



ConBREpro

XV CONGRESSO BRASILEIRO DE ENGENHARIA DE PRODUÇÃO

03 a 05 de dezembro de 2025

As Engenharias na Transformação Digital das PMEs

Simulações de balanço de massa aplicadas ao dimensionamento de tecnologias para produção de farelo de soja com qualidade mercadológica

Bruno Edward Meyer

Departamento Acadêmico de Engenharia Química - Universidade Tecnológica Federal do Paraná, campus Ponta grossa

Resumo: A soja é uma das principais culturas agrícolas do mundo e sua industrialização representa um elo estratégico para a cadeia agroindustrial, com destaque para a produção de óleo vegetal e farelo proteico. No Brasil, observa-se uma crescente redução no teor de proteína dos grãos, o que impacta diretamente a qualidade do farelo e desafia as indústrias a atenderem exigências de mercado, que demandam farelos com elevado teor proteico. Diante desse cenário, torna-se necessário compreender como o processamento industrial pode ser ajustado para mitigar os efeitos dessa queda. Este artigo tem como objetivo aplicar simulações de balanço de massa para avaliar a influência do descascamento e da secagem na obtenção de farelo com teor proteico adequado. Trata-se de um estudo qualitativo, exploratório e experimental, baseado em parâmetros técnicos industriais típicos. Foram simulados dois cenários: para atingir 46% de proteína no farelo, é necessário remover 47% das cascas presentes no grão; já para alcançar 48%, exige-se a remoção de 85% das cascas e redução da umidade do farelo para 11,5%. Os resultados evidenciam que o correto dimensionamento das tecnologias de descascamento e secagem é determinante para garantir a qualidade final do produto. O estudo reforça a utilidade do balanço de massa como ferramenta estratégica para dimensionamento adequado das tecnologias e tomada de decisão industrial.

Palavras-chave: Soja, Farelo, Proteína, Balanço de massa, Processamento industrial.

Mass balance simulations applied to the sizing of technologies for the production of soybean meal with market-grade quality

Abstract: Soybean is one of the main agricultural crops worldwide, and its industrial processing represents a strategic link in the agro-industrial chain, with emphasis on the production of vegetable oil and protein meal. In Brazil, there has been a growing reduction in the protein content of the grains, which directly impacts the quality of the meal and challenges industries to meet market demands for meals with high protein content. Given this scenario, it is necessary to understand how industrial processing can be adjusted to mitigate the effects of this decline. This article aims to apply mass balance simulations to evaluate the influence of dehulling and drying on obtaining meal with adequate protein content. This is a qualitative, exploratory, and experimental study based on typical industrial technical parameters. Two scenarios were simulated: to achieve 46% protein in the meal, it is necessary to remove 47% of the hulls present in the grain; to reach 48%, removal of 85% of the hulls and reduction of the meal moisture to 11.5% are required. The results show that proper sizing of dehulling and drying technologies is crucial to ensure the final product quality. The study reinforces the usefulness of mass balance as a strategic tool for the proper dimensioning of technologies and industrial decision-making.

Keywords: Soybean, Meal, Protein, Mass balance, Industrial Processing.

1. Introdução

A soja (*Glycine max* L.) é uma das principais *commodities* agrícolas do mundo e desempenha uma função estratégica na segurança alimentar global e na cadeia agroindustrial (EMBRAPA, 2022). Originária do leste asiático, a cultura expandiu-se globalmente nas últimas décadas, consolidando-se como uma das mais cultivadas, devido à sua elevada produtividade, versatilidade e alto valor nutricional (NEVES et al., 2010). Atualmente, os maiores produtores mundiais de soja são os Estados Unidos, o Brasil e a Argentina, responsáveis por mais de 80% da produção global (USDA, 2025). O Brasil, em particular, tem se destacado como líder em produtividade e exportação, sendo atualmente o maior exportador mundial da oleaginosa (CONAB, 2025).

