

**Sustentabilidade e potencial econômico da canola em regiões tropicais do Brasil:
desafios para consolidação como matéria-prima para Combustível Sustentável de
Aviação (SAF)**

***Sustainability and economic potential of canola in tropical regions of Brazil: challenges for
consolidation as a feedstock for Sustainable Aviation Fuel (SAF)***

Rosana do Carmo Nascimento Guiducci

Embrapa Agroenergia. Brasília, DF, Brasil

Alexandre Nunes Cardoso

Embrapa Agroenergia. Brasília, DF, Brasil

Soryana Gonçalves Ferreira de Melo

Bolsista do Projeto REDECANOLA. Brasília, DF, Brasil

Bruno Galvêas Laviola

Embrapa Agroenergia. Brasília, DF, Brasil

SOBER GT12. Impactos socioambientais das novas tecnologias no agronegócio

Resumo: Este trabalho visa avaliar o potencial econômico e o desempenho ambiental de diferentes genótipos de canola (*Brassica napus L. var. oleífera*) em regiões tropicais do Brasil, utilizando como base ensaios de Valor de Cultivo e Uso (VCU). A metodologia integrou análises produtivas, econômicas e ambientais. Foram analisados dados de 252 ensaios de VCU com 18 híbridos em 12 localidades representativas de diversas condições edafoclimáticas. A análise estatística envolveu ANOVA e teste de Scott-Knott ($p < 0,05$). A viabilidade econômica foi mensurada pelo confronto da produtividade experimental com as matrizes de custos de referência (sistema de alta tecnologia e sistema simplificado), determinando-se os pontos de nivelamento e fechamento. O desempenho ambiental foi mensurado via Avaliação do Ciclo de Vida (ACV), com abordagem "do berço ao portão da fazenda" e método ReCiPe 2016, focando em categorias como mudanças climáticas e uso da terra. Os resultados indicam que a viabilidade econômica da canola tropical é desafiadora no estágio tecnológico atual, com a maioria dos ensaios operando em zona de prejuízo. A produtividade demonstrou forte dependência de fatores edafoclimáticos, sendo viável apenas em altitudes elevadas ($> 900\text{m}$) com temperaturas amenas. Ambientalmente, a produção e o uso de fertilizantes nitrogenados foram identificados como o principal ponto crítico (*hotspot*) para a pegada de carbono. Conclui-se que a consolidação da cultura da canola no Cerrado depende de avanços no melhoramento genético para tolerância ao calor e estresse hídrico, além da otimização do manejo de nitrogênio.

Palavras-chave: tropicalização da canola, viabilidade econômica, ACV.

Abstract: This study aims to evaluate the economic potential and environmental performance of different canola genotypes (*Brassica napus L. var. oleífera*) in tropical regions of Brazil, based on Value for Cultivation and Use (VCU) trials. The methodology integrated productive, economic, and environmental analyses. Data from 252 VCU trials were analyzed, encompassing 18 hybrids across 12 locations representative of diverse edaphoclimatic conditions. Statistical analysis involved ANOVA and the Scott-Knott test ($p < 0.05$). Economic viability was measured by comparing experimental productivity with reference cost matrices (high-technology and simplified systems), determining the break-even and shutdown points. Environmental performance was assessed via Life Cycle Assessment (LCA) using a 'cradle-to-farm-gate' approach and the ReCiPe 2016 method, focusing on categories such as climate change and land use. The results indicate that the economic viability of tropical canola remains challenging at the current technological stage, with the majority of trials operating within a loss zone. Productivity demonstrated a strong dependence on edaphoclimatic factors, proving viable only at high altitudes ($> 900\text{m}$) with mild temperatures. Environmentally, the production and application of nitrogen fertilizers were identified as the primary hotspot for the carbon footprint. It is concluded that the consolidation of canola cultivation in the Cerrado depends on advances in genetic breeding for heat and water stress tolerance, alongside the optimization of nitrogen management.

Keywords: tropicalization of canola, economic feasibility, LCA.

1. Introdução

A transição energética global e o estabelecimento de metas de descarbonização em setores como o de transporte aéreo e marítimo têm impulsionado a demanda por biocombustíveis avançados, com destaque para o Diesel Renovável (*HVO - Hydrotreated Vegetable Oil*) e o Combustível Sustentável de Aviação (*SAF - Sustainable Aviation Fuel*). Estima-se que 65% da mitigação de carbono necessária para atingir emissões líquidas zero até 2050 virá de SAF (IATA, 2024). Todavia, a produção ainda é muito aquém do necessário para atingir esta meta. Em 2023, a totalidade da produção de SAF foi comprada e consumida pela indústria, e representou apenas 0,2% do combustível utilizado (IATA, 2024). Em 2025, a produção esperada é de 2 milhões de toneladas, o dobro do ano anterior, correspondendo a apenas 0,7% da necessidade da indústria frente à meta estabelecida (IATA, 2025).

De um total de 11 processos de conversão para produção de SAF aprovados até 2025 (ICAO, 2026), estima-se que o processo HEFA (*Hydro-processed esters and fatty acids*), que tem como matéria prima o óleo vegetal, gordura animal e óleo de cozinha, responderá por 85% da produção de SAF projetada para os próximos cinco anos (IATA, 2023). Esta dominância deve permanecer nos próximos 10 a 15 anos tendo em vista a disponibilidade de matéria prima, eficiência superior, maturidade tecnológica e menores custos operacional e capital investido (Bolakhe et al., 2026; IATA, 2023).

O Brasil pode se tornar um grande *player* neste mercado pela capacidade de ampliar a produção de oleaginosas e atender a demanda interna e internacional de biocombustíveis. Todavia deverá estar atento às novas exigências do mercado internacional, tais como o Regulamento da União Europeia para Produtos Livres de Desflorestação (EUDR) (Nonnenberg, et al., 2025) e critérios de sustentabilidade para combustíveis elegíveis no âmbito do CORSIA (Esquema de Compensação e Redução de Carbono da Aviação Internacional, do inglês *Carbon Offsetting and Reduction Scheme for International Aviation*).

O critério CORSIA de sustentabilidade estabelece que o SAF deve reduzir as emissões de GEE em pelo menos 10% em comparação com os valores de referência e não pode ser produzido a partir de biomassa de ecossistemas com alto estoque de carbono, como florestas primárias e pântanos, além de trazer novos temas que incluem a permanência da redução de emissões e a gestão da água, solo e biodiversidade (ICAO, 2025).

