

Extração de óleo de grão-de-bico (*Cicer arietinum*) utilizando CO₂ supercrítico (avaliação dos efeitos da temperatura e pressão no rendimento)

Chickpea (*Cicer arietinum*) oil extraction using supercritical CO₂ (evaluation of the effects of temperature and pressure on yield)

Extracción de aceite de garbanzo (*Cicer arietinum*) mediante CO₂ supercrítico (evaluación de los efectos de la temperatura y la presión en el rendimiento)

Recebido: 16/06/2025 | Revisado: 27/06/2025 | Aceitado: 28/06/2025 | Publicado: 30/06/2025

Marcos Antônio Avibar Rizza

ORCID: <https://orcid.org/0009-0008-7224-8095>

Universidade Estadual Paulista "Júlio de Mesquita Filho", Brasil

E-mail: marcos.rizza@unesp.br

Kevin Azevedo Cardoso

ORCID: <https://orcid.org/0009-0007-1933-9900>

Universidade Estadual Paulista "Júlio de Mesquita Filho", Brasil

E-mail: kevin.azevedo@unesp.br

Guilherme de Souza Lopes

ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-7331-8173>

Universidade Estadual Paulista "Júlio de Mesquita Filho", Brasil

E-mail: guilherme.s.lopes@unesp.br

Leandro Ferreira-Pinto

ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-0656-9471>

Universidade Estadual Paulista "Júlio de Mesquita Filho", Brasil

E-mail: leandro.f.pinto@unesp.br

Renivaldo José dos Santos

ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-0079-6876>

Universidade Estadual Paulista "Júlio de Mesquita Filho", Brasil

E-mail: renivaldo.santos@unesp.br

Resumo

A presente pesquisa teve como objetivo, avaliar o rendimento dos extratos do conteúdo lipídico obtidos a partir do grão de bico utilizando CO₂ supercrítico gerando uma curva cinética de extração, para avaliar os efeitos das variáveis do processo (pressão e temperatura), e comparar com o rendimento dos extratos utilizando o método convencional (extração com solvente orgânico). O grão de bico (*Cicer arietinum*) é uma leguminosa rica em material lipídico, sendo um alimento com excelente taxa nutricional de proteínas, rica em outras propriedades como ferro e antioxidantes, muito produzida no centro-oeste do Brasil e em outros países do mundo como a Índia, cultura bastante adaptada ao clima seco com baixa taxa de umidade relativa no ar, características muito comum de regiões tropicais, sua principal variedade de espécie produzida e consumida no Brasil é a Kabuli, dentre suas principais características físicas temos sua folhagem do tipo penada com folíolos ovais pequenos, flores pequenas com coloração branca ou arroxeadas, sua planta pode chegar a uma altura que varia de 30 a 60 cm, o grão de bico é rica em proteína vegetal, fibra e ferro, é utilizado como base alimentar principalmente em regiões como Ásia e mediterrâneo. A partir disso, foi realizado a extração de óleo do grão de bico por meio de dois métodos de extração, sendo eles o método convencional, no qual utiliza-se solventes orgânicos, e o método de extração supercrítica, no qual, utiliza-se fluidos supercríticos. Para o método convencional foi utilizado etanol como solvente orgânico, já para a extração supercrítica foi utilizado CO₂. Os resultados obtidos mostram que a extração com etanol teve um rendimento de aproximadamente 6,97% de óleo após um período de 8 horas. Em contraste, a extração com CO₂ supercrítico obteve rendimentos de 5,57% após um tempo de apenas 80 minutos. Embora a extração com etanol tenha produzido rendimentos ligeiramente maiores, o CO₂ supercrítico foi mais eficaz devido o processo de extração ser mais rápido. O CO₂ em estado supercrítico teve maior grau de eficiência pelo fator de ter atingido seu rendimento máximo em um período de tempo significativamente menor do que o método utilizando o etanol como solvente.

Palavra-chave: Grão de Bico; *Cicer arietinum*; Extração Supercrítica; CO₂; Pressão; Temperatura.

Abstract

The present research aimed to evaluate the yield of extracts of lipid content obtained from chickpeas using supercritical CO₂ generating an extraction kinetic curve, to evaluate the effects of process variables (pressure and temperature), and

compare with the yield of extracts using the conventional method (extraction with organic solvent). Chickpea (*Cicer arietinum*) is a legume rich in lipid material, being a food with an excellent nutritional rate of proteins, rich in other properties such as iron and antioxidants, widely produced in the center-west of Brazil and in other countries of the world such as India, a crop well adapted to the dry climate with low relative humidity rate in the air, very common characteristics of tropical regions, its main variety of species produced and consumed in Brazil is the Kabuli, among its main physical characteristics we have its feathery foliage with small oval leaflets, small flowers with white or purplish coloration, its plant can reach a height that varies from 30 to 60 cm, the chickpea is rich in vegetable protein, fiber and iron, it is used as a food base mainly in regions such as Asia and the Mediterranean. From this, the chickpea oil was extracted using two extraction methods, namely the conventional method, in which organic solvents are used, and the supercritical extraction method, in which supercritical fluids are used. For the conventional method, ethanol was used as the organic solvent, while for the supercritical extraction CO_2 was used. The results obtained show that the extraction with ethanol had a yield of approximately 6.97% of oil after a period of 8 hours. In contrast, the extraction with supercritical CO_2 obtained yields of 5.57% after a time of only 80 minutes. Although the extraction with ethanol produced slightly higher yields, supercritical CO_2 was more effective because the extraction process was faster. The CO_2 in a supercritical state had a higher degree of efficiency because it reached its maximum yield in a significantly shorter period of time than the method using ethanol as a solvent.