Nesse contexto, o crescimento da produção brasileira de soja está intimamente ligado ao desenvolvimento da cadeia agroindustrial (NEVES et al., 2010). A industrialização da soja no Brasil concentra-se, principalmente, em dois produtos: o óleo e o farelo. A obtenção desses produtos concentra-se em um processo denominado preparação de sementes e extração contínua, que pode ocorrer por meio da prensagem mecânica ou solvente, e permite um aproveitamento quase integral do grão (ABIOVE, 2024). O óleo de soja é amplamente utilizado na alimentação humana, na produção de biocombustíveis e em aplicações industriais. Já o farelo animal, rico em proteínas, é um insumo essencial para a indústria de rações, especialmente para aves e suínos (BATALHA; SILVA, 2001). Essa verticalização produtiva tem impulsionado o setor agroindustrial brasileiro, agregando valor à *commodity* e contribuindo significativamente para a balança comercial do país (CONAB, 2025).

Contudo, nas últimas décadas, observou-se uma redução gradual nos teores médios de proteína dos grãos de soja produzidos no Brasil, o que tem impactado diretamente a qualidade do farelo obtido (NEVES et al., 2010; EMBRAPA, 2022). Fatores como a busca por maior produtividade agrícola, alterações genéticas e mudanças climáticas têm influenciado essa tendência de declínio proteico (ABIOVE, 2024). Como consequência, muitas indústrias têm enfrentado dificuldades para atender às exigências do mercado, que demanda farelos com teores mínimos de proteína entre 46% e 48% (ABIOVE, 2024).

Diante desse desafio, uma estratégia fundamental para mitigar os efeitos da redução da proteína da matéria-prima é o dimensionamento adequado da planta industrial de preparação e extração, visando a eficiência do processo e a padronização da qualidade do farelo final. Neste panorama, o balanço de massa torna-se uma ferramenta importante, pois permite visualizar com precisão o nível de processamento necessário para atingir os padrões de proteína exigidos, ao mesmo tempo que considera as características do material processado, as perdas e os rendimentos do processo (BATALHA; SILVA, 2001; NEVES et al., 2010).

Dentre os principais parâmetros de controle do processo industrial que impactam diretamente a qualidade proteica do farelo, destacam-se o teor de fibra e a umidade final do farelo. O excesso de fibra reduz a concentração relativa de proteína, pois atua como diluente na composição final, e a umidade influencia a estabilidade do produto, o teor de sólidos e a medição analítica da proteína (ABIOVE, 2024). Assim, o controle rigoroso desses dois parâmetros, aliado ao uso de ferramentas de engenharia como o balanço de massa, permite que a indústria utilize tecnologias que atendam às especificações técnicas exigidas pelos mercados nacional e internacional.

Assim, o objetivo deste trabalho consiste em aplicar simulações de balanço de massa para dimensionar tecnologias empregadas no processamento de indústrias de soja, que garantam a produção de farelo de soja com qualidade compatível com as exigências do

mercado. Este artigo apresenta um contexto do tema em questão, expõe brevemente a metodologia aplicada e apresenta uma revisão teórica sucinta; nas seções finais, os resultados obtidos são analisados e uma conclusão final.

Este artigo apresenta a contextualização do tema, descreve de forma concisa a metodologia empregada e realiza uma revisão teórica sucinta. Nas seções finais, os resultados obtidos são analisados com o intuito de subsidiar a conclusão acerca do assunto investigado.

2. Metodologia

O presente estudo adota as seguintes abordagens:

- Quanto à natureza do método: qualitativa, pois analisa e interpreta resultados obtidos a partir das simulações de balanço de massa.
- Quanto aos objetivos: exploratório, uma vez que visa investigar e compreender melhor a relevância do balanço de massa para o dimensionamento adequado de tecnologias.
- Quanto os procedimentos: experimental, pois manipulam-se variáveis e realiza-se simulações em determinados cenários de processo com o objetivo de avaliar os efeitos no resultado final.

