

BIODIESEL NO BRASIL

REFLEXÕES SOBRE O POTENCIAL
DAS PRINCIPAIS MATÉRIAS-PRIMAS



Embrapa

*Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária
Embrapa Soja
Ministério da Agricultura e Pecuária*

BIODIESEL NO BRASIL

REFLEXÕES SOBRE O POTENCIAL
DAS PRINCIPAIS MATÉRIAS-PRIMAS

*César de Castro
Marcelo Hiroshi Hirakuri
Fábio Alvares de Oliveira
Ruan Francisco Firmano
Marcelo Álvares de Oliveira
José Carlos Fialho de Resende
Alexandre Magno Brighenti*

Embrapa
Brasília, DF
2025

Embrapa

Parque Estação Biológica
Av. W3 Norte (final)
70770-901 Brasília, DF
www.embrapa.br
www.embrapa.br/fale-conosco/sac

Responsável pelo conteúdo e editoração

Embrapa Soja
Rod. Carlos João Strass, s/n
Acesso Orlando Amaral,
Caixa Postal 4006, CEP 86085981
Distrito da Warta, Londrina, PR
www.embrapa.br/soja

Comitê Local de Publicações

Presidente: *Roberta Aparecida Carnevalli*

Secretária-executiva: *Regina Maria Villas Bôas de Campos Leite*

Membros: *Clara Beatriz Hoffmann-Campo, Claudine Dinali Santos Seixas, Claudio Guilherme Portela de Carvalho, Fernando Augusto Henning, Leandro Eugênio Cardamone Diniz, Liliane Márcia Mertz-Henning, Maria Cristina Neves de Oliveira e Norman Neumaier*

1ª edição

1ª impressão (2025): 1.000 exemplares

Todos os direitos reservados

A reprodução não autorizada desta publicação, no todo ou em parte, constitui violação dos direitos autorais (Lei nº 9.610).

Dados Internacionais de Catalogação na Publicação (CIP)

Embrapa Soja

Edição executiva

Vanessa Fuzinatto Dall'Agnol

Revisão de texto

Regina Maria Villas Bôas de Campos Leite

Normalização

Valéria de Fátima Cardoso

Projeto gráfico

Vanessa Fuzinatto Dall'Agnol

Diagramação

Vanessa Fuzinatto Dall'Agnol

Capa

Eliane Hayami (montagem)

Fotos da capa: *Eliane Hayami* (foto central); *Nilton Tadeu Vilela Junqueira* (dendê e macaúba); *Joseani Antunes* (canola); *César de Castro* (girassol e soja); *Ruan Francisco Firmano* (algodão e milho).

Biodiesel no Brasil : reflexões sobre o potencial das principais matérias-primas /

César de Castro... [et al.] – Brasília, DF : Embrapa, 2025.

173 p. : il. color. 16 cm x 22 cm

ISBN

1. Biocombustível. 2. Biodiesel. 3. Agroenergia. I. Castro, César de. II. Hirakuri, Marcelo Hiroshi. III. Oliveira, Fábio Alvares de. IV. Firmano, Ruan Francisco. V. Oliveira, Marcelo Álvares de. VI. Resende, José Carlos Fialho de. VII. Brighenti, Alexandre Magno.

CDD (21. ed.) 662.669

338.16

AUTORES

César de Castro

Engenheiro-agrônomo, doutor em Solos e Nutrição de Plantas, pesquisador da Embrapa Soja, Londrina, PR.

Marcelo Hiroshi Hirakuri

Cientista da computação e administrador, mestre em Ciência da Computação, analista da Embrapa Soja, Londrina, PR.

Fábio Alvares de Oliveira

Engenheiro-agrônomo, doutor em Solos e Nutrição de Plantas, pesquisador da Embrapa Soja, Londrina, PR.

Ruan Francisco Firmano

Engenheiro-agrônomo, doutor em Solos e Nutrição de Plantas, bolsista de Desenvolvimento Tecnológico e Industrial (DTI-C) do CNPq/Embrapa Soja, Londrina, PR.

José Carlos Fialho de Resende

Engenheiro-agrônomo, doutor em Ciências - Energia Nuclear na Agricultura, pesquisador da Epamig Norte, Montes Claros, MG.

Marcelo Álvares de Oliveira

Engenheiro-agrônomo, doutor em Agronomia, pesquisador da Embrapa Soja, Londrina, PR.

Alexandre Magno Brighenti

Engenheiro-agrônomo, doutor em Fitotecnia, pesquisador da Embrapa Gado de Leite, Juiz de Fora, MG.



APRESENTAÇÃO

Esta publicação nasceu das preocupações com o programa de bioenergia e, particularmente, com as discussões sobre matérias-primas e a importância de tomar decisões conscientes para fortalecer o setor. É também oportuna em um momento em que o mundo discute o aumento da produção de energia via fontes renováveis, sustentáveis e com impactos ambientais mitigados.

Ao final da 28ª Conferência do Clima da Organização das Nações Unidas – COP 28, foi proposto e aprovado por 195 países, pela primeira vez em 30 anos, que o mundo encaminhe a “transição para o fim dos combustíveis fósseis” e que medidas sejam implementadas para transformar o acordo em ações tangíveis.

Encaminhar esta transição não será uma tarefa simples, devido a fatores de viabilidade econômica, questões geopolíticas e de adequação das cadeias energéticas alternativas. A extração de combustíveis fósseis ainda é mais barata que a produção de biocombustíveis e existem, ainda, muitas reservas, que são estratégicas para alguns países. Por outro lado, além das culturas que representam a quase totalidade do atendimento da atual demanda mundial por óleos, poucas apresentam real potencial de crescimento.

O biodiesel no Brasil tem como principal matéria-prima a soja, mas o país dispõe de espécies nativas e introduzidas que poderiam diversificar essa base. Para tanto, é crucial que governo, instituições de ensino e pesquisa coordenem esforços contínuos de melhoramento genético e manejo, transformando essas possibilidades em realidade.

Além de suas potencialidades, a soja tem demonstrado notável aumento na produtividade e na capacidade de ocupar áreas marginais. Com isso, reforça seu papel de “espécie pioneira”, facilitando a introdução de outras culturas em sistemas de sucessão ou rotação, em diversas condições edafoclimáticas.

Alexandre Lima Nepomuceno
Chefe-Geral da Embrapa Soja

PREFÁCIO

O universo visível tem aproximadamente 93 bilhões de anos-luz de diâmetro. O universo total, por sua vez, pode se estender muito além do que conseguimos observar, sendo potencialmente muito maior – ou até infinito. No entanto, essa questão ainda é alvo de debates científicos, filosóficos e, em alguns casos, até religiosos. Essa teoria do Big Bang é, de fato, um pouquinho complexa e polêmica. Em contraste com essa vastidão cósmica, o objeto mais distante já enviado para o espaço pela humanidade foi a sonda Voyager 1, lançada pela NASA em 1977. Atualmente, ela está a mais de 24 bilhões de quilômetros da terra, tendo ultrapassado a heliosfera – mas essa distância equivale somente a ~0,0022 anos-luz. Os humanos, por sua vez, não foram além da Lua, que é logo ali. A maior distância alcançada por astronautas ocorreu durante as missões Apollo, com a Apollo 13 atingindo aproximadamente 400 mil quilômetros da terra – uma distância insignificante em termos cósmicos, correspondendo a apenas $4,23 \times 10^{-8}$ anos-luz. Ou seja, não chegamos nem perto de “arranhar a crosta do universo” e, ainda assim, muitos acreditam já ter entendido tudo.

Apesar da aparente infinitude do cosmos, habitamos em um “Pálido Ponto Azul”, uma pequena esfera que abriga pouco mais de 8 bilhões de almas. Dessas, muitas ainda enfrentam a fome – não por uma escassez global de alimentos, como previam teorias malthusianas, mas devido a questões geopolíticas e ao desconhecimento agrônomico. Em muitos casos, a simples aplicação de fertilizantes ou a introdução de espécies e variedades mais adaptadas poderia transformar significativamente essa realidade. Mesmo assim, apesar da fome calórica, proteica ou a fome oculta de micronutrientes e de vitaminas, grande parte do problema não é a falta de alimentos no mundo, per se, mas sim o acesso universal à segurança alimentar, no sentido lato da definição e, mais especificamente, à segurança nutricional.

Embora a necessidade de aumentar a produção de alimentos per capita seja inegável, a verdade é que o mundo também enfrenta uma crescente demanda por energia – com apagões ocorrendo em algumas regiões. A magnitude dessa “fome energética” é evidenciada pela dependência das sociedades modernas de múltiplas formas e fontes de energia. Para exemplificar, somente para atender as necessidades metabólicas e garantir o funcionamento adequado do organismo, um humano deveria ter uma ingestão calórica em média, de 2.500 kcal por dia. Muitos, porém, não conseguem sequer atingir esse valor.

Em regiões mais pobres, especialmente em áreas rurais de países em desenvolvimento, a lenha e o esterco seco, por vezes misturados a outros materiais, ainda são utilizados como fontes de energia, sobretudo em locais onde o acesso aos combustíveis fósseis ou à eletricidade é limitado. No entanto, o uso desses combustíveis para cozinhar e aquecer as casas pode causar problemas de saúde devido à má qualidade do ar em ambientes fechados. Por outro lado, nas sociedades mais ricas, a demanda energética provém de diferentes fontes, e mesmo que algumas não sejam consideradas limpas, não causam problemas diretos à saúde dos usuários. Além do mais, nestas sociedades a energia consumida é utilizada prioritariamente para a produção de bens de consumo, transporte, aquecimento, refrigeração, aviação, equipamentos eletrônicos, iluminação elétrica, além da defesa – representando 92% do consumo global de energia. Em contraste, a energia destinada à produção e cocção de alimentos representa apenas 8% da energia mundial.

Ou seja, apesar de serem mundos e necessidades distintas, a tendência é de que todos deveriam usufruir dos mesmos confortos da vida moderna. Afinal, mesmo que difícil, não é justo a persistência de tanta desigualdade. Essas duas realidades, diametralmente opostas – uma lutando por combustíveis básicos e o outra por mais energia para “mover” tecnologias avançadas, limpas e sustentáveis – revelam uma disparidade brutal que, embora difícil de resolver, expõe uma assimetria social dolorosa. Mesmo que seja difícil sentir, sinceramente, a dor dos outros, ou sofrer pelo que não se pode ver, esta realidade traz à tona uma premência que não deveríamos ignorar.

Assim, o aumento progressivo da demanda energética, impulsionado pelo crescimento global, aliado à consciência da sociedade em relação às mudanças climáticas, exige soluções inovadoras e cria oportunidades para a bioeconomia de fontes renováveis, como os biocombustíveis, ao mesmo tempo que se intensifica a urgência por descarbonizar o planeta. Nesse contexto, a bioenergia pode ter um papel crucial na diversificação das opções energéticas, especialmente para o Brasil, apresentando-se como uma das alternativas mais limpas e sustentáveis, além de contribuir para a mitigação das mudanças climáticas.

Diante deste cenário, esta obra reúne informações atualizadas e analisa algumas culturas alternativas e potenciais fontes bioenergéticas, como a camelina e a macaúba, mas com ênfase no papel central da soja na produção de biodiesel no Brasil e sua relação direta com cadeias de outros materiais graxos (gorduras bovina, suína e de frango), além do óleo de fritura, destacando a soja como cultura-chave na produção de bioenergia. Em face do exposto, percebe-se, de forma inequívoca, a grande importância da soja no mercado de biocombustíveis, seja para veículos terrestres ou, no futuro, para combustível sustentável de aviação.

Entretanto, para aqueles que, inocentemente, imaginam que a commodity soja seja utilizada apenas como matéria-prima para ração animal ou que não deveria ocupar áreas agrícolas para compor o pool de fontes vegetais para a produção de biocombustíveis, vale a pena se atentar para a ubiquidade dessa leguminosa na vida moderna. O grão se presta como matéria-prima constituinte de uma diversidade enorme de produtos derivados de alto valor agregado, desde um singelo batom, carnes de frango, suínos, bovinos, leite, ovos e aplicações industriais entre outras, fornecendo proteína, lubrificantes e energia de qualidade e, até mesmo, combustível de aviação.

Embora a soja desempenhe um papel importante no sistema agroalimentar moderno e esteja presente em inúmeros aspectos da vida cotidiana, muitas vezes é vista como um fardo para a sociedade e o meio ambiente. Além disso, permanece praticamente invisível – ou até intencionalmente ocultada – dos consumidores finais. Ainda assim, a produção de soja avança lado a lado com a geração de alimentos e energia, alimentando e empregando, direta ou indiretamente, milhões de pessoas ao redor do mundo.

Bom, se você chegou até aqui, vale a pena ler, amiúde, o restante da publicação.

Os Autores

SUMÁRIO

Introdução	12
Programa de Produção de Biodiesel no Brasil.....	15
Considerações sobre fontes fósseis de energia.....	19
Biocombustíveis como fonte renovável alternativa de energia	26
Matérias-primas para a produção de óleo no mundo	29
Áreas potenciais para produzir culturas energéticas no mundo	33
As principais fontes de óleo no Brasil	35
Alternativas para a produção de biodiesel.....	43
Culturas potenciais para a produção de biodiesel	47
Questionamentos para a escolha de novas matérias-primas.....	58
Estudos de casos	60
Importância da soja para o Brasil	80
Por que a produção de biodiesel depende da soja?.....	91
Custos do óleo de soja para a produção de biodiesel.....	101
Composição de ácidos graxos e características desejáveis do biodiesel.....	108
A soja alto oleica	113
Óleo alto oleico para cocção e indústria de alimento	115
Óleo alto oleico para a indústria de bioenergia	121
Considerações finais	125
Epílogo	126
Referências	128
Apêndice: Algumas definições e considerações sobre combustíveis.....	163
Índice remissivo	165

INTRODUÇÃO

As sociedades modernas demonstram uma crescente necessidade por energia, sobretudo por fontes sustentáveis. O aumento brutal da demanda energética, impulsionado pelo desenvolvimento global, exige soluções inovadoras e cria oportunidades para fontes renováveis, como os biocombustíveis. Ao mesmo tempo, intensifica a urgência por descarbonizar o planeta. Como aponta Pinker (2018), na ausência de precificação do carbono, os combustíveis fósseis possuem uma vantagem significativa sobre as fontes alternativas devido à sua abundância, portabilidade e densidade energética. Apesar disso, a bioenergia pode ter um papel crucial na diversificação das opções energéticas do Brasil, apresentando-se como uma das alternativas mais limpas e sustentáveis, além de contribuir para a mitigação das mudanças climáticas.

Esta obra analisa alguns aspectos do programa de biodiesel, com foco na produção de matérias-primas, sendo voltado para o público especializado e a academia. Além disso, faz um alerta a órgãos reguladores e instituições de pesquisa sobre a necessidade de decisões estratégicas e da alocação eficiente dos limitados recursos financeiros, com o objetivo de formular uma agenda política e agrícola que fortaleça o setor.

A publicação destaca que muitas das propostas recentes já foram discutidas anteriormente e que matérias-primas hoje consideradas inovadoras já eram mencionadas há décadas. A abordagem, no entanto, permanece essencialmente a mesma, concentrando-se nas vantagens e potencialidades das culturas sem a devida comprovação agrônômica. Dessa forma, é fundamental adotar culturas de alta produtividade, preferencialmente com elevado teor de óleo, que atendam aos critérios de baixas emissões ao longo de seu ciclo de vida e que sejam compatíveis com práticas de manejo sustentável do solo.

Nossa preocupação é que, na busca por alternativas à soja para a produção de biodiesel, sejam feitas novas apostas ou promessas, como o pinhão-manso e a mamona, que possam ser incentivadas à adoção, sem avaliações agrônômicas adequadas. Isso pode comprometer, ou até inviabilizar, a capacidade de agricultores e empresários de tomar decisões fundamentadas e investir de forma eficaz nessas iniciativas.

Uma estratégia para explorar novas fontes é aproveitar a dinâmica de crescimento da cadeia da soja, baseada em estudos agrônômicos duradouros, laboratoriais, genéticos e biotecnológicos, entre outros, para aplicar abordagens semelhantes a outras culturas potenciais. Isso significa iniciar com estudos fitotécnicos, para depois avançar com pesquisas biotecnológicas e, por fim, a divulgação.

Para a elaboração do documento, foram consultados estudos científicos, relatórios e documentos oficiais de diversas fontes, incluindo a Agência Nacional do Petróleo, Gás Natural e Biocombustíveis (ANP), a Companhia Nacional de Abastecimento (Conab), o Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística (IBGE), o Departamento de Agricultura dos Estados Unidos (USDA), a Organização das Nações Unidas para a Alimentação e a Agricultura (FAO) e a Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária (Embrapa), além da experiência dos autores.

Com base nas informações discutidas, conclui-se que a soja continuará a ser a principal matéria-prima para a produção de biodiesel no Brasil por um longo período. Contudo, outras culturas também apresentam potencial para contribuir para o programa, especialmente se forem alvo de investimentos significativos e contínuos, de maneira similar ao que ocorreu com a soja.



PROGRAMA DE PRODUÇÃO DE BIODIESEL NO BRASIL

Se você conseguir descrever um problema de forma clara, o problema estará parcialmente resolvido.

Princípio da clareza, tida como Lei de Kidlin.

O Brasil é um dos principais supridores mundiais de produtos agropecuários, com destaque para soja, café, citros, carne e cana-de-açúcar (álcool e açúcar) (Brasil, 2023a; Estados Unidos, 2024a). Contudo, mesmo com uma cadeia sucroalcooleira modelo, as políticas para produção e uso de biocombustíveis precisam melhorar a estratégia de desenvolvimento mercadológico. Para expansão de mercado, tanto interna quanto externa, é fundamental considerar questões como volume de produção, dispersão dos cultivos no território nacional e logística das matérias-primas e biocombustível (armazenamento, distribuição e portos).

O Programa Nacional de Produção e Uso do Biodiesel (PNPB) foi criado em 2004 (Brasil, 2023b) para ser uma das estrelas do primeiro governo Lula. A exemplo do etanol, que é empregado em motores do ciclo Otto, o objetivo foi transformar o biodiesel em um substituto ao diesel fóssil, renovável e com menor impacto ambiental para utilização em motores do ciclo Diesel. Além disso, a produção de maior diversidade de espécies oleaginosas foi incentivada, com objetivo de promover a agricultura familiar, gerar novos empregos no campo e projetar o Brasil como protagonista mundial na área de combustíveis alternativos.

Desde o início do programa, a produção cresceu, principalmente em capacidade instalada, e o número de investidores multiplicou. No entanto, muitas empresas de biodiesel, com diferentes escalas produtivas, fecharam as portas por erros estratégicos e logísticos, geralmente associado às escolhas equivocadas de fontes de matérias-primas com suposto potencial de atender com regularidade e volume a capacidade instalada de processamento destas indústrias.

Entre algumas usinas que entregaram biodiesel em 2008 e/ou 2009, mas não o fizeram em 2020 e 2021, estão: Agropalma, Agrenco, Agrosoja, Araguassu, B-100 (Biominas), Biotins, Barrálcool, Biobras (Renobras), Biocapital, Bracol, Bioverde, Brasil Ecodiesel, CLV Agrodiesel, Comanche, DVH Chemical, Fertibom, Ouro Verde e SPBio (Agência Nacional do Petróleo, Gás Natural e Biocombustíveis, 2022). Entre aquelas que conti-

nuaram a operar estão: ADM, Amazonbio, Bianchini, Binatural, Bio Óleo, BSBIOS, Caimense, Caramuru, Cesbra, Fiagril, Cargill e Oleoplan.

Diversos empreendimentos foram instalados no Brasil, desde o Rio Grande do Sul até o Ceará, inclusive em regiões que não produziam matérias-primas em larga escala para a produção de biodiesel. Além disso, muitos desses projetos investiram em culturas que enfrentam um ou mais dos seguintes desafios: falta de conhecimento técnico sobre o cultivo, ausência de uma cadeia produtiva estruturada e deficiência no suporte técnico adequado.

Um exemplo de fracasso visceral é a Soyminas, primeira usina brasileira de biodiesel a operar comercialmente. Inaugurada em Cássia (MG), no ano de 2005, para produzir biodiesel a partir de óleo de girassol, soja e até nabo forrageiro, a empresa sequer sobreviveu ao começo do PNPB, paralisando sua produção em 2009 (Rodrigues, 2009; Tavares, 2011).

O RenovaBio é uma política do Ministério de Minas e Energia (MME), lançada em 2016 e instituída pela Lei nº 13.576/2017, com o objetivo de promover a expansão adequada da produção e uso de biocombustíveis na matriz energética brasileira. Esta política tem ênfase na regularidade do fornecimento de combustíveis para aumentar a eficiência energética do setor produtivo de biocombustíveis e contribuir com a redução das emissões de gases de efeito estufa (GEE) (Agência Nacional do Petróleo, Gás Natural e Biocombustíveis, 2023a).

Outra preocupação é a determinação da eficiência energética dos biocombustíveis. Para isso, foi desenvolvida a ferramenta oficial RenovaCalc, que permite a geração da Nota de Eficiência Energético-Ambiental e a obtenção de créditos de descarbonização (CBIOS) no âmbito da política Renovabio (Agência Nacional do Petróleo, Gás Natural e Biocombustíveis, 2020). A eficiência dos biocombustíveis é calculada usando a RenovaCalc (Matsuura et al., 2018). Um exemplo dos avanços no uso dessa ferramenta são os estudos de Ramos et al. (2023), que abordam a regionalização dos perfis típicos da produção de soja para aplicação no Renovabio.

Em 2024, apesar de o Brasil ter uma capacidade instalada de mais de ~14,6 milhões de m³/ano (Agência Nacional do Petróleo, Gás Natural e Biocombustíveis, 2024a), a produção brasileira de biodiesel alcançou ao redor de 9,7 milhões de m³. Com exceção da região Norte do Brasil, em todas as outras regiões as instalações industriais atendem às necessidades regionais. Embora este cenário demonstre o potencial de

produção de biodiesel (B 100) em solo nacional, também expõe uma ociosidade de aproximadamente 34% da capacidade instalada, a qual poderá implicar na postergação de investimentos e, até mesmo, risco de cancelamento da operação das empresas e de desocupação de postos de trabalho.

Cerca de 49% de todo óleo consumido no Brasil se destina a fins alimentares e 51% é direcionado para usos industriais (Estados Unidos, 2019). A produção de óleo vegetal, no Brasil, encontra-se fortemente baseada na cultura da soja (*Glycine max* L.). Outras oleaginosas tradicionais, como palma de óleo (*Elaeis guineensis* L.), algodão (*Gossypium hirsutum* L.), girassol (*Helianthus annuus* L.) e amendoim (*Arachis hypogaea* L.) participam minoritariamente do mercado brasileiro (Conab, 2024a).

Espera-se que a produção global de óleo vegetal se expanda em cerca de 1,5% ao ano entre 2018 e 2027 (OECD-FAO [...], 2018). Já o uso destes óleos vegetais tem projeção de expansão de 1,7% ao ano, globalmente, entre 2013 e 2050, a partir de uma linha de base de 165 milhões de toneladas, incluindo usos em alimentos, rações e biocombustíveis (Byerlee et al., 2017).

Dessa forma, caso a demanda por óleos não desacelere, o mundo necessitará de uma produção adicional média de 3,86 milhões de toneladas de óleo vegetal por ano. O consumo mundial de óleos vegetais foi previsto em 212,82 milhões de toneladas na safra 2022/2023, com um acréscimo da ordem de 4,3% em relação a 2021/2022 (Zeferrino; Ramos, 2023). Mantendo-se essas previsões e números, quais culturas poderiam atender esta demanda, como se daria o aumento da produção agrícola e do rendimento de óleo, e em que prazo?

Em meio ao sonho de impulsionar a transição da matriz energética para fontes renováveis e promover a descarbonização da economia mundial, algumas espécies vegetais têm sido repetidamente citadas como “ótimas” opções de matérias-primas para se produzir biodiesel: macaúba (*Acrocomia aculeata* (Jacq.) Lodd. Ex Mart.), pinhão-manso (*Jatropha curcas* L.), nabo forrageiro (*Raphanus sativus* L.), colza (*Brassica napus* L.), girassol, canola (*Brassica napus* L.), mamona (*Ricinus communis* L.), crambe (*Crambe abyssinica* L.), tabaco energético (*Nicotiana tabacum* L.) e, mais recentemente, carinata (*Brassica carinata* A. Braun), entre tantas outras.

O dendê (palma de óleo) é um caso especial, por ser responsável por 39,7% da produção mundial de óleo (óleo de palma e óleo de palmiste; palm oil + palm kernel), com tendência de expansão de área e crescimento da produção. Na safra 2022/2023,

a produção de óleo de palma e palmiste foi de 86,84 milhões de toneladas (Estados Unidos, 2025a). Os dois maiores produtores são a Indonésia e a Malásia, com 58,7% e 24,7% da produção, respectivamente, perfazendo 83,4% do total mundial (Zeferino; Ramos, 2023).

Apenas como exercício teórico, caso o aumento da demanda mundial por óleos vegetais fosse suprido apenas por esta cultura, com rendimento aproximado de 4,0 t/ha de óleo, seriam necessários 35,7 milhões de ha de terras adicionais entre 2020 e 2050 (Meijaard et al., 2020). Entretanto, apesar da tendência de crescimento da produção mundial de óleo de palma, as pressões, principalmente da União Europeia, face à alegada degradação do meio ambiente nos países produtores, torna esse mercado cada vez mais restrito ao consumo interno na Indonésia, aos mercados da Índia, China e outros países do Sudeste Asiático. No entanto, apesar das questões ambientais, a União Europeia é o terceiro maior importador de óleo de palma, com o consumo de 4,85 milhões de toneladas por ano (Estados Unidos, 2025a).