Este cenário exige estratégias de intensificação agrícola que permitam o aumento da oferta de biomassa oleaginosa sem a conversão de vegetação nativa, além de melhoria nos sistemas de cultivo para reduzir o impacto ambiental na fase agrícola.

O Brasil, maior produtor mundial de oleaginosas (USDA, 2026), tem como diferencial sistemas de produção capazes de gerar duas a três safras ao ano utilizando a mesma área. Esta prática se mostra sustentável, ao trazer benefícios ambientais, econômicos e sociais, como demonstrado por Gurgel et al. (2024). Ao avaliar o sistema de produção de etanol de milho de cultivo duplo (soja-milho safrinha), na região Centro-Oeste, os autores apontam que a integração do fornecimento de matéria-prima é um dos principais fatores de eficiência e sustentabilidade do sistema, aprimorada pela captura e armazenamento de carbono.

Neste contexto, a introdução da canola (*Brassica napus* L. var. *oleifera*) como cultura de segunda safra surge como uma alternativa estratégica para diversificar as matérias-primas para produção de óleo vegetal, em sistemas de sucessão e rotação de culturas, permitindo a utilização eficiente do solo no período de entressafra de importantes *commodities* de verão. Além dos benefícios agrônômicos, como a melhoria da saúde do solo e redução da pressão fitossanitária, a canola apresenta um balanço de carbono favorável à descarbonização das cadeias de transporte (Town et al., 2023). Nos Estados Unidos, Bolakhe et al. (2026) avaliaram a sustentabilidade do SAF produzido a partir do cultivo de canola de inverno, considerando variações de produtividade, e demonstraram que a produção é economicamente viável com ganhos ambientais em redução de emissões de carbono.

Estudos recentes indicam que a expansão da canola para regiões tropicais e subtropicais é viável, desde que observados critérios edafoclimáticos como altitudes superiores a 600 metros e manejo hídrico adequado durante o florescimento (Candido et al., 2025; Laviola et al., 2022; Araujo, et al., 2021; Panozzo, et al. 2014). Além dos benefícios relacionados ao uso do solo já mencionados, a introdução da canola como segunda safra em regiões tropicais merece ser avaliada no que se refere à sustentabilidade do sistema de cultivo.

O objetivo deste trabalho é avaliar o potencial econômico e o desempenho ambiental de genótipos de canola em regiões tropicais do Brasil, fundamentando-se em ensaios de Valor de Cultivo e Uso (VCU). O estudo integra as ações da RedeCanola, consórcio de PD&I liderado pela Embrapa em parceria com o setor privado (Advanta Seeds, Orígeo e Bunge).

2. Revisão da Literatura

A canola posiciona-se como a terceira oleaginosa mais importante do mundo (USDA, 2026). O mercado global, avaliado em aproximadamente US\$ 51 bilhões para a próxima década, é impulsionado tanto pela indústria alimentícia quanto pelo setor energético. O Canadá, maior exportador mundial, tem liderado o desenvolvimento de variedades com perfis lipídicos otimizados, servindo de modelo para a expansão da capacidade de processamento (COUNCIL, 2026). No setor de biocombustíveis, o óleo de canola é uma das matérias-primas preferenciais para a rota HEFA na produção de SAF, devido à sua densidade energética e menor ponto de fluidez em comparação com gorduras saturadas (Lamas et al., 2026; Umeh & Okonkwo, 2025; Guimarães et al., 2022).

A cultura da canola se destaca pelo elevado rendimento de óleo (40% a 45%), conferindo-lhe uma eficiência de extração superior à culturas oleaginosas tradicionais como a soja (18% a 20%) e menor intensidade de carbono no cultivo (Ukaew et al., 2016). Além do uso energético e alimentar, o óleo de canola possui propriedades de lubricidade e estabilidade oxidativa que permitem a sua aplicação em fluidos hidráulicos e lubrificantes biodegradáveis, superando óleos minerais em termos de segurança (ponto de fulgor $>320^{\circ}\text{C}$) e impacto ambiental (Umeh & Okonkwo, 2025; Guimarães et al., 2022; De Mori, et al., 2014).

O farelo de canola resultante da extração (coproduto) possui alto valor nutricional, com 34% a 38% de proteína bruta e um perfil de aminoácidos essenciais (metionina e cisteína) equilibrado (Guimarães et al., 2022). Pesquisas indicam que a inclusão deste farelo na dieta de ruminantes pode elevar a produção de leite e melhorar a eficiência alimentar em monogástricos (COUNCIL, 2026).

No Brasil, a canola consolidou-se na região Sul, que responde por cerca de 98,7% da produção nacional. Na safra 2025 houve um avanço significativo: a estimativa de produção de 344,8 mil toneladas representou um incremento de 76% em relação a 2024, ocupando uma área de 211,9 mil hectares (CONAB, 2026a). Contudo, em comparação às *commodities* soja e milho, a canola ainda responde por uma fração marginal da matriz produtiva brasileira. Para se ter uma ideia do potencial de expansão da canola de segunda safra no Brasil, na safra 2025/26 a área destinada ao milho de segunda safra foi de 17,89 milhões de hectares, sendo 11,46 milhões de ha (64%) somente na região Centro-Oeste (CONAB, 2026b).

A expansão da canola para o Cerrado e outras áreas tropicais enfrenta desafios bióticos e abióticos. A principal limitação reside na adaptação térmica, que afeta a retenção de flores e a deiscência das siliquas (Laviola et al., 2022). A cooperação entre a Embrapa e parceiros

privados (RedeCanola) foca no desenvolvimento de híbridos com ciclos curtos (aproximadamente 95 dias) e resistência a doenças como a canela-preta (*blackleg*), visando reduzir riscos climáticos e otimizar a plantabilidade. O uso de bioinsumos e o refinamento do Zoneamento Agrícola de Risco Climático (ZARC) são apontados como pilares fundamentais para garantir a sustentabilidade e competitividade da canola tropical brasileira.

Avaliações sobre o desempenho da canola estão avançando, inclusive com relação a ganhos ambientais. No período de 2019 a 2020 foi elaborado o Inventário do Ciclo de Vida - ICV para o processo de produção agrícola da canola na região sul, tendo sido o resultado depositado no Banco Nacional de ICV - SICV-Brasil (Ibict- MCTI, 2020).