3. Referencial Teórico

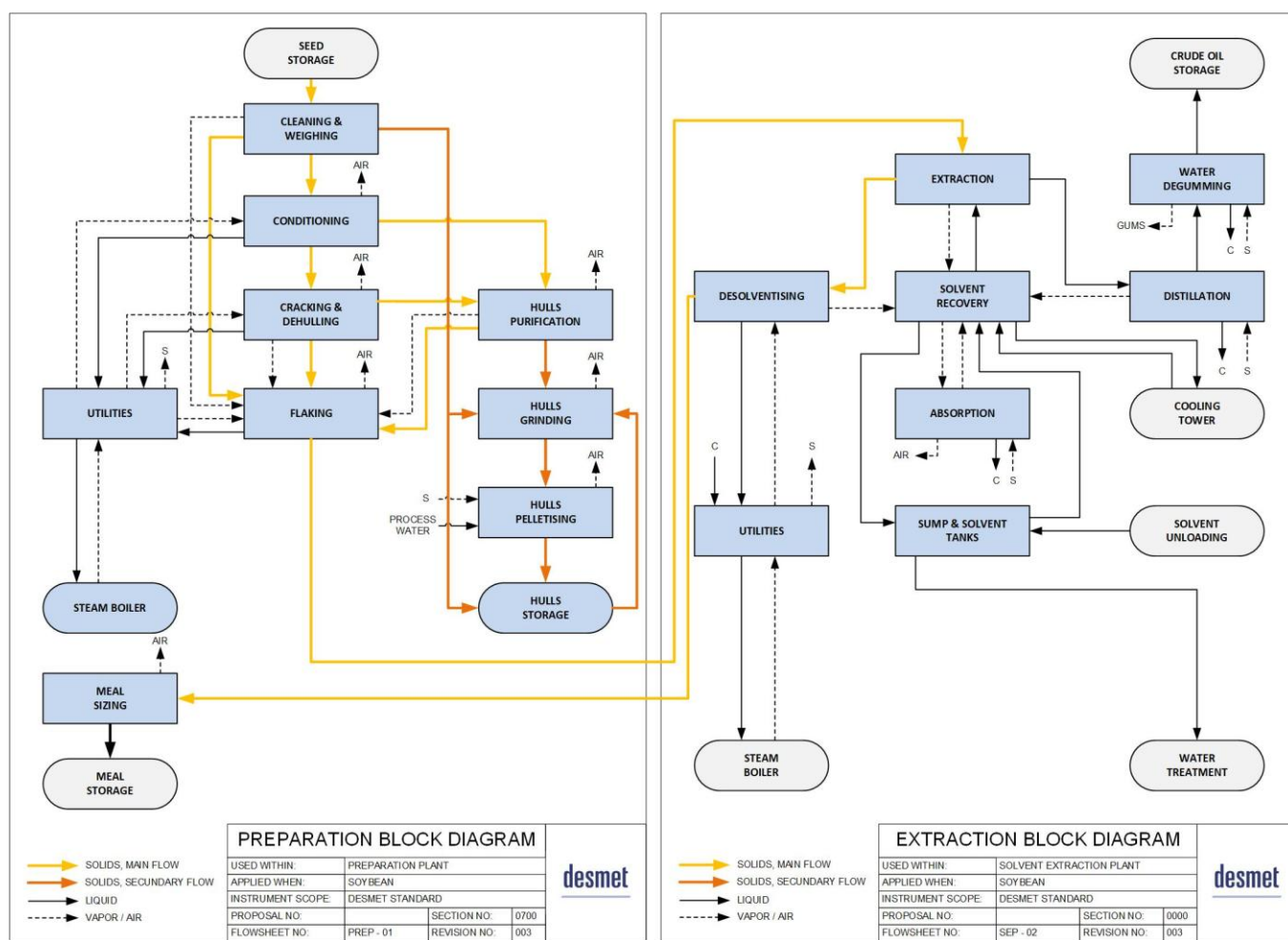
A industrialização da soja envolve uma sequência de operações que transformam o grão *in natura* em dois produtos de alto valor comercial: o óleo vegetal e o farelo proteico. Essa cadeia produtiva é altamente dependente da eficiência dos processos de preparação de sementes e extração contínua por solvente, cujos desempenhos impactam diretamente a qualidade final dos produtos e a viabilidade econômica da planta industrial (Demarco; Gibon, 2020; Desmet, 2023a).