No Brasil, apesar das enormes possibilidades agrônômicas, características edafoclimáticas favoráveis, grande disponibilidade de área e possíveis vantagens comerciais, a expansão esbarra em outros fatores como tempo de maturação dos novos projetos, dificuldade de mão de obra, manejo da adubação, colheita e tratos culturais, entre outros. Além disso, os custos do empreendimento costumam ser elevados e o “payback”¹, um indicador financeiro de retorno do investimento, é alto.

Segundo Meijaard et al. (2020), se a adição, ao invés do dendê, proviesse apenas da soja, produzindo cerca de 0,7 t/ha de óleo, seriam necessários 204 milhões de hectare de terras adicionais. Na verdade, um pensamento estanque das necessidades de combustível ser atendido por uma só cultura não é adequado. Mesmo assim, utilizando-se padrões mais atuais de produtividade e teor de óleo na soja, a área necessária seria menor. Nesses cálculos, o teor de óleo normalmente considerado é de 18% e produtividade média mundial abaixo da verificada nos países onde deve ocorrer a expansão de área cultivada. No Brasil, o teor médio de óleo da soja é de 22,3%, conforme medições realizadas no Laboratório de Melhoramento da Embrapa Soja, podendo chegar a até 30% em casos extremos. Outra questão é produtividade média estimada na safra 2024/2025, de 3.530 kg/ha (Conab, 2025a), mas muitas lavouras comerciais alcançaram produtividades em torno de 5.000 kg/ha, refletindo os avanços tecnológicos no setor e as possibilidades da cultura.

¹ Métrica financeira que representa o período necessário para recuperar o investimento inicial.

Frequentemente, as algas são citadas como uma fonte potencial, com elevada capacidade de produção de óleo. Contudo, apesar de anos de pesquisa, as algas ainda não saíram dos laboratórios para se tornarem uma realidade ou ainda estão em fase de maturação tecnológica em grande escala. Para que todas as opções citadas se tornem viáveis, é necessário dominar o processo produtivo, eliminar gargalos de produção e uso e capacitar profissionais ao longo da cadeia de produção do biocombustível.

A grande complexidade das previsões reside no fato de que, quanto mais longo o horizonte temporal, maior a probabilidade de imprecisões. Inicialmente, as previsões são elaboradas segundo padrões estáticos para alguns fatores e dinâmicos para outros. Por exemplo, considera-se uma curva de crescimento populacional para estimar o consumo de óleo (um fator dinâmico) e a produtividade de determinada cultura como sendo um fator estático.

A propósito, com os avanços genéticos e da biotecnologia, além das melhorias nas práticas de manejo agrícola (como o do solo e das culturas), melhoria do ambiente de produção e outros fatores que influenciam o desenvolvimento das plantas, tudo indica que a produtividade de várias culturas continuará a crescer de forma sustentável.

CONSIDERAÇÕES SOBRE FONTES FÓSSEIS DE ENERGIA

Quase toda solução ou inovação traz, insidiosamente escondida, um novo problema.

Fontes de energia não renováveis são utilizadas pelo homem desde tempos imemoriais, de forma esporádica, mas dignas de nota (e.g. Torre de Babel e a Arca de Noé), sendo consideradas essenciais ao funcionamento no mundo moderno, a partir do século XIX. O petróleo, o gás e o carvão natural são exemplos de combustíveis fósseis não renováveis, formados a partir da decomposição de matéria orgânica ao longo de milhões de anos, sob pressão e calor intensos no subsolo da Terra. No entanto, toda a matéria orgânica convertida em fonte de energia tem sua origem na fotossíntese, um processo metabólico que incorpora o carbono atmosférico na estrutura dos vegetais. Assim, muitas das necessidades energéticas globais derivam, direta ou indiretamente, desse processo. Portanto, compreender os aspectos geológicos, históricos e agrônô-

micos relacionados à formação e utilização de fontes energéticas é fundamental para entender a necessidade de maior eficiência na conversão desses recursos em energia.

Apesar da importância do petróleo, existe uma relação conflitante entre os benefícios e malefícios às sociedades. As reservas mundiais recuperáveis de petróleo e de carvão, mensuradas em diferentes continentes, cresceram 3,3% em 2022, atingindo um total de 1,6 trilhão de barris (Reservas [...], 2023a, 2023b). O mesmo relatório da Engie ainda aponta para a adição de 84 bilhões de barris em 2022, sendo 13 bilhões de barris de novas descobertas e outros 71 bilhões de barris da revisão dos volumes de campos em produção ou projetos já aprovados.

Em 2022, o consumo mundial foi estimado em 30 bilhões de barris (Reservas [...], 2023b). De acordo com a reportagem do site EPBR (Reservas [...], 2023a), mesmo com a promoção de políticas públicas para a descarbonização da economia mundial com redução do consumo de combustíveis fósseis, a indústria do setor de óleo e gás continuará ativa e representativa nos próximos 30 anos.

Interessante observar que, feliz ou infelizmente – dependendo do ponto de vista – o petróleo ainda é abundante. A Terra é imensa, com aproximadamente 65 mil campos conhecidos de petróleo e gás, e as novas descobertas não param de acontecer (Lawton, 2016; Innocent, 2021). Exemplos próximos, ou mesmo dentro do Brasil, incluem as recentes descobertas no Atlântico Equatorial, especialmente na Bacia Guiana/Suriname (Kombrink, 2024; Teles, 2025), além da chamada "margem equatorial brasileira", que abrange a região litorânea dos Estados do Amapá, Pará, Maranhão, Piauí, Ceará e Rio Grande do Norte. Nessa área, há cinco bacias sedimentares que podem conter reservas de petróleo (Petrobras, 2023, c2024, c2025). Somente nas reservas offshore, desde a Venezuela até o Rio Grande do Norte, ainda há muito petróleo nessas bacias. Talvez seja um erro estratégico não explorar esses recursos. A inação nas decisões atuais sobre a exploração de petróleo remete aos aspectos abordados no livro *O Escândalo do Petróleo* (Lobato, 1936). Já naquela época, o autor alertava sobre o risco de o Brasil continuar refém do controle externo sobre um de seus recursos mais valiosos. Lobato defendia que o país deveria buscar maior independência no setor, com o objetivo de se apropriar de suas vastas riquezas naturais e promover o desenvolvimento econômico, o que teria reflexos diretos na melhoria da qualidade de vida da população.

No entanto, apesar dos volumes ainda existentes de petróleo e gás, há uma corrente de ideias que aposta na possibilidade do mundo se afastar do petróleo, embora ainda

exista muito petróleo e o Oriente Médio tenha baixo custo de exploração e o petróleo e/ou gás de xisto (fraturamento hidráulico) nos EUA seja uma realidade.

Neste cenário de reservas atuais de 1,6 trilhão de barris, mesmo com a redução no consumo de petróleo decorrente da maior eficiência dos novos equipamentos e motores a combustão, da maior eficiência nos transportes e do aumento do consumo de eletricidade, acelerado pelas políticas relativas às mudanças climáticas e pelo renascimento do carro elétrico, é coerente inferir que as reservas globais continuarão sendo exploradas por um período substancial de tempo, em função da sua importância do volume de reservas existentes e do custo de produção relativo mais baixo que as fontes alternativas atuais.

De acordo com a reportagem da *Rystad Energy* (Nysveen; Busby, 2024), a exploração de novas reservas de petróleo tem diminuído, à medida que investidores receiam que essas descobertas possam perder valor devido à crescente eletrificação dos veículos e à expectativa de queda na demanda e nos preços do petróleo bruto. Esse cenário, no entanto, envolve tanto aspectos concretos quanto especulativos.

Os veículos elétricos, em particular, podem ter um impacto significativo na redução da demanda por petróleo. Em outras palavras, avanços em áreas como eficiência energética, autonomia, velocidade de recarga, custo e segurança das baterias, confiabilidade, peso, valor de revenda dos veículos, descarte de baterias, dependência e exploração de lítio, bem como a expansão da infraestrutura de recarga, entre outros fatores, têm o potencial de influenciar diretamente a exploração e o consumo de petróleo.

Além dos carros elétricos, que não é uma ideia nova (The Horseless [...], 2003), outro fator que poderá influenciar as decisões sobre novos projetos de exploração de fontes fósseis é o avanço da energia solar fotovoltaica. Esse avanço não se restringe ao aumento da eficiência dos painéis solares na conversão de energia solar em eletricidade, mas também ao rápido crescimento do número de usinas fotovoltaicas, o que tem contribuído para a expansão da participação da energia solar na matriz elétrica, tanto em países desenvolvidos quanto em desenvolvimento.

Há uma enorme incerteza quanto às projeções de estagnação e redução do consumo de petróleo associadas às políticas de combate às mudanças climáticas e preservação ambiental. Vale destacar que o petróleo apresenta uma cadeia bem estabelecida, logística de distribuição e de produção e, ao contrário de outras fontes energéticas,

pode ser eficientemente armazenado e transportado a grandes distâncias. Assim, um questionamento que se pode fazer é se o consumo de petróleo irá estagnar e diminuir mais cedo do que geralmente se previa.

Como exemplo da magnitude do desafio de alterar a matriz energética global, no setor de transportes – responsável por 60% da demanda mundial de petróleo (Empresa de Pesquisa Energética, 2022) –, em 2021 havia cerca de 1,4 bilhão de veículos motorizados, sendo aproximadamente 1,2 bilhão de carros, SUVs, picapes e vans, e 200 milhões de ônibus e caminhões. Desses, menos de 17 milhões (cerca de 1,2%) eram elétricos, enquanto os demais ainda eram movidos a gasolina ou óleo diesel (Smil, 2023).

Não obstante o crescimento da frota de veículos elétricos ou mistos, os motores a diesel, com toda a sua “modernidade”, parecem estar aqui para ficar. Afinal, não existem alternativas que possam substituir, com a mesma acessibilidade, eficiência e confiabilidade, os motores a diesel, particularmente em setores tão exigentes como transporte de carga – onde caminhões, locomotivas e navios continuam a ser movidos com um combustível que, aparentemente, não cederá lugar tão facilmente. Nesse cenário, independentemente da origem, esses motores continuarão a precisar de algum tipo de combustível para se manter em funcionamento.

E, embora não tenhamos números exatos sobre quantos novos veículos foram produzidos e entregues ao mercado de 2022 até o momento, é seguro afirmar que o número foi considerável. Se a frota de veículos elétricos ainda está longe de substituir os motores a combustão, a frota global de veículos em circulação continua a expandir significativamente, sem grandes surpresas. Independentemente do combustível que alimenta esses veículos, essa expansão é acompanhada pela crescente rede de estradas – majoritariamente pavimentadas com “cimento asfáltico” – que continuam a ser o palco dessa mobilidade crescente e, em grande parte, resistente à mudança radical. Cimento asfáltico, é um derivado de petróleo que se obtém quando já se destilou todos os seus componentes destiláveis. Posteriormente, este cimento é misturado com pedra britada e aditivos, para produzir a camada que pavimenta a maioria das estradas.

No Brasil, poucas estradas são construídas com concreto (cimento Portland), sendo mais comum nos Estados Unidos. A propósito, aproximadamente de 5% a 8% das emissões antropogênicas globais de CO₂ são provenientes da produção de cimento (Richards; Agranovski, 2017; Farfan, et al., 2019; Estados Unidos, 2023; Fischetti et al., 2023; Rutkowski et al., 2024; Schwarcz, 2024). Portanto, a possível finitude do petró-

leo ou redução significativa de sua exploração ou de seu consumo obrigará a adoção de outras soluções mais sustentáveis para pavimentar ruas e estradas.

Mesmo para aqueles que buscam uma explicação mais poética, como a ideia de que “a Idade da Pedra não terminou por falta de pedras”, mas sim pelo domínio da metalurgia, esse raciocínio não se aplica ao petróleo. Portanto, é imprescindível, antes de tudo, dominar o processo produtivo das fontes alternativas, tornando-as eficientes, seguras e economicamente viáveis, para que a transição energética possa ser acelerada. Contudo, enquanto esse domínio não for alcançado, os combustíveis fósseis continuarão a ser utilizados e dificilmente serão completamente abandonados.

Embora o cenário dos campos de produção seja positivo ao petróleo, uma das determinações da 28ª Conferência do Clima da Organização das Nações Unidas (COP 28) propõe, pela primeira vez em 30 anos, que o mundo encaminhe a “transição para o fim dos combustíveis fósseis” e que medidas devem ser tomadas para converter o acordo em ações tangíveis. Efetivar esta transição não será uma tarefa fácil por motivos quase antagônicos, pois ainda há muitas reservas de combustíveis fósseis (petróleo, gás e carvão) em países industrializados e países pobres (Energy Institute, 2024).

Um aspecto que acirra este debate é que a principal origem desta determinação é a União Europeia, bloco que impõe normas ambientais externas restritivas, mas que flexibilizou normas ambientais internas em resposta aos protestos de seus agricultores, tendo como justificativa a segurança alimentar da sua população (Oliveira, 2024; Países [...], 2024; União [...], 2024). A geopolítica mundial é dinâmica e tem-se visto o aumento da importância dos países asiáticos, liderados pelo China em aliança com a Rússia e a Índia. Será que estes países e outras grandes nações mundiais, como Estados Unidos, Japão, Coreia do Sul e Indonésia seguirão, *ipsis litteris*, as determinações da União Europeia?

Independentemente do rumo que tomem as discussões globais, cabe aos governos - e, especialmente, aos órgãos de inteligência estratégica e às instituições de pesquisa - um esforço contínuo, consistente e profundo na avaliação de cenários, bem como no fomento à pesquisa, desenvolvimento e inovação. Esses esforços são fundamentais para viabilizar processos e cadeias produtivas que garantam a geração, distribuição e consumo de fontes alternativas de energia, apoiando, assim, inclusive os programas de mitigação das mudanças climáticas e a descarbonização da economia global.

No entanto, não podemos ignorar que decisões tomadas em fóruns como a COP 28, ou mesmo a COP 29, que ocorreu em novembro de 2024, não devem prejudicar os países emergentes e pobres, especialmente quando as mesmas regras não são aplicadas de forma equânime a todos. Mesmo considerando a relevância dos temas tratados, é um irônico paradoxo que aqueles que já industrializaram suas economias e degradaram o meio ambiente ao longo de décadas, ditem agora normas e exigências para os países em desenvolvimento, sem levar em conta o contexto histórico e as disparidades econômicas.

Afinal, se as definições da COP são, de fato, sérias, não deveria haver espaço para desvios de foco ou soluções fantasiosas. Nesse sentido, seria prudente considerar a implementação de um “ombudsman científico”, que deveria ser distinto de um “comitê de avaliação”. Sua função seria garantir que as propostas estivessem devidamente alinhadas com a solução real dos problemas – como, por exemplo, os biocombustíveis – assegurando que os recursos sejam direcionados de forma eficaz e pragmática, sem cair em soluções periféricas que não atendam ao contexto global emergente.



BIOCOMBUSTÍVEIS COMO FONTE RENOVÁVEL ALTERNATIVA DE ENERGIA

Mesmo quando os fatos são claros, muitas pessoas preferem aderir à lenda e rejeitam a verdade se ela contradisser ou prejudicar o mito.

John M. Brown

Há uma crescente demanda de energia, proveniente especialmente de petróleo, gás e carvão mineral, além do significativo consumo de lenha e carvão vegetal, para atender diferentes aspectos das necessidades humanas, ou mesmo industriais, em função do crescimento econômico e populacional.

Interessante notar que apesar de toda evolução tecnológica, o uso de madeira (lenha e carvão) ainda desempenha um importante papel na matriz energética (Metade [...], 2021), produzindo mais energia do que fontes como a solar, hidroelétrica ou eólica, representando ao redor de 40% do fornecimento global de energia renovável (FAO, 2008). Esta dependência é particularmente significativa em países em desenvolvimento (FAO, 2023). A demanda por biomassa, especialmente lenha, tem crescido à medida que aumenta o número de usinas para a produção de etanol de milho, por exemplo, uma indústria que depende fortemente de energia renovável. Tradicionalmente, a biomassa utilizada para esse fim é composta, em grande parte, por lenha proveniente de florestas plantadas, o que pode ser alinhado com os princípios da economia circular. Isso porque a biomassa, quando proveniente de fontes renováveis, como florestas manejadas, permite a reutilização de resíduos orgânicos e contribui para a redução da dependência de combustíveis fósseis. Assim, o uso de lenha se torna uma alternativa energética que não apenas apoia a produção industrial, mas também contribui para a transição para fontes de energia mais sustentáveis. Ou seja, uma fonte de energia renovável sendo utilizada para a produção de outra fonte renovável de energia.

A bioenergia oferece a oportunidade de reduzir as emissões de gases de efeito estufa, sendo os biocombustíveis uma peça importante na transição para uma economia de baixo carbono e possível diversificação das fontes energéticas, para a redução da dependência de combustíveis fósseis.

A eficiência na produção de bioenergia, bem como a avaliação abrangente dos componentes do sistema de produção e das culturas selecionadas, é crucial. Nesse con-

texto, o balanço energético e a análise do ciclo de vida podem desempenhar papéis decisivos.

Com base nos argumentos agrônômicos, técnicos, logísticos, socioeconômicos, comerciais e estratégicos apresentados, a soja é considerada a principal cultura para a produção de energia (biodiesel), proteína e alimentos no Brasil. Ademais, sua inserção nos diferentes sistemas de produção tem impulsionado a produtividade das demais culturas e responsáveis pela produção direta e indireta de outros alimentos, promovendo a diversificação da economia.

Dado o contexto atual de pressão para a redução do uso de fontes de energia fósseis, uma reflexão pertinente diante do quadro econômico mundial seria questionar se a demanda por proteínas alimentares não poderá, na verdade, ser superada pela crescente necessidade de fontes energéticas renováveis, tanto para o presente quanto para o futuro. Em termos de uso de áreas agrícolas, essas duas cadeias de produção — de alimentos e de energia — podem competir de maneira crescente, exigindo uma gestão cuidadosa dos recursos. A velocidade dessas transformações dependerá de diversos cenários, incluindo a evolução das sociedades, com variações nos índices de desenvolvimento humano (IDH), produto interno bruto (PIB), cultura e níveis de escolaridade.

Uma análise interessante sobre o aumento das necessidades humanas diz respeito ao consumo de energia ao longo do tempo. Um caçador-coletor, por exemplo, tinha um consumo diário estimado em torno de 1.900 kcal provenientes de alimentos colhidos e caçados. Em contraste, um ser humano no mundo ocidental moderno consome em média 196.000 kcal por dia (Lawton, 2016). Esse aumento brutal e crescente consumo de energia - fome energética -, especialmente proveniente de fontes fósseis, ocorre em diversos aspectos da vida moderna, indo muito além da produção de alimentos.

Atualmente, as principais demandas por energia são devidas à fabricação de bens de consumo, transporte pessoal, aquecimento, refrigeração e aviação, totalizando 79% do consumo energético. Contudo, a demanda por energia vital para o homem, como ocorria nas sociedades tradicionais, utilizada para a produção e cocção de alimentos, representa apenas 8% da energia mundial. Ainda são gastos mais 13% de energia com transporte de mercadorias, gasodutos e oleodutos, aparelhos eletrônicos, iluminação elétrica e defesa (Figura 1).

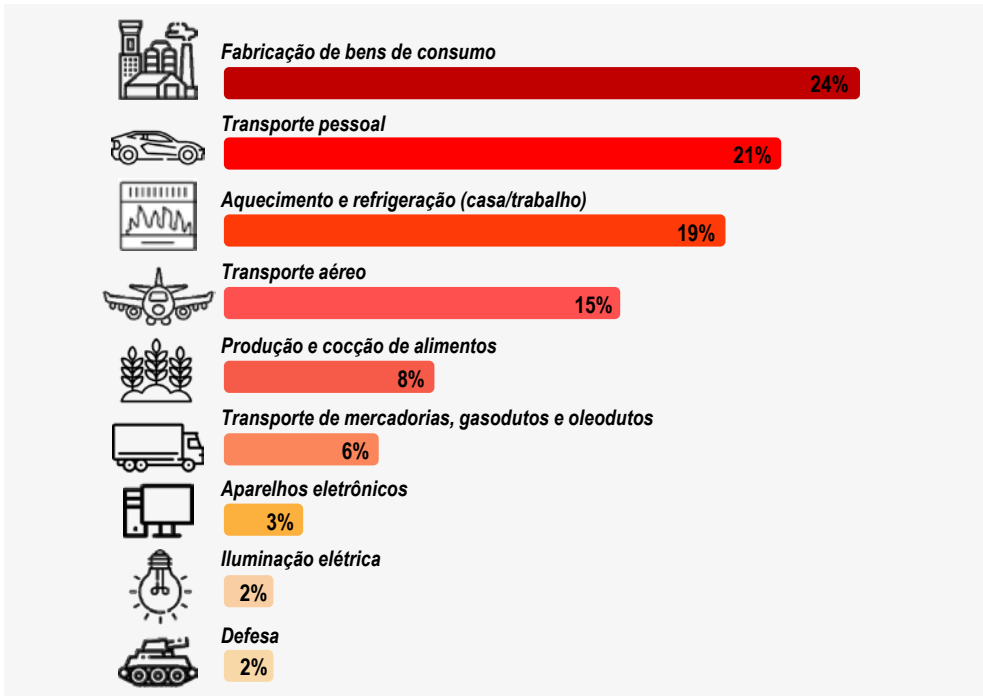


Figura 1. Principais destinos gerais do consumo da energia em percentagem na sociedade.

Fonte: adaptado de Lawton (2016).

Mesmo que esses números não sejam exatamente a expressão absoluta da verdade, sua ordem de grandeza evidencia a crescente dependência das sociedades modernas de todas as formas de energia. Essa dependência se reflete, por exemplo, nas imagens de satélite das cidades ao longo do tempo, especialmente em regiões que passaram por processos rápidos de urbanização. Embora tenha havido avanços significativos em tecnologias que aumentam a eficiência energética, não há indicações de que a demanda global de energia vá diminuir; pelo contrário, a tendência é de crescimento contínuo.

Embora já existam diversas fontes de energia em uso, algumas delas inovadoras, como a solar espacial e a geotérmica de alta entalpia – variações de modelos já conhecidos – essas fontes ainda estão em estágios iniciais de desenvolvimento e enfrentam desafios significativos, como limitações técnicas, questões ambientais e barreiras econômicas. Assim, o grande desafio da humanidade continua sendo encontrar uma fonte de energia abundante, limpa e sustentável, capaz de atender à crescente demanda global de forma duradoura.

Nesse contexto, a fusão nuclear surge como uma das soluções mais promissoras. Embora ainda existam enormes barreiras tecnológicas, a fusão nuclear — que busca replicar o processo de geração de energia que ocorre no interior das estrelas — tem o potencial de gerar enormes quantidades de energia de forma limpa e praticamente ilimitada. Se dominada de maneira eficiente, a fusão poderia ser a chave para o futuro energético do planeta, oferecendo uma solução capaz de atender à crescente demanda global sem as limitações e os impactos ambientais de muitas fontes de energia convencionais.

Entretanto, enquanto a fusão nuclear ainda está distante de se tornar uma realidade em larga escala, a bioenergia continua a desempenhar um papel essencial na transição para um sistema energético mais sustentável, com a soja assumindo um papel central na produção tanto de alimentos quanto de energia — como cultura de duplo propósito. Embora a bioenergia também enfrente desafios significativos, ela segue sendo uma solução crucial no curto e médio prazo, à medida que buscamos alternativas mais limpas e eficientes para a geração de energia e de proteínas.

MATÉRIAS-PRIMAS PARA A PRODUÇÃO DE ÓLEO NO MUNDO

Quando se trabalha na solução de um problema, sempre ajuda alguma coisa já saber a resposta.

Lei de Murphy, 1996.

As principais matérias-primas para a produção de óleo no mundo são a palma de óleo (dendê), a soja, a canola e o girassol. O óleo de dendê, extraído do mesocarpo, e o palmiste, extraído da amêndoa (semente), do mesmo fruto, representam quase 40% da produção mundial de óleo, enquanto a soja, a canola e o girassol suprem ao redor de 28%, 15% e 10% do mercado mundial de óleo, respectivamente (Tabela 1). Essas culturas juntas, correspondem a, aproximadamente, 92 % da produção mundial de óleos, principalmente por serem eficientes na conversão de energia luminosa em energia química, alicerçadas por décadas de pesquisa e experimentação agrônômica.

Tabela 1. Suprimento mundial de óleos vegetais, em milhões de toneladas, no período de 2015/2016 a 2024/2025.

Cultura (Óleo)	15/16	16/17	17/18	18/19	19/20	20/21	21/22	22/23	23/24	24/25*
	Milhões de toneladas									
Palma de óleo	58,86	65,26	70,58	73,11	73,11	73,37	73,17	76,63	76,26	79,63
Palmiste	7,02	7,62	8,25	8,59	8,51	8,43	8,24	8,75	8,67	9,08
Soja	51,64	53,84	55,23	56,04	58,55	60,06	60,05	59,67	62,80	66,25
Canola	27,37	27,60	28,13	27,79	28,34	29,44	29,17	33,25	34,39	34,11
Girassol	15,47	18,30	18,58	19,60	21,15	19,01	19,69	21,72	22,24	20,05
Amendoim	5,39	5,69	5,89	5,86	6,18	6,38	6,44	6,22	6,06	6,26
Algodão	4,24	4,37	5,10	4,97	5,02	4,84	4,80	4,89	4,97	5,09
Coco	3,22	3,30	3,56	3,63	3,61	3,58	3,73	3,72	3,90	3,65
Oliva	3,12	2,49	3,29	3,15	3,15	2,94	3,30	2,44	2,42	3,07
Total	176,34	188,49	198,60	203,87	207,62	208,03	208,60	217,29	221,69	227,18

* Estimativa jan, 2025.

Fonte: Estados Unidos (2024a).