Em 2024 foi realizada uma revisão deste ICV, considerando a coleta de dados primários junto aos produtores de canola na mesma região (Cardoso et al., 2025). Esse trabalho foi fundamental para disponibilizar base de dados para avaliação de impacto ambiental da canola na região Sul do Brasil. Com a introdução da canola como segunda safra em regiões tropicais/subtropicais é importante dar continuidade à avaliação no que se refere à sustentabilidade do sistema de cultivo em regiões de expansão.

A elaboração do ICV consiste na etapa que precede a Avaliação do Ciclo de Vida - ACV (ABNT, 2009). Quando se trata da cadeia de suprimentos de SAF torna-se essencial um estudo de ACV para verificar seu potencial de descarbonização e elegibilidade para créditos de redução de carbono (Bolakhe et al., 2026).

3. Metodologia

3.1. Fonte de dados e delineamento experimental

A avaliação do desempenho produtivo da canola baseou-se em dados primários de produtividade (kg/ha) obtidos a partir de 252 ensaios de Valor de Cultivo e Uso (VCU). O delineamento experimental foi em blocos casualizados (DBC) com três repetições. Os experimentos foram realizados com 18 híbridos codificados de forma randomizada, conduzidos em 12 localidades representando diferentes condições edafoclimáticas, abrangendo os estados de Minas Gerais (municípios de Uberlândia e Lavras), Maranhão (Fortaleza dos Nogueiras), Mato Grosso (Água Boa, Campo Novo dos Parecis, Novo São Joaquim e Sorriso), Piauí (municípios de Baixa Grande do Ribeiro), Paraná (Guarapuava), Rio Grande do Sul (Três de Maio) e Bahia (Luís Eduardo Magalhães), com representatividade das regiões Nordeste, Centro-Oeste, Sudeste e Sul.

3.2. Análise estatística

Os dados de produtividade obtidos nos diferentes ensaios foram submetidos aos pressupostos de normalidade e homogeneidade de variância. As médias de produtividade (kg/ha) obtidas nos ensaios de VCU foram corrigidas para 13% de umidade (base úmida), garantindo a uniformidade na comparação entre os híbridos. Posteriormente, procedeu-se à Análise de Variância (ANOVA) e, quando significativo, as médias de produtividade das cultivares foram comparadas pelo teste de Scott-Knott, a 5% de probabilidade ($p < 0.05$), utilizando o software estatístico R. Esta etapa permitiu identificar as genéticas de maior potencial produtivo para as análises econômicas subsequentes.

3.3. Análise econômica

Dada a natureza experimental dos ensaios de VCU, cujos custos não refletem fielmente a realidade comercial devido às simplificações em escala, mão de obra e infraestrutura, optou-se pela utilização de uma matriz de custos de referência externa. Foram utilizados dados da Companhia Nacional de Abastecimento (CONAB) referentes à safra de inverno 2023, para o município de São Luiz Gonzaga (RS), caracterizado por sistema de plantio direto de alta tecnologia e produtividade média de 1.800 kg/ha.

O modelo de custo foi adaptado para um sistema simplificado, excluindo-se despesas com seguro agrícola, juros de financiamento, administração e arrendamento da terra. A análise de viabilidade econômica compreendeu:

- **Estrutura de Custos:** Segregada em Custos Variáveis (desembolsos diretos proporcionais à produção, exemplo: insumos e serviços) e Custos Fixos (despesas independentes do nível de produção, ex: depreciação e manutenção).
- **Custo Operacional e Total:** O Custo Operacional foi definido pela soma dos custos fixos e variáveis. O Custo Total incorporou o Custo de Oportunidade (renda dos fatores), permitindo a análise da remuneração dos recursos de produção.
- **Indicadores de Viabilidade:** Foram calculados o Ponto de Nivelamento (*Break-even Point*), onde a receita equaliza o Custo Total, e o Ponto de Fechamento (*Shutdown Point*), limiar crítico onde a receita não cobre os custos fixos, indicando a necessidade de interrupção da atividade para minimização de perdas.

A representação gráfica destes limiares (Figura 1) evidencia que produtividades situadas entre o ponto de fechamento e o ponto de equilíbrio operam em zona de prejuízo contábil, mas podem ser sustentáveis no curto prazo se cobrirem os custos variáveis.

A análise econômica consistiu no confronto entre o desempenho produtivo das VCUs e os custos de produção do sistema de referência (São Luiz Gonzaga/RS) e do sistema simplificado proposto.

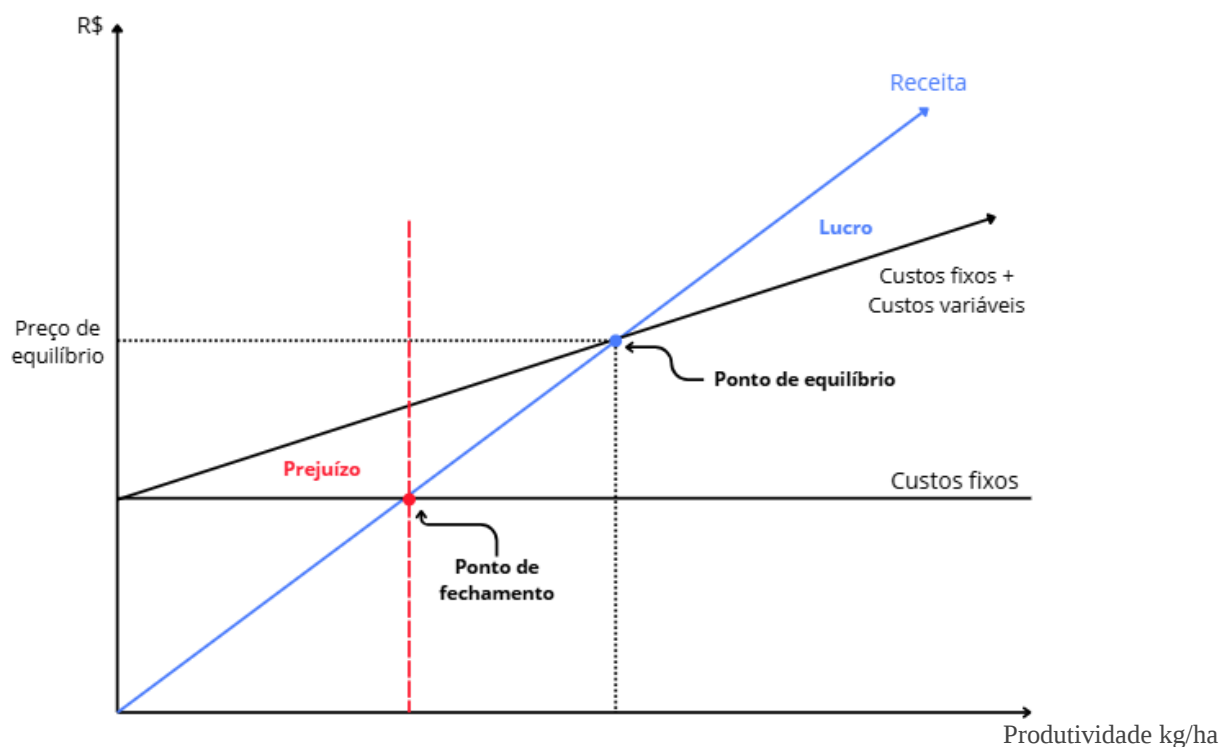


Figura 1 – Ponto de fechamento e ponto de equilíbrio econômico de curto prazo.