Keyword: Chickpea; *Cicer arietinum*; Supercritical Extraction; CO_2 ; Pressure; Temperature.

Resumen

La presente investigación tuvo como objetivo evaluar el rendimiento de extractos lipídicos obtenidos de garbanzos mediante CO_2 supercrítico, generando una curva cinética de extracción para evaluar los efectos de las variables de proceso (presión y temperatura) y compararla con el rendimiento de extractos mediante el método convencional (extracción con solvente orgánico). El garbanzo (*Cicer arietinum*) es una leguminosa rica en lípidos, un alimento con un excelente aporte proteico, rico en hierro y antioxidantes. Se cultiva ampliamente en el centro-oeste de Brasil y en países como la India. Es un cultivo adaptado a climas secos con baja humedad relativa, características propias de las regiones tropicales. Su principal variedad, producida y consumida en Brasil, es el garbanzo. Entre sus principales características físicas se encuentran su follaje plumoso con pequeños folíolos ovalados, flores pequeñas de color blanco o violáceo. Su planta puede alcanzar una altura de 30 a 60 cm. Es rico en proteína vegetal, fibra y hierro, y se utiliza como base alimentaria principalmente en regiones como Asia y el Mediterráneo. El aceite de garbanzo se extrajo mediante dos métodos: el convencional, con disolventes orgánicos, y el supercrítico, con fluidos supercríticos. Para el método convencional, se utilizó etanol como disolvente orgánico, mientras que para la extracción supercrítica, se utilizó CO_2 . Los resultados obtenidos muestran que la extracción con etanol tuvo un rendimiento de aproximadamente el 6,97% de aceite después de un período de 8 horas. En contraste, la extracción con CO_2 supercrítico obtuvo rendimientos del 5,57 % después de un tiempo de tan solo 80 minutos. Si bien la extracción con etanol produjo rendimientos ligeramente superiores, el CO_2 supercrítico fue más efectivo debido a que el proceso de extracción fue más rápido. El CO_2 en estado supercrítico presentó un mayor grado de eficiencia debido a que alcanzó su rendimiento máximo en un período de tiempo significativamente menor que el método que utiliza etanol como disolvente.

Palabras clave: Garbanzo; *Cicer arietinum*; Extracción Supercrítica; CO_2 ; Presión; Temperatura.

1. Introdução

Inúmeros produtos comestíveis são também fonte de recursos que podem ser utilizados nas mais variadas áreas proporcionando novas finalidades para produtos e derivados de suas propriedades, como matéria-prima, Biofertilizantes, ração, suplementos, remédios, vestimentas, derivados de adubação, combustíveis, etc. O grão de bico (*Cicer arietinum*) é uma leguminosa e possui inúmeras propriedades que podem ser utilizadas como fitoestrógenos utilizados como auxiliadores para o tratamento da menopausa. O grão de bico é uma leguminosa muito consumida na Índia que é seu principal país produtor com 70% de toda produção global, seguido por Austrália, Turquia e Paquistão, no Brasil a leguminosa é pouco consumida, porém vem tendo um crescente aumento nas regiões do centro-oeste como Goiás, Distrito Federal, Mato Grosso, e no sudeste em estados como São Paulo e Minas Gerais, é uma cultura muito adaptada para o clima seco a temperaturas ambientes que variam de 20°C e 30°C podendo tolerar temperaturas mais elevadas, bastante adaptada a regiões tropicais e semiáridas com baixa umidade relativa do ar em sua fase de maturação, na Índia é muito cultivada pelo sistema de sequeiro, já no Brasil vem sendo implementada como cultura de segunda safra tendo seu plantio após a colheita da soja, é utilizada em rotações de culturas por ser caracterizada com alto teor de fixação de nitrogênio no solo tendo suas principais variedades de espécies a Desi e Kabuli, sendo a Kabuli variedade que é a mais consumida no Brasil para fins alimentícios, possui como uma de suas principais características físicas

seu sistema radicular, folhagem do tipo penada com folíolos ovais pequenos, flores pequenas com coloração branca ou arroxeadas, chegando a uma altura que varia de 30 a 60 cm, seus frutos são vagens que possuem de 1 a 3 sementes, seus grãos são arredondados, dependendo do tipo da espécie possui uma superfície mais lisa ou porosa, tendo coloração mais para o bege, o grão de bico é rica em proteína vegetal, fibra e ferro, é utilizado como base alimentar principalmente em regiões como Ásia e mediterrâneo (Memariani et al., 2019; Patil et al., 2017; Artiaga et al., 2015).

O grão de bico também é rico em bioativos, é rico em vitaminas do complexo B e fitoesteróis que diminuem os riscos de doenças como AVC, hipertensão, infarto agudo do miocárdio, pode atuar como anti-inflamatório, diminui dores nas articulações (Abbasifard & Zareshahi, 2020; Gonçalves Neto & Ramos, 2023; Li et al., 2021).

A extração das gorduras encontradas no grão de bico podem ser realizadas de diferentes formas, o processo de extração tem por objetivo separar o material lipídico encontrado na oleaginosa da amostra, As técnicas mais utilizadas na indústria alimentícia é por prensagem, extração com solventes e o método de extração por fluido supercrítico, os solventes orgânicos precisam possuir algumas características para possuir maior grau de eficiência na extração como o hexano por ser um composto orgânico e apolar tem facilidade em dissolver os lipídeos encontrados na parede celular da oleaginosa além de ter uma baixa densidade, outros solventes orgânicos como o metanol também podem ser empregados no processo, porém possuem menor grau de eficiência (Brunner, 2005; Cannavacciuolo et al., 2022; Geow et al., 2021).