Descrição Geral do Processo

A soja contém, em média, 18% a 20% de óleo e 38% a 42% de proteína bruta. O objetivo do processamento industrial é separar eficientemente essas frações, garantindo que o óleo seja extraído com a maior eficiência possível e que o farelo resultante atenda às exigências do mercado, especialmente no que se refere ao teor de proteína (46% a 48%) e umidade final (10% a 12%) (Desmet, 2023a; USDA, 2025).

A seguir, apresenta-se os diagramas de blocos e uma breve descrição do processo industrial da soja (adaptado de Demarco e Gibon (2020); Desmet (2023a, 2023b)):

Figura 1 – Diagrama de Blocos da Planta de Preparação de Sementes e da Planta de Extração Contínua por Solvente



Fonte: Cortesia de Desmet

Planta de Preparação de Sementes

a) Limpeza e Pesagem: Remoção de impurezas como palha, areia, metais e outros materiais estranhos, com o objetivo de proteger os equipamentos e garantir a qualidade do processo. Após a limpeza, realiza-se a pesagem do produto, controlando o fluxo de matéria-prima que entra na linha de produção (BERNARDO et al., 2003);

b) Condicionamento: Ajuste de temperatura e umidade dos grãos para facilitar a laminação e melhorar a difusão do solvente durante a extração (CAI; ZHANG; SHAO, 2011);

c) Quebramento e Descascamento (Processo “Morno”): Fragmentação dos grãos para facilitar o processamento subsequente. Nessa etapa, ocorre também a separação das cascas, que apresentam alto teor de fibra e baixo teor de proteína. Essa operação resulta em redução da vazão volumétrica do material para as etapas seguintes e melhoria da qualidade nutricional do farelo, com maior concentração de proteína bruta (BASTOS et al., 2010);

d) Laminação: Compressão dos grãos quebrados em lâminas finas (espessura entre 0,36 e 0,40 mm), aumentando a área de contato com o solvente e, consequentemente, otimizando a eficiência da extração do óleo (ERICKSON; SINGH, 2009);

e) Processamento das Cascas: Após o descascamento, as cascas separadas são tratadas para aproveitamento industrial. Elas são inicialmente purificadas por meio de peneiras, onde são eliminadas impurezas residuais e fragmentos indesejados. Após isso, elas são moídas para ajuste de tamanho de partícula, garantindo uma granulometria adequada à etapa seguinte. Por fim, o material moído é compactado em moinhos de peletização com

matrizes perfuradas, formando pellets padronizados, que se caracterizam por possuir maior densidade aparente e serem mais facilmente armazenados e transportados; os pellets podem ser usados ainda como insumo energético ou como fonte de fibra para ração animal (BERNARDO et al., 2003; ERICKSON; SINGH, 2009).

Planta de Extração Contínua por Solvente

a) Extração Contínua por Solvente (normalmente com n-hexano): as lâminas são colocadas em contato com o solvente em contracorrente, promovendo a dissolução do óleo. O produto líquido (miscela) é separado e o sólido úmido (farelo branco) segue para a dessolventização (CAI; ZHANG; SHAO, 2011).

Figura 2 – Extrator de camada profunda tipicamente utilizado no processo de extração por solvente



Fonte: <https://www.desmet.com/en/feed/solvent-extraction>

b) Dessolventização, Tostagem, Secagem e Resfriamento: No equipamento DTDC (Desolventizer-Toaster-Dryer-Cooler), o farelo branco passa pela remoção do solvente residual (n-hexano) via vapor indireto e direto, inativação de fatores antinutricionais, ajuste da umidade e temperatura, secagem e resfriamento final, preparando o farelo para armazenamento (ERICKSON; SINGH, 2009)..