3.4 Avaliação de Impacto Ambiental

A análise ambiental foi conduzida por meio da estruturação de um Inventário do Ciclo de Vida (ICV) e posterior Avaliação do Ciclo de Vida (ACV), seguindo as diretrizes da norma ABNT NBR ISO 14040 (2009). O estudo focou na sustentabilidade do sistema de cultivo de canola em regime de "safrinha" em clima tropical, com ênfase na região de expansão do Cerrado.

3.4.1. Escopo e Inventário

As fronteiras do sistema foram definidas com abordagem "do berço ao portão da fazenda" (*cradle-to-farm-gate*), abrangendo desde o preparo do solo e plantio até a colheita. O

inventário foi construído utilizando o software OpenLCA v. 2.5.0 e a base de dados Ecoinvent v. 3.7.

Os dados primários para o ICV foram coletados em lavouras comerciais e experimentais no Distrito Federal e no estado de Mato Grosso, além dos dados provenientes dos ensaios de VCU (safra 2023). Os dados abrangeram as fases do ciclo de vida do cultivo da canola, desde a preparação do solo e plantio até a colheita. Ressalta-se que a avaliação possui caráter preliminar, uma vez que o escopo de dados foi limitado pelo desempenho agrônomo insatisfatório da cultura em algumas Unidades de Referência Tecnológica (URTs) planejadas, decorrente de adversidades climáticas na região tropical.

3.4.2. Avaliação de Impacto

Para a caracterização dos potenciais impactos ambientais, utilizou-se o método ReCiPe 2016 Midpoint (H) no software openLCA v. 2.5.0. As categorias de impacto avaliadas incluíram:

- Uso e ocupação da terra;
- Consumo e eficiência do uso da água;
- Mudanças climáticas (emissões de gases de efeito estufa);
- Poluição atmosférica;
- Ecotoxicidade terrestre e aquática decorrente do uso de insumos agrícolas (fertilizantes e defensivos).

A análise culminou na identificação dos pontos críticos (*hotspots*) de pressão ambiental e na proposição de medidas mitigadoras visando a sustentabilidade do sistema produtivo.

4. Resultados e discussão

4.1. Análise econômica e produtiva

A análise da estrutura de custos, tomada como referência para a viabilidade do cultivo, indicou um Custo Total (CT) de R\$ 5.211,21/ha para o sistema de alta tecnologia em São Luiz Gonzaga (RS) e de R\$ 4.360,47/ha para o sistema simplificado proposto (Tabela 1). A composição destes custos, segregada em fixos e variáveis, serviu de balizador para a avaliação de desempenho das 252 Unidades de Valor de Cultivo e Uso (VCU).

Tabela 1 – Custos de produção de canola, em R\$/ha

DISCRIMINAÇÃO	São Luiz Gonzaga (RS)	Sistema simplificado
I - DESPESAS DO CUSTEIO		
1 - Tratores e Colheitadeiras	304,14	304,14
2 - Administrador	82,88	0,00
3 - Sementes e mudas	420,00	420,00
4 - Fertilizantes	1.806,20	1.806,20
5 - Agrotóxicos	445,05	445,05
TOTAL DAS DESPESAS DE CUSTEIO (A)	3.058,27	2.975,39
II - OUTRAS DESPESAS		
6 - Despesas Administrativas	90,83	90,83
7 - Seguro da Produção	136,25	0,00
8 - CESSR	52,61	52,61
TOTAL DAS OUTRAS DESPESAS (B)	279,69	143,4400
III - DESPESAS FINANCEIRAS		
9 - Juros do Financiamento	202,89	0,00
TOTAL DAS DESPESAS FINANCEIRAS (C)	202,89	0,00
CUSTO VARIÁVEL (A+B+C=D)	3.540,85	3.118,83
IV - DEPRECIAÇÕES		
10 - Depreciação de benfeitorias/instalações	27,80	27,80
11 - Depreciação de implementos	178,74	178,74
12 - Depreciação de Máquinas	93,55	93,55
TOTAL DE DEPRECIAÇÕES (E)	300,0900	300,0900
V - OUTROS CUSTOS FIXOS		
13 - Manutenção Periódica Benfeitorias/Instalações	162,38	162,38
14 - Encargos Sociais	37,78	37,78
15 - Seguro do capital fixo	17,27	0,00
16 - Arrendamento	411,45	0,00
TOTAL DE OUTROS CUSTOS FIXOS (F)	628,88	200,16
CUSTO FIXO (E+F=G)	928,97	500,25
CUSTO OPERACIONAL (D+G=H)	4.469,82	3.619,08
VI - RENDA DE FATORES		
17 - Remuneração esperada sobre o capital fixo	188,57	188,57
18 - Terra Própria	552,82	552,82
TOTAL DE RENDA DE FATORES (I)	741,39	741,39
CUSTO TOTAL (H+I=J)	5.211,21	4.360,47

Fonte: CONAB. Sistema simplificado – adaptado pelos autores.

4.1.1. Distribuição de Produtividade e Pontos de Equilíbrio

A avaliação agrônômica revelou uma heterogeneidade significativa no desempenho produtivo das cultivares testadas. Observou-se que a maioria absoluta dos ensaios (57,5%) obteve produtividade inferior a 1.200 kg/ha (Tabela 2). Apenas uma fração reduzida,

correspondente a 20 VCUs (7,9% do total), alcançou patamares de produtividade iguais ou superiores a 2.000 kg/ha.