A Figura 2, que apresenta as estimativas para a safra 2024/2025, evidencia a crescente importância dos óleos de palma e de soja como matérias-primas vegetais, bem como a contínua escalada de seu crescimento. As lavouras de dendê estão concentradas principalmente nas regiões próximas à linha do Equador, entre 5° de latitude Norte e 5° de latitude Sul, sendo a Indonésia responsável por quase 60% da produção mundial. Ainda assim, o Brasil possui vastas áreas com condições edafoclimáticas favoráveis à produção de dendê. Somando-se a produção da Indonésia à da Malásia, Nigéria e Tailândia, esse grupo passa a ser responsável por mais de 90% da produção global (Estados Unidos, 2025a).

Apesar das projeções de aumento da produção de dendê, as pressões por um modelo produtivo mais sustentável, sobretudo da União Europeia, podem impactar o futuro desse avanço. Observa-se na Figura 2 que o dendê (palma + palmiste), soja, canola e girassol apresentaram um crescimento acumulado na produção de óleo de 35%, 28%, 25% e 30%, respectivamente. No entanto, o crescimento médio das demais culturas – amendoim, algodão e coco – foi de 17%. Em contrapartida, o azeite de oliva registrou

uma queda de 2%. Esse cenário de menor representatividade desses óleos no comércio global, aliado à eventual queda na produção, tende a se manter. Contudo, no caso do azeite de oliva, essa tendência é preocupante, devido ao seu uso predominante e às características únicas do seu óleo.

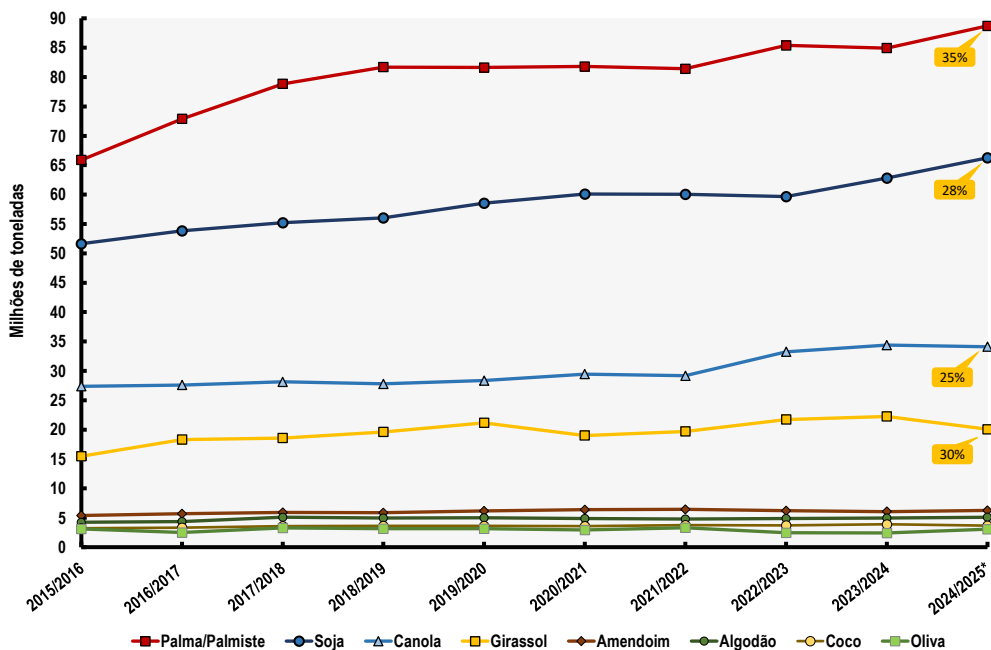


Figura 2. Evolução da produção mundial de óleo vegetal no período de 2015/2016 a 2024/2025.

*Março 2025

Fonte: Estados Unidos (2025a).

A soja é o principal produto do agronegócio brasileiro. Segundo o Centro de Estudos de Economia Aplicada, da Escola Superior de Agricultura Luiz de Queiroz (2024), da Universidade de São Paulo, a cadeia produtiva da soja e do biodiesel obteve um PIB de 635,9 bilhões em 2023, gerando mais de 2,3 milhões de empregos. Além disso, a soja é líder nas exportações do agronegócio brasileiro, sendo um dos principais responsáveis pelo superávit da balança comercial do Brasil. A produção brasileira de soja representa aproximadamente 40% da produção global do grão e detém o maior potencial de expansão mundial, com uma evolução constante impulsionada pelo aumento da produtividade e pela ampliação de áreas aptas, sobretudo em pastagens perenes degradadas e subutilizadas.

Em decorrência desta importância, em 2021, foi criado o Programa Soja Baixo Carbono (SBC), iniciativa coordenada pela Embrapa Soja (Nepomuceno et al., 2023) com diversos segmentos da cadeia produtiva e estruturada da cultura. O SBC tem como objetivo criar uma certificação, com diretrizes técnicas que atestem a sustentabilidade dos sistemas de produção com soja em áreas candidatas, tornando tangíveis aspectos qualitativos e quantitativos do grão, produzido com tecnologias e práticas agrícolas que reduzam a intensidade de emissão de gases de efeito estufa (GEEs), frente aos nossos principais concorrentes.

Além do Brasil, as grandes nações produtoras de soja são Estados Unidos, Argentina, China e Índia, que juntos são responsáveis por mais de 90% da produção mundial da leguminosa. Contudo, diferentemente do Brasil, os Estados Unidos e a China não contam com grandes áreas aptas para a expansão do cultivo de grãos e oleaginosas, podendo aumentá-las basicamente a partir do tradeoff² entre culturas. Dessa forma, o aumento de produção de soja nestes países fica basicamente restrito ao incremento de produtividade.

A Índia, por sua vez, tem ampliado gradualmente sua área de cultivo de soja, passando de cerca de 5,8 milhões de hectares no ano 2000 para 13,5 milhões de hectares na safra mais recente. No entanto, o que realmente chama a atenção são as baixas produtividades, com uma média estimada de aproximadamente 0,9 t/ha em 2024. Caso os desafios relacionados ao manejo da cultura e ao desenvolvimento de cultivares mais adaptadas não sejam devidamente abordados, não há perspectivas claras de crescimento substancial na produção.

Por outro lado, a Argentina, em meio aos esforços para superar a instabilidade política dos últimos anos e os impactos climáticos sobre a produtividade, tem expandido suas áreas de cultivo, atingindo cerca de 17,3 milhões de hectares de soja na última safra. Este cenário revela um grande potencial para aumento da produção, não apenas pela possibilidade de ampliação da área de cultivo - que já alcançou aproximadamente 20 milhões de hectares em 2012 - mas também pelo considerável potencial de aumento na produtividade.

² Termo inglês que representa um conflito de escolha. Na agricultura, significa escolher entre diferentes opções de cultivo.

ÁREAS POTENCIAIS PARA PRODUZIR CULTURAS ENERGÉTICAS NO MUNDO

O Brasil tem enormes vantagens comparativas e tecnologias para produzir fontes energéticas, para alimentação e para combustíveis.

Na representação cartográfica plana do mapa-múndi, destaca-se a área entre os trópicos de câncer e de capricórnio, que engloba as zonas intertropicais, porções do globo que recebem a máxima radiação solar e possuem maior estabilidade climática durante o ano, razões pelas quais apresentam um grande potencial agrônômico para expansão de culturas (Figura 3). Para Laurance (2014), nos trópicos as culturas crescem mais rapidamente, a terra é relativamente mais barata e é onde a procura de alimentos aumentará mais. Contudo, se práticas agrícolas eficientes e adaptadas às diferentes condições edafoclimáticas não forem implementadas, a expansão agrícola nessas regiões poderá causar impactos ambientais significativos sobre florestas tropicais, savanas e outros ecossistemas, que já enfrentam grandes transformações na paisagem.



Figura 3. Principal região com potencial de expansão das principais culturas oleaginosas no mundo.

As áreas intertropicais cobrem principalmente da África Subsaariana até a África Austral, incluindo a região até o norte da África do Sul, bem como partes da Namíbia, Botswana, Moçambique e Madagascar. Na Ásia, incluem-se áreas da Península Arábica, do

subcontinente indiano e da Península Indochinesa, estendendo-se até partes da Austrália. Nas Américas, abrangem áreas significativas do México, Paraguai, Chile, norte da Argentina e grande parte do Brasil. As regiões tropicais cobrem aproximadamente 36% das áreas emersas do planeta, totalizando cerca de 54 milhões de km² (ou 5,4 bilhões de hectares) (Song et al., 2017; National Geographic, 2024). Nesse vasto espaço, reside cerca de 40% da população mundial. Devido às altas taxas de natalidade, projeta-se que essa proporção aumentará para 50% da população global entre os anos 2030 e 2040 (World Population Review, 2024). É aqui que ocorre uma corrida mais desigual entre a produção de alimentos versus crescimentos populacional (Sanches, 2022).

Segundo Diamond (1999, p. 25), em frase que sintetiza seu famoso livro, cita: “A história seguiu diferentes rumos para os diferentes povos devido às diferenças entre os ambientes em que viviam e não devido a diferenças biológicas entre os povos”. Atualmente, com o desenvolvimento de tecnologias para o manejo do solo e das culturas em áreas tropicais, além do zoneamento de risco climático e da disponibilidade de plantas melhoradas ou adaptáveis, muitas áreas que parecem inadequadas para a produção de alimentos ou energia, ou subaproveitadas, na verdade aguardam por esses avanços para cumprir parte de sua função. À primeira vista, essa afirmação pode parecer inaplicável ou até insensata, mas os obstáculos são mais geopolíticos e culturais do que técnicos. Embora essa proposição ainda não possa ser verificada, toda mudança deveria ter início no imaginário, alimentada pelo desejo persistente de transformação.

Assim, essa vasta extensão de terra, que já desempenha um papel importante, pode se tornar ainda mais protagonista na expansão das áreas dedicadas à produção de alimentos, óleos, gorduras, fibras e criação animal. No entanto, muitos países em desenvolvimento, especialmente na África subsaariana, existem uma deficiência crítica de fertilizantes, em especial o potássio, que afeta, negativamente a produção agrícola (Sardans; Peñuelas, 2015). Embora a África represente cerca de 24% das áreas potenciais para produção agrícolas do mundo (FAO, 2020), o continente continua severamente afetado pela fome, não apenas devido à falta de insumos modernos, mas por questões geopolíticas.

Por outro lado, é importante destacar que em muitas áreas tropicais da África e da Austrália apresentam condições climáticas de severas restrições hídricas que as tornam inaptas, sem irrigação, para a exploração agropecuária ou, ao menos impõem dificuldades enormes para obtenção de elevadas produtividades no sistema de produção agrícola. Também não possuem sistemas de cultivo semelhantes aos do Brasil,

onde a manutenção do solo coberto, e os processos para a aumentar a capacidade produtiva do solo, são uma constante agronômica.

O Brasil se destaca nesse cenário pois apresenta maior estabilidade política que os demais países da zona intertropical, sofre menos com problemas logísticos e culturais que afetam a produção e o desenvolvimento agropecuário de muitos países. Além disso, o Brasil teve um destacado desenvolvimento tecnológico, que se iniciou na década de 1970, por meio de programas públicos de pesquisa, o que criou um contexto favorável para vultosos investimentos privados, especialmente a partir dos anos 2000. Isso culminou na estruturação de importantes cadeias produtivas agropecuárias, inclusive de oleaginosas, consolidando a sua grande vocação para a produção agropecuária, tanto para atendimento da demanda interna quanto para o mercado de exportação.

Além do aumento da produtividade das áreas já tradicionais de cultivo, o Brasil ainda possui vastas áreas, legalmente aptas à expansão do cultivo de espécies anuais ou perenes, com adequada disponibilidade luminosa e hídrica, atualmente ocupadas com pastagens degradadas. Soma-se a isso, o grau de maturidade tecnológica da agricultura brasileira sob plantio direto, que concilia produtividade com sustentabilidade, promovendo a manutenção da cobertura do solo e aumentando a resiliência dos ambientes de produção para suportar o cultivo agrícola de duas a três espécies em sucessão dentro do mesmo ano agrícola.

Desse modo, pode-se dizer que o Brasil é o país com maior capacidade política, estrutural, tecnológica (agronômica) e edafoclimática para expandir sua produção de alimentos e oleaginosas/gorduras e fibras, independentemente do destino que seja dado às matérias-primas. Os países da América do Sul e, principalmente, da África também podem aumentar significativamente a produção de alimentos e sucedâneos para os hidrocarbonetos fósseis, contudo, os desafios políticos e econômicos são muito maiores que os agronômicos.

AS PRINCIPAIS FONTES DE ÓLEO NO BRASIL

Uma andorinha só não faz o verão.

Ditado popular

No Brasil, a principal cultura produtora de óleo, apesar das potencialidades do dendê e outras, é a soja. A Figura 4 ilustra a dinâmica da produção de óleo das principais matérias-primas cultivadas no Brasil, alternativas à soja. A produção de óleo apresentada

é uma estimativa, considerando que toda a produção de frutos ou grãos dessas culturas (IBGE 2024a; Conab, 2025a) fosse processada para extração de óleo. Assim, os volumes de óleo foram calculados levando em conta a porcentagem de óleo característica de cada cultura e a produção anual (em toneladas) dessas culturas, resultando em estimativas aproximadas de produção de óleo para cada uma delas.

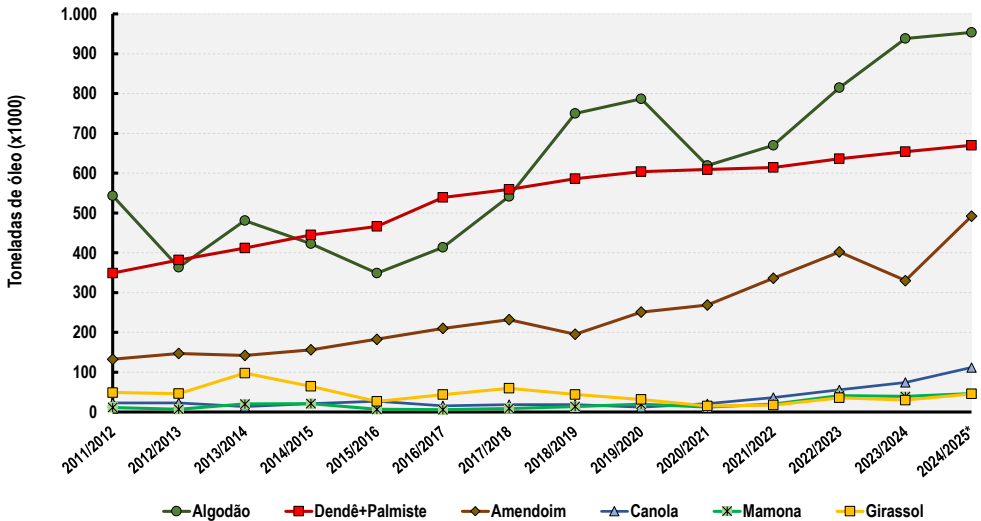


Figura 4. Estimativa teórica da evolução da produção de óleo das principais culturas produtoras de óleo no Brasil, exceto a soja, caso toda produção de frutos ou de grãos fossem processadas e extraídos seu óleo (mil toneladas).

*Março 2025

Fonte: Estados Unidos (2022, 2025b), IBGE (2024a) e Conab (2025a).

Durante o período avaliado, a produção de óleo de algodão, palma e amendoim apresentou um crescimento significativo, enquanto a produção de óleo de canola, girassol e mamona registrou um leve aumento ou permaneceu estável (Figura 4). A oferta de óleo de algodão aumentou até a safra 2019/2020, registrando uma queda na safra 2020/2021, antes de retomar um crescimento acentuado até a safra 2023/2024. O cultivo do algodão representa uma cadeia importante do agronegócio brasileiro, com uma área estimada em 1,9 milhão de hectares para a safra 2023/2024. O principal produto do algodão é a fibra, utilizada principalmente no mercado de vestuário. O óleo de algodão é um coproduto, absorvido especialmente pelos mercados de alimentação humana e de biodiesel.

Na década de 1970, o algodão atingiu mais de 4,0 milhões de hectares cultivados. Contudo, sofreu drástica redução de área, chegando a 735 mil hectares na safra 2002/2003 (Conab, 2025a). Nesse período, a commodity era produzida predominantemente em primeira safra, muitas vezes sem o cultivo de nenhuma outra cultura em sucessão (inclusive, culturas de cobertura). Dessa época até a safra 2016/2017, a área anual do algodão sofreu variações, mas sem uma tendência de crescimento.

Apenas a partir da safra 2017/2018, a commodity voltou a apresentar expansão da área cultivada, por alguns fatores inclusive a mudança no contexto produtivo. Atualmente, mais de 80% da produção de algodão acontece por meio de um modelo de sucessão, sobretudo soja-algodão, em que a soja é produzida na primeira safra (primavera-verão), enquanto o algodão é cultivado na segunda safra (verão-outono). Isso propiciou a ampliação da área da cultura, principalmente no estado de Mato Grosso.

Devido ao aumento da área de soja, há potencial para expansão das áreas de cultivos comerciais em sucessão à soja, com várias espécies competindo para ocupar esse espaço, como o sorgo (*Sorghum bicolor* L.), feijão comum (*Phaseolus vulgaris* L.), feijão caupi (*Vigna unguiculata* L.), trigo (*Triticum aestivum* L.), aveia (*Avena sativa* L.), arroz (*Oryza sativa* L.), girassol e canola, entre outras. No entanto, o milho (*Zea mays* L.) e o algodão são, de forma destacada, as culturas com maiores possibilidades.

Com a manutenção da previsão para a safra 2024/2025, a produção de óleo de algodão deverá continuar crescendo, o que poderia aumentar a expectativa de que o algodão ganhasse maior representatividade no atendimento às metas do Renovabio. Entretanto, parte do aumento na produção de óleo de algodão será destinada a um novo mercado, com a inauguração da maior planta industrial de óleo de algodão do Brasil. Inaugurada no final de 2024 em Nova Mutum-MT, a indústria fortalecerá a cadeia produtiva, com capacidade para processar cerca de 200 mil toneladas de caroço de algodão e refinar 108 mil toneladas de óleo bruto por ano (Fagundes, 2024a; Fagundes 2024b; Infocoweb, 2024).

O dendê é uma palmeira africana introduzida no Brasil, no século XVII, que gera os seguintes desdobramentos em termos produtivos: óleo da palma; óleo do palmiste; cachos vazios (para adubação da plantação); fibras (para caldeiras e cinzas); casca (para caldeiras e estradas); efluentes (para adubação da plantação). O principal deles é o óleo que pode ser utilizado em: produtos alimentícios (óleo de cozinha, margarina, biscoito, bolacha, mistura para bolos, glacê, macarrão instantâneo, gorduras para fri-

tura etc.); biocombustíveis; sabões e produtos de limpeza; cosméticos; velas; farmacêuticos, plásticos e lubrificantes (Dendê, 2007), entre outros.

O cultivo comercial do dendê no Brasil se deu no início da década de 1960, mas o avanço mais substancial da cultura ocorreu na metade da década de 2000. Atualmente, o País tem aproximadamente 200 mil hectares da oleaginosa, com mais de 92% localizado no estado do Pará (IBGE, 2023a). A maior parte da produção está organizada em torno da Associação Brasileira de Produtores de Óleo de Palma (Abrapalma), que possui os seguintes associados: Agropalma, Belém Bioenergia Brasil S/A, Brasil Biofuels, Denpasa - Dendê do Pará S/A, Dendê do Tauá S/A, Marborges Agroindústria S/A, Agroindústria Palmasa S/A, Palmaplan Agroindustrial Ltda e Vila Nova Agroindustrial Ltda (Abrapalma, 2015).

As referidas empresas geralmente possuem plantações próprias e indústrias de processamento de cachos de frutos frescos. Parte delas também recebe cachos de frutos frescos de produtores associados e independentes, com plantações de diferentes tamanhos (Muller et al., 2006; Abrapalma, 2015). Pensando em um horizonte de 10 anos, a tendência é que o dendê tenha um aumento moderado de área na Região Norte do Brasil, de tal forma que a cultura não deverá ter um crescimento representativo na sua participação na produção nacional de biodiesel. Alguns fatores podem influenciar, além do tempo necessário para a implantação ou renovação de áreas de lavouras, até a fase de exploração comercial: a limitação de áreas exploráveis na Amazônia Legal, devido à exigência de manter uma reserva legal de, no mínimo, 80% da propriedade, conforme o Código Florestal Brasileiro, somada a problemas como escassez de mão de obra, logística, entre outros.

No Brasil, as culturas da canola, girassol e mamona são muito regionalizadas. Na safra 2023/2024, a área de mamona foi de 59 mil ha, a quase totalidade localizada na Bahia (99%), enquanto a área cultivada de canola em 2024 foi cerca de 148 mil ha, localizada majoritariamente no Rio Grande do Sul (99%). Por fim, o girassol com uma área de 60 mil ha, sendo 46 mil ha distribuídos nas unidades federativas do Centro-Oeste e 11 mil em Minas Gerais (Conab, 2025a). Embora restritos a áreas mais específicas, tanto a canola quanto o girassol não têm apresentado aumentos consistentes na produtividade, com médias em torno de 1.300 kg/ha na última safra. No entanto, a área cultivada com essas oleaginosas tem crescido significativamente: em 2025, estima-se que a área de girassol ultrapasse 80 mil hectares, enquanto a de canola deve passar dos 200 mil hectares. Em relação à mamona, as maiores produtividades observadas no estado de São Paulo variaram entre 1.900 e 2.000 kg/ha, até o cultivo ser interrompido

na safra 2013/2014. Apenas na safra 2022/2023, a Bahia, que concentra 99% da área atual da cultura, atingiu um patamar próximo a esses números, com uma produtividade de 1.800 kg/ha, embora os valores normalmente fiquem bem abaixo dessa média.

A escassez de uma rede robusta de pesquisa voltada para o avanço do conhecimento e o desenvolvimento de tecnologias que aumentem a resiliência dessas culturas aos estresses bióticos e abióticos, com o objetivo de melhorar a rentabilidade e ampliar as áreas cultivadas, representa um desafio significativo para a consolidação do girassol e da canola no Brasil. Além disso, essas culturas enfrentam intensa concorrência de outras mais rentáveis e com maior domínio tecnológico. Essa combinação de fatores estruturais tem retardado a expansão para regiões com diferentes condições edafoclimáticas, bem como o desenvolvimento de novos mercados, sendo uma das principais razões para o crescimento limitado da oferta desses produtos agrícolas.

Na Figura 4, são apresentadas as principais culturas produtoras de óleo no Brasil, com exceção da soja. Já na Figura 5, a soja está incluída. Ao comparar a evolução da produção de óleo da soja com as demais culturas, observa-se uma diferença significativa na oferta histórica de óleo, evidenciando o potencial de cada uma. Dessa forma, devido à sua escala produtiva, a produção brasileira de óleo de soja pode atender tanto ao programa de biodiesel quanto aos mercados de alimentos (in natura) e da indústria de transformação/alimentos.

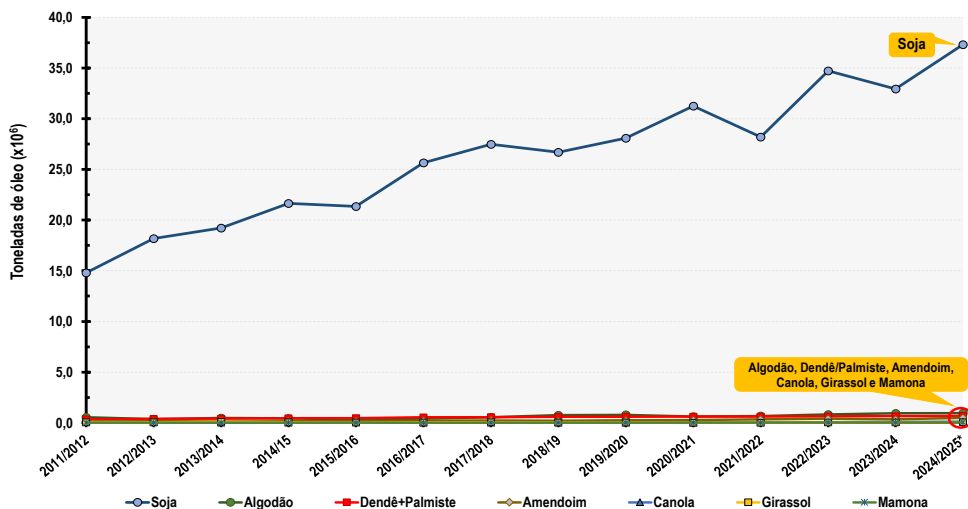


Figura 5. Estimativa de produção de óleo das principais oleaginosas cultivadas no Brasil, caso toda produção de frutos ou grãos fossem processadas e extraídos seu óleo (mil toneladas).

Fonte: IBGE (2024a), Conab (2025a) e Estados Unidos (2025b). *Março de 2025.

Este cenário se dá não só em função da área cultivada com essas culturas (Figura 6), mas também pelos mercados sólidos e regulares, demanda (proteína, óleo e uma profusão de coprodutos com alto valor agregado) e desenvolvimento tecnológico. No caso da soja, a adaptação das tecnologias de produção em diferentes condições edafoclimáticas permite a estabilidade produtiva da cultura, de tal forma que as produtividades regionais médias geralmente giram em torno da média nacional. Dito de outra forma, a soja pode ser produzida com elevadas produtividades, em todas as cinco regiões do Brasil, quadro que não tem sido alcançado com outras “oleaginosas” como girassol, canola, mamona e, até mesmo, dendê.