Uma alternativa para extrair o material lipídico seria através da extração com fluidos supercríticos. O fluido supercrítico é uma substância que está acima de seus parâmetros críticos de pressão e temperatura, e apresenta determinadas particularidades de gás e líquido. Desta forma os fluidos supercríticos apresentam uma maior difusividade e menor viscosidade, se comparado a alguns solventes orgânicos. (Ameer et al., 2017; Gallego et al., 2019; Zhou et al., 2021).

Para escolher uma substância que vai ser empregada como um fluido supercrítico deve-se ser levado em conta seus parâmetros críticos. Um dos fluidos supercríticos mais utilizados na indústria de alimentos é o CO₂, pois o CO₂ apresenta algumas vantagens em relação a outros fluídos, condições de pressão e temperatura crítica relativamente baixos (72,01 bar e 31,1 °C) (Zhou et al., 2021), não toxicidade, barato e sua fácil separação do óleo extraído (da Silva et al., 2016; Pereira & Meireles, 2010).

O presente trabalho teve como objetivo, avaliar o rendimento dos extratos do material lipídico obtidos a partir do grão de bico utilizando CO₂ supercrítico gerando uma curva cinética de extração, para avaliar os efeitos das variáveis do processo (pressão e temperatura), e comparar com o rendimento dos extratos utilizando o método convencional (extração com solvente orgânico).

2. Metodologia

Realizou-se uma pesquisa mista experimental, num estudo laboratorial e de natureza quantitativa (Gil, 2017; Pereira et al., 2018) com emprego de análise estatística (Vieira, 2021; Bekman & Costa Neto, 2009).

2.1 Preparação

Os grãos da oleaginosa (*Cicer arietinum*) foram adquiridas no distrito de Primavera pertencente ao município de Rosana, localizado no estado de São Paulo, Brasil (22° 32' 14.7" S, 52° 56' 52.9" W). A amostra foi levada até a estufa de circulação de ar por 70 h a uma temperatura aproximada de 55 °C para secagem. Após a secagem a amostra foi triturada para se obter uma granulometria próxima de 15 TY. O CO₂ foi adquirido da Air Liquid S.A (Brasil).

2.2 Extração com Soxhlet

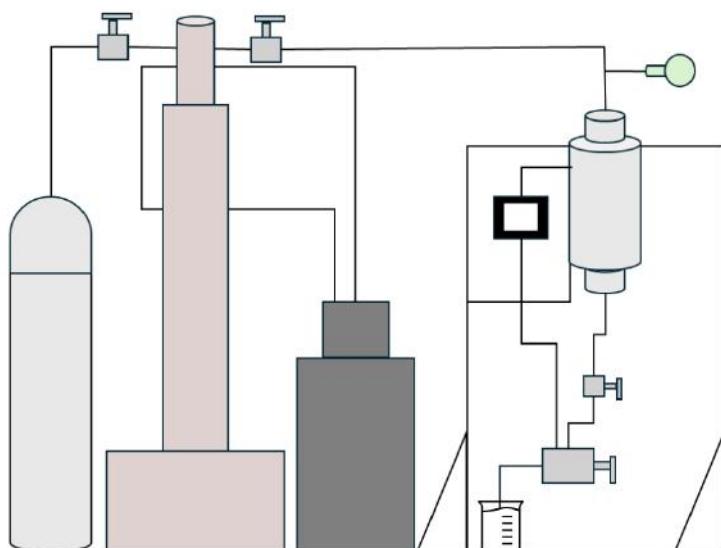
O solvente utilizado foi o etanol, a massa da amostra utilizada foi 0,5 g de semente triturada do grão de bico, a semente da oleaginosa foi inserida em um papel do tipo filtro que posteriormente foi colocado no extrator. posteriormente o sistema foi

instalado onde foi encaixado o frasco do tipo soxhlet no extrator, no frasco do tipo soxhlet foi adicionado o volume de 300 ml do solvente etanol, o tempo de duração do experimento foi de 8 horas, com repetidos ciclos de refluxo e sifonagem do etanol que garante uma extração com maior grau de eficiente, posteriormente após as 8 horas de duração do experimento o extrato foi levado para a estufa, a temperatura de operação da mesma foi de 50 °C. Os experimentos foram realizados em duplicata.

2.3 Extração com CO₂ supercrítico

Os parâmetros de configuração utilizados no experimento como temperatura, pressão e vazão foram previamente determinados com base em estudos preliminares já relatados na literatura (Garcia et al., 2012; Gonçalves et al., 2013; Lemos et al., 2012; Lopes et al., 2022; Menezes Rodrigues et al., 2017; Silva et al., 2016). Na extração de bancada onde foram realizados os testes experimentais temos um cilindro de CO₂, um banho termostatizado, uma bomba seringa (ISCO 260D, EUA), um recipiente de extração revestido de camisa térmica feito de aço 304 (com diâmetro de 1,90 cm e altura de 16,8 cm) e um transdutor de pressão absoluta (Smar LD 301, Brasil), conforme é apresentado na Figura 1.

Figura 1 - Bancada experimental de extração supercrítica.



Fonte: Autoria própria.

Para a execução do experimento afim de concluir a extração do material lipídico da matriz o extrator foi alimentado com 0,5 gramas de massa do grão de bico, e o interior do extrator foi completo com um conjunto de esferas de vidro (leito inerte). Consequentemente, o CO₂ fornecido ao dispositivo passou inicialmente através do leito inerte antes de alcançar a matriz. Após atingir a temperatura ideal para começar a extração, foram pressurizados a bomba e o extrator. Para assegurar que no início do processo de extração o sistema já estivesse em equilíbrio foi estabelecido um repouso de 30 minutos, tempo suficiente para assegurar a saturação do solvente (Lopes et al., 2022).