Tabela 2 – Classificação dos VCUs por extrato de produtividade

Extrato de produtividade (t/ha)	Nº de VCU	%
Produtividade $\geq 2,0$	20	7,9
Produtividade $1,5 \leq p < 2,0$	41	16,3
Produtividade $1,2 \leq x < 1,5$	32	12,7
Produtividade $< 1,2$	145	57,5
Não informada	14	5,6
Total	252	100

Fonte: Dados da pesquisa.

Esta distribuição de produtividade impactou diretamente os indicadores de viabilidade econômica. Para o sistema de referência (São Luiz Gonzaga/RS), o Ponto de Nivelamento, que é a produtividade necessária para cobrir o custo total, foi estimado em 2.804,27 kg/ha. Nenhuma das cultivares avaliadas atingiu tal produtividade, indicando que, sob a estrutura de custos de alta tecnologia e os preços vigentes, o lucro econômico foi inexistente (Tabela 3).

Contudo, ao considerar o Ponto de Fechamento, que é a produtividade mínima para cobertura dos custos fixos, a análise torna-se mais permissiva:

- Viabilidade de Curto Prazo: 150 VCUs (60% do total) apresentaram receita suficiente para cobrir os custos fixos no sistema de referência, sugerindo possibilidade de manutenção da operação mediante ajustes de gestão.
- Inviabilidade Operacional: Identificaram-se 88 VCUs (35% do total) situadas abaixo do ponto de fechamento ($< 499,90$ kg/ha), cenário em que a interrupção imediata da produção é recomendada para minimizar a acumulação de prejuízos.

No cenário do sistema simplificado, a redução do Custo Total permitiu que 7 VCUs atingissem o ponto de nivelamento (2.346,47 kg/ha), obtendo lucro econômico. Além disso, 21 VCUs demonstraram capacidade de cobrir o Custo Operacional, e 41 VCUs cobriram integralmente os Custos Variáveis (Tabela 3). Nestes casos, é possível insistir com a produção e buscar reduzir custos ou elevar receitas para tornar a atividade viável.

Tabela 3 – Identificação de VCUs com potencial de viabilidade econômica no curto prazo

Sistema de São Luiz Gonzaga - RS	Sistema simplificado
----------------------------------	----------------------

	Ponto de nivelamento (kg/ha)	nº de VCU	Ponto de nivelamento (Kg/ha)	nº de VCU
Custo Total	2.804,27	0	2.346,47	7
Custo operacional	2.405,32	6	1.947,51	21
Custo variável	1.905,41	23	1.678,32	41
Custo Fixo*	499,90	150	269,20	177
Inviável no curto prazo	<499,90	88	<269,20	61

Fonte: dados da pesquisa. *Referência para o ponto de fechamento.

A análise de viabilidade econômica de curto prazo para o sistema simplificado, indicou ainda que 177 VCUs situam-se no limiar de operação, apresentando receita suficiente apenas para a cobertura dos custos fixos, resultando em prejuízo equivalente à totalidade dos custos variáveis e de oportunidade. Adicionalmente, identificaram-se 61 VCUs operando abaixo do ponto de fechamento (*shutdown point*), cujas produtividades não foram capazes de remunerar sequer os custos fixos (Tabela 3). Tal desempenho indica inviabilidade operacional, recomendando-se a descontinuidade da produção nestas condições para mitigação de perdas.

4.1.2. Interação Genótipo x Ambiente e Potencial Econômico

A análise detalhada das VCUs de elite (produtividade > 2.000 kg/ha) permitiu inferências sobre a interação genótipo-ambiente (Tabela 4). O município de Lavras (MG) destacou-se com quatro variedades apresentando Receita Líquida positiva no sistema simplificado, com a cultivar ADV-C-24105 alcançando a maior produtividade do estudo (2.711 kg/ha) e lucro de R\$ 677,41/ha. Outros resultados positivos pontuais foram observados em Uberlândia (MG) e Luís Eduardo Magalhães (BA).

Em contrapartida, localidades como Três de Maio (RS) apresentaram prejuízos significativos mesmo entre as melhores variedades, variando de - R\$ 316,79/ha a - R\$ 625,27/ha. Estes resultados corroboram a hipótese de que a adaptação das cultivares - todas de origem australiana e não desenvolvidas especificamente para o Brasil - é fortemente influenciada pela altitude e temperatura:

- **Fator Altitude/Temperatura:** Regiões de maior altitude, como Lavras (922m), mimetizaram melhor as condições de clima ameno de origem das cultivares, favorecendo o desempenho.

- **Estresse Ambiental:** Em baixas altitudes com restrição hídrica, como Baixa Grande do Ribeiro (PI, 325m), a produtividade foi inviável para todas as 18 variedades. No Rio Grande do Sul, o excesso de precipitação no plantio foi o fator limitante.

Tabela 4 – Análise econômica de VCU de maior potencial produtivo

Município/UF	Variedade	Produtividade média (kg/ha)	Receita bruta (R\$/ha)	Receita líquida (R\$/ha)*
Lavras/MG	ADV-C-24105	2.711	5.037,88	677,41
	ADV-C-24107	2.505	4.655,07	294,60
	ADV-C-24120	2.472	4.593,74	233,27
	ADV-C-24103	2.371	4.406,05	45,58
Uberlândia/MG	ADV-C-24102	2.315	4.301,99	- 58,48
	ADV-C-24103	2.444	4.541,71	181,24
	ADV-C-24105	2.243	4.168,19	- 192,28
	ADV-C-24107	2.189	4.067,84	- 292,63
	ADV-C-24109	2.486	4.619,76	259,29
	ADV-C-24110	2.326	4.322,43	- 38,04
Luís Eduardo Magalhães/BA	ADV-C-24101	2.653	4.930,10	569,63
	ADV-C-24113	2.068	3.842,98	- 517,49
Três de Maio/RS	ADV-C-24102	2.176	4.043,68	- 316,79
	ADV-C-24105	2.060	3.828,12	- 532,35
	ADV-C-24107	2.012	3.738,92	- 621,55
	ADV-C-24109	2.010	3.735,20	- 625,27
	ADV-C-24119	2.114	3.928,47	- 432,00

Fonte: dados da pesquisa. *Receita bruta menos custo total do sistema simplificado.

Apesar de apenas seis variedades terem alcançado lucro líquido positivo sob as condições do estudo, o desempenho superior destas em relação à média comercial de São Luiz Gonzaga (que operou com prejuízo de R\$1.015,51/ha) demonstra o potencial de expansão da cultura mediante seleção genética adequada.