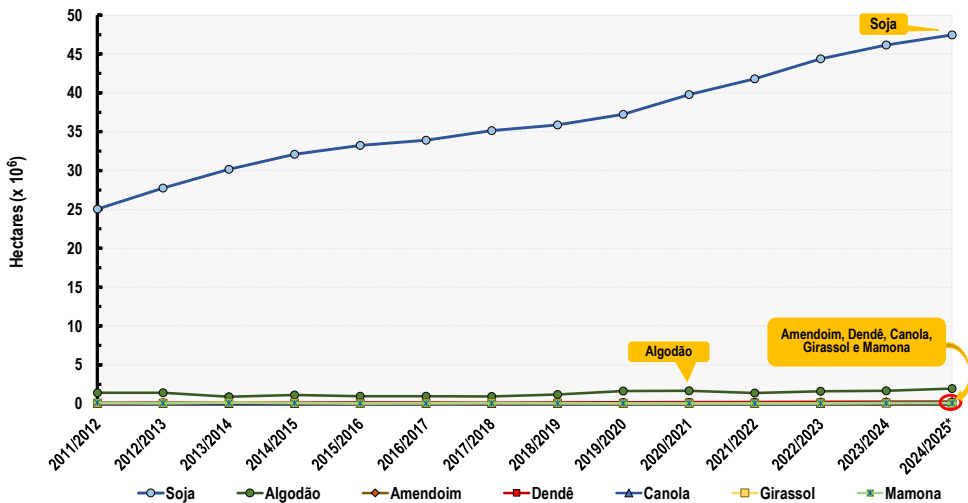


Figura 6. Área cultivada das principais oleaginosas produzidas no Brasil (mil hectares).

Fonte: IBGE (2024b) e Conab (2025a). *Março 2025.

O principal apelo comercial da soja reside no elevado teor e na qualidade de sua proteína vegetal, juntamente com o baixo custo de produção, o que torna o farelo de soja a principal fonte de proteína para rações animais. O FDA (Food and Drug Administration) utiliza o PDCAAS (protein digestibility corrected amino acid score), um índice que avalia a qualidade das proteínas com base na sua digestibilidade e no conteúdo de aminoácidos essenciais. O PDCAAS mede a presença dos aminoácidos essenciais e quão limitante um aminoácido específico é em uma proteína, de acordo com sua digestibilidade. Os valores do PDCAAS variam de próximo a 0,1 a 1,0, sendo que o valor 1,0 indica que a proteína, quando ingerida em quantidade adequada, pode suprir 100% das necessidades de aminoácidos essenciais de uma criança entre dois e cinco anos. Vale destacar que a

proteína da carne bovina tem um valor de 0,92 no índice de qualidade, o mesmo valor atribuído à proteína isolada de soja (Mandarino, 2018). Por esse motivo, o melhoramento genético tem sido desenvolvido para obtenção de altas produtividades. Contudo, embora a produtividade e o teor de proteína não sejam diretamente proporcionais, também há a preocupação, e até o interesse, tanto em desenvolver cultivares de soja com alto teor de proteína, quanto em aprimorar aquelas com alto teor de óleo (Li et al., 2023). Por exemplo, desenvolver cultivares de soja com alto teor de óleo, composto principalmente por uma elevada concentração de ácido graxo oleico.

Nesse contexto, apesar da demanda preferencial por proteína, o desenvolvimento de cultivares de soja com maior teor de óleo e/ou associado ao perfil de ácidos graxos mais adequados à indústria alimentícia ou à produção de biodiesel (e.g. alto oleico), pode constituir uma estratégia para a ampliação da área de produção de soja com características distintas, para mercados que não competem entre si. Quanto aos menores teores de proteína no farelo, seriam absorvidos como se faz atualmente: realização de misturas, segregação e descascamento ou destino a mercados menos nobres.

Estudos conduzidos por Li et al., (2023) compararam a soja commodity com quatro tipos de soja, cujos perfis de óleo e composição de farelo foram modificados: soja com alto teor de oleico (78%), soja com alto teor de lipídios (25%), soja com alto teor de lipídios e alto teor de oleico (25% lipídios sendo 78% oleico) e soja com alto teor de proteína (45%). Os resultados indicam os benefícios diretos e indiretos da produção de soja com maior teor de óleo na redução dos GEEs. A redução dos GEEs ocorre devido ao menor consumo de hidrogênio durante o processo de hidrotreatamento para a produção de diesel renovável.

Durante o hidrotreatamento, o hidrogênio é consumido em reações químicas para remover impurezas como oxigênio, enxofre e nitrogênio, e para saturar as duplas ligações presentes nas moléculas de ácidos graxos. Assim, óleos com maior concentração de ácidos graxos poli-insaturados, como o linoleico (C18:2) e linolênico (C18:3), exigem mais hidrogênio, enquanto óleos ricos em ácido graxo oleico (C18:1), que possuem apenas uma dupla ligação, reduzem a demanda por hidrogênio. Este hidrogênio, geralmente obtido por reforma de gás natural, possibilita a produção de um biodiesel de alta qualidade, mais semelhante ao diesel de petróleo - ou seja, um hidrocarboneto, e não ésteres de ácidos graxos.

Especificamente, os resultados de Li et al. (2023) sugerem que o uso de óleo de soja alto oleico poderia reduzir as emissões de GEE do diesel renovável em 1 g CO₂eq/MJ, o

que corresponde a uma redução de 10% nas emissões. Isso ocorre devido à diminuição do consumo de hidrogênio na etapa de hidrorrefino da produção de diesel renovável. Essa análise indica que o uso de soja com características otimizadas como, soja alto oleica ou soja com alto teor de lipídios pode contribuir para a redução das emissões no ciclo de vida do biodiesel e do diesel renovável, representando uma alternativa de menor impacto ambiental na produção de biocombustíveis.

Neste contexto, a Embrapa Soja tem grande potencial para se destacar e gerar respostas mais rápidas, pois detém o terceiro maior banco de germoplasma do mundo, com acessos que apresentam diversas características que podem ser incorporadas e aprimoradas nas novas cultivares por meio de diferentes processos, como o melhoramento clássico ou a biotecnologia.

Como exercício matemático ou curiosidade, se o teor médio de óleo na soja aumentasse em 1,5%, seriam produzidos mais 2,5 milhões de toneladas de biodiesel, o que representaria cerca de 26 % da produção total de biocombustível em 2024 (Agência Nacional do Petróleo, Gás Natural e Biocombustíveis, 2025a). Esse volume equivale a aproximadamente 100% do total de óleo produzido pela soma de todas as demais oleaginosas cultivadas no Brasil, caso estas fossem convertidas em óleo.

Ao discutir a necessidade de novas matérias-primas para fortalecer o programa de biodiesel e atender outras demandas, é importante lembrar que a China é o maior importador mundial de soja em grãos, responsável pela compra de cerca de 109 milhões de toneladas, enquanto o Brasil ocupa a posição de maior exportador, com aproximadamente 105,5 milhões de toneladas (Estados Unidos, 2025a). Embora tenha ocorrido uma queda nas importações de soja, a China segue sendo nosso principal comprador, com cerca de 72,5 milhões de toneladas (Associação Brasileira das Indústrias de Óleos Vegetais, 2025a). Juntamente com a proteína, os chineses também importaram, indiretamente, cerca de 16 milhões de toneladas de óleo de soja contido nos grãos, utilizado para diversos fins. Além desse volume gigantesco, os compradores preferem que a soja tenha elevados teores de proteína.

Esse volume é aproximadamente três vezes maior que a quantidade de óleo/gordura destinada à produção de biodiesel no Brasil. Em outras palavras, mesmo que as regras de mercado sigam outras lógicas, quando o Brasil exporta grãos, exporta empregos, matéria-prima para a produção de biodiesel, óleo e farelo para alimentação humana e/ou outros usos, além de inúmeros coprodutos. Ou seja, exporta a parte mais valiosa da cadeia da soja.

ALTERNATIVAS PARA A PRODUÇÃO DE BIODIESEL NO BRASIL

Nunca se deve aceitar algo como verdadeiro sem o claro conhecimento sobre esse atributo.

Discurso do Método, Renê Descartes

Ao longo das décadas, o Brasil tem sido reconhecido e reverenciado como país abundante em recursos naturais, detentor da maior riqueza biológica do planeta (Bound, 2008). Desde o descobrimento do Brasil, em 1500, Pero Vaz de Caminha já relatava na carta escrita ao Rei de Portugal, Dom Manuel I, sobre a descoberta de uma nova terra, nomeada primeiramente como Ilha de Vera Cruz ou o “achamento do Brasil”, sua percepção sobre o potencial agrícola destas terras. Nela, redigida em português arcaico, estava escrito “dar-se-á nela tudo” (Arquivo Nacional da Torre do Tombo, Lisboa, Portugal), o que, traduzindo para o português moderno significa “em se plantando tudo dá”. No entanto, não é bem assim. Afinal, Caminha que não era Engenheiro agrônomo, não entendeu os motivos da pujança da natureza daquele pequeno fragmento da região.

Em virtude da grande extensão territorial e diversidade de biomas e condições edafoclimáticas existentes no Brasil, o país apresenta muitas alternativas de espécies vegetais nativas com potencial para o seu cultivo regionalizado destinado à produção de biodiesel. As palmeiras tropicais estão no topo da lista de possibilidades pela sua capacidade de captar luz solar, fixar carbono e produzir enorme diversidade de biomassas (Lopes; Fávoro, 2021), além de viabilizar modelos de produção mais complexos, de modo a diversificar e intensificar o uso da terra, divergindo do modelo de produção baseado em monocultura (Ferro et al., 2006; Flider, 2022).

Outra possibilidade é ampliar o cultivo regionalizado de oleaginosas como girassol, algodão, amendoim, canola e dendê, espécies já cultivadas no país. Contudo, apesar da mamona de ter sido uma grande aposta no passado, o preço de seu óleo é elevado, pois atende a nichos específicos (e.g. composição de fluido hidráulico aeronáutico) e pouco competitivo. Além de alguns aspectos técnicos que dificultam seu cultivo em grande escala, contém aproximadamente, 90% de ácido ricinoleico e possui alta densidade e viscosidade (Beltrão et al., 2006; Beltrão; Oliveira, 2008; Ramos et al., 2017; Osorio-González et al., 2020), e em desacordo com os limites estabelecidos (Agência Nacional do Petróleo, Gás Natural e Biocombustíveis, 2023b).

Existem diversas literaturas relevantes que indicam matérias-primas potenciais para a produção comercial de óleos vegetais e gordura animal (Goes; Marra, 2008; Beltrão; Oliveira, 2008; Jardine et al., 2009; Delatorre et al., 2011; Lima, 2011; Vieira, 2011; Furtado, 2014; Jardine; Barros, 2021), com destaque para a regionalização das cadeias de produção, considerando a adaptabilidade às condições climáticas (Figura 7). Este modelo simplificado, que visa à estruturação de cadeias de produção com foco no desenvolvimento regional, sugere que a regionalização ou segmentação da produção de biodiesel poderia se beneficiar de possíveis fortalezas agrônômicas locais. No entanto, isso só se confirmaria caso essas fontes estivessem de fato disponíveis.



Figura 7. Matérias-primas com potencial para biodiesel por região, no Brasil (compilado pelos autores a partir de diferentes fontes).

Fonte: Adaptado de Almeida et al., 2008; Beltrão; Oliveira, 2008; Goes; Marra, 2008; Jardine et al., 2009; Delatorre et al., 2011; Lima, 2011; Vieira, 2011; Furtado, 2014; Jardine; Barros, 2021.

No entanto, apesar da grande diversidade de plantas endêmicas e daquelas introduzidas com potencial de fornecimento de óleo, essas experiências não têm tido sucesso ou não têm mostrado evolução significativa, pois, na realidade os processos agrônô-

micos dependem não só de fatores climáticos, mas de desenvolvimento de um pacote tecnológico de convivência e mitigação de estresses abióticos e bióticos e estruturação de uma cadeia de produção e comercialização viável economicamente. Na verdade, a esmagadora maioria das plantas citadas, são inexpressivas, ou têm apresentado redução na área cultivada desde o lançamento do PNPB (Conab, 2025a; IBGE, 2024a).

Na região amazônica, por exemplo, Celestino Pesce³ já havia declarado em 1941 (Pandolfo, 1964, p. 31):

No mundo, há fome de gordura, enquanto de outros produtos, há até superprodução que os governos procuram limitar. Nenhum Estado como a Região Amazônica, se encontra de apagar esta fome. Então, o imenso potencial de valores vegetais que se dispõe a Amazônia oferecerá ao Brasil elementos capazes de atender ao consumo e procura mundialmente progressivos de matéria gorda e seus derivados para alimentação e indústria.

Contudo, nesta mesma publicação, o referido autor destacou profeticamente:

Apesar do muito que tem sido feito, o aproveitamento das oleaginosas da região Amazônica ainda está muito longe do ponto sonhado por Celestino Pesce.

Ou seja, qual a grande estratégia atual ao citar as vantagens de algumas culturas para produzir óleo, se desde há muito, cientistas cômicos no passado, já faziam os mesmos alertas. Inobstante: “No princípio era o Verbo – Evangelho de João”; atualmente, não deveria ser só o verbo (discursos e opiniões), deveria ser o verbo transformado em ações concretas e duradoras.

Uma questão preocupante reside no grande número de citações bibliográficas sobre as vantagens potenciais das matérias-primas alternativas, como as palmeiras nativas do Brasil. A maioria utiliza argumentos que se referem à maior concentração de óleo ou às suas “excelentes” qualidades, além de não competirem com a produção de alimentos. Também adotam frases com apelos de sustentabilidade e impacto social, dentre outros, mas prescindem de robustos resultados de pesquisa. O principal ponto é que alicerçam suas inferências em outros autores que, não raro, emitiram opinião ou são típicos artigos de opinião, movida pelo modismo ou paixão, e não pela razão.

³ Celestino Pesce (1896-1942) foi um italiano que se interessou pelas plantas oleaginosas da Amazônia e, desde 1913, dedicou-se à extração de óleos e gorduras de sementes de várias espécies já conhecidas e de novas descobertas feitas em viagens que realizou pela região (PESCE, C. **Oleaginosas da Amazonia**. Belém, PA: Oficina Gráfica da Revista da Veterinária, 1941. 124 p).

Adicionalmente, muitos trabalhos trazem uma conclusão com base em fragmentos do que seria uma cadeia estruturada da cultura. E, em um pior cenário, não consideram um fragmento sequer. O risco não será do articulista, mas dos agricultores e empresários que acreditarem na afirmação veiculada por tais artigos opinativos. Segundo Taleb (2018), uma pessoa que consegue convencer os outros de que está certa, em teoria, nem sempre se importa com o impacto de suas ideias sobre os demais. Portanto, citar o potencial de algo não significa fazer com que esse algo aconteça. Existe a necessidade de pessoas, tecnologias e muitos trabalhos de campo, para que uma potencial espécie torne-se uma cultura real.

A inserção de espécies nativas de forma expressiva na bioeconomia é incipiente frente ao potencial do país. A emergência de um novo paradigma econômico, de base biológica, renovável e orientado por métricas ESG – Environmental, Social and Governance (Responsabilidade Ambiental, Social e de Governança), poderá estimular a transformação desse potencial em riqueza e progresso para o país (Nobre; Nobre, 2019).

A bioeconomia como um modelo de produção industrial baseado no uso de recursos biológicos, não é simples. Conforme citado por Homma (2022, p. 481):

A nova bioeconomia como está sendo proposta vai depender de investimentos na domesticação de recursos da biodiversidade e do seu plantio ou criação. É utopia pensar que a mesma ocorrerá mediante a simples e penosa coleta de produtos extrativos da floresta. Se for apoiada somente na base extrativista, sem plantios, será um nicho de mercado para reduzido grupo de produtores, sem condições de gerar emprego e renda para o conjunto maior de pequenos produtores.

A realidade atual indica de forma clara que a principal matéria-prima de óleo vegetal disponível no país e com possibilidade de expansão de área é a soja, espécie já cultivada em todas as regiões, inclusive na região Norte, com uma cadeia de produção bem estabelecida e um arcabouço técnico qualificado que viabiliza o cultivo sustentável sob diferentes escalas de produção, incluindo a agricultura familiar (IBGE, 2019). Apesar de o Brasil ser o maior produtor e exportador mundial de soja (Estados Unidos, 2025a), ainda é comum entre a população brasileira o pouco reconhecimento da extrema relevância da soja para a nação - um pecado, ou uma ingratidão. Parafraseando o multifacetado artista Tom Jobim: “No Brasil, o sucesso é um insulto”.

Além do potencial atual da soja, desconsidera-se o incremento da produtividade da cultura, face ao melhoramento genético e melhoria dos ambientes de produção, sendo comum

produtividades superiores 5.000 kg/ha, que normalmente não são consideradas nas análises. Outra questão é a concreta possibilidade de incremento no teor de óleo.

Em um cenário ideal, o cultivo de palmeiras, por exemplo, deveria seguir os mesmos passos observados em outras culturas, que mantêm contínuos incrementos e evoluções fitotécnicas. Após estudos eficientes e consolidados no atendimento às necessidades do país, as palmeiras poderiam se somar à soja na demanda por óleos.

Contudo, será muito difícil a consolidação de novas e potenciais matérias-primas para a produção de óleo, mesmo em médio e longo prazo, com a maioria das espécies nativas ou culturas agrícolas citadas no Brasil, independentemente do proselitismo científico ou repetição de conceitos sem sólida sustentação agrônômica.

Outra possibilidade é continuar mantendo a postura utópica ou romântica a respeito de cultivos comerciais de plantas emergentes ou que, em tese, não competem com a produção de alimentos, mas dificilmente serão produtivas ou atenderão aos volumes crescentes de energia e alimentos. Estas plantas podem até contar com vasta literatura referente a estudos laboratoriais, abrangendo composição de ácidos graxos, carotenoides, vitaminas, entre outros, porém carecem de estudos em condições reais de campo.

CULTURAS POTENCIAIS PARA A PRODUÇÃO DE BIODIESEL

Eu acredito que o extraordinário certamente deveria ser perseguido. Mas alegações extraordinárias exigem evidências igualmente extraordinárias.
Broca's Brain, 1980; Carl Sagan

A idílica imagem da produção regionalizada de biodiesel no território nacional é um retrato destituído de fundamentos agrônômicos e, normalmente, distante da realidade e da capacidade do produtor rural. Entre os exemplos desta visão, tem-se a Figura 7 como uma das muitas possibilidades já citadas no passado, algo ainda cultuado na atualidade, com algumas modificações: a) o dendê é a aposta para o Norte, Centro-Oeste e Nordeste; b) a mamona, uma cultura de subsistência do Nordeste, vislumbrada para o Sudeste e Centro-Oeste; c) a canola, vista como a “menina dos olhos” para o Sul; d) o girassol, que era produzido inicialmente no Rio Grande do Sul (onde praticamente deixou de ser cultivado) e foi idealizado para Centro-Oeste e Sudeste.

Dependendo do autor da fonte bibliográfica pode haver alguma alteração no conjunto de espécies potenciais de cada região, contudo, existe grande ausência de conexão com a realidade agrônômica ou comercial na maioria dos casos, podendo ser modificadas com várias outras combinações, onde a imaginação é o limite. Por outro lado, observa-se que a soja é sempre uma constante em todas as regiões, inclusive na região Norte, porque é uma cultura real, também produzida pela agricultura familiar (IBGE, 2019).

Estima-se que existam ao redor de 350 espécies de plantas com potencial para utilização na produção de biodiesel no mundo (Atabani et al., 2012), e em especial no Brasil, que já foi conhecido entre os nativos como Pindorama – Terra das Palmeiras (Ferreira, 1986). O país possui uma enorme diversidade de espécies com potencial para a produção de óleo, que pode ser aproveitada na geração de biodiesel.

Na verdade, qualquer grão ou fruto que produza óleo, a princípio, poderia produzir biodiesel. Essas espécies incluem tanto aquelas domesticadas, como soja, girassol, canola, milho, amendoim, gergelim (*Sesamum indicum* L.), nabo forrageiro (*Raphanus sativus* L.), abacate (*Persea americana* Mill.), cártamo (*Carthamus tinctorius* L.), e dendê, quanto as nativas brasileiras, como macaúba, caiaué (*Elaeis oleifera*), babaçu (*Attalea speciosa*), cupuaçu (*Theobroma grandiflorum*), inajá (*Maximiliana maripa*), buriti (*Mauritia flexuosa*), andiroba-de-rama (*Fevillea cordifolia*), patauí (*Oenocarpus bataua*), pequi (*Caryocar brasiliense*), tucumã (*Astocaryum vulgare*), entre outras. Além disso, acredita-se que algumas espécies exóticas também apresentam potencial, como crambe, niger (*Guizotia abyssinica*), pinhão-manso, pongâmia (*Pongamia pinnata*), tungue (*Aleurites fordii*), e pennycress (*Thlaspi arvense* L.). No entanto, apesar dessa grande variedade, não é tão simples assim. A viabilidade de uma espécie para produção de biodiesel depende de múltiplos fatores. Portanto, é necessário avaliar não apenas o potencial teórico, mas também as condições práticas e sustentáveis para cada espécie.

Um exemplo interessante, que a história nos oferece como ótima conselheira, é o do patauí, conhecido como a “oliveira brasileira”, que ganhou destaque durante a Segunda Guerra Mundial. Naquela época, o Brasil exportou o óleo extraído dessa palmeira como alternativa à escassez de azeite de oliva na Europa (Pinto, 1951; Gomes-Silva et al., 2004). O mesmo fenômeno ocorreu no Paraguai, com a exportação de óleo de macaúba para a Europa no mesmo período (McDonald, 2007).

No caso do patauá, o interesse pela cultura se deveu às qualidades organolépticas e físico-químicas de seu óleo, semelhante ao de oliva (Markley, 1955; Altman, 1958), com teor médio de ácido oleico entre 73% e 82%. No entanto, o fim da guerra, somado ao manejo inadequado das áreas nativas e à dizimação de extensos patauazais, levou ao declínio desse comércio, de forma semelhante ao que ocorreu com a borracha nativa.

Esse exemplo reforça que o teor de óleo, sua qualidade ou disponibilidade regional não são, por si só, suficientes ou condição *sine qua non* para transformar uma matéria-prima em uma ‘commodity’ agrícola.

Atualmente, o óleo de patauá tem sido utilizado em escala bem mais reduzida, como matéria-prima para a produção de cosméticos (Pastore Junior et al., 2005; Natura, 2024), ou para a alimentação. No entanto, a produção se restringe ao modelo extrativista adotado pela agricultura familiar. Algumas mulheres de seringais da Reserva Extrativista Chico Mendes relatam que conseguem vender pequenas porções, na cidade de Xapuri, para serem empregadas como tônico capilar para amaciar os cabelos (Gomes-Silva et al., 2004). Mesmo com o alto custo físico da coleta dos frutos e da produção de óleo, ou em condições laborais desafiadoras, as quantidades necessárias para a produção de cosméticos podem ser supridas pela extração de plantas nativas.

Algumas pesquisas têm analisado a possibilidade de adoção de frutos de outras palmeiras dispersas na paisagem, ou mesmo agrupadas em maciços, para atender às usinas de biodiesel (e.g. babaçu, carnaúba (*Copernicia prunifera* Miller.) e inajá) (Lima et al., 2007, 2019; Junqueira, 2013; Brasil, 2014a; Kozłowski et al., 2019; Cardoso et al., 2020; Wendt, 2021). Uma ressalva é que, embora tais pesquisas nasçam do esforço de vários pesquisadores, grande parte delas foca questões como o teor de óleo dos frutos, revisões bibliográficas; peso dos cachos de frutos, qualidade dos óleos, perfil de ácidos graxos e a qualidade do biodiesel produzido, mas não analisa outras questões tão ou mais cruciais como:

- Propagação, produção e seleção das mudas.
- Densidade de palmeiras por hectare.
- Mecanização (implantação, tratamentos culturais e colheita).
- Possível sistema de manejo e manejo fitossanitário.
- Métodos de colheita e mão de obra.
- Sazonalidade da produção, armazenamento e transporte dos frutos.
- Estruturação do mercado e da cadeia produtiva.
- Questões fundiárias e logísticas, entre outras.

Como alerta Homma (2022), a nova bioeconomia, da forma como está sendo proposta, dependerá de investimentos na domesticação de recursos da biodiversidade, além do seu cultivo ou criação racional. É utópico pensar que ela se sustentará apenas com a coleta de produtos extrativos da floresta. Se for apoiada somente na base extrativa, sem plantios ou criação, será um nicho de mercado para reduzido grupo de produtores, sem condições de gerar emprego e renda para o conjunto maior de pequenos produtores.

Abaixo, um excerto da publicação de Pandolfo (1964, p. 26), cita as dificuldades do extrativismo:

ESTABELECIMENTO DE PLANTAÇÕES SISTEMÁTICAS DE OLEAGINOSAS

Malgrado o seu imenso potencial silvestre, a solução racional para a exploração e industrialização de oleaginosas na Amazônia está, todavia, no estabelecimento de grandes plantações sistemáticas, aproveitando as condições ecológica favoráveis à oleicultura, apresentada pela região.

As atividades extrativistas impõem aos trabalhadores condições muito precárias de vida, de modo que estes debandam ao aparecimento de melhores interesses. A coleta da semente no recesso da floresta, onde é difícil o acesso, se faz às custas de grandes sacrifícios para o coletor e não pode ser comparada com a coleta feita em campos racionalmente cultivados, onde se pode operar com facilidade e rapidez, com uma estimativa precisa da produção comandando as possibilidades de expansão da indústria.

Ou seja, passados 60 anos, confirma-se que, como costuma acontecer, “o tempo é o senhor da razão.”

Embora os frutos produzidos por palmeiras nativas tenham o potencial de produzir óleo, praticar sua coleta extrativista é seguir um caminho já trilhado no passado, sem considerar os aprendizados da história e as possibilidades tecnológicas disponíveis no tempo atual. Seria como se revivêssemos os esforços da Segunda Guerra Mundial, com a reativação dos seringais nativos para a exploração de borracha (*Hevea brasiliensis*), para o atendimento às necessidades internacionais de elastômeros, enquanto o teatro de guerra se desenrolava no sudeste asiático, o que dificultava a produção e o comércio de borracha natural daqueles seringais de cultivo.