Figura 3 – Dessolventizador Tostador tipicamente utilizado no processo de tratamento do farelo



Fonte: <https://www.desmet.com/en/feed/solvent-extraction>

c) Destilação da Miscela: A miscela (óleo + n-hexano) é direcionada a um sistema de destilação sob vácuo. Neste processo, o n-hexano é evaporado e separado do óleo, e o óleo bruto é enviado para degomagem. O vapor de solvente é condensado para reuso no sistema (BASTOS et al., 2010).

d) Recuperação de Solvente: Todo vapor de n-hexano gerado no DTDC e na destilação é condensado em trocadores de calor ou condensadores, direcionado a um tanque decantador água/solvente e reutilizado no processo de extração, garantindo eficiência econômica e ambiental (BERNARDO et al., 2003)..

e) Sistema de Óleo Mineral: O sistema de óleo mineral é utilizado para recuperar vapores residuais de n-hexano presentes nos gases do processo de extração. Ele opera por meio de absorção, onde o óleo mineral frio capta o solvente presente na corrente gasosa contendo hexano, e por meio de dessorção, onde o óleo mineral saturado é aquecido com vapor direto e libera o solvente absorvido, que é então condensado e reutilizado no processo. Esse sistema reduz significativamente as emissões atmosféricas, aumenta a eficiência na recuperação de solvente e contribui para a segurança e conformidade ambiental da planta (ERICKSON; SINGH, 2009).

Balanço de Massa

Um balanço de massa simplificado permite estimar a eficiência do processo industrial e identificar onde ocorrem perdas ou desvios operacionais. Considerando 100 kg de grãos de soja entrando no processo, os seguintes rendimentos gerais são usualmente obtidos nas plantas de processamento de soja:

Tabela 1 – Exemplo ilustrativo com base em dados médios da indústria

Item	Massa (kg)	Observações
Grão de Soja (Entrada)	100	Matéria-prima inicial
Farelo Final	78	Subproduto proteico
Óleo Bruto	19,5	97,5% de eficiência de extração
Perdas e Umidade Evaporada	2,5	Inclui perdas mecânicas e solvente residual

Fonte: Adaptado de Sinha, Haldar e Majumdar (2015); Demarco e Gibon (2020)

Este tipo de balanço permite calibrar o processo, identificar gargalos e projetar melhorias na planta. A análise de massa é, portanto, uma ferramenta essencial para garantir que a planta industrial atinja as especificações desejadas de qualidade do farelo, especialmente no que diz respeito ao teor de proteína, que pode ser diluído caso haja excesso de fibra ou umidade no produto final (Desmet, 2023b; Rodrigues et al., 2010).

4. Resultados e Discussões

Para realizar a simulação do balanço de massa do processo de preparação e extração por solvente, considerou-se uma soja com 91% de polpa, 7% de cascas e 2% de impurezas (BERNARDO et al., 2003), que consiste em uma composição geral conforme indicado na tabela abaixo:

Tabela 2 – Composição típica da soja

Componente	g / 100 g
Umidade	13,0
Óleo	19,0
Proteína	34,5
Açúcares extraíveis	23,0
Fibra	9,0

Além da composição da soja, outros parâmetros típicos de performance do processo foram fixados para permitir que a simulação fosse realizada; estes parâmetros são típicos de plantas de processamento de soja.

— Parâmetros de Entrada:

- Após limpeza e pesagem - Impurezas extraídas: 75,0% do total;
- Após limpeza e pesagem - Cascas removidas: 0,3% do total;
- Após limpeza e pesagem - Polpa removida: 0,05% do total;
- Após condicionamento - umidade do grão: 10,5%;
- Após processamento de cascas - residual de óleo na casca: 1,5%;
- Após processamento de cascas - umidade do pellet: 12,5%;
- Após laminação - umidade das lâminas: 10,0%;
- Após extração - residual de óleo no farelo branco: 0,50%;
- Na degomagem - umidade do óleo de entrada: 2,0%;
- Na degomagem - umidade do óleo de saída: 0,1%;
- Na degomagem - teor de fósforo do óleo de entrada: 800 ppm;
- Na degomagem - teor de fósforo do óleo de saída: 200 ppm;
- Na degomagem - insolúveis em acetona nas gomas: 65,0%.

