Free Radical Biology and Medicine**, v. 216, p. 46-49, 2024. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.freeradbiomed.2024.03.003>.

TORRES, P.; OSAKI, S.; SILVEIRA, E.; DOS SANTOS, D. Y. A. C.; CHOW, F. Comprehensive evaluation of Folin-Ciocalteu assay for total phenolic quantification in algae (*Chlorophyta*, *Phaeophyceae*, and *Rhodophyta*). **Algal Research**, v. 80, 103503, 2024. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.algal.2024.103503>.

UNGUREANU, C.-R. M.; POIANA, M.-A.; COCAN, I.; LUPITU, A. I.; ALEXA, E.; MOIGRADEAN, D. Strategies to improve the thermo-oxidative stability of sunflower oil by exploiting the antioxidant potential of blueberries processing byproducts. **Molecules**, v. 25, n. 23, 5688, 2020. DOI: <https://doi.org/10.3390/molecules25235688>.

WANG, G.; LIU, L.; PENG, F.; MA, Y.; DENG, Z.; LI, H. Natural antioxidants enhance the oxidation stability of blended oils enriched in unsaturated fatty acids. **Journal of the Science of Food and Agriculture**, v. 104, n. 5, p. 2907-2916, 2024. DOI: <https://doi.org/10.1002/jsfa.13183>.

WEI, C.; WANG, X.; AI, Y.; ZHANG, S.; ZHANG, X.; ZHOU, Y.; LU, S.; GU, H.; ZHANG, X.; LUO, X.; XU, G.; LI, X. Effect of oleic/linoleic acid ratio on simultaneous formation of epoxy fatty acids and polar compounds in deep frying oils. **LWT - Food Science and Technology**, v. 187, 115389, 2023. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.lwt.2023.115389>.

ZAUNSCHIRM, M.; PIGNITTER, M.; KIENESBERGER, J.; HERNLER, N.; RIEGGER, C.; EGGERSDORFER, M.; SOMOZA, V. Contribution of the ratio of tocopherol homologs to the oxidative stability of commercial vegetable oils. **Molecules**, v. 23, n. 1, 206, 2018. DOI: <https://doi.org/10.3390/molecules23010206>.

ZUFAROV, O.; SERKAYEV, K. Determination of oxidative stability of crude and refined vegetable oils by Rancimat. **Chemical Technology, Control and Management**, v. 2023, n. 5, p. 11-16, 2023. DOI: <https://doi.org/10.59048/2181-1105.1500>.