Nesse sentido, a adoção destas fontes de óleos, a partir do modelo extrativista de coleta de frutos, seria ignorar os benefícios da Agricultura 4.0, de eficiência produtiva e de redução de esforços físicos para maior qualidade de vida no trabalho, além do desenvolvimento socioeconômico por ela gerados, em favor de um desgastante trabalho físico do trabalhador rural como citado por Pandolfo (1964) e da consequente perpe-

tuação da pobreza, uma vez que estas palmeiras não mobilizam um arranjo produtivo capaz de desenvolver economias regionais significativas.

A domesticação de espécies nativas, como inajá, pequi, macaúba e caiaué, ou exóticas, como pinhão-manso, camelina, pongâmia pinnata e carinata, entre outras, ou até mesmo a adaptação dessas espécies, poderia ser uma solução. No entanto, essa abordagem exigiria tempo, recursos e constância em pesquisa para estruturar um sistema de produção agrônômica viável do ponto de vista ambiental, social, técnico e econômico.

A macaúba parece ser um caso à parte, pois já conta com um conjunto significativo de pesquisas sobre as qualidades do óleo, descrição botânica e produção de mudas, entre outros aspectos. No entanto, enfrenta desafios relacionados à falta de fundamentos cruciais no manejo da cultura, como o custo de implantação e condução até a fase produtiva, a garantia de mudas homogêneas e produtivas, a implementação de sistemas de produção regionalizados e o manejo adequado do solo. Esses fatores são essenciais para dar maior sustentabilidade ao empreendimento, especialmente devido ao longo período de maturação necessário.

Além do teor de óleo, frequentemente mencionado em várias matérias-primas promissoras, é igualmente relevante considerar propriedades como o perfil de ácidos graxos, a complexidade do processo de extração e transesterificação, o ponto de fusão, a viscosidade, o número de cetano, o ponto de névoa, a presença de outros componentes no óleo (Ramos et al., 2011) e, principalmente, o valor agregado dos coprodutos, como a qualidade da torta ou farelo, bem como a possibilidade de cogeração de energia, entre outros (Castro et al., 2010).

No Brasil existe um conjunto de cultivos e espécies reais ou potenciais para o atendimento da demanda de biodiesel (Tabela 2). Merece destaque, no entanto, que a soja, principal fonte de óleo vegetal produzida no Brasil, poderia atender ~384 % da necessidade anual de biodiesel do País, caso toda a produção fosse utilizada para esta finalidade. Seguindo a mesma lógica, a soma dos volumes de óleos produzidos pelas demais culturas atenderia cerca de 26% da demanda anual de biodiesel, considerando o volume produzido em 2024. No entanto, a maioria dessas culturas enfrenta um problema comum: a falta de escala de produção e os riscos associados aos conhecimentos agrônômicos ainda incipientes desestimulam agricultores e empresários a investir em sua produção e industrialização.

Tabela 2. Capacidade de atendimento às demandas de biodiesel no Brasil de diferentes culturas, em 2024, caso toda a produção fosse utilizada para esta finalidade.

Culturas	Área (ha)	Produt.	Teor	Rendim.	Produção	Capacidade Atendimento
			Óleo			
	(x1000)	t/ha	%	t/ha	(t x 1000)	(%) ⁴
Soja	47.450,7 ¹	3,53	22,3	0,78	37.352,7	384,2
Algodão	1.944,2 ¹	2,68	18,0	0,47	937,9	9,6
Dendê/Palmiste	200,9 ²	14,72	24,5	3,61	724,5	7,5
Amendoim	279,01	4,20	48,0	2,02	562,5	5,8
Gergelim	659,9 ³	0,55	50,0	0,27	180,5	1,9
Canola	147,9 ¹	1,32	38,0	0,50	74,3	0,8
Girassol	58,7 ¹	1,48	43,0	0,64	37,5	0,4
Mamona	59,7 ¹	1,19	42,0	0,50	29,8	0,3
Outra cultura	?	?	?	?	?	?

⁴9.721.890 m³ de biodiesel.

Fonte: ¹Conab (2025a), ²IBGE (2024a), ³Conab (2025b).

Assim, a Tabela 2 pode ser utilizada como um exercício aritmético para estimar a produção de óleo com qualquer espécie vegetal. Basta aplicar, numa planilha de Excel, os mesmos parâmetros: área cultivada (ha), produtividade (kg/ha) e os coeficientes técnicos característicos de cada espécie, como o teor de óleo (%) e o rendimento de óleo (t/ha). Entretanto, a maioria das culturas terá o mesmo problema, caso não haja produção comercial. Ou seja, trata-se de um cálculo teórico ou de uma projeção.

Na Figura 8 é apresentada a evolução do percentual mínimo obrigatório de adição do biodiesel ao óleo diesel, comercializado no território nacional, por força das leis nº 11.097, de 2005, e de nº 13.033, de 2014 (Brasil, 2005, 2014b).

Com o amadurecimento do mercado brasileiro, os programas de incentivos e as ações governamentais, para diversificar as matérias-primas, e a participação da agricultura familiar na cadeia produtiva do biodiesel, por meio do Programa Nacional de Uso e Produção de Biodiesel (PNPB), o Selo Combustível Social (SCS), implementado pelo Ministério do Desenvolvimento Agrário (MDA), garantiu a participação da agricultura familiar na cadeia produtiva do biodiesel, que teve seu percentual gradativamente ampliado.

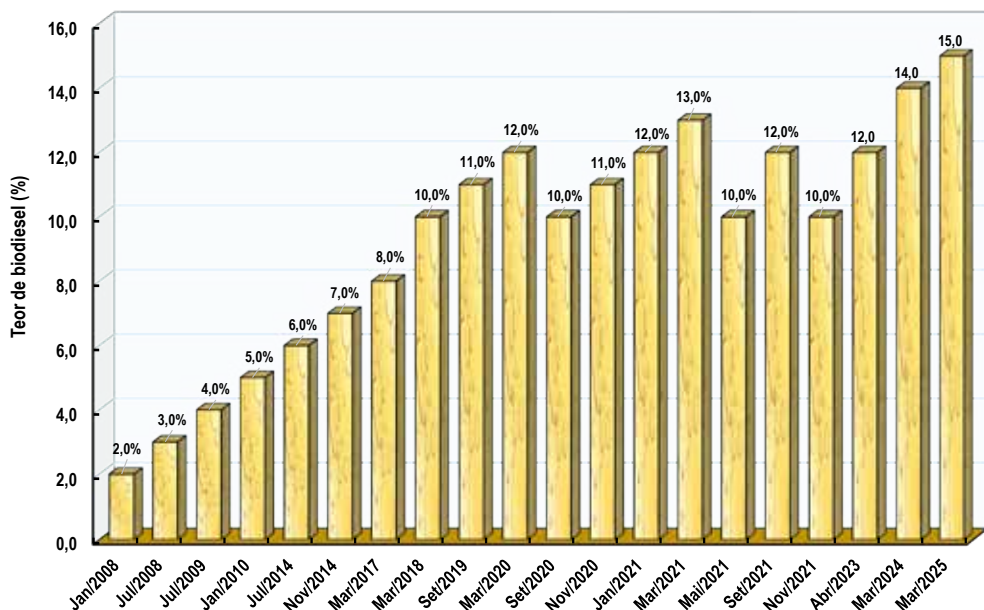


Figura 8. Evolução dos teores de combustível renovável no diesel fóssil.

Fonte: Agência Nacional do Petróleo, Gás Natural e Biocombustíveis (2008, 2024, 2024c); Brasil (2005, 2024b); CNPE (2018, 2021a, 2021b, 2021c, 2021d, 2022, 2023).

Mesmo que a evolução não seja linear e sempre crescente, a tendência tem sido de aumento do teor de biodiesel e poucas culturas ou matérias-primas têm os principais atributos para atender ao programa de biocombustível nas diferentes regiões do país. A soja, por deter arranjos produtivos consolidados, logística e volume de produção, capilaridade de distribuição e de armazenamento, continuará sendo o principal motor do PNPB (Tabela 3).

Tabela 3. Matérias-primas utilizadas na produção de biodiesel do Brasil no ano de 2024, em volume (m³) e percentagem (%).

Matérias-primas	Volume (m ³)	%
Óleo de soja	7.197.534	74,03
Outros materiais graxos ¹	1.354.244	13,93
Gordura bovina	589.306	6,06
Gordura de porco	165.726	1,70
Óleo de algodão	154.808	1,59
Óleo de fritura usado	101.873	1,05
Óleo de palma/dendê	67.603	0,70
Óleo de milho	53.712	0,55
Gordura de frango	18.410	0,19
Óleo de colza/canola	18.137	0,19
Óleo de girassol	537	0,01
Total	9.721.890	100

¹Outros materiais graxos: ácido graxo de óleo de soja, mistura de matérias-primas tradicionais em tanque e reprocessamento de subprodutos gerados na produção de biodiesel.

Fonte: (Agência Nacional do Petróleo, Gás Natural e Biocombustíveis 2024d, 2025a).

Apesar da queda na produção de soja na safra 2023/2024 (Figura 5), a cultura manteve uma forte contribuição ao programa de biodiesel, respondendo por aproximadamente 74% da demanda nacional. Isso reflete a flexibilidade do setor em atender diferentes segmentos de mercado, não apenas em função dos volumes de produção, mas também pela capacidade de armazenamento e formação de estoques e pela eficiência no transporte da safra.

A questão logística e o volume de matéria-prima são fatores cruciais para a indústria de biodiesel no Brasil. A soja, devido à sua capilaridade de produção e disponibilidade, destaca-se em relação a outras culturas. Isso é evidenciado pela estreita correlação entre as regiões produtoras de soja (Tabela 6), e os volumes de biodiesel gerados (Figura 9). A região Centro-Sul, que responde por aproximadamente 84% da produção de soja, também é responsável por cerca de 88% da produção nacional de biodiesel.

Ilustração: Rubson Natal Ribeiro Sibaldelli

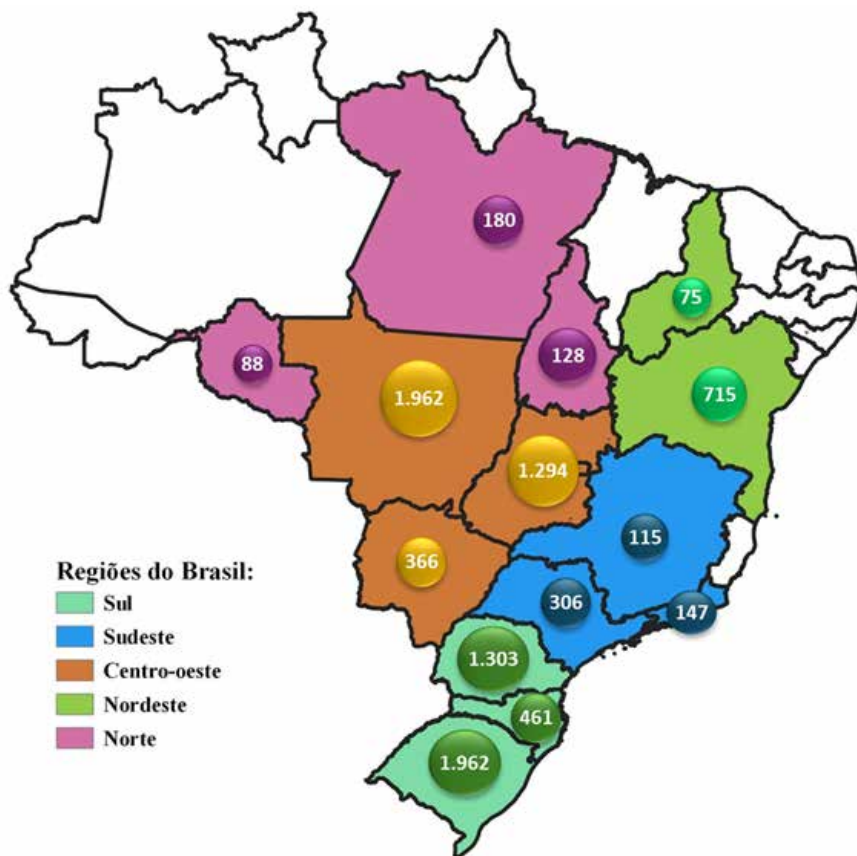


Figura 9. Produção de biodiesel (mil m³) por estados e região no Brasil.

Fonte: Agência Nacional do Petróleo, Gás Natural e Biocombustíveis (2025a).

Passados 16 anos do início do PNPB, algumas espécies consideradas matérias-primas potenciais, permanecem como promessas e têm capacidade zero (0%) de contribuir com a matriz energética nacional para a produção de biodiesel. Diversas são as razões, principalmente a pequena área cultivada, decorrente da frágil tecnologia de produção, incertezas de mercado, cadeias produtivas não estruturadas, questões fundiárias, sazonalidade e estrutura logística, entre outros gargalos que inviabilizam sua dinâmica de colheita e utilização na indústria.

Uma estratégia usada pelos lobistas ou aceita pelos incautos é o insustentável argumento de que as culturas alternativas não competem com a produção de alimentos

e podem ser cultivadas pelos agricultores familiares em pequenas áreas com menor aptidão agrícola.

A viabilização de uma fonte alternativa de óleo, com escala de produção para integrar a matriz do PNPB, demandará, no entanto, tempo e muitos recursos. Esses recursos deveriam se concentrar primeiramente em pesquisas agronômicas sólidas e, em seguida, em pesquisas laboratoriais, contrariamente ao que vem acontecendo. Ou seja, embora haja um vasto conhecimento sobre o óleo da polpa e da amêndoa (Faria, 2010; Sanjinez-Argandoña; Chuba, 2011; Vieira et al., 2012; Pereira et al., 2014; Costa Junior et al., 2015; Lescano et al., 2015; Del Río et al., 2016; Evaristo et al.; 2016a; 2016b; 2017; Shahidi; Camargo, 2016; Souza et al., 2017; Antoniassi et al., 2020), e até o período mais adequados para coleta de folhas para fins avaliação do estado nutricional (Dietrich et al., 2024), ainda se sabe pouco sobre o sistema de produção e a logística de comercialização.

Estudos fitotécnicos de longa duração seriam uma parte significativa da solução. Ignorando essas premissas, muitos cultivos foram incentivados no Brasil e acabaram fracassando, resultando em uma sensação de privação relativa para os agricultores, que, ao arcar com prejuízos financeiros, viram seus sonhos destruídos. No âmbito do Renovabio e do PNPB, dois exemplos mais recentes são o pinhão-manso e a mamona. O primeiro caso ilustra de forma contundente que a propaganda articulada, sem respaldo técnico e científico, aliada à falta de validação em um ambiente real de negócios, pode superar o conhecimento agronômico e mercadológico.

O pinhão-manso mereceria um capítulo à parte nos anais dos grandes erros agrônômicos e comerciais, bem como no poder da propaganda. Especialistas declamaram Odes às diversas vantagens e potencialidades dessa espécie, resgatando uma cultura esquecida, promovendo eventos científicos e acumulando vastas citações bibliográficas. No entanto, os agricultores e empresários, que acreditaram nessa promessa, arcam com os prejuízos decorrentes dessa aposta.

No caso da mamona, além de características inerentes de seu óleo, não foram analisadas: (a) fragilidades agronômicas básicas, como instabilidade produtiva e dificuldades para compor sistemas de produção (e.g. eliminação de plantas guaxas e controle de plantas daninhas e de doenças), que incorrem em baixas produtividades; (b) questões socioeconômicas, como estrutura fundiária e comercial, que incorrem na inexistência de uma cadeia produtiva estruturada. A falta das referidas análises, entre outras, selou o destino da mamona que não tem sido relevante para o Renovabio.

Com uma área produtiva de aproximadamente 200 mil hectares, principalmente no Pará (Rumos [...], 2025), o dendê apresenta uma questão instigante que ressalta as potencialidades dessa cultura: o Brasil possui o maior potencial mundial para a produção de óleo de palma. Isso se deve aos quase 70 milhões de hectares de terras aptas à dendeicultura, com destaque para os estados do Amazonas, Pará, Bahia e Amapá (Valois, 1997; Veiga et al., 2000; Suframa, 2003).

Assim, com base nas matérias-primas e na capacidade de atender às demandas crescentes de biodiesel no Brasil (Tabela 3), surgem alguns questionamentos. Por exemplo: quais culturas podem competir ou complementar aquelas já mencionadas, a curto, médio ou longo prazo, para a produção de bioenergia?

Em termos previdenciários, o curto prazo é geralmente entendido como um período de até dois anos, o médio prazo como um intervalo de três a dez anos, e o longo prazo como mais de dez anos. Para investimentos financeiros, o curto prazo costuma variar de seis meses a um ano, o médio de um a cinco anos e o longo de cinco a dez anos. No entanto, no contexto da maturação agrônômica e do agronegócio, esses prazos tendem a ser mais elásticos, podendo se estender dependendo das características específicas de cada setor. No entanto, sem uma estrutura adequada de pesquisa e transferência de tecnologia, o tempo de retorno dos investimentos em alternativas para a produção de biodiesel pode não atender aos prazos esperados pelos empresários. Mais preocupante ainda, esse retorno poderá ser afetado por decisões políticas.

Diante dos pressupostos mencionados acima, a sociedade pode realmente se dar ao luxo de esperar por novas fontes de matérias-primas enquanto critica as que já estão disponíveis? Existe, de fato, uma disposição para substituir parte do diesel fóssil por fontes renováveis, considerando as imensas reservas existentes? Os países produtores ou com reservas de combustíveis fósseis irão parar de explorá-las? É realmente mais barata, sustentável ou socialmente justa a produção de bioenergia? As propaladas opções de algumas espécies apresentam real potencial produtivo? Muitos outros questionamentos poderiam ser levantados, como, por exemplo, se as propostas de médio e longo prazos são confiáveis ou se vale a pena investir dinheiro e tempo em afirmações desprovidas de base agrônômica e comercial.

Nesse contexto, a soja ainda é a única fonte que reúne requisitos para sustentar o Renovabio, pois conta com uma eficiente tecnologia de produção, mercado e cadeia produtiva estruturados, logística favorável e indicação técnica para todas as regiões agrícolas do País (Seixas et al., 2020), fruto de cinco décadas de pesquisa e desenvolvimento.

QUESTIONAMENTOS PARA A ESCOLHA DE NOVAS MATÉRIAS-PRIMAS

A palavra convence, mas o exemplo arrasta.
Tida como de Confúcio (500 a.C.)

Ao considerar matérias-primas alternativas de óleo vegetal com potencial para a produção de biodiesel, é crucial levantar alguns questionamentos. Se as respostas revelarem incertezas, inconsistências ou desconhecimento, isso indica de maneira contundente que a realização de estudos fitotécnicos e de melhoramento genético é absolutamente necessária e deveria preceder quaisquer promessas.

Algumas questões relativas às forças ou fraquezas das matérias-primas

Agronômicas:

- Existem recomendações técnicas e pacotes tecnológicos robustos para seu cultivo?
- Existem estudos de ZARC indicando as regiões com menores riscos de cultivo e as melhores épocas para sua semeadura e de produção?
- Quais as características físicas, químicas ou biológicas do solo que são mais adequadas para o sucesso do seu cultivo?
- Qual o sistema de manejo do solo mais adequado e a estratégia de manejo nutricional recomendada para a produção comercial?
- Existem fornecedores de sementes ou de mudas certificadas?
- Qual a procedência e a homogeneidade (padrão de qualidade/produktividade) das sementes ou mudas?
- A cultura pode compor os sistemas de cultivos já existentes de sucessão e rotação?
- Quais as principais pragas, doenças e plantas daninhas recorrentes nas lavouras?
- A cultura tem sensibilidade aos herbicidas usados nos sistemas de produção nos quais poderá ser incluída?
- Existem defensivos registrados no Mapa eficientes no tratamento das pragas, doenças e plantas daninhas que a infestam?
- Qual o consumo de água nas principais fases de desenvolvimento da cultura?
- Qual o ciclo da cultura anual, ou início do ciclo se for cultura perene?
- A cultura é sensível ou multiplica nematoides no solo?

Conjunturais e mercadológicas:

- Qual o custo de produção e o payback do empreendimento, principalmente para as culturas perenes?
- Existem máquinas e equipamentos adequados para a semeadura, tratos culturais e colheita?
- Qual o valor recebido pelos produtores pela venda da produção?
- Existem fornecedores locais de insumos necessários para seu cultivo?
- Há mão de obra disponível para implantação, manejo e colheita?
- Quais são as necessidades de armazenamento, considerando a sazonalidade de produção de grãos ou de frutos?
- A produção pode ser armazenada para atendimento necessidade anual de matéria-prima?
- Existem mercados regionais para aquisição da produção?

A falta de respostas para esses e muitos outros questionamentos é o motivo pelos quais várias espécies citadas como potenciais, com diversas alegações e destaques (e.g. não competir com a produção de alimentos ou, serem espécies cultivadas desde antes da Era Cristã), não tem grande evolução. Sem o suporte duradouro de pesquisas, grande parte destas espécies permanece sendo cultivada em escala regional, em comunidades pobres ou isoladas, com menor infraestrutura produtiva e pouca assistência governamental.

É interessante notar que, embora o Brasil possua uma grande diversidade de espécies vegetais, as quatro principais culturas responsáveis por 92% da produção mundial de óleo - dendê, soja, canola e girassol - não são originárias do país. Esse protagonismo no mercado global está alicerçado em décadas de investimentos em pesquisa e transferência de tecnologia.

No Brasil, a soja é um caso de sucesso, pois além das contribuições da Embrapa Soja que está completando 49 anos de existência em 2024, diversos institutos estaduais de pesquisa, universidades e outras instituições públicas e privadas ligadas ao agronegócio vêm desenvolvendo trabalhos técnico-científicos com a cultura. Não foi apenas a retórica que transformou a incipiente cultura da soja de décadas atrás (Löbbecke, 1935, 1938, 1942a, 1942b, 1945; Bonato; Bonato, 1987) na principal oleaginosa do país. Essa transformação resultou de ações coordenadas entre instituições, governos e grande número de produtores - muitos deles pequenos - que acreditaram na cultura e superaram diversas adversidades.

Um bom exemplo do esforço para se “desenvolver” uma espécie com potencial produtivo foi a canola (*Brassica napus* L. e *Brassica rapa* L.), no início da década de 1970. A história sugere que a colza já era cultivada na Índia em 2.000 a.C., planta da família das crucíferas que possuía algumas características indesejáveis para a saúde. Canola, que é um acrônimo de *Canadian Oil Low Acid*, não uma marca registrada, refere-se a uma planta cujo óleo deve conter menos de 2% de ácido erúico, e as sementes secas apresentam, no máximo, 30 micromoles de glucosinolatos por grama de componente sólido (Canola Council of Canada, 2024). Vale destacar que, atualmente, é a segunda cultura anual com maior produção de óleo no mundo.

Uma constatação sobre a escolha de novas matérias-primas nos leva a uma importante reflexão: deixar de aproveitar as riquezas da natureza brasileira, sem o respaldo de pesquisas de campo duradouras e estruturadas, é acreditar que apenas opiniões, sem ações concretas, discursos vazios e “planejamentos”, podem transformar uma espécie em uma fonte eficiente de óleo.

ESTUDOS DE CASOS

Só se pode dizer que existe aquilo que possa ser provado.
Ceticismo Metodológico; René Descartes

Há muito tempo, persiste a esperança de que plantas nativas dos biomas brasileiros se tornem fornecedoras de óleos vegetais para as cadeias de produção de biodiesel e outros setores da indústria, devido às suas propriedades físico-químicas, sensoriais, nutricionais e funcionais. No entanto, apesar das promessas e do surgimento de espécies potenciais, essa realidade ainda está distante de se concretizar.

Como exemplo do movimento de incentivo ao cultivo de espécies oleaginosas, baseado na projeção de vantagens competitivas e na subestimação das dificuldades, riscos e incertezas, apresentaremos dois estudos de caso sobre culturas consideradas promissoras para a produção de biodiesel. Essas culturas são vistas como vantajosas por não competirem diretamente com a produção de alimentos, por se adaptarem a áreas menos apropriadas para culturas de grãos e por serem ambientalmente mais adequadas: a camelina, uma cultura anual exótica, e a macaúba, uma planta perene e nativa de diferentes biomas do Brasil.

Independentemente das vantagens frequentemente citadas para essas ou outras espécies, nenhum sistema deve ser considerado aceitável ou ideal a priori, sem que todos os aspectos relacionados à real potencialidade da espécie sejam devidamente estudados. Afinal, empresários e produtores assumem riscos significativos, e muitos já faliram ou sofreram grandes prejuízos, vendo seus sonhos se transformarem em pesadelos. Portanto, embora o lobby seja uma prática comum e válida, ele não deveria comprometer a objetividade dos fatos na pesquisa científica, que deve sempre se basear em dados concretos. Conforme nos ensina Taleb (2018), não se deve confiar em alguém que não arrisca a própria pele.

O dendê não será discutido, pois é a cultura com maior produção de óleo no mundo, com diversos predicativos agronômicos e reconhecido por sua eficiência energética. A lenta expansão do cultivo de dendê no Brasil está mais relacionada ao desenvolvimento de políticas públicas e estratégias competitivas de longo prazo, à carência de investimentos em pesquisa e infraestrutura (Rocha; Castro, 2012), além da concorrência com outros óleos e das preocupações ambientais e sociais, do que a problemas agronômicos. Além disso, embora não seja o foco deste trabalho, é importante destacar que, devido à sua relevância global, o planeta precisará maximizar a produção de óleos vegetais para contribuir na substituição parcial dos combustíveis fósseis.

Um exemplo claro da gigantesca demanda global por combustíveis é o consumo de querosene de aviação, estimado em impressionantes 390 bilhões de litros por ano, contrastando com a produção ainda incipiente de SAF (*Sustainable Aviation Fuel*), que atinge apenas 14 milhões de litros (Disponibilidade [...], 2021; Zapparoli, 2022).

CAMELINA

É um erro grave teorizar antes de se ter os dados. Sem perceber, começa-se a distorcer os fatos para que se ajustem às teorias, em vez de fazer com que as teorias se ajustem aos fatos.