4.2. Análise de Impacto Ambiental

Para as principais categorias de impacto consideradas na avaliação do ciclo de vida da fase agrícola da canola, processos associados à produção de fertilizantes, principalmente nitrogenados, resultaram em expressiva contribuição nos impactos ambientais potenciais. Esta tendência vem sendo demonstrada em avaliações de desempenho ambiental de processos agrícolas, como no estudo por Lamas et al. (2026), que concluiu sobre a importância dos insumos agrícolas, particularmente do manejo dos fertilizantes nitrogenados e potencial

adoção de biofertilizantes. Fertilizantes fosfatados e potássicos, também contribuíram para os impactos ambientais potenciais. Processos relacionados à produção de embalagens de insumos, plantio e colheita contribuíram em menor proporção (Figura 2).

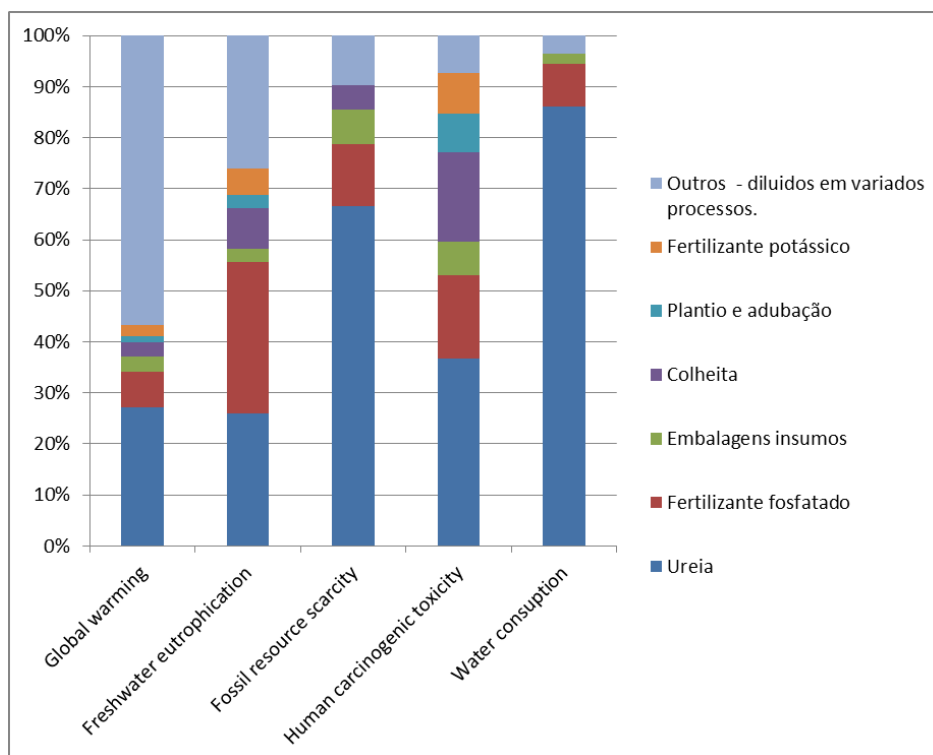


Figura 2: Principais contribuições de processos relacionados ao cultivo da canola na região Centro-Oeste.

Fonte: dados da pesquisa.

A avaliação preliminar dos impactos ambientais potenciais com foco na categoria de impacto "Mudanças Climáticas", diretamente relacionada à pegada de carbono do processo de cultivo, identificou os fertilizantes químicos, principalmente nitrogenados como um ponto crítico no sistema produtivo, em geral associados às emissões de gases de efeito estufa (GEE).

A Figura 3, obtida a partir da avaliação de impactos ambientais potenciais, no software OpenLCA, para a categoria "Aquecimento Global", ilustra a participação dos processos associados à cadeia de produção de ureia para as emissões totais de CO₂-eq, seguidos pela produção de fertilizantes fosfatados. Este resultado evidencia que a pegada de carbono da canola tropical é sensível à eficiência do uso de fertilizantes nitrogenados, particularmente a ureia.

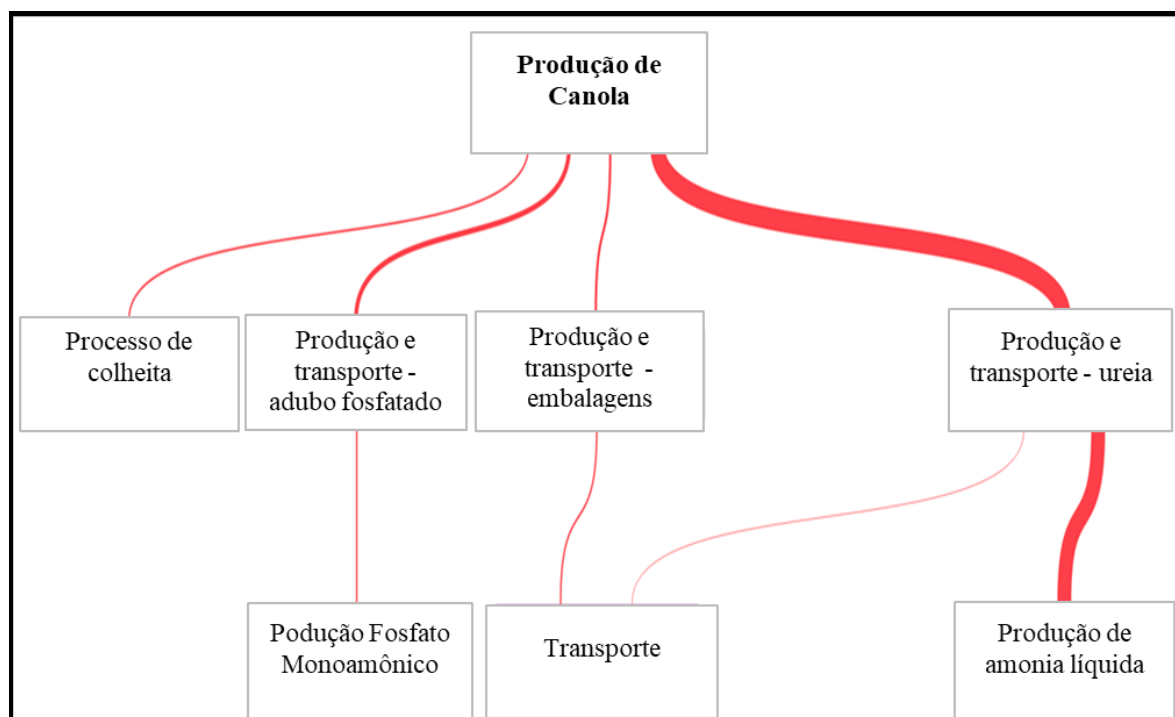


Figura 3 - Análise da contribuição dos processos envolvidos no cultivo da canola na região Centro-Oeste, para a categoria de impacto “*Global Warming*”.