Os experimentos foram conduzidos com valores de pressões a 200, 240 e 280 bar e temperaturas de 40 °C, 50 °C e 60 °C, com uma vazão de CO₂ de 2,0 mL.min⁻¹, utilizando um planejamento fatorial 2², incluindo triplicata no ponto central (conforme Tabela 1). Para não ocorrer variações no fluxo de solvente foi utilizado uma válvula como controlador do tipo micrométrica para controle de saída do solvente (Parker Autoclave Engineers, EUA) mantida a 90 °C, pois como o sistema de extração utilizado libera o CO₂ no ambiente poderia ocorrer o congelamento da válvula. O resíduo final da matriz oleaginosa

proveniente do grão de bico foi reservado em recipientes de vidro, os frascos foram pesados em seis ciclos iniciais de 5 minutos, seguidos por cinco ciclos de 10 minutos, totalizando 80 minutos de experimento (Lopes et al., 2022).

Tabela 1 - Planejamento fatorial 2².

| Fatores | Símbolos | Unidades | Níveis | | |
|-------------|----------|----------|--------|-----|-----|
| | | | -1 | 0 | +1 |
| Temperatura | T | °C | 40 | 50 | 60 |
| Pressão | P | bar | 200 | 240 | 280 |

Fonte: Autoria própria.

2.4 Analise estatística

Para o apuramento dos resultados experimentais, os dados de rendimento foram submetidos a análises estatísticas utilizando um planejamento fatorial 2², conforme é detalhado na Tabela 3. As análises foram conduzidas com o auxílio do software Design Expert versão 12, o qual permitiu identificar os principais fatores que influenciaram significativamente o rendimento da extração lipídica do grão de bico por meio de dióxido de carbono supercrítico.

Por meio da análise de variância (ANOVA), foi possível determinar a significância dos resultados dos experimentos e estabelecer uma equação a partir disso é possível verificar a significância estatística dos efeitos individuais e combinados dos fatores temperatura (T) e pressão (P), além de estimar o grau de ajuste do modelo. Conforme apresentado na Tabela 4.

3. Resultados e Discussões

3.1 Extração com solvente orgânico (etanol)

A Tabela 2 apresenta a comparação entre os métodos de extração utilizando etanol (solvente orgânico) e CO₂ supercrítico. O método com etanol apresentou um rendimento de 6,97%, enquanto o CO₂ supercrítico obteve um rendimento inferior, de 5,57%. Apesar do CO₂ supercrítico apresentar menor rendimento, o processo com CO₂ supercrítico foi mais rápido, com duração de 80 minutos, o método de extração por solvente orgânico utilizando o etanol teve duração de 420 minutos. Esses dados indicam que, embora o solvente orgânico tenha extraído uma quantidade de volume maior do material lipídico do grão de bico, o uso de CO₂ supercrítico se destaca pela eficiência no fator tempo de extração, tornando-se uma alternativa atrativa quando o tempo de extração é um dos fatores consideráveis.

Tabela 2 - Comparação experimental do rendimento de extração para a extração de óleo do grão de bico utilizando o método de solvente orgânico e CO₂ supercrítico.

| Solvente | Tempo (min) | Rendimento (%) |
|-----------------|-------------|----------------|
| Etanol | 420 | 6,97 |
| CO ₂ | 80 | 5,57 |

Fonte: Autoria própria.

A partir dos resultados apresentados na Tabela 2 nota-se que não há diferença significativa no rendimento final entre os métodos de extração, porém, a utilização de etanol apresentou um rendimento superior em relação ao CO₂ supercrítico. A partir da Tabela 2 nota-se que mesmo existindo uma pequena diferença no rendimento dos extratos obtidos, o CO₂ supercrítico se mostrou mais eficaz, pois, foram necessários apenas 80 minutos para se extrair quase que a mesma quantidade de material lipídico obtido a partir da utilização de etanol. Não é constatado diferenças significativas entre os resultados dos rendimentos finais dos dois métodos de extração exibidos na Tabela 2, no entanto o rendimento final do etanol é superior em relação ao CO₂

supercrítico, nota-se que o experimento com CO₂ se mostrou mais eficaz do que o método com etanol pois foi necessários apenas 80 minutos para realizar a extração do óleo. Essa diferença de tempo pode ser atribuída às propriedades únicas do CO₂ em condições supercríticas, que promovem uma taxa elevada de transferência de massa. Fatores como a baixa viscosidade, reduzida da tensão superficial e a alta difusividade do fluido supercrítico contribuem significativamente para a sua eficiência no processo de extração. Essas características favorecem a penetração do solvente na matriz sólida e o transporte do soluto, resultando em uma extração rápida e com grau de eficiência maior. mesmo com um rendimento inferior, o processo com CO₂ supercrítico se apresenta como uma alternativa viável e vantajosa, especialmente em aplicações onde a redução do tempo de processamento é um fator crítico.

3.2 Extração supercrítica (CO₂)

Na Tabela 3 é possível observar os percentuais dos rendimentos obtidos na extração supercrítica do material lipídico do grão de bico empregando o CO₂ supercrítico, o experimento foi realizado em um intervalo de tempo de 80 minutos, foram também utilizadas diferentes configurações para pressão e temperatura, os rendimentos obtidos variaram entre 4,70% e 5,57%.