Sherlock Holmes: A scandal in Bohemia; Arthur Conan Doyle.

Segundo Lopes et al. (2019), citando Fröhlich e Rice (2005) e Moser e Vaughn (2010), *Camelina sativa* (L.) Crantz é uma planta herbácea da família Brassicaceae que produz sementes ricas em óleo (28% a 40%), com boa resistência à seca e a climas frios. Ela cresce bem em regiões semiáridas e em solos salinos ou de baixa fertilidade. Seu ciclo

de desenvolvimento é curto, variando entre 85 e 100 dias, e o manejo agrícola pode ser realizado com equipamentos comuns às culturas anuais, exigindo baixa aplicação de fertilizantes e agrotóxicos.

Embora as características de *Camelina sativa* possam parecer promissoras, assim como muitos ainda acreditam na possibilidade de um moto-contínuo que viola a “segunda lei da termodinâmica”, a ideia de uma planta que produza de maneira tão eficiente (kg/ha) e com as condições descritas acima parece, à primeira vista, fantástica. No entanto, afirmações como essas frequentemente carecem de suporte em resultados experimentais de campo. Na realidade, são, muitas vezes, citações de citações que desconsideram a “segunda lei do bom senso”, no que diz respeito a declarações técnicas.

Em razão destas vantagens, há tempos, a camelina tem sido citada como uma das espécies potenciais para atender aos diferentes programas de produção de biodiesel (Jewett, 2015; Sainger et al., 2017). Além do elevado teor de óleo de suas sementes, adota-se de forma recorrente o argumento tergiversado, desprovido de sólidos embasamento técnicos e econômicos, de que a camelina é uma planta rústica e pode ser produzida em áreas marginais e, por essa razão, não competiria por áreas de produção de culturas alimentícias

Esta afirmação apresenta um equívoco conceitual inato. Como exemplo, a expansão da área cultivada com soja no Brasil ocorre, sobretudo, em áreas subutilizadas por proprietários rurais, especialmente sob pastagens em diferentes estágios de degradação (Hirakuri et al., 2018a, 2019a, 2019b, 2020). Além disso, a cultura tem sido uma opção muito adotada em sistemas integrados de produção, principalmente os sistemas de integração lavoura-pecuária-floresta (ILPF) e de integração lavoura-pecuária (ILP), e se tornou a principal opção de cultivo em sistemas de renovação de cana-de-açúcar. Desse modo, a soja não tem competido com a produção de alimentos, mas contribuído para a segurança alimentar do Brasil, provendo grãos para nutrição animal e aumentando a resiliência financeira da pecuária e da atividade canavieira.

Um fato interessante que ilustra como algumas culturas alcançam os píncaros da fama e, posteriormente, experimentam o ocaso, é o caso da camelina. Escavações arqueológicas indicam que a espécie já era conhecida na Idade do Bronze (1500-400 a.C.) (Zubr, 1997). No século 19, a cultura foi amplamente cultivada na França e, em menor grau, na Holanda, Bélgica, Balcãs e Rússia (Plessers et al., 1962). Durante esse período, a área de produção de camelina sempre esteve restrita a solos arenosos e

pobres (Bertsch, 1947, citado por Plessers et al., 1962), o que levou à associação da rusticidade como uma característica da cultura. Mais recentemente, a camelina foi citada como uma ótima matéria-prima para a produção de biodiesel; no entanto, cada vez menos se fala nessa opção. Um exemplo semelhante pode ser encontrado também no pinhão-manso.

Mesmo assim, baseado em premissas como a rusticidade e o baixo custo de produção, além da composição química do óleo superior aos demais óleos vegetais produzidos no país, a literatura traz afirmações de que a Camelina se constitui em uma matéria-prima potencial para a produção de biodiesel no Brasil (Lopes et al., 2019). Assim, a temática ganha posição de destaque no desenvolvimento de projetos futuros, seja para a produção de inovação, seja para o aperfeiçoamento dos processos já existentes.

No entanto, a camelina apresenta uma produtividade média baixa, varia de 0,6 e 1,2 t ha⁻¹, com aproximadamente 38% de óleo. Estudos de prospecção dessa espécie conduzidos na Embrapa Soja (dados não publicados), para avaliação fitotécnica de adaptabilidade ambiental e épocas de semeadura, alcançaram produtividade média de cerca de 1,0 t ha⁻¹ de grãos, na melhor época (Figura 10). Embora essa produtividade seja semelhante àquelas obtidas em alguns estudos realizados no Brasil, o resultado ainda indica a limitada capacidade da cultura de competir com as já estabelecidas no país. Além disso, o processo produtivo - que abrange semeadura, implantação, manejo de solo, tratamentos fitossanitários e colheita - é complexo, e viável apenas com o uso de equipamentos adaptados para o cultivo.

Fotos: César de Castro



Figura 10. Plantas de camelina em diferentes estádios de crescimento nos estudos de épocas de semeadura na Embrapa Soja, Londrina, PR.

Hossain et al. (2019), trabalhando com camelina e plantas oleaginosas no Canadá, conseguiu produtividade de 1823 kg/ha e peso de 1,19 g/1000 grãos de camelina. No Brasil, no entanto, o desempenho agrônômico da espécie foi menos eficiente. No ensaio conduzido em Londrina, norte do Paraná, o ciclo da camelina variou de 96 a 126 dias, com a maior produtividade sendo alcançada na semeadura mais tardia, com 126 dias de ciclo de cultivo e peso médio de 1000 sementes ao redor de 1,0 g (Figura 11). Suquila (2015), trabalhando com camelina em quatro locais no Paraná, obteve peso médio de 1000 sementes de 0,81 g, com valor mínimo de 0,62 g e máximo de 0,94 g.

Fotos: Ruan Francisco Firmiano



Figura 11. Plantas em florescimento (A) e grãos de camelina (B) colhidos nos estudos de épocas de semeadura na Embrapa Soja, Londrina, PR.

O baixo peso das sementes da camelina exige cuidados adicionais nas operações de semeadura e, principalmente, na colheita. Culturas agrícolas tradicionais, como soja, milho, arroz, feijão e girassol, possuem sementes maiores e mais pesadas, além de contar com equipamentos apropriados ou adaptados que são eficientes em todas as etapas do ciclo de cultivo, desde a semeadura até a colheita.

A literatura indica que os mesmos equipamentos utilizados no cultivo da canola (com peso de cerca de 3,0 g/1000 sementes) podem ser empregados também para outras culturas. No Brasil, a canola é cultivada principalmente no Rio Grande do Sul, em uma área de aproximadamente 148 mil hectares (Conab, 2025a). Apesar do aumento nas áreas de cultivo, ainda persistem alguns gargalos que dificultam o avanço sustentável da canola, como a falta de máquinas adequadas para semeadura, tratos culturais, colheita e transporte da safra, além da necessidade de importação das sementes, entre outros. Em outras palavras, uma das culturas mencionadas como suporte para a camelina ou culturas assemelhadas, ainda não tem mostrado um desenvolvimento sólido no Brasil.

O quadro descrito indica que a camelina não possui um pacote tecnológico que torne sua produção viável em campo. Além disso, faltam estudos sobre a formação de uma cadeia produtiva e o desenvolvimento de mercados para a cultura. Vale ressaltar que, mesmo culturas que já possuem cadeias produtivas estruturadas ou semiestruturadas, como canola, girassol e mamona, enfrentam dificuldades para expandir a produção de forma sólida e se tornarem relevantes para o Renovabio. Assim, não há motivos para realizar apostas audaciosas na camelina, ou outras culturas com características semelhantes.

MACAÚBA

Minha terra tem palmeiras onde canta o sabiá.

Canção do exílio; Gonçalves Dias

Entre as culturas agroflorestais emergentes com alto potencial energético, a macaúba é considerada uma promessa notável para a produção de combustíveis (Brasil, 1985; Zelt, 2018). Antes da primeira COP em Berlim, em 1995, quando ainda se falava pouco sobre mudanças climáticas e sua mitigação, a macaúba já era mencionada devido à sua alta capacidade de produção de biomassa, contribuindo assim para a área de bioenergia (Coimbra; Jorge, 2012; Berton et al., 2013; Montoya et al., 2016).

A palmeira macaúba, também conhecida como bocaiúva, macaíba, coco babão, grugru, drude, coco xodó, coco de catarro e mbocayá, entre outros, representa um grupo de palmeiras de ampla ocorrência natural na América Tropical e Subtropical. As principais espécies de interesse comercial são *Acrocomia aculeata*, *Acrocomia totai* e *Acrocomia intumescens* (Brasil, 2024).

A macaúba possui características agronômicas interessantes e é capaz de produzir óleo de qualidade em grande quantidade, o que permite fazer algumas considerações importantes para o agronegócio. Isso indica seu potencial como uma nova fonte de óleo para consumo humano e produção de energia, além de oferecer muitos coprodutos.

A importância da macaúba, conhecida regionalmente por diversos nomes, pode ser atestada pelo reconhecimento do então dramaturgo e jornalista Quintino Antônio Ferreira de Sousa, que em 1853 adotou o nome indígena Bocaiúva, uma espécie nativa de palmeira (macaúba), como afirmação de seu nativismo. O agora Quintino Antônio Ferreira de Sousa Bocaiúva (Quintino Bocaiúva), jornalista famoso, se tornou um des-

tacado político, primeiro-ministro das relações exteriores da República e Presidente da província do Rio de Janeiro, de 1900 a 1903 (Lemos, 2010). Outra curiosidade: a ex-ministra da Agricultura Tereza Cristina Corrêa da Costa Dias é tetraneta do insigne político (Dieguez, 2019).

Esta palmeira é nativa da América Tropical e subtropical, disseminada em diversos biomas, inclusive em regiões semiáridas (Plath et al., 2016; Falasca et al., 2017; Resende et al., 2020). No Brasil, a espécie apresenta concentrações populacionais expressivas em Minas Gerais, Goiás, Mato Grosso e Mato Grosso do Sul, sendo amplamente espalhada pelas áreas de Cerrado (Bhering, 2009; Junqueira et al., 2019). Sítios arqueológicos indicam seu uso pelos povos pré-colombianos da América Tropical até os dias atuais em grandes maciços, inclusive no Paraguai onde já teve seu apogeu nas décadas de 1960 e, no momento, experimenta seu ocaso.

No Paraguai, a exploração industrial da macaúba (mbokaja) começou ainda no século XIX. Rodrigues (1903) menciona o uso do óleo da amêndoa para fabricação de sabão e na iluminação de igrejas, e a comercialização da polpa em forma de bolos para alimentação do gado. Em 1940, já era importante fonte de divisas para o país que exportava o óleo da amêndoa para fabricação de sabão e fins culinários quando dezenas de indústrias o produziam (Markley, 1956).

A indústria de óleo comestível de macaúba alcançou seu auge em 1960 com 2.300 toneladas, ou 65,9% do total de óleo produzido no país. Segundo Savin (1966) citado por McDonald (2007), em 1965, a produção de óleo de amêndoa bruto chegou a 5.100 toneladas, e de óleo da polpa, a 5.000 toneladas, representando 60,7% de todo óleo produzido no país.

A partir de 1966, o governo paraguaio passou a financiar pesquisas e incentivar o desenvolvimento da indústria de óleo, frente à perda de competitividade para o óleo de soja e de algodão. A produção de soja que inicialmente era inexpressiva, atualmente está distribuída em aproximadamente 3,9 milhões de hectares, alcançando 10,7 milhões de toneladas na safra 2024/2025 e um grande produto de exportação (Estados Unidos, 2024a). Por outro lado, havia 26 indústrias de óleo de macaúba em 1953 (Markley, 1956), restando apenas 4 em 2003. O motivo da queda consiste no diferencial competitivo da soja e de óleos importados mais baratos.

Apesar da macaúba caracterizar-se por ser uma planta multipropósito (Figura 12) e todas as suas partes terem usos potenciais (Brasil, 1985; Azevedo Filho et al., 2012; Ciconini, 2012), é o óleo que se configura como o produto com maior valor agregado. Entre os principais usos do óleo, destaca-se a possibilidade de ser utilizado diretamente como fonte alimentar e na indústria oleoquímica para a produção de biocombustíveis (Lopes et al., 2013; Vargas-Carpinteiro et al., 2021). Segundo os mesmos autores salientam, a macaúba é uma planta em que todas as suas partes têm usos potenciais (Tabela 4). No entanto, esclarecem que o alto nível de incerteza associado às práticas agrônômicas, produtividade das plantas e qualidade da biomassa expõem a necessidade de investigação complementar.

Fotos: Niltron Tadeu Vilela Junqueira



Figura 12. Plantas de macaúba em fase de produção, destacando-se a inflorescência e a frutificação.

Conforme observado por Markley (1956), embora quase todas as partes da palmeira macaúba sejam importantes, são os frutos, que têm importância industrial, e para o agricultor, rendimento econômico. Outro aspecto que é citado como destaque é o aproveitamento da macaúba para a prestação de serviços ambientais, como recuperação de solos degradados e recomposição de áreas de preservação (Motoike et al., 2013; Finatec, 2021) e fixação de carbono (Ferreira et al., 2014; Moreira et al., 2020).

Tabela 4. Principais usos das partes da palmeira macaúba.

Parte da planta	Utilização
Folha	Forragem para bovino e equino, ração animal, chapéu, balaio, linha de pesca, redes, cobertura de casas
Estipe	Construção de parede, caibro, ripas, calhas para água, mourão, estacas, fécula nutritiva, palmito, vinho medicinal febrífugo.
Raízes	Diurético
Mesocarpo	Licor, sorvete, óleo de cozinha, analgésico medicinal, hidratante capilar, detergente, sabão, biodiesel
Óleo do mesocarpo	Licor, sorvete, óleo de cozinha, analgésico medicinal, hidratante capilar, detergente, sabão, biodiesel
Endocarpo	Confecções de botões, carvão, biomassa, substituto a brita no concreto, carvão ativado
Amêndoa	Coco, paçoca
Óleo de amêndoa	Óleo de cozinha, óleo para lamparina, detergente, sabão, biodiesel, hidratante capilar, laxante

Fonte: Lorenzi (2006), Azevedo Filho et al. (2012) e Ciconini (2012).

Uma consideração que deve ser feita é que solos degradados precisam ser recuperados, sendo que a macaúba tratada como uma cultura, demandará vários insumos para ser competitiva, com destaque para os fertilizantes. A cultura também necessitará de água⁴ e produtos fitossanitários. Seria uma profunda ingenuidade agrônômica achar que plantas dispersas na paisagem, onde o tempo não foi considerado, podem ser comparadas com plantas melhoradas e eficientes, cultivadas racionalmente (Homma, 2022), ao longo do tempo. Sobrevivência e sucesso significam geração de capital.

⁴ Consequentemente, será necessária a observância do Zoneamento Agrícola de Risco Climático (ZARC) para viabilizar a produção nas condições edafoclimáticas típicas de cada região, com base em uma avaliação adequada da variabilidade local e de suas implicações para a cultura.

Uma curiosidade, pelo menos em algumas regiões, e pouco considerada, são os serviços ecossistêmicos das flores da macaúba ao forrageamento das abelhas (*Apis mellifera*), e das abelhas sem ferrão (Meliponíneos). Na região dos Campos das Vertentes, Estado de Minas Gerais, o período de entressafra ocorre em outubro e novembro. Nessa época ocorre grande escassez de flores, abandono das colmeias e migração dos enxames. Nesse período as abelhas estão ávidas por proteína e com a abertura das inflorescências da macaúba, inicia-se uma grande visitação de abelhas às centenas de flores, possibilitando fortalecer os enxames, num momento crítico para as colmeias. O pólen é tão importante neste período que, mesmo os que caem no chão, são também aproveitados pelas abelhas, em grande profusão⁵.

Na Figura 13, observa-se a sequência da florada da macaúba e o armazenamento dos grãos de pólen transportados pelas forrageadoras de *A. mellifera* até os favos das colmeias. É interessante notar que acima da inflorescência há uma estrutura chamada espata que, em dias nublados ou chuvosos, forma uma “capa” de proteção às flores, enquanto em dias ensolarados, ou nas horas mais quentes do dia, torna-se ereta facilitando a visitação dos polinizadores.

Fotos: Deodoro Magno Brighenti



Figura 13. Inflorescência de macaúba e favo de abelhas (*Apis mellifera*) sendo armazenado com grãos de pólen de macaúba.

⁵ Comunicação pessoal de Deodoro Magno Brighenti, doutor em Entomologia/Apicultura, em 20/09/2024.

Uma característica pouco apreciável são os espinhos longos e afiados no estipe e até nas folhas. Não é sem propósito seu nome científico (*Acrocomia aculeata*), uma combinação binária (nome do gênero seguido do epíteto específico): *aculeata* é uma referência aos inúmeros acúleos, espinhos presentes no tronco e na nervura das folhas e até pequenas estruturas semelhantes a pequenos espinhos, na lateral dos folíolos dessa palmeira. A Figura 14 destaca um estipe, folhas com os espinhos característicos na nervura central e pequenos espinhos nos folíolos. No entanto, é importante registrar que existem plantas sem espinhos nas reminiscências ou cicatrizes da bainha, mais comum em plantas mais velhas.

Fotos: Ruan Francisco Firmano (A) e Alexandre Magno Brighenti (B)



Figura 14. Estipe e folhas de macaúba com espinhos longos e afiados na nervura central e espinhos pequenos nos folíolos.

A Tabela 4 menciona os principais usos da macaúba, incluindo suas folhas como forragem para bovinos e equinos, conforme também indicado por Brasil (1985). Durante períodos de escassez de forragem, os animais se alimentam das folhas da macaúba até cerca da metade do folíolo (Figura 15). A partir desse ponto, os espinhos na nervura central impedem que os animais aproveitem o restante do folíolo, limitando o consumo total das folhas.



Figura 15. Folha de macaúba pastejada pelo gado. Coronel Pacheco/MG, 2024.

Em função dessa observação, foi realizada a determinação da composição químico-bromatológica de duas frações da folha (nervura central + espinhos e folíolo), com o objetivo de avaliar seu valor nutritivo. As amostras foram enviadas ao Laboratório de Análise de Alimentos da Embrapa Gado de Leite (Juiz de Fora, MG) (Tabela 5). A primeira amostra era composta pela nervura central mais espinhos, e a segunda pelos folíolos.

A fração “nervura+espinhos” apresenta baixo teor de proteína bruta (PB) e elevados teores da fração fibrosa (fibra em detergente neutro-FDN, fibra em detergente ácido-FDA e lignina-LIG), o que resulta na baixa digestibilidade da matéria seca (DIVMS) dessa fração foliar. Os valores obtidos, embora sejam próximos aos obtidos para espécies forrageiras tradicionais da região manejadas sob lotação contínua, indicam que esta fração não atende ao mínimo recomendado para atender aos requerimentos de manutenção de bovinos. Por outro lado, a composição do folíolo foi surpreendente, principalmente quanto aos elevados teores de PB (19%), conferindo a esta fração um valor nutritivo superior ao das espécies forrageiras tradicionais manejadas de forma extensiva. Contudo, o elevado teor de LIG e a baixa DIVMS indicam que o folíolo não apresenta um bom valor nutritivo nem um bom potencial de ingestão de matéria seca pelos animais. Além disso, seria interessante determinar a fração indigerível da proteína do folíolo, a fim de permitir uma avaliação mais precisa da proteína disponível para os animais.

Tabela 5. Análise bromatológica de folhas de macaúba, (nervura central + espinhos) e folíolos, realizada no Laboratório de Análise de Alimentos da Embrapa Gado de Leite (Juiz de Fora, MG).

Partes da folha	PB	FDA	FDN	Lignina	DIVMS
	%				
Nervura	4,83	49,33	68,32	11,02	41,06
Folíolo	19,02	33,88	52,32	8,56	46,80

PB: proteína bruta, FDA: fibra em detergente ácido, FDN: fibra em detergente neutro e DIVMS: digestibilidade “in situ” da matéria seca.

Assim, como na palma de óleo, são obtidos dois tipos de óleo da macaúba: da polpa e da amêndoa (Del Río et al., 2016). A maior parte do óleo do fruto, em torno de 80% a 85%, está contido na polpa, e o restante, ao redor do 15% na amêndoa (Fávaro et al., 2022; Fávaro; Rocha, 2022). A Figura 16 apresenta um fruto de macaúba em detalhe, composto por casca (epicarpo), polpa amarela (mesocarpo), casca dura da amêndoa (endocarpo) e amêndoa (endosperma). A maior quantidade de óleo é extraída do mesocarpo, enquanto uma menor quantidade de óleo de palmiste é extraída do endosperma. Após o processo de extração dos óleos, os resíduos do epicarpo e do endocarpo podem ser utilizados para a produção de energia a partir de sua queima em caldeiras.

Foto: César de Castro



Figura 16. Fruto de macaúba (39 g), destacando-se a morfologia característica e percentagem aproximada de cada um dos componentes do fruto.

Além da variabilidade do potencial produtivo entre genótipos de plantas individuais numa mesma área, as plantas apresentam ciclos anuais de maior ou menor produção em resposta às condições climáticas. Consequentemente, as produtividades totais para dois anos podem variar muito (Markley, 1956).

Segundo Fundação Centro Tecnológico de Minas Gerais (1983) e César et al. (2015), a macaúba pode produzir, cerca de 4 a 6 toneladas de óleo/ha/ano, produtividade semelhante ao rendimento de plantios comerciais de dendê. No entanto, estas estimativas baseiam-se em estudos exploratórios e poucos plantios comerciais ou de maciços da macaúba.

Junqueira et al. (2019) avaliando plantas selecionadas alcançou a produção estimada de 6,9 t/ha de óleo do mesocarpo (polpa) e 1,2 t/ha do endosperma (amêndoa), 19,3 t/ha de endocarpo e 24,5 t/ha de resíduo da polpa e da amêndoa. No mesmo estudo o autor destaca que as estimativas das plantas selecionada (escolhidas) são, no mínimo, duas vezes maiores em relação à respectiva amostra populacional.

Considerando os valores médios das plantas selecionadas, espera-se uma produtividade ao redor de 45,6 t/ha de frutos (densidade de 400 plantas/ha) e o rendimento de óleo total, com eficiência de extração de 70%, será de 4,0 t/ha de óleo de polpa e 0,8 t/ha de óleo de amêndoa. No entanto, os melhores resultados de amostra populacional (não selecionadas) foram alcançados, 2,3 t de óleo de polpa, 0,4 t de óleo de amêndoa, 6,4 t de endocarpo e 5,9 t de torta, considerando 400 plantas/ha (Junqueira et al., 2019). O que se destaca neste meticoloso estudo, é a grande variabilidade de ideótipos na paisagem, com produtividades e rendimento de óleo distintos, devido à grande variabilidade nos números e tamanhos de cachos e de frutos/plantas.

Em consonância com o que foi mencionado anteriormente, a Figura 17 apresenta duas plantas do pool de matrizes selecionadas do banco de germoplasma da Embrapa Cerarados, carregadas com vários cachos e com potencial para produzir mais de 100 kg de frutos por planta por ano. Lavouras estabelecidas com mudas de plantas que apresentassem uniformemente esse potencial seriam responsáveis por grande parte do sucesso do empreendimento.



Figura 17. Plantas de macaúba com vários cachos de frutos e elevado potencial produtivo.

O cultivo da macaúba pode ser solteiro, mas tem sido também preconizado arranjos agroflorestais, ou ainda a integração com a produção animal. O alto rendimento potencial em óleo qualifica a macaúba como importante opção para exploração econômica em áreas inaptas para a palma de óleo, cobrindo boa parte do território nacional (Pires et al., 2013).

Com a publicação do Zoneamento Agrícola de Risco Climático (ZARC) para a macaúba (Brasil, 2024), reduzem-se as incertezas relacionadas ao solo e ao clima, promovendo um cultivo racional, independentemente do modelo de produção adotado. O ZARC é uma ferramenta essencial para possibilitar uma produção agrícola mais segura e sustentável no Brasil, contribuindo para um planejamento mais eficiente e incentivando práticas agrícolas de alta qualidade.

Um programa de melhoramento genético voltado para a utilização comercial desta espécie deverá, além de identificar genótipos de alta capacidade produtiva, buscar ideótipos que apresentem características favoráveis ao manejo da cultura. Nesse contexto, destaca-se a grande necessidade de produzir mudas padronizadas de plantas melhoradas ou selecionadas, conforme indicado pelas médias gerais das plantas superiores e pelo seu potencial de produção de óleo. Para atender a essa demanda, é fundamental conhecer o germoplasma disponível, levando em consideração a diver-

sidade genética, com vistas ao sucesso dos programas de melhoramento. Laviola et al. (2016) e Junqueira et al. (2019) destacam essas necessidades, bem como os trabalhos em andamento nas áreas de recursos genéticos, sistemas de produção, qualidade da matéria-prima, processamento, além de análises socioeconômicas e de impactos ambientais.

Uma questão importante no sistema de produção da cultura é a colheita. Assim como na palma de óleo, os frutos da macaúba necessitam de um rápido processamento pós-colheita para evitar a degradação, o que compromete a qualidade do óleo (Souza, 2013; Franco, 2019). Essa perda de qualidade ocorre devido ao contato dos frutos com o solo, que aumenta a umidade e favorece a colonização de microrganismos, responsáveis por deteriorar e alterar suas características físico-químicas (Motta et al., 2011).

O tempo ideal de processamento dos frutos colhidos é compreendido entre 7 e 15 dias (Resende et al., 2019). Rinaldi et al. (2020), observa que após a colheita, os frutos armazenados à sombra em condições ambientais mantêm o teor de óleo por até 15 dias. No entanto, o armazenamento por um período superior a 15 dias resulta em perda de óleo, redução de massa da polpa e de conteúdo de água. Os microrganismos, especialmente os fungos, hidrolisam os triglicerídeos presentes na polpa, resultando em um aumento do teor de ácidos graxos livres no óleo (Silva, 2017). Apesar das diferenças morfológicas e dos padrões de amadurecimento entre os cachos de dendê e da macaúba, a colheita eficiente continua sendo um obstáculo para o manejo racional.