Nesse contexto, pode-se considerar que, dentre as medidas de mitigação dos impactos ambientais potenciais estão relacionados a duas possíveis estratégias: o aumento da eficiência agrônômica de fertilizantes minerais e a substituição por bioinsumos, visando reduzir a carga de emissões associada à cadeia de fertilizantes agrícolas.

5. Considerações finais

A avaliação integrada do desempenho econômico e ambiental da canola em regiões tropicais do Brasil, com base em ensaios de Valor de Cultivo e Uso (VCU), embora consista em uma avaliação preliminar do desempenho da canola, permite concluir que a viabilidade econômica da cultura da canola na região do Cerrado e demais áreas de expansão avaliadas apresenta-se, no atual estágio tecnológico, como desafiadora. Sob a estrutura de custos de referência de alta tecnologia (São Luiz Gonzaga/RS), nenhuma cultivar atingiu o Ponto de Nivelamento. Mesmo no cenário de sistema simplificado, a maioria absoluta das unidades experimentais operou em zonas de prejuízo, com 61 VCUs situadas abaixo do Ponto de Fechamento, indicando a inviabilidade operacional imediata nessas condições específicas. Todavia, é importante ressaltar que o resultado econômico em São Luiz Gonzaga/RS naquele ano foi negativo, ou seja, operaram com prejuízo.

Evidenciou-se uma forte influência de fatores edafoclimáticos, notadamente a altitude e a temperatura, sobre a produtividade. As cultivares, de origem australiana, expressaram seu potencial produtivo apenas em microrregiões de maior altitude (como Lavras, MG), onde as condições térmicas foram mais amenas. Em contrapartida, regiões de baixa altitude e com restrições hídricas (como no Piauí) resultaram em produtividades inexpressivas, inviabilizando a atividade econômica independentemente do genótipo utilizado.

A avaliação preliminar do desempenho ambiental do sistema de produção da canola por meio da ACV, identificou maior contribuição de processos associados à produção de fertilizantes, principalmente nitrogenados, para impactos ambientais potenciais. A mesma tendência foi observada para as categorias de impacto relacionadas à pegada de carbono da “canola tropical”, sendo influenciada pelos fertilizantes. A fertilização nitrogenada com ureia consolidou-se como o principal *hotspot* ambiental, respondendo pela maior parcela das emissões de gases de efeito estufa CO₂eq. Assim sendo, o desempenho ambiental do sistema demonstra relação com o uso eficiente do nitrogênio e à adoção de tecnologias que mitiguem as emissões na fase agrícola, com um cenário potencialmente positivo para o uso de bioinsumos com menor impacto ambiental.

Para a consolidação da canola como uma alternativa viável de “safrinha” no Brasil Central, faz-se necessário o desenvolvimento de programas de melhoramento genético focados na tolerância ao calor e ao estresse hídrico, visando elevar o patamar produtivo médio para acima de 2.000 kg/ha. Simultaneamente, a otimização dos custos de produção e o manejo eficiente de fertilizantes são pré-requisitos para garantir margens econômicas positivas e reduzir o impacto ambiental da cultura.

Referências

ABNT. ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR ISO 14040**: Gestão ambiental - Avaliação do ciclo de vida - Princípios e estrutura. 2. ed. Rio de Janeiro, 2009.

Araújo, L. N.; Rosado, T. B.; Rodrigues, E. V.; Santos, A.; Laviola, B. G. Tropicalization of canola: commercial hybrids show potential for cultivation in the Brazilian Cerrado. **Revista de la Facultad de Ciencias Agrarias UNCuyo**, v. 53, n. 2, p. 20–26, 2021. DOI: <https://doi.org/10.48162/rev.39.035>. Disponível em: <https://revistas.uncu.edu.ar/ojs3/index.php/RFCA/article/view/4471>. Acesso em: 9 fev. 2026.

Bolakhe, K.; Yu, T. E.; Sykes, V. R.; Smith, S. A.; Boyer, C. N. Assessing a sustainable aviation fuel supply chain from winter canola and its carbon intensity considering feedstock yield variations. **Renewable Energy**, v. 261, 2026. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.renene.2026.125291>.

Candido, W. S.; Laviola, B. G.; Guimarães, C. G.; Rodrigues, E. V.; Nunes, V. R.; Camargo, J. P. P. A. Genetic parameters and selection of genotypes in rapeseed (*Brassica napus*) populations segregants by REML/BLUP in the Brazilian Cerrado. **Australian Journal of Crop Science**, 2025. DOI: <https://doi.org/10.21475/ajcs.25.19.07.p335>.

Cardoso, A. C.; Laviola, B. G.; Lamas, G. C.; Silveira, E. A.; Scarantti, V. Atualização do inventário do ciclo de vida para o cultivo da canola na região sul do Brasil. In: SIMPÓSIO LATINO AMERICANO DE CANOLA, 3., 2025, Alto Paraná. **Anais [...]**. Três de Maio: Setrem, 2025. No prelo.

CANOLA COUNCIL. **Industry Overview**. Disponível em: <https://www.canolacouncil.org/about-canola/industry/>. Acesso em: 28 jan. 2026.

CONAB. COMPANHIA NACIONAL DE ABASTECIMENTO. **Acompanhamento da safra brasileira**: Grãos, safra 2025/2026, 4º levantamento. Brasília, DF: Conab, 2026a. Disponível em: <https://www.gov.br/conab/pt-br/atuacao/informacoes-agropecuarias/safras/safra-de-graos/boletim-da-safra-de-graos/4o-levantamento-safra-2025-26/>. Acesso em: 4 fev. 2026.

_____. **5º Levantamento - Safra 2025/26**. Brasília, DF: Conab, 2026b. Disponível em: <https://www.gov.br/conab/pt-br/atuacao/informacoes-agropecuarias/safras/safra-de-graos/boletim-da-safra-de-graos/5o-levantamento-safra-2025-26/>. Acesso em: 19 fev. 2026.