Tabela 3 - Condições experimentais e resultados de rendimento de extração para a extração de óleo do grão de bico utilizando CO₂ supercrítico.

| Experimento | Temperatura (°C) | Pressão (bar) | Rendimento (%) |
|-------------|---------------------|------------------|-------------------|
| 1 | 40 | 280 | 5,12 |
| 2 | 60 | 280 | 5,57 |
| 3 | 40 | 200 | 5,56 |
| 4 | 60 | 200 | 4,70 |
| 5 | 50 | 240 | 5,30 |
| 6 | 50 | 240 | 5,03 |
| 7 | 50 | 240 | 5,19 |

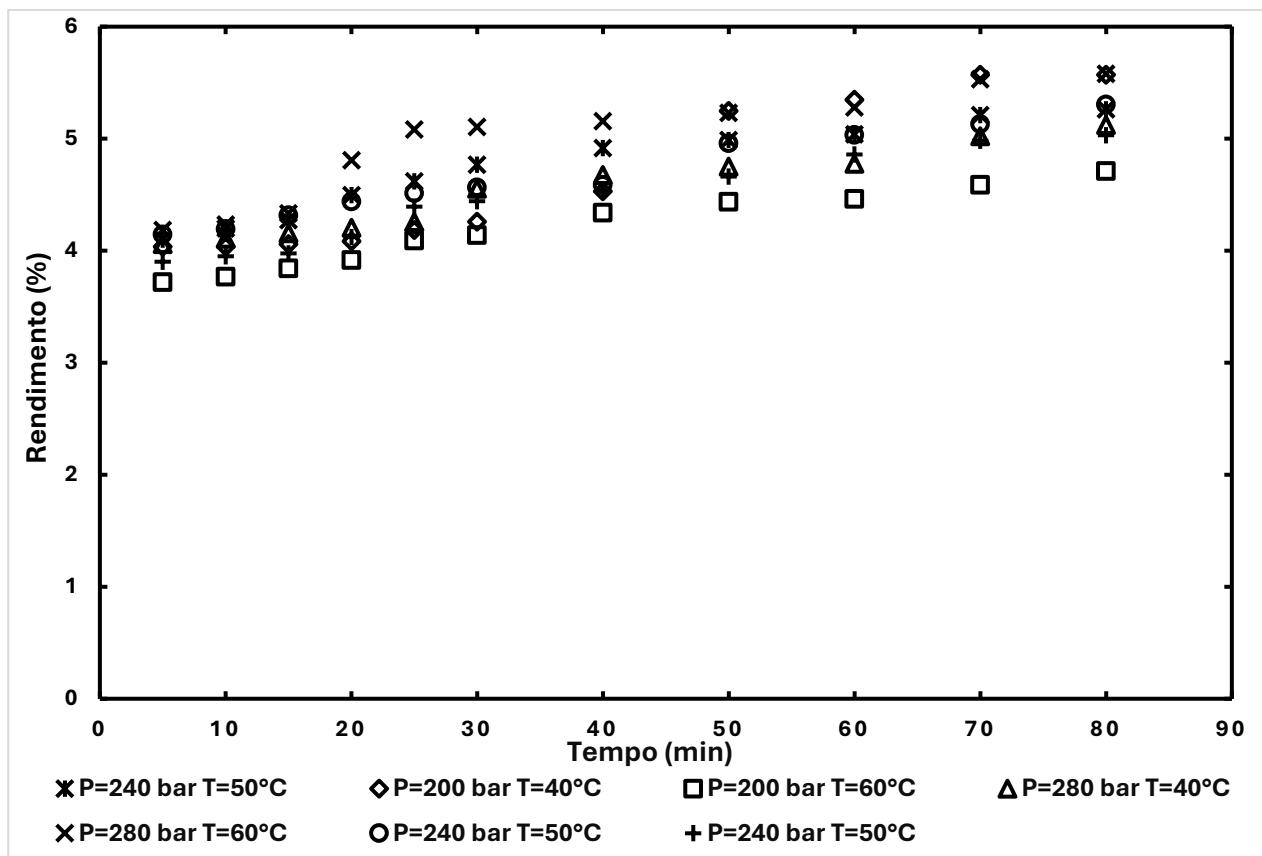
Fonte: Autoria própria.

Na Tabela 3 é observado os rendimentos dos 7 experimentos realizados com o fluido CO₂ em condições supercríticas, os resultados apresentados não possuem variações significativas, constatando-se que o CO₂ em condições supercríticas manteve o mesmo efeito de solvatação para todos as configurações estabelecidas na extração do material lipídico do grão de bico, constata-se que o experimento 2 com apresentou o maior rendimento, o que apresentou a menor taxa de rendimento foi o experimento 4.

Na Figura 2 é possível observar a apresentação da cinética resultante do processo de extração do conteúdo lipídico da matriz oleaginosa, observa-se que apenas o experimento 2 teve maior parte do rendimento do material lipídico extraído nos primeiros 20 minutos do experimento, para os demais experimentos ocorreu o aumento do rendimento dos extratos só depois dos 50 minutos de experimento.

A diminuição do rendimento das extrações ocorre devido ao fato de que as extrações supercríticas, acontecem em dois estágios de transferência de massa e três fases distintas de extração. A taxa de extração posterior a isso reduz, em seguida o conteúdo lipídico extraído é de acesso mais difícil, o parâmetro que mais influência nessa extração é o mecanismo de difusão interna, já na terceira fase percebe-se que a curva de extração quase se conserva linear, a taxa de extração é menor se comparada com a taxa da primeira fase.

Figura 2 - Curvas cinéticas experimentais e modeladas para as extrações de óleo da semente do grão de bico por CO₂ supercrítico.