Vários autores afirmam que a macaúba apresenta alta produtividade, posicionando-a entre as principais culturas agroenergéticas em termos de produção de frutos por hectare por ano e rendimento de óleo. Em algumas comparações, a produtividade da macaúba é igual ou até superior à da palma de óleo (Fundação..., 1983; Brasil, 1985; Wandeck; Justo, 1988; Teixeira, 2005; Nucci, 2007; Roscoe et al., 2007; Cargnin et al., 2008; Manfio et al., 2012; Berton, 2013; Ciconini et al., 2013; Fávoro; Miranda, 2013; Pires et al., 2013; César et al., 2015; Fonseca, 2016; Colombo et al., 2017; Vianna et al., 2017; Fávoro; Rocha, 2022).

No entanto, muitos estudos e revisões de literatura sobre a macaúba se baseiam em poucas referências bibliográficas, frequentemente citando fontes secundárias, o que dificulta a localização das fontes originais. Além disso, muitos desses trabalhos são teóricos, consistindo em estimativas de produtividade ou artigos de opinião, com poucos dados provenientes de áreas de produção consolidadas. Por essa razão, alguns autores, corretamente, ressaltam a necessidade de estudos de campo em condições reais que confirmem essas informações.

A macaúba apresenta características semelhantes a outros resíduos florestais ou agrícolas utilizados na produção de biocombustíveis. Contudo, devido ao seu alto potencial produtivo em regiões tropicais e subtropicais, o Brasil tem condições favoráveis para promover o cultivo comercial dessa palmeira, mesmo que sua exploração tenha sido predominantemente extrativista (César et al., 2015; Cardoso et al., 2017). Contudo, os mesmos autores enfatizam que a adoção, em larga escala, da macaúba como fonte para a produção de biocombustíveis dependerá principalmente do sucesso e esforços de pesquisa atuais e futuros no sentido de domesticar a espécie, desenvolver mudas de qualidade e modelos de plantação sustentáveis (e.g. integração com a pecuária e/ou culturas alimentares), bem como gerar tecnologias adequadas à colheita e pós-colheita.

Com base em tantos estudos, por que a produção da macaúba ainda não se concretizou, mesmo com alertas sobre essas necessidades? Para entender a resposta, é necessário considerar algumas informações essenciais, como: (a) a domesticação e seleção da espécie; (b) o domínio do pacote tecnológico; (c) a carga de trabalho exigida no cultivo; (d) a estruturação da cadeia produtiva; (e) aspectos mercadológicos e preços; (f) o custo de produção; umbilicalmente ligado ao manejo da cultura; e (g) a logística associada ao processo. Entretanto, além dos conhecimentos agrônômicos necessários para tornar o sistema de produção mais eficiente e fortalecer a cadeia de produção e consumo dos produtos da macaúba, é fundamental reduzir as incertezas que cercam a tomada de decisão dos investidores. O Estado deveria ocupar o papel de agente indutor nesse processo.

Em Minas Gerais, a utilização da macaúba como fonte produtora de energia renovável poderia ter sido impulsionada pelo Governo Estadual, que em 2011 regulamentou a Lei nº 19.485/2011 – Pró-Macaúba, instituindo a política estadual de incentivo ao cultivo, à extração, à comercialização, ao consumo e à transformação da macaúba e das demais palmeiras oleaginosas (Minas Gerais, 2011). A reboque dessa lei, foi implementada a Plataforma de Bioquerosene. Infelizmente, tanto o Pró-Macaúba quanto a Plataforma de Bioquerosene não fazem parte das ações prioritárias das Políticas Públicas Governamentais em execução.

Uma alvissareira notícia é a iniciativa da Acelen Renováveis, empresa de energia criada pelo fundo Mubadala Capital e a Embrapa, que iniciam domesticação da macaúba para a produção de combustível renovável de aviação (SAF), diesel verde (HVO), energia térmica e outros coprodutos de alto valor agregado. Este projeto, que terá duração de cinco anos, está amparado em acordos técnicos de cooperação técnica, com

investimento de 13,7 milhões de reais. No entanto, conforme citado na matéria, há um longo caminho pela frente e o desenvolvimento agroindustrial da macaúba está apenas no seu início (Acelen, 2021).

De acordo com reportagem de Tosi (2024), estima-se que a Acelen investirá 15 bilhões de reais ao longo de dez anos, inicialmente com um módulo de cultivo de macaúba de 200 mil hectares, expandindo para 1 milhão de hectares. Enquanto esses 200 mil hectares de macaúba não entrarem em produção – o que, conforme a matéria, levará até 3,5 anos – a usina da Acelen na Bahia funcionará movida a óleo de soja. A mesma reportagem aponta que a macaúba tem atributos para se tornar a nova soja.

Outra iniciativa interessante (BNDES [...], 2024), é o financiamento aprovado pelo Banco Nacional de Desenvolvimento Econômico e Social (BNDES) de R\$ 257,9 milhões para a Acelen implantar um centro de inovação tecnológica – o Acelen Agripark – focado em pesquisa e desenvolvimento da cultura. Segunda a mesma reportagem O projeto permitirá o desenvolvimento de novas mudas de macaúba e a seleção dos maciços com maior potencial de produção de óleo e a estruturação de um banco de germoplasma. A tecnologia permitirá a seleção das melhores plantas para a produção de sementes, clonagem e melhoramento genético.

Este é o primeiro financiamento do BNDES voltado ao desenvolvimento de SAF, considerado o “combustível do futuro”. O centro de inovação, será localizado em Montes Claros-MG e será responsável pelas pesquisas e o desenvolvimento para suportar o projeto da biorrefinaria de combustíveis. A estrutura terá capacidade de germinação de 1,7 milhão de sementes por mês, com a produção de 10,5 milhões de mudas de macaúba por ano.

Um dado interessante é que este centro de inovação tecnológica integra um projeto maior da Acelen, com investimento total estimado em US\$ 2,7 bilhões. O projeto permitirá a produção de 20 mil barris/dia de combustível renovável, a captura de quase 60 milhões de toneladas de CO₂ equivalente e a geração de mais de 90 mil empregos. Essa estratégia inédita, voltada para o uso da macaúba, prevê também o cultivo de 180 mil hectares em Minas Gerais e na Bahia. Além disso, 20% da produção total de combustíveis virá da agricultura familiar, beneficiando mais de dez mil famílias nas áreas de atuação do projeto (Energia [...], 2024).

Como se pode observar, a macaúba tem conquistado merecida atenção como potencial fornecedora de matéria-prima para o programa de produção de combustível reno-

vável, contribuindo para a transição energética com impactos significativos nas áreas social, ambiental e de desenvolvimento tecnológico. Isso pode fortalecer a imagem do Brasil como parte da solução para a descarbonização global. Resta-nos esperar que essas expectativas se concretizem.

Entretanto, Conceição et al. (2015, p. 271) alertaram que, apesar do grande potencial e da diversidade de usos da macaúba, para que essa espécie se torne uma nova cultura viável, são necessários estudos que desenvolvam um sistema de cultivo capaz de explorar seu potencial de rendimento, além da seleção de genótipos ou acessos que respondam adequadamente às tecnologias desenvolvidas. Enfatizaram ainda que, nos últimos 10 anos, houve um crescimento exponencial no conhecimento e na tecnologia relacionados à macaúba e vaticinavam:

Atualmente, é consenso entre pesquisadores das principais instituições envolvidas em pesquisa e desenvolvimento da macaúba que, nos próximos 5 a 10 anos, essa espécie será uma excelente alternativa em sistemas de integração lavoura-pecuária e agroflorestais, adequando-se tanto à agricultura familiar quanto à agricultura tropical.

Principais vantagens comparativas da macaúba

Com base num conjunto de afirmações sobre diferentes matérias-primas, abstraímos alguns fragmentos ou afirmações de trabalhos, muitos de opinião, sobre as vantagens comparativas da macaúba:

- Potencial para redução da pobreza e para o desenvolvimento econômico. fonte de emprego, contribuindo para o desenvolvimento rural e para a fixação da população no campo.
- Potencial de sequestro de carbono acima e abaixo do solo e obtenção de créditos de carbono.
- Alto rendimento na produção de óleo (4,0 a 6,0 t/ha), alta rusticidade e adaptabilidade a diferentes condições edafoclimáticas.
- Possibilidade de extrativismo sustentável, em sistemas agroflorestais sustentáveis.
- Início da produção entre 4 e 5 anos após o plantio e produtividade estendendo-se além dos 50 anos:
- Menor consumo de água, adaptabilidade a diferentes ambientes de produção, dispersão em solos pobres, resistência à seca e ao calor.
- Planta multipropósito, com todas as suas partes apresentando usos potenciais.
- Produção de óleo com excelentes características físico-químicas, carvão e de torta como fonte alternativa de proteína vegetal.
- Prestação de serviços ambientais como recuperação de solos degradados e recomposição de áreas de preservação.



IMPORTÂNCIA DA SOJA PARA O BRASIL

O segredo da soja é a sua utilidade universal.

The Soy Bean's Day Coming; The Wilmington Morning Star (1915).

A soja é e continuará a ser a principal alternativa para um cultivo eficiente e rentável, capaz de atender à demanda do país por óleos, tanto para energia quanto para alimentação, inclusive a longo prazo. Há algumas décadas, a soja não ocupava uma posição de destaque como cultura agrícola no Brasil, mas já era apresentada como uma alternativa para fontes de óleos vegetais (Brasil, 1985) na produção de biodiesel.

Progressivamente, essa cultura tem se consolidado como a opção mais vantajosa, em termos econômicos e práticos, para um número crescente de produtores, incluindo áreas marginais ou de expansão agrícola. Isso possibilitou o desenvolvimento de uma alternativa de cultivo lucrativa em diversos sistemas de produção, segmentos do setor agrícola e módulos de produção (Hirakuri et al., 2019a). Outras culturas continuam sendo discutidas e, em algumas ocasiões, recebem apoio de lobbies.

Para proporcionar maior segurança nos empreendimentos agrícolas, frente às barreiras não tarifárias ou exigências do mercado externo, torna-se essencial integrar ainda mais à cadeia produtiva da soja o uso de ferramentas de gestão e de avaliação do impacto ambiental da propriedade rural, bem como a avaliação do ciclo de vida (ACV) (Matsuura et al., 2015, 2017), inclusive no manejo fitossanitário, lastreado no manejo integrado de pragas e doenças (MIP-MID), que pode reduzir significativamente a carga de pesticidas no meio ambiente (Lucas et al., 2023). Essas abordagens têm como objetivo compreender os sistemas de produção e permitir a redução dos possíveis efeitos negativos do cultivo da oleaginosa, além de corrigir os elos mais frágeis da cadeia produtiva.

A soja ocupa em torno de 47,5 milhões de hectares e, em grande parte, é sucedida pelo cultivo do milho, que ocupa, no total, cerca de 21 milhões de hectares (Figura 18). Apesar da discreta previsão de aumento da área de milho, um fato importante é o potencial aumento da produção e da produtividade de milho, inclusive para atender as indústrias de produção de etanol. Assim, considerando-se as potencialidades da cultura do milho e o crescimento dos diferentes mercados, é possível que, nos próximos anos, o milho venha a se aproximar da soja em termos de produção, podendo até apresentar uma maior competitividade em algumas regiões e segmentos de mercado.

O milho é responsável pela produção de quase 116 milhões de toneladas de grão, dos quais 17,3 milhões de toneladas foram processadas para a produção de etanol, e aproximadamente 7,2 bilhões de litros de etanol (anidro e hidratado), representando cerca de 21% da produção nacional (Conab, 2024a, 2025a). Um ponto de destaque na produção de energia é o notável aumento na produção de etanol proveniente do milho desde 2015/2016 e, mais expressivamente, entre a safra 2022/2023 e a atual, evidenciando a solidificação do produto no cenário brasileiro, com crescimento de 33,1% na comparação entre as duas últimas safras.

O crescimento consistente da produção de etanol de milho no Brasil é resultado de um planejamento estratégico e de investimentos significativos, especialmente no Centro-Oeste, que concentra quase 60% da produção nacional de milho. Essa expansão também tem se espalhado para outras regiões, impulsionada por políticas de apoio e pela crescente demanda por biocombustíveis. Outro fator que tem favorecido esse desenvolvimento são os preços do milho, que, em determinadas épocas do ano, tornam o uso do grão para a produção de etanol uma opção economicamente atraente para a indústria.

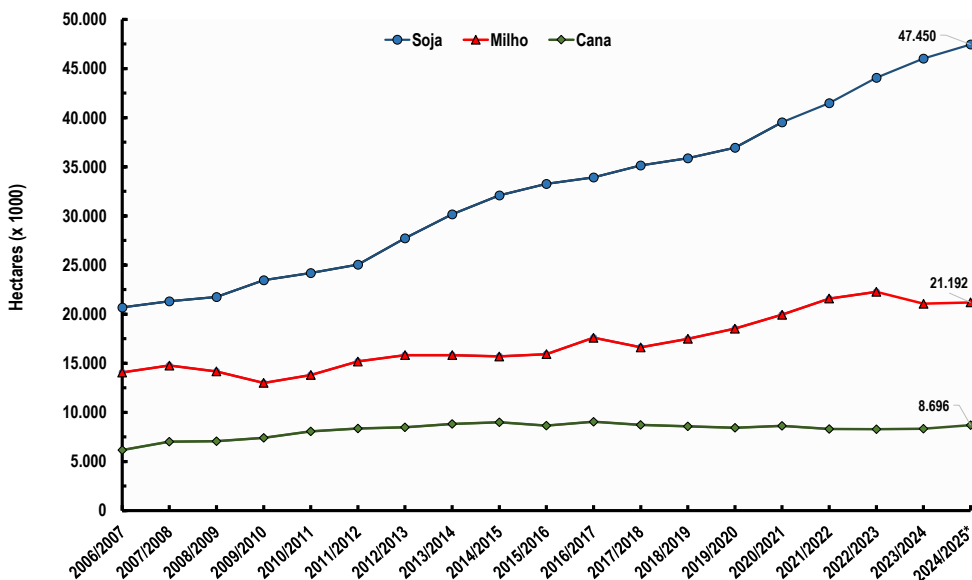


Figura 18. Evolução das áreas de produção das três mais destacadas culturas para a produção de bioenergia no Brasil.

Fonte: Conab (2025a). *Março 2025.

O que, de forma injusta, convencionou-se chamar de monocultura da soja/milho é, na verdade, um sistema de produção agrícola que tem sido um vetor de enorme desenvolvimento de muitas cidades do interior do Brasil, as quais apresentam elevados índices de Desenvolvimento Humano (IDH) (Richards et al., 2015; Hirakuri et al., 2018b), refletindo diretamente na economia do país. Embora possam existir alternativas ao sistema atual, nenhuma delas tem, até o momento, se mostrado tão rentável e eficiente quanto o sistema soja/milho, o que torna sua substituição uma tarefa particularmente difícil.

A cadeia de produção de soja tem contribuído para a geração e fortalecimento de uma classe média rural e desenvolvimento socioeconômico de várias regiões do Brasil (Telhado; Capdeville, 2021). De acordo com o Índice de Desenvolvimento Humano Municipal (IDHM) e o Índice Firjan de Desenvolvimento Municipal (IFDM), que são medidas gerais e sintéticas utilizadas para classificar o grau de desenvolvimento socioeconômico e a qualidade de vida dos municípios brasileiros, com base em indicadores de emprego e renda, educação e saúde da população, existe uma relação diretamente proporcional entre a produção municipal de soja e o nível de desenvolvimento socioeconômico dos municípios (Firjan, 2023). Esses dois indicadores analisam, basicamente, o desenvolvimento socioeconômico de mais de cinco mil municípios brasileiros em três áreas: emprego e renda, educação e saúde. Assim, pode-se estabelecer uma relação direta entre a produção de soja e os índices de desenvolvimento social dos municípios, cujo o coeficiente seria próximo a 1.

A importância do milho na agricultura nacional e no conjunto de matérias-primas para a produção de agroenergia, além da cana-de-açúcar, pode ser medida não só pelo volume de grãos produzidos e utilizados para o arração animal, mas também para a produção de etanol anidro e hidratado, óleo de milho, DDG e DDGs. Vale ressaltar que uma tonelada de grãos de milho produz, em média, cerca de 410 litros de etanol, 300 kg de DDG/s e 18 litros de óleo (Talamini et al., 2022). Todos esses produtos, com valor agregado, explicam o crescimento da indústria de etanol de milho.

As culturas da soja e do milho se desenvolvem quase a pari passu, pois compõem a base da alimentação animal (proteína e carboidratos). A conversão de ração à base de soja e milho em carnes, ovos e leite tem sido fundamental para a significativa evolução da produção de frangos, bovinos, suínos e ovos no Brasil (Figura 19), além de contribuir para a geração de renda no campo e na agroindústria.

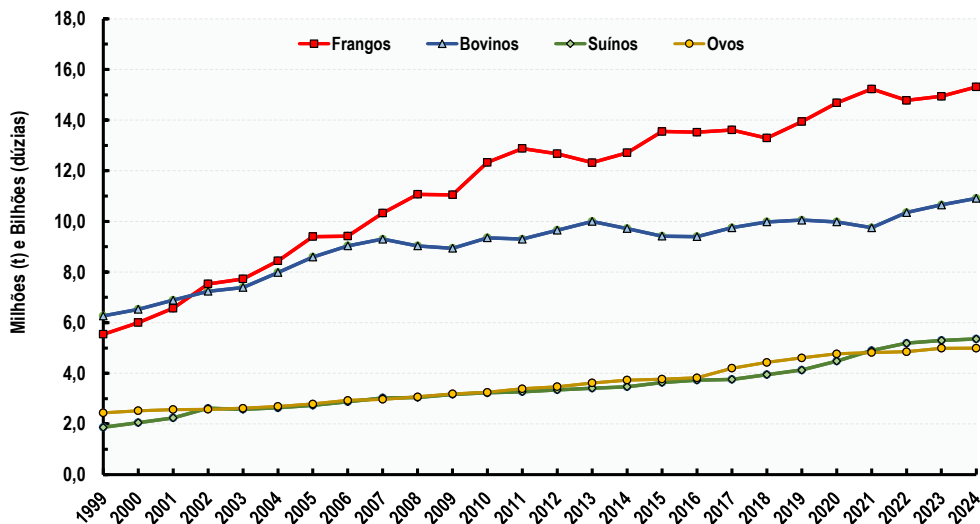


Figura 19. Evolução da produção de carnes de frango, bovina, suína e de ovos no Brasil.

Fonte: Anuário [...] (2023), Talamini e Martins (2023), ABPA (2024), Embrapa Suínos e Aves (2024), Estados Unidos (2024b), Conab (2025c) e IBGE (2025a, 2025b).

O protagonismo da soja não se deve pela produção de óleo, que não é considerado seu produto principal. Ela é bem-sucedida, entre muitos outros fatores, pelo valor proteico do farelo, que tem uma ampla demanda mundial para uso direto e, principalmente, para uso indireto como insumo para rações e diferentes bebidas e extratos vegetais. O óleo de soja também tem elevado valor agregado, sendo largamente usado na alimentação humana e como importante matéria-prima industrial em que se destaca, justamente, a produção de biocombustíveis (Estados Unidos, 2024a; Agência Nacional do Petróleo, Gás Natural e Biocombustíveis, 2024b).

A soja e o milho são matérias-primas importantes para a produção de biocombustíveis no Brasil. Enquanto a soja sustenta a maior parte da produção de biodiesel (~74%) (Agência Nacional do Petróleo, Gás Natural e Biocombustíveis 2025a), a participação do milho no setor de etanol vem crescendo rapidamente e hoje representa cerca de 21 % da produção nacional (Agência Nacional do Petróleo, Gás Natural e Biocombustíveis, 2025b; Única, 2025). Esse avanço destaca a relevância desses grãos na matriz energética do país, com o milho se consolidando como uma fonte renovável estratégica. Além disso, tanto a soja quanto o milho são insumos-chave na nutrição animal – energéticos e proteicos – fundamentais para a criação e engorda de suínos, bovinos e aves (para carne, leite e ovos). Esse papel impacta diretamente o custo de produção

e a eficiência alimentar, influenciando fatores como o ganho de peso e a conversão alimentar. Quais outras matérias-primas possuem qualidades semelhantes ao binômio soja e milho que poderiam ampliar a diversificação do agronegócio brasileiro nessa mesma magnitude?

Reforçando o conceito: A conversão alimentar de frangos é em torno de 1,7, e a de suínos, por volta de 2,5, considerando o peso vivo (Pereira; Cardoso, 2023). Isso destaca a alta dependência da produção de carnes de aves, ovos e suínos da combinação de soja e milho (soja + milho = proteína animal). Portanto, essas duas culturas são fundamentais para as cadeias de produção de proteína animal no Brasil. Vale ressaltar que, nos custos de produção de aves (carne e ovos) e suínos, cerca de 70% são atribuídos às rações (Embrapa Suínos e Aves, 2024), compostas principalmente por milho e soja. Com base na avicultura e na suinocultura, pode-se afirmar que padrões de custos semelhantes se aplicam às cadeias produtivas da bovinocultura de corte e leite, assim como à produção de peixes, perus e de animais de estimação.

Como demonstrado nos gráficos e figuras já citados, a soja não se destaca apenas pelos volumes crescentes de óleo, mas também pela diversidade de coprodutos indispensáveis no cotidiano da sociedade. Esses coprodutos vão além da função de fornecer proteína vegetal para a produção de carnes, leite e ovos, sendo utilizados em uma ampla gama de setores.

Em 2024, o consumo per capita no Brasil foi de aproximadamente 49,0 kg de carne de frango, 20,0 kg de carne suína, 37,0 kg de carne bovina e 269 unidades de ovos. Alguns desses índices estão abaixo dos registrados em países desenvolvidos e em nações emergentes da Ásia, o que revela um expressivo potencial de crescimento para essas cadeias produtivas, especialmente no mercado interno brasileiro, com o aumento no poder aquisitivo da população. Assim, se a cadeia de carnes, ovos e leite é fortemente influenciada pela soja e pelo milho, podemos fazer a seguinte inferência: Se você é o que come, também é o que comeu o que você come.

Para aqueles que elegem outras culturas como potenciais substitutas ou complementares na produção de biodiesel, é importante lembrar que o sucesso da soja foi resultado de planejamento, visão e ações estratégicas de longo prazo. Sem o trabalho contínuo de diversas instituições de ensino e pesquisa, que permitiu a ampla difusão de tecnologias, a soja não teria alcançado os níveis atuais. Ignorar esses princípios é como construir castelos alicerçados em areia ou acreditar que “Roma foi construída em um dia”.

Ao longo de 50 anos, a Embrapa Soja organizou e coordenou 39 Reuniões de Pesquisa de Soja em diferentes regiões do Brasil. Além disso, foram realizadas edições específicas, como a Reunião de Pesquisa de Soja do Paraná, da Região Central do Brasil e da Região Nordeste. Como resultado dessas reuniões e dos trabalhos de pesquisa, foram publicados inúmeros sistemas de produção de soja, conhecidos como Tecnologias de Produção de Soja. A Embrapa Trigo também tem organizado Reuniões de Pesquisa de Soja na Região Sul, abrangendo o Rio Grande do Sul e Santa Catarina, totalizando 43 eventos e diversos sistemas de produção. Além das reuniões técnicas realizadas nas principais regiões sojícolas do país, a Embrapa Soja coordenou nove edições do Congresso Brasileiro de Soja. Esse talvez seja o grande diferencial da soja: uma pesquisa robusta e duradoura, em parceria com instituições públicas e privadas. Um destaque especial deve ser dado à transferência de tecnologia e às ações coordenadas de pesquisa em âmbito nacional.

A produtividade média estimada de soja no Brasil foi de 3.530 kg/ha na safra 2024/2025 (Tabela 2), embora muitos produtores tenham alcançado rendimentos superiores a 5.000 kg/ha, com recordes de até 8.500 kg/ha (Case [...], [2015]). Nos Estados Unidos, um produtor superou seu próprio recorde, atingindo a impressionante marca de 14.680 kg/ha, ou quase 245 sacas/ha, na última safra (Haire, 2024). Esse panorama, impulsionado pelos constantes avanços no melhoramento genético, manejo da cultura e aprimoramento dos ambientes de produção, além de treinamentos e transferência de tecnologias, aponta para uma gigantesca possibilidade de aumento na produção de soja no país. Isso terá um impacto direto na expansão comercial de sua cadeia produtiva, bem como nos setores de carnes (bovinos, suínos, aves e peixes), ovos, leite e outros segmentos alimentícios.

Devido ao crescente potencial de aumento da produtividade e à possibilidade de ocupar áreas já antropizadas ou marginais, a soja ainda tem espaço para crescer e integrar diferentes cadeias produtivas interconectadas. Nesse contexto, embora o farelo e o óleo recebam maior destaque, será apresentado um fluxograma genérico que categoriza alguns processos de transformação dos grãos de soja em produtos de valor agregado, destacando seus usos em diversas cadeias produtivas e reforçando a importância da soja como vetor de desenvolvimento regional e nacional (Figuras 20 A, B, C, D e E).

Vale ainda ressaltar outros produtos industriais e farmacêuticos que contêm subprodutos do processamento da soja, como aqueles derivados da lecitina, utilizada nas indústrias de cosméticos, alimentos e medicamentos, além de isoflavonas, tintas, solventes, compostos elastoméricos, componentes para a produção de espumas indus-

triais e revestimentos e impermeabilizantes. (Schmitz et al., 2008; Johnson; Myers, 1995; Soyata et al., 2021; Gaonkar; Rosentrater, 2019).