De Mori, C.; Tomm, G. O.; Ernani, P.; Ferreira, P. **Aspectos econômicos e conjunturais da cultura da canola no mundo e no Brasil**. Passo Fundo: Embrapa Trigo, 2014. (Documentos Online, 149). Disponível em: <https://www.infoteca.cnptia.embrapa.br/handle/doc/988475>. Acesso em: 4 fev. 2026.

Guimarães, C. G.; Santos, A.; Rodrigues, E. V.; Laviola, B. G. **Canola: panorama atual e tecnologias de produção no Brasil**. Brasília, DF: Embrapa, 2022. (Documentos, 40). Disponível em: <https://www.embrapa.br/busca-de-publicacoes/-/publicacao/1140176/canola-panorama-atual-e-tecnologias-de-producao-no-brasil>. Acesso em: 28 jan. 2026.

Gurgel, A. C.; Seabra, J. E. A.; Arantes, S. M.; Moreira, M. M. R.; Lynd, L. R.; Galindo, R. Contribution of double-cropped maize ethanol in Brazil to sustainable development. **Nature Sustainability**, v. 7, p. 1429–1440, 2024. DOI: <https://doi.org/10.1038/s41893-024-01424-5>. Disponível em: <https://www.nature.com/articles/s41893-024-01424-5>. Acesso em: 11 fev. 2026.

IATA. INTERNATIONAL AIR TRANSPORT ASSOCIATION. **Annual Review 2024**. Montreal: IATA, 2024. Disponível em: <https://www.iata.org/contentassets/c81222d96c9a4e0bb4ff6ced0126f0bb/iata-annual-review-2024.pdf>. Acesso em: 21 fev. 2026.

_____. **Annual Review 2025**. Montreal: IATA, 2025. Disponível em: <https://www.iata.org/en/publications/annual-review/>. Acesso em: 21 fev. 2026.

_____. **Net Zero CO₂ Emissions Roadmap**. Montreal: IATA Sustainability and Economics, set. 2024. Disponível em: <https://www.iata.org>. Acesso em: 21 fev. 2026.

IBICT. INSTITUTO BRASILEIRO DE INFORMAÇÃO EM CIÊNCIA E TECNOLOGIA; MCTI. **Banco Nacional de Inventários do Ciclo de Vida de Produtos Brasileiros - SICV Brasil**. Brasília, DF: Ibict, [2026]. Disponível em: <https://sicv.acv.ibict.br>. Acesso em: 21 jan. 2026.

ICAO. INTERNATIONAL CIVIL AVIATION ORGANIZATION. **SAF Conversion Process**. Montreal: ICAO, [2026]. Disponível em: <https://www.icao.int/SAF/saf-conversion-processes>. Acesso em: 19 fev. 2026.

_____. **Sustainability Criteria for CORSIA Eligible Fuels**. Montreal: ICAO, jun. 2025. Disponível em: <https://www.icao.int/sites/default/files/environmental-protection/CORSIA/Documents/CORSIA%20Eligible%20Fuels/ICAO-document-05-Sustainability-Criteria-June-2025.pdf>. Acesso em: 21 fev. 2026.

Lamas, G. C.; Cardoso, A. C.; Sabaini, P. S.; Luz, S. M.; Borges, M. R. S.; Costa, T. S.; Gonzales, T. S.; Matsuura, M. I. S. F.; Laviola, B. G.; Rodrigues, T. O.; Rousset, P.; Silveira, E. A. Energy–environmental nexus in green hydrogen-assisted conversion of second-crop canola to sustainable aviation fuel: Toward low-carbon bioenergy systems. **Biomass and Bioenergy**, v. 211, 2026. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.biombioe.2026.109149>.

Laviola, B. G.; Rodrigues, E. V.; Santos, A. et al. Breeding strategies to consolidate canola among the main crops for biofuels. **Euphytica**, v. 218, n. 1, 2022. DOI: <https://doi.org/10.1007/s10681-021-02955-0>.

Nonnemberg, M. J. B.; Martins, M. M. V.; Cechin, A.; Vianna, R. S.; Cruz, C. C. P.; Silva, F. A.; Bispo, S. Q. A.; Santos, F. E. L. A. **Efeitos da lei europeia contra o desmatamento sobre as exportações brasileiras**. Brasília, DF: Ipea, 2025. Disponível em: <https://repositorio.ipea.gov.br/entities/publication/41549cf6-3f8c-4678-8ffa-ca873fdc5a8b>. Acesso em: 28 jan. 2026.

Panozzo, L. E.; Zuchi, J.; Silva, F. D.; Pinto, L. B.; Dias, D. C. F. S.; Barros, W. S.; Tømm, G. O. Evaluation of some hybrids of canola in function of sowing dates in Viçosa, MG, Brazil. **African Journal of Agricultural Research**, v. 9, n. 32, p. 2488-2494, 2014. DOI: <https://doi.org/10.5897/AJAR2014.8876>.

Town, J. R.; Dumonceaux, T.; Tidemann, B.; Helgason, B. L. Crop rotation significantly influences the composition of soil, rhizosphere, and root microbiota in canola (*Brassica napus* L.). **Environmental Microbiome**, v. 18, n. 40, 2023. DOI: <https://doi.org/10.1186/s40793-023-00495-9>.

Ukaew, S.; Shi, R.; Lee, J. H.; Archer, D. W.; Pearlson, M.; Lewis, K. C.; Bregni, L.; Shonnard, D. R. Full chain life cycle assessment of greenhouse gases and energy demand for canola-derived jet fuel in North Dakota, United States. **ACS Sustainable Chemistry & Engineering**, v. 4, p. 2771-2779, 2016. Disponível em: <https://pubs.acs.org/doi/abs/10.1021/acssuschemeng.6b00276>. Acesso em: 28 jan. 2026.

Umeh, S. I.; Okonkwo, P. A. The Essential Properties of Oils for Biodiesel Production. In: **Biodiesel Plants – Fueling the Sustainable Outlooks**. [s. l.]: IntechOpen, 2025. cap. 1. DOI: <http://dx.doi.org/10.5772/intechopen.1008694>.

USDA. UNITED STATES DEPARTMENT OF AGRICULTURE. **Oilseeds: World Markets and Trade**. Washington: USDA, 2026. Disponível em: <https://www.fas.usda.gov/sites/default/files/2025-12/oilseeds.pdf>. Acesso em: 9 fev. 2026.