A partir da composição da soja e dos parâmetros de entrada, foram efetuadas simulações em dois cenários distintos, e os seguintes resultados foram obtidos:

— Resultados da Simulação, para obtenção de farelo final com 46,0% de proteína:

- Eficiência de descasque necessário - retirada de 47% das cascas presentes no grão;
- Teor de umidade, óleo e fibras no farelo final (após o DTDC) - 12,5%, 1,1% e 3,5%, respectivamente;
- Rendimentos de farelo e óleo degomado - 73,94% e 18,17, respectivamente.

— Resultados da Simulação, para obtenção de farelo final com 48,0% de proteína:

- Eficiência de descasque necessário - retirada de 85% das cascas presentes no grão (performance máxima de remoção do sistema de descascamento “morno”);
- Teor de umidade, óleo e fibras no farelo final (após o DTDC) - 11,5%, 1,1% e 2,5%, respectivamente;
- Rendimentos de farelo e óleo degomado - 70,36% e 18,14, respectivamente.

Como é possível observar, para obter um farelo final com proteína de 46,0%, é necessário retirar somente 47% do total de cascas presentes no grão, o que por sua vez resulta em um teor de fibra de 3,5%, mantendo uma umidade de 12,5%. Em contrapartida, para se obter um farelo de 48,0% de proteína, o sistema de descasque terá que operar em sua máxima eficiência (retirando 85% de todas as cascas presentes no grão), o que ocasiona em um produto com menor teor de fibra (apenas 2,5%), e o processo terá que ser dimensionado para conseguir realizar a secagem do farelo de forma que ele tenha no máximo 11,5% de umidade.

A partir das premissas utilizadas e dos valores obtidos a partir das simulações, verifica-se que a obtenção do farelo com teor de proteína de 48,0% só será possível se as tecnologias aplicadas ao sistema de descasque (essencialmente colunas de aspiração e peneiras) e à secagem e resfriamento do farelo (essencialmente o DC - *Dryer Cooler*) forem corretamente dimensionadas de forma a permitir a máxima remoção de casca e secagem otimizada de produto.

5. Conclusões

Este estudo apresentou uma análise do processo industrial de extração de óleo e produção de farelo a partir da soja, com foco nas etapas de preparação de sementes, extração contínua por solvente e simulação de balanço de massa. A motivação para o estudo reside no desafio crescente enfrentado pela indústria em manter a qualidade proteica do farelo, frente à tendência de redução do teor de proteína nos grãos de soja produzidos no Brasil.

O objetivo principal foi aplicar simulações de balanço de massa como ferramenta para dimensionar tecnologias industriais capazes de garantir a obtenção de farelos com teor de proteína compatível com as exigências do mercado (46% e 48%). Para isso, adotou-se uma abordagem qualitativa, exploratória e experimental, com base em parâmetros técnicos típicos de unidades industriais.

Os resultados demonstraram que a obtenção de farelo com 46% de proteína requer a remoção de 47% das cascas presentes no grão, enquanto para atingir 48% de proteína é necessário operar o sistema de descascamento em sua eficiência máxima (remoção de 85% das cascas) e reduzir a umidade final do farelo para 11,5%. Esses resultados corroboram a importância do correto dimensionamento dos sistemas de descascamento e secagem na planta industrial.

O trabalho contribui para a compreensão prática da aplicação do balanço de massa como ferramenta estratégica no controle da qualidade do farelo e na melhoria da eficiência do processo industrial. Uma possível limitação da pesquisa foi a adoção de parâmetros médios e estáticos, sem considerar variações regionais ou genéticas dos grãos processados.

Como sugestão para trabalhos futuros, recomenda-se a integração de dados operacionais reais de plantas industriais em diferentes regiões produtoras, bem como o desenvolvimento de modelos dinâmicos que considerem variações sazonais e de matéria-prima, de forma a aprimorar a acurácia das simulações e sua aplicabilidade prática.