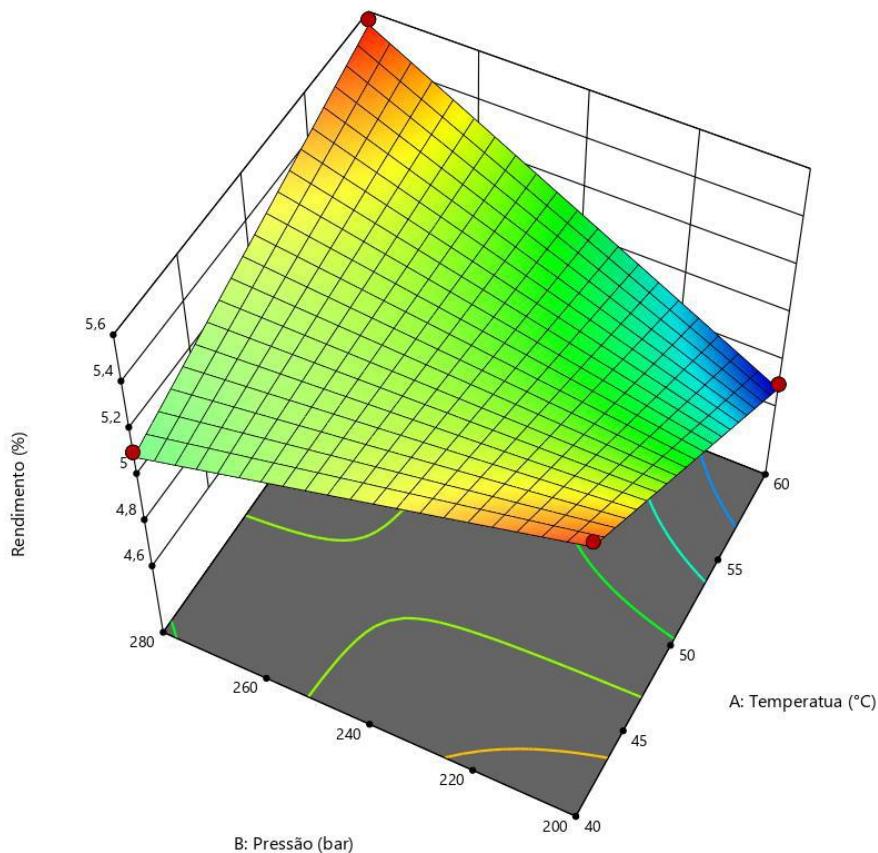


Fonte: Autoria própria.

Não foi possível obter todo material lipídico presente na amostra, observa-se que as extrações do óleo de grão de bico não atingiram o platô máximo, porém os resultados encontrados são satisfatórios devido a inclinação dos gráficos estarem menores na fase final do experimento, os valores dos resultados obtidos foram satisfatórios, pois a obtenção total do material lipídico estava próxima de ser concluído. O experimento 2 (pressão de 280 bar e temperatura de 60°C) inicialmente foi o experimento que obteve a maior taxa de extração em um pequeno intervalo de tempo, pois em 25 minutos de extração foi possível obter aproximadamente 5 % do extrato.

O gráfico de superfície de resposta do rendimento na Figura 3 apresenta justamente parâmetros como pressão e temperatura e sua respectiva influencia no rendimento de extração.

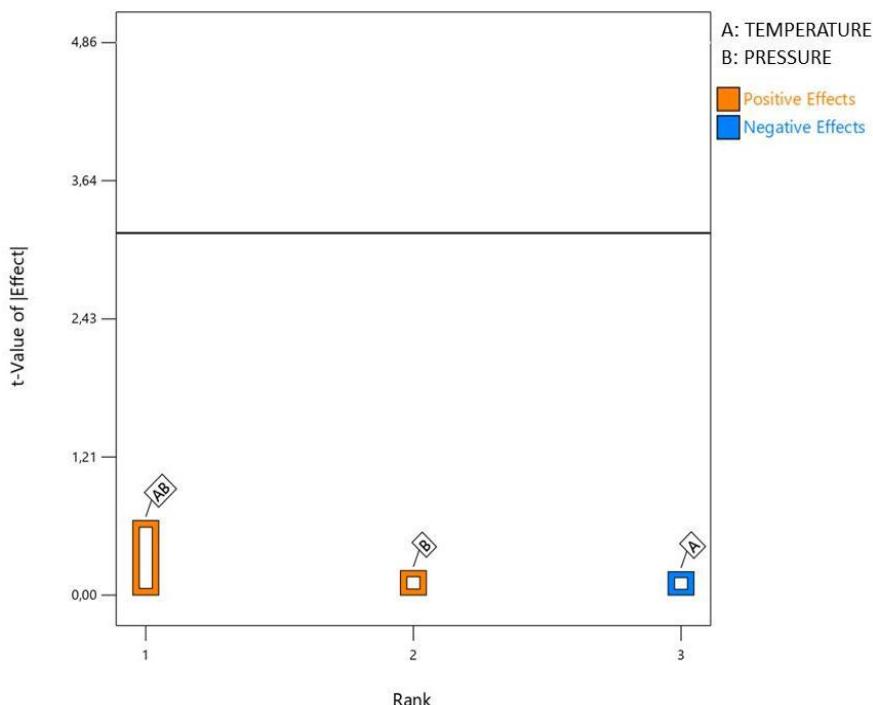
Figura 3 - Gráfico de superfície de resposta ao rendimento da extração de óleo do grão de bico em função dos níveis de temperatura e pressão com vazão constante de 2,0 mL.min⁻¹.



Fonte: Autoria própria.

Na Figura 3 nota-se o gráfico de superfície de resposta, onde observa-se parâmetros como pressão e temperatura que influencia significativamente os rendimentos obtidos provenientes da extração do material lipídico que provem do grão de bico, o comportamento ocorre de maneira distinta entre as regiões extremas apresentadas no gráfico, como os parâmetros não atuam de maneira separada não é possível afirmar que a pressão ou a temperatura possui fator maior de influência sobre o rendimento analisado, como a diferença dos rendimentos é mínima para cada experimento podemos compreender dessa forma esse tipo de comportamento. Na Figura 4 é possível identificar que a pressão que é uma das variáveis analisadas que mais influencia positivamente os rendimentos de extração já a temperatura influência de maneira negativa, no entanto quando observado a influência gerada na forma de interação dos parâmetros pressão e temperatura é possível notar efeitos positivos e um grau de importância maior no rendimento observado.

Figura 4 - Gráfico de Pareto: Estimativa dos efeitos lineares das variáveis.



Fonte: Autoria própria.

Ao analisar as estimativas dos efeitos lineares das variáveis através do Gráfico de Pareto constata-se que a variação dos valores de temperatura e a pressão não apresentaram efeitos significativos no rendimento das extrações.

O Gráfico de Pareto apresentou uma linearidade observado na Tabela 4, onde foi gerado uma equação (Equação 1), afim de determinar a predição dos rendimentos de extratos de óleo do grão de bico dentro do intervalo de pressão e temperatura citados na Tabela 1 (200 a 280 bar e 40 a 60 °C). Utilizando a Equação 2 é possível realizar uma predição dos rendimentos de extrato de óleo substituindo os valores de T e P, onde T representa a temperatura e P representa a pressão. Os resultados do rendimento obtido a partir da Equação 2 são dados em porcentagem.

$$\text{Rendimento} = 5,22 - 0,1025 \cdot T + 0,1075 \cdot P + 0,3275 \cdot T \cdot P \quad (1)$$

O modelo estatístico utilizado (Tabela 4) apresentou os valores de P abaixo dos 5% de tolerância, e apresentou um valor de R² de 0,9926, ou seja, os dados obtidos através dos experimentos realizados possuem 99,26% de precisão.

Tabela 4 - Dados de análise de variância para os extratos obtidos utilizando planejamento fatorial 2² para extrações com dióxido de carbono do grão de bico.

| Termos | Soma dos quadrados | Graus de liberdade | Quadrados médios | F-valor | p-valor | R ² |
|-------------------------|--------------------|--------------------|------------------|---------|---------|----------------|
| Semente da Grão de Bico | | | | | | |
| Modelo | 0,5173 | 3 | 0,1724 | 133,74 | 0,0011 | |
| T | 0,0420 | 1 | 0,0420 | 32,60 | 0,0107 | |
| P | 0,0462 | 1 | 0,0462 | 35,85 | 0,0093 | |
| T.P | 0,4290 | 1 | 0,4290 | 332,76 | 0,0004 | 0,9926 |
| Erro Puro | 0,00 | 2 | 0,00 | | | |
| Cor Total | 0,5211 | 6 | | | | |

T = Temperatura; P = Pressão.

Fonte: Autoria própria.

Na Tabela 4 é possível observar que o modelo estatístico foi significativo ($p = 0,001$), também possui coeficiente de determinação (R^2) de 0,9926, esse dado indica uma boa capacidade preditiva dos dados recolhidos, é possível constatar que os fatores combinados temperatura e pressão foram extremamente relevantes para o rendimento da extração ($p = 0,0004$), superior aos efeitos individuais de temperatura ($p = 0,00107$) e pressão ($p = 0,0093$), esses dados indicam que essas variáveis em conjunto geram maior rendimento na extração supercrítica do óleo de grão de bico.

4 Conclusão

Os resultados obtidos nesta pesquisa demonstram que, embora o uso do etanol como solvente orgânico tenha proporcionado um rendimento de 6,97% em um período de tempo de 420 minutos na extração do óleo de grão-de-bico, a extração utilizando CO_2 supercrítico se destacou pela sua eficiência operacional, atingindo um rendimento cuja variação de 5 a 5,56% em 80 minutos, o curto tempo necessário para alcançar rendimentos próximos aos do método convencional evidencia o potencial da tecnologia supercrítica, especialmente em contextos onde a agilidade do processo é um fator determinante. Significativa parte do material lipídico obtido foram coletados nos primeiros 50 minutos de ensaio. A análise estatística revelou que os parâmetros de temperatura e pressão influenciam significativamente o rendimento da extração com CO_2 , sendo a interação entre esses fatores a mais relevante. Isso reforça a importância do controle preciso das variáveis operacionais para otimizar o processo. Dessa forma, conclui-se que a extração com CO_2 supercrítico, apesar de não atingir os mesmos percentuais de rendimento do etanol, representa uma alternativa viável, eficiente e com vantagens associadas à sustentabilidade e à velocidade de extração.