Referências

ABIOVE – ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DAS INDÚSTRIAS DE ÓLEOS VEGETAIS.

Anuário estatístico 2024. São Paulo: ABIOVE, 2024. Disponível em: <https://abiove.org.br>. Acesso em: 30 set. 2025.

AGROADVANCE. Constituição do grão de soja. 2019. Disponível em: [https://agroadvance.com.br/blog-subprodutos-da-soja/#:~:text=\(~%208%25\).-](https://agroadvance.com.br/blog-subprodutos-da-soja/#:~:text=(~%208%25).-)

,Constitui%C3%A7%C3%A3o%20do%20gr%C3%A3o%20de%20soja. Acesso em: 30 set. 2025.

BASTOS, A. R. R. et al. *Processos industriais na cadeia da soja: tecnologia e sustentabilidade.* Londrina: Embrapa Soja, 2010.

BATALHA, M. O.; SILVA, A. L. da. A cadeia produtiva da soja no Brasil. *Informações Econômicas*, São Paulo, v. 31, n. 1, p. 7-20, jan. 2001.

BERNARDO, A. et al. *Processamento da soja e qualidade do farelo para nutrição animal.* Campinas: Embrapa CNPSA, 2003.

CAI, L.; ZHANG, Y.; SHAO, S. Effect of expanding on soybean oil extraction using hexane and enzyme-assisted aqueous extraction. *Journal of the American Oil Chemists' Society*, v. 88, n. 7, p. 1151–1159, 2011.

CONAB – COMPANHIA NACIONAL DE ABASTECIMENTO. *Acompanhamento da safra brasileira de grãos: 2024/2025 – 1º levantamento*. Brasília: CONAB, 2025.

DEMARCO, A.; GIBON, V. Overview of the soybean process in the crushing industry. *OCL – Oilseeds and Fats, Crops and Lipids*, v. 27, p. 47, 2020. Disponível em: https://www.ocl-journal.org/articles/ocl/full_html/2020/01/ocl200047s/ocl200047s.html. Acesso em: 30 set. 2025.

DESMET. *Oilseeds preparation & pressing*. 2023b. Disponível em: <https://www.desmet.com/en/feed/oilseeds-preparation-pressing>. Acesso em: 30 set. 2025.

DESMET. *Solvent extraction*. 2023a. Disponível em: <https://www.desmet.com/en/feed/solvent-extraction>. Acesso em: 30 set. 2025.

EMBRAPA – EMPRESA BRASILEIRA DE PESQUISA AGROPECUÁRIA. *Soja no Brasil: histórico e importância econômica*. Brasília: Embrapa, 2022. Disponível em: <https://www.embrapa.br>. Acesso em: 30 set. 2025.

EMBRAPA – EMPRESA BRASILEIRA DE PESQUISA AGROPECUÁRIA. *Composição da soja*. Disponível em: <https://www.embrapa.br/soja/alimentacao/composicaodasoja>. Acesso em: 30 set. 2025.

ERICKSON, D. R.; SINGH, M. *Edible fats and oils processing: basic principles and modern practices*. Urbana: AOCS Press, 2009.

NEVES, M. F. et al. *O agronegócio da soja nos contextos mundial e brasileiro*. São Paulo: Atlas, 2010.

RODRIGUES, C. E. C. et al. Thermodynamic study of soybean oil extraction using ethanol as solvent. *Journal of Food Science*, v. 75, n. 6, p. C517–C521, 2010.

SINHA, A. K.; HALDAR, S.; MAJUMDAR, G. Extraction of oil from soybean using hexane and ethanol: a comparative study. *Journal of Food Science and Technology*, v. 52, n. 8, p. 4530–4536, 2015.

USDA – UNITED STATES DEPARTMENT OF AGRICULTURE. *World Agricultural Supply and Demand Estimates – WASDE Report*. Washington, D.C.: USDA, 2025. Disponível em: <https://www.usda.gov>. Acesso em: 30 set. 2025.