Referências

- Abbasifard, M. & Zareshahi, R. (2020). Effect of topical chickpea oil (*Cicer arietinum* L.) on knee osteoarthritis: A randomized double-blind controlled clinical trial. *Eur J Integr Med.* 35 (2020). <https://doi.org/10.1016/j.eujim.2020.101076>.
- Ameer, K., Shahbaz, H. M. & Kwon, J. H. (2017). Green Extraction Methods for Polyphenols from Plant Matrices and Their Byproducts: A Review, *Compr Rev Food Sci Food Saf.* 16, 295–315. <https://doi.org/10.1111/1541-4337.12253>.
- Artiaga, O. P. et al. (2015). Avaliação de genótipos de grão de bico em cultivo de sequeiro nas condições de Cerrado. *Revista Brasileira de ciências agrarias.* 10 (1), 102-09.
- Bekman, O. R. & Costa Neto, P. L. O. (2009). Análise estatística da decisão. (2ed). Ed. Edgar Blucher.
- Brunner, G. (2005). Supercritical fluids: Technology and application to food processing. *J Food Eng.* 67, 21–33. <https://doi.org/10.1016/j.jfoodeng.2004.05.060>.
- Cannavacciuolo, C., Pagliari, S., Frigerio, J., Giustra, C. M., Labra, M., & Campone, L. (2022). Natural deep eutectic solvents (NADESs) combined with sustainable extraction techniques: A review of the green chemistry approach in food analysis. *Foods.* 12 (1), 56. <https://doi.org/10.3390/foods12010056>.
- Gallego, R., Bueno, M. & Herrero, M. (2019). Sub-and supercritical fluid extraction of bioactive compounds from plants, food-by-2 products, seaweeds and microalgae-an update. *TrAC Trends in Analytical Chemistry.* 116, 198–213. <https://doi.org/10.1016/j.trac.2019.04.030>.
- Garcia, V. A. S., Cabral, V. F., Zanoelo, E. F., Silva, C. & Filho, L. C. (2012). Extraction of Mucuna seed oil using supercritical carbon dioxide to increase the concentration of l-Dopa in the defatted meal, *J Supercrit Fluids.* 69, 75–81. <https://doi.org/10.1016/j.supflu.2012.05.007>.
- Geow, C. H., Tan, M. C., Yeap, S. P., & Chin, N. L. (2021). A review on extraction techniques and its future applications in industry. *European Journal of Lipid Science and Technology.* 123 (3), 2000302. <https://doi.org/10.1002/ejlt.202000302>.
- Gil, A. C. (2017). Como elaborar projetos de pesquisa. (6ed). Atlas.
- Gonçalves Neto, J. D. & Ramos, I. S. S. (2023). Avaliação das propriedades físico-químicas e funcionais da aquafaba de grão-de-bico. 35 f. Monografia (Graduação em Ciência e Tecnologia de Alimentos) - Escola de Nutrição, Universidade Federal de Ouro Preto.
- Gonçalves, R., Lemos, C., Leal, I., Nakamura, C., Cortez, D., Silva, E., Cabral, V., & Cardozo-Filho, L. (2013). Comparing Conventional and Supercritical Extraction of (-)-Mammea A/BB and the Antioxidant Activity of *Calophyllum brasiliense* Extracts, *Molecules.* 18, 6215–29. <https://doi.org/10.3390/molecules18066215>.
- Lemos, C. O. T., Garcia, V. A. S., Gonçalves, R. M., Leal, I. C. R., Siqueira, V. L. D., Filho, L. C. & Cabral, V. F. (2012). Supercritical extraction of neolignans from *Piper regnelli* var. *pallescens*. *J Supercrit Fluids.* 71, 64–70. <https://doi.org/10.1016/j.supflu.2012.07.003>.
- Li, P.; Lu, B.; Gong, J.; Li, L.; Chen, G.; Zhang, J.; Chen, Y.; Tian, X.; Han, B.; Guo, Y.; Xie, Z.; & Liao, Q. (s.d.). Chickpea Extract Ameliorates Metabolic Syndrome Symptoms via Restoring Intestinal Ecology and Metabolic Profile in Type 2 Diabetic Rats. *Mol Nutr Food Res.* 65. <https://doi.org/10.1002/mnfr.202100007>.
- Lopes, G. S., Araujo, P. C. C., Silva, M. J., Paim, L. L., Oliveira, K. R., Valarini Jr, O., Favareto, R., Parizi, M. P. S. & Ferreira-Pinto, L. (2022). Kinetic study of peanut seed oil extraction with supercritical CO_2 . *Research, Society and Development.* 11, e15511427098. <https://doi.org/10.33448/rsd-v11i4.27098>.

Memariani, Z., Gorji, N., Moeini, R. & Farzaei, M.Z. (2019). Traditional uses, in: Phytonutrients in Food: From Traditional to Rational Usage, Elsevier. pp. 23–66. <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-815354-3.00004-6>.

Menezes Rodrigues, G., Cardozo-Filho, L. & Silva, C. (2017). Pressurized liquid extraction of oil from soybean seeds. *Can J Chem Eng.* 95, 2383–9. <https://doi.org/10.1002/cjce.22922>.

Patil, S. B., Goyal, A., Chitgupekar, S. S., Kumar, S. & El-Bouhssini, M. (2017). Sustainable management of chickpea pod borer. A review. *Agron Sustain Dev.* 37. <https://doi.org/10.1007/s13593-017-0428-8>.

Pereira, C. G. & Meireles, M. A. A. (2010). Supercritical fluid extraction of bioactive compounds: Fundamentals, applications and economic perspectives. *Food Bioproc Tech.* 3, 340–72. <https://doi.org/10.1007/s11947-009-0263-2>.

Pereira A. S. et al. (2018). Metodologia da pesquisa científica. [free e-book]. Editora daUAB/NTE/UFSM.

Silva, M. O., Camacho, F.P., Ferreira-Pinto, L., Giufrida, W. M., Vieira, A. M. S., Visentaine, J. V., Vedoy, D. R. L., & Cardozo-Filho, L. (2016). Extraction and phase behaviour of Moringa oleifera seed oil using compressed propane. *Can J Chem Eng.* 94, 2195–201. <https://doi.org/10.1002/cjce.22614>.

Silva, R. P. F. F., Rocha-Santos, T. A. P. & Duarte, A. C. (2016). Supercritical fluid extraction of bioactive compounds. *TrAC - Trends in Analytical Chemistry.* 76, 40–51. <https://doi.org/10.1016/j.trac.2015.11.013>.

Vieira, S. (2021). Introdução à bioestatística. Editora GEN/Guanabara Koogan.

Zhou, J., Gullón, B., Wang, M., Gullón, P., Lorenzo, J. M. & Barba, F. J. (2021). The application of supercritical fluids technology to recover healthy valuable compounds from marine and agricultural food processing by-products: A review, *Processes.* 9, 1–23. <https://doi.org/10.3390/pr9020357>.