Devido aos diversos usos e substituições de produtos industriais derivados do petróleo, com vantagens ambientais e maior sustentabilidade, a soja pode ser vista, em muitos aspectos, como um importante substrato para a química verde (Vaz Junior, 2013). Mesmo sem conhecer todo o potencial da soja, o jornal *The Wilmington Morning Star* já destacava em 1915: “uma cultura, muitos propósitos” (The soy [...], 1915, p. 80).

É interessante observar que, mesmo muito antes do boom da soja, autores como Piper e Morse (1916, 1923), Löbbe (1945), Markley e Goss (1944), e Markley (1947, 1950) já mencionavam que a cultura possuía um conjunto de setores integrados à sua cadeia produtiva, utilizando seus derivados na geração de produtos para os mais diversos fins, incluindo nutrição animal, alimentação humana (como leite e manteiga), geração de energia e bens de consumo (como tintas, vernizes e lubrificantes). Ou seja, muitos já destacavam as potencialidades da soja, e curiosamente, alguns dos produtos citados parecem bastante modernos ou inovadores para a época.

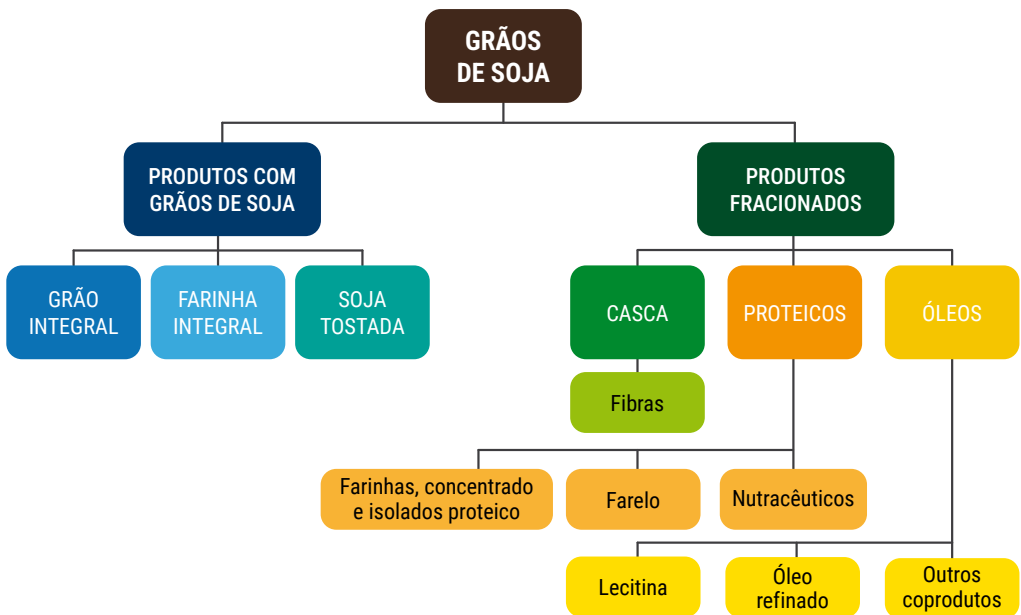


Figura 20 A. Fluxograma com os principais usos da soja em diferentes cadeias de produção.

Fonte: Norberg e Deutsch (2023).

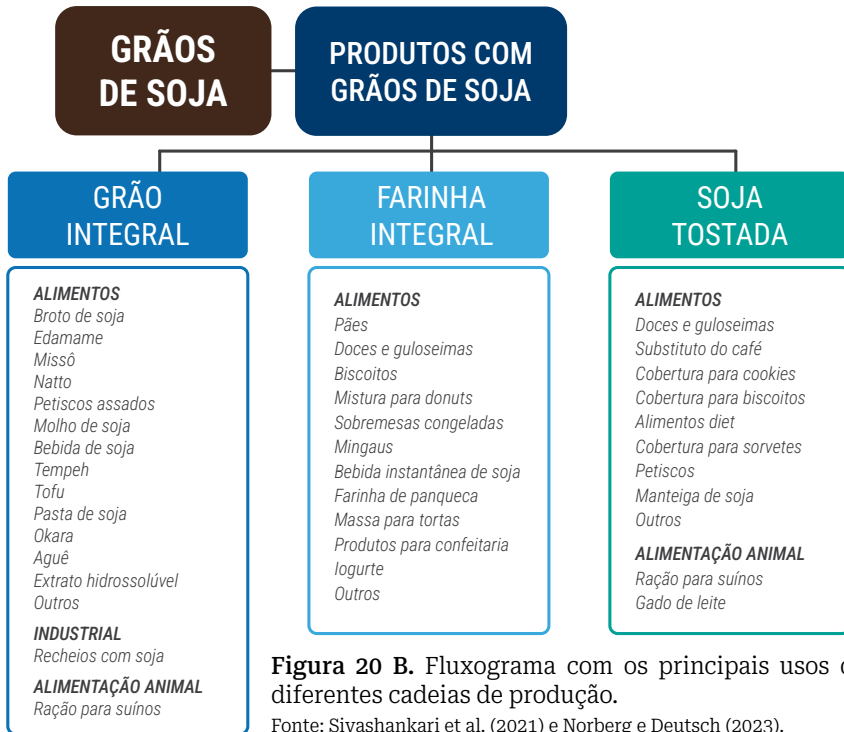


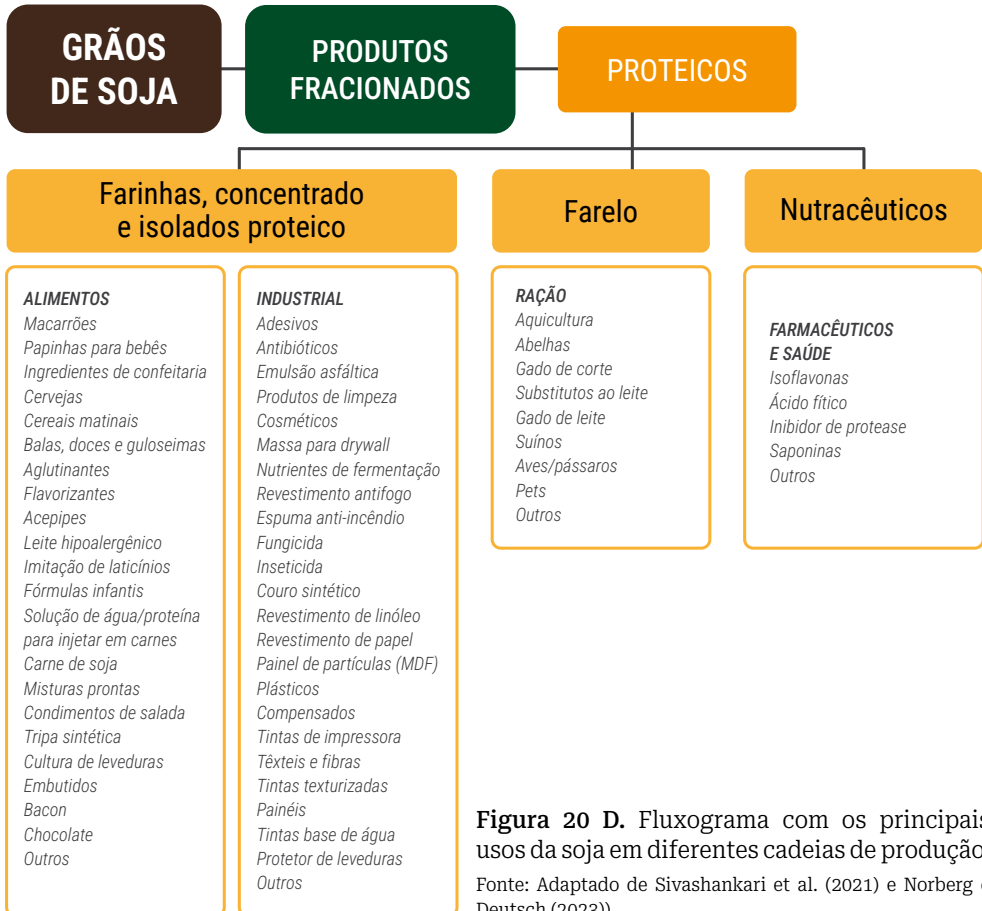
Figura 20 B. Fluxograma com os principais usos da soja em diferentes cadeias de produção.

Fonte: Sivashankari et al. (2021) e Norberg e Deutsch (2023).



Figura 20 C. Fluxograma com os principais usos da soja em diferentes cadeias de produção.

Fonte: Adaptado de Sivashankari et al. (2021) e Norberg e Deutsch (2023).



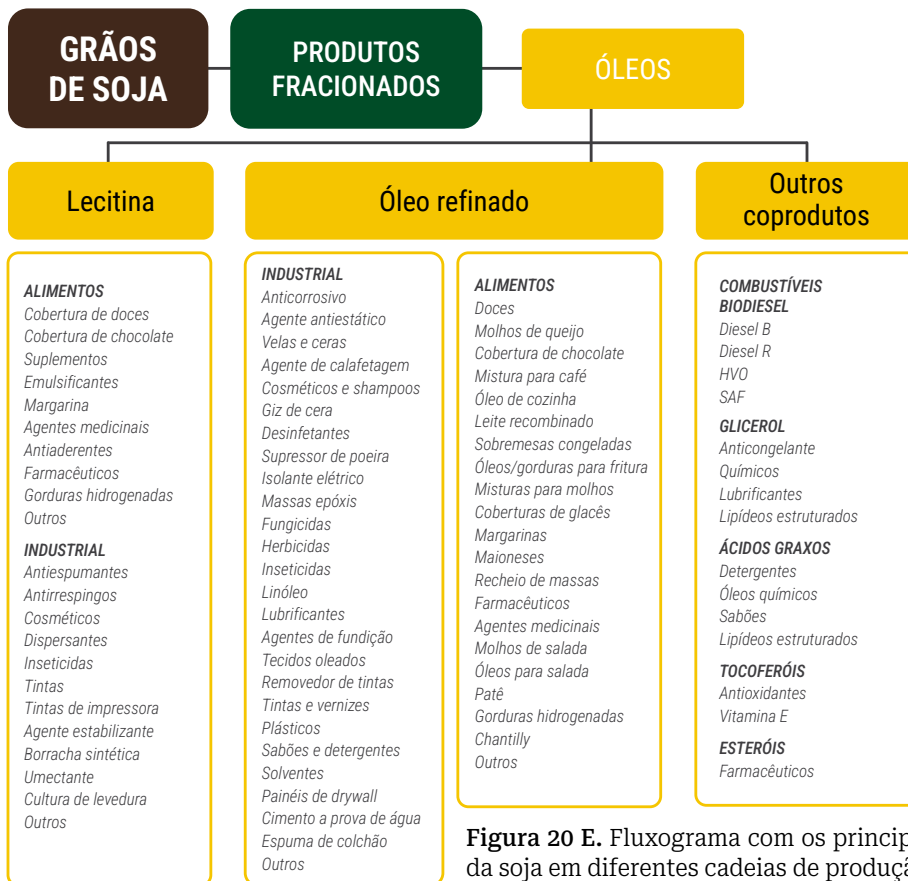


Figura 20 E. Fluxograma com os principais usos da soja em diferentes cadeias de produção.

Fonte: Adaptado de Sivashankari et al. (2021) e Norberg e Deutsch (2023).

Na realidade, os processos e produtos descritos no diagrama não possuem usos estanques; na maioria das vezes, estão interligados a outras cadeias produtivas, evidenciando a ubiquidade da soja e a variedade de produtos com elevado valor agregado, que explicam, em parte, o sucesso dessa cultura. Além das indústrias de alimentos e de combustíveis, a soja também desempenha um papel central em outros setores, como biotecnologia, agroquímicos e comércio de commodities.

É evidente que, como um componente do sistema agroalimentar moderno, a soja está presente em muitos aspectos, mas, ao mesmo tempo, permanece praticamente invisível, ou até mesmo escondida, dos consumidores finais (Du Bois, 2018; Norberg, Deutsch, 2023). Além disso, muitas vezes é vista como um fardo para a sociedade e à natureza (Langthaler et al., 2023). No Brasil, apesar de uma miríade de coprodutos de alto valor agregado, a situação não é diferente.



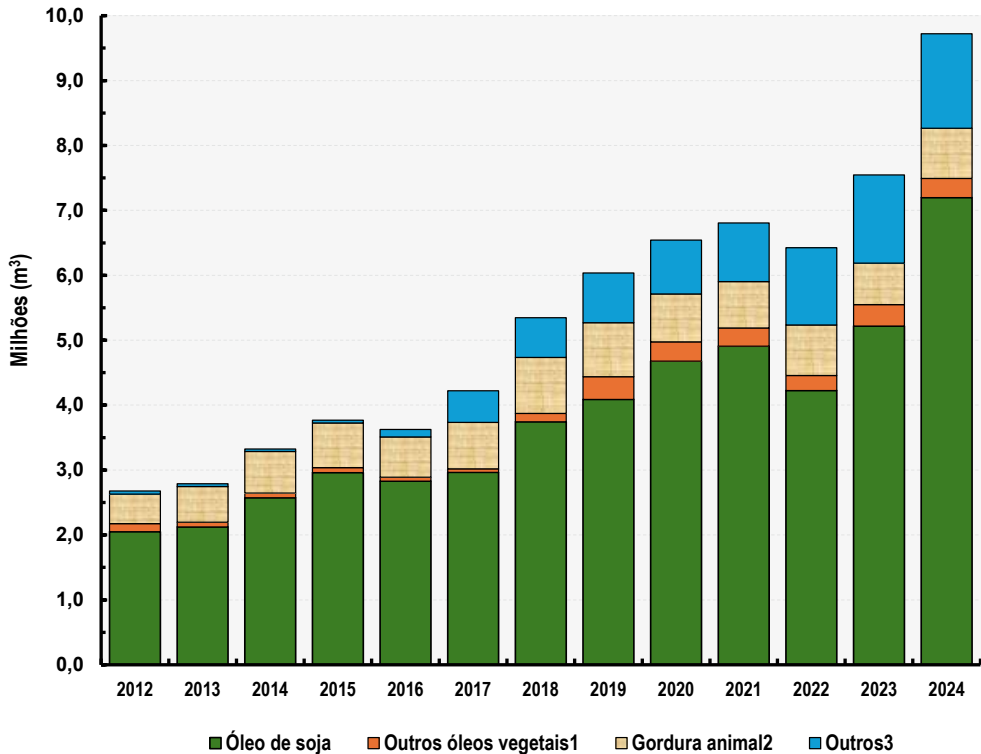
POR QUE A PRODUÇÃO DE BIODIESEL DEPENDE DA SOJA?

“Ahi fica a resenha do que sabemos sobre essa interessante leguminosa - a soja. Seu valor é indiscutível e muito permite esperar-se della em nosso paiz, uma vez que a sua cultura seja bem orientada.”

Löbbe (1935)

Embora referências bibliográficas indiquem problemas ou ineficiência das matérias-primas atuais, como a soja, essas publicações focam vantagens de outras espécies, tratando questões como: intensificação do uso da terra, uso das palmeiras tropicais, inserção de espécies nativas de forma expressiva na bioeconomia, entre outros argumentos. No entanto, a maioria das observações são teóricas ou baseiam-se em preocupações legítimas com o meio ambiente, como a redução do impacto da mudança no uso da terra e das atividades agropecuárias, além da estruturação de arranjos produtivos voltados para o desenvolvimento regional, entre outras narrativas socialmente relevantes. Contudo, muitas dessas análises carecem de concretude, pois negligenciam questões técnicas e econômicas essenciais.

Assim, apesar dos esforços para encontrar fontes de óleo sucedâneos à soja, a quase totalidade das espécies ou cultivos potenciais fracassaram, não por culpa da matéria-prima, mas por diversos motivos que não são objetos de análises pormenorizadas desse documento. Ao longo dos anos, o óleo de soja manteve-se como principal matéria-prima na produção de biodiesel, com uma oferta crescente, exceto pelas quedas na produção nas safras 2015/2016 e 2021/2022, além redução percentual de biodiesel no diesel, de 12% para 10% em 2022 (Figura 21). Na verdade, outros fatores definem os volumes das matérias-primas, além da produção total de uma fonte.



(¹Inclui óleo de algodão, canola, girassol, macaúba, milho, palma e palmiste, ²Inclui gordura bovina, de frango e de porco, ³Inclui óleo de fritura usado e outros materiais graxos).

Figura 21. Principais matérias-primas utilizadas na produção de biodiesel do Brasil, no período 2012-2023, em milhões de m³.

Fonte: (Agência Nacional do Petróleo, Gás Natural e Biocombustíveis, 2025a).

No que se refere ao preço do óleo de soja no Brasil, observa-se um aumento gradual nos preços até junho de 2020, com as cotações variando de 620 R\$/t em janeiro de 1996 para 3.400 R\$/t em junho de 2020. A partir da declaração oficial da Organização Mundial da Saúde (OMS) sobre a pandemia de covid-19, em março de 2020, houve um aumento expressivo nos preços dos produtos agropecuários, com as cotações do óleo de soja superando os R\$9.000/t em maio de 2022. Após a flexibilização das restrições e a mudança no status de emergência da covid-19, os preços começaram a recuar, chegando a R\$4.450/t em abril de 2024. No entanto, até dezembro de 2024, os preços voltaram a mostrar um viés de alta acentuado, atingindo quase R\$7.000/t (Figura 22).

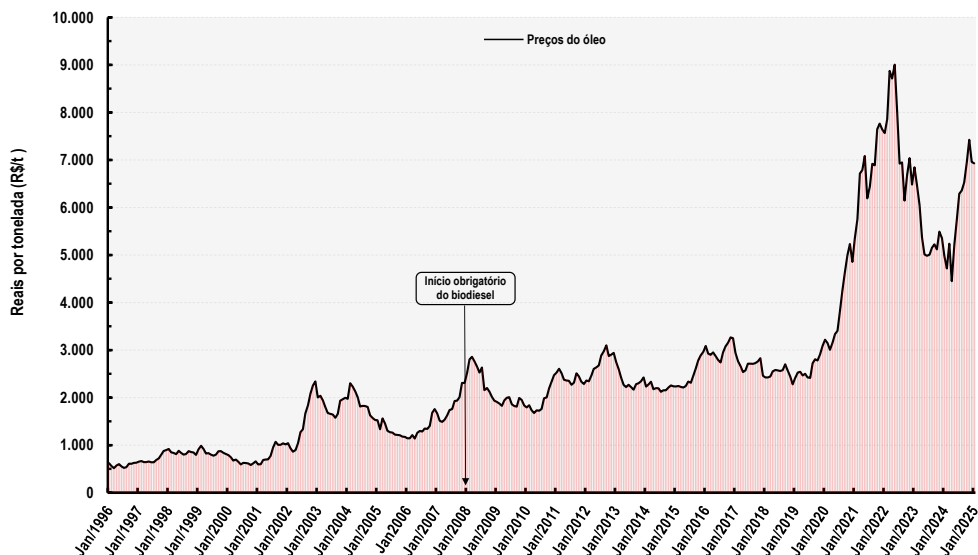


Figura 22. Preço do óleo bruto de soja em São Paulo, em R\$/t.

Fonte: Abiove (2025b).

Independentemente dos motivos para os picos nos preços do óleo de soja, como a quebra de safras (Figura 24), aumento das exportações de grãos, crescimento no consumo de rações (Figuras 19 e 23), ampliação da porcentagem e volume de biodiesel (Tabela 3 e Figura 21), variação nos estoques mundiais de soja e variação cambial, entre outros fatores, o fato é que há uma tendência de alta nos preços do óleo de soja. Essa tendência torna a produção de biodiesel mais cara, impactando diretamente os custos do setor.

Em 2024, o óleo de soja representou aproximadamente 74% (incluindo óleo de soja e ácido graxo de óleo de soja) da produção de biodiesel no Brasil. Em segundo lugar, com cerca de 14%, figuraram outros materiais graxos, como óleos de descarte, misturas de matérias-primas tradicionais em tanque e o reprocessamento de subprodutos gerados na produção de biodiesel, que também contêm óleo de soja (Agência Nacional do Petróleo, Gás Natural e Biocombustíveis, 2025a). Vale destacar que a soma total das gorduras bovina, suína e de frango, juntamente com o óleo de fritura (somando 9,0%), está diretamente ligada à cadeia de produção de soja, devido à demanda por rações e pelo óleo de soja para a cocção, principal óleo de fritura no Brasil (Figura 23).



O óleo de soja respondeu em 2024 por um pouco mais de 74% da produção nacional de biodiesel, variando de 68,9 % em janeiro a 76,9 % em Julho¹.



O Brasil possui o segundo maior rebanho bovino do mundo, com cerca de 234 milhões de cabeças em 2024. O país abateu 39 milhões de bovinos, produzindo ~10 milhões de toneladas de carne em equivalente carcaça².



O Brasil é o quarto maior produtor de suíno do mundo, com aproximadamente 58 milhões de cabeças abatidas em 2024, alcançando uma produção de ~5,3 milhões de toneladas de carne em equivalente carcaça².



Em 2024 foram produzidos 18,4 milhões de litro de biodiesel com óleo de fritura¹. Contudo, mais de 1 bilhão de litros de óleo de cozinha são descartados incorretamente³.



O Brasil é o segundo maior produtor de carne de frango e o sexto de ovos no mundo. Em 2024, foram abatidos ~6 bilhões de cabeças, com produção de 13,6 milhões/t de carne². No setor de ovos produziu ~55 bilhões de unidades e abrigava, ~260 milhões de poedeiras⁴.

Figura 23. Principais cadeias produtivas e matérias-primas relacionadas à soja na produção de biodiesel no Brasil.

Fonte: ¹ Agência Nacional do Petróleo, Gás Natural e Biocombustíveis (2025a), ²IBGE (2025b), ³Rocha (2021) e ⁴ Embrapa Suíno e Aves (2024).

Mesmo que houvesse uma melhoria na logística de coleta e maior conscientização da sociedade para reprocessar todo o óleo vegetal de fritura (Costa Neto et al., 2000; Abiove, 2024; Óleo sustentável, 2024) e derivados, ainda assim não seria possível recolher matéria graxa suficiente para produzir todo o SAF necessário. Portanto, para atender às expectativas, é essencial investir na expansão da área plantada com oleaginosas, especialmente aquelas de alta produtividade, como o dendê e a macaúba. No entanto, apenas o dendê possui atualmente domínio agrônômico, enquanto a macaúba ainda é uma promessa que pode se concretizar no futuro.

O que se depreende da Figura 21 e da Tabela 3 é o papel central da soja na produção de biodiesel no Brasil e a relação umbilical entre a soja e as cadeias de outros materiais graxos (gorduras bovina, suína e de frango) e de óleo de fritura. Assim, o quadro descrito evidencia, de forma inequívoca, a grande importância da soja no mercado de biocombustível, seja para veículos terrestres ou, no futuro, para combustível sustentável de aviação.

Contrariamente às demais culturas emergentes ou potenciais, a soja tem o diferencial de poder ser produzida em todas as regiões do Brasil, desde o sul do Rio Grande do Sul (33° de Latitude) até Roraima (3° de Latitude Norte), e do estado de Alagoas até o estado do Acre. Adicionalmente, a cultura conta com regionalizados sistemas de produção e zoneamento agrícola de risco climático (ZARC- soja) bem estabelecido, o qual indica os ambientes com menores riscos de frustração de safra (Farias et al., 2023).

A soja brasileira possui características determinantes que a diferenciam de outras culturas potenciais, destacando-se pela crescente produtividade e estabilidade de produção, independentemente da região ou estado. O Brasil, como maior produtor mundial de soja, alcança índices de produtividade comparáveis aos dos Estados Unidos. A maioria dos estados produtores de soja apresenta produtividades (kg/ha) próximas à média nacional (Tabela 6), o que reflete o uso de tecnologias avançadas e o treinamento de milhares de produtores, inclusive em áreas de expansão agrícola, como as de pastagem convertida em lavoura.

Tabela 6. Área, produtividade média, produção de soja e variação percentual por estado e região entre as safras 2023/2024 e 2024/2025.

Regiões/UF	Área (1000 ha)		Produtividade (kg/ha)		Produção (1000 t)	
	2023/2024	2024/2025	2023/2024	2024/2025	2023/2024	2024/2025
N	3.390	3.548,0	3.366	3.475	11.409,1	12.330,1
RR	118,0	118,0	3.000	3.137	354,0	370,2
RO	643,2	686,9	3.547	3.558	2.281,4	2.444,0
AC	17,5	18,6	3.460	3.459	60,6	64,3
AM	17,7	12,0	3.060	3.300	54,2	39,6
AP	7,5	10,0	2.693	2.618	20,2	26,2
PA	1.129,3	1.219,6	3.598	3.355	4.063,2	4.091,8
TO	1.456,7	1.482,9	3.141	3.570	4.575,5	5.294,0
NE	4.406,0	4.665,2	3.578	3.681	15.766,7	17.170,9
MA	1.329,7	1.420,1	3.312	3.332	4.404,0	4731,8
PI	1.087,0	1.097,9	3.540	3.612	3.848,0	3.965,3
CE	3,9	3,9	3.463	3.679	13,5	14,3
AL	6,2	6,9	3.200	3.075	19,8	21,2
BA	1.979,2	2.135,6	3.780	3.950	7.481,4	8.435,6
CO	21.423,0	22.031,5	3.180	3.747	68.125,4	82.560,2
MT	12.376,1	12.735,0	3.179	3.808	39.343,6	48.494,9
MS	4.124,3	4.253,4	2.825	3.180	11.651,1	13.525,8
GO	4.833,9	4.954,7	3.480	4.079	16.822,0	20.210,2
DF	88,7	88,4	3.480	3.725	308,7	329,3
SE	3.556,3	3.683,6	3.218	3.830	11.443,7	14.107,3
MG	2.251,6	2.328,2	3.460	3.905	7.790,5	9.091,6
SP	1.304,7	1.355,6	2.800	3.700	3.653,2	5.015,7
S	13.373,6	13.522,2	3.064	3.047	40.973,8	41.201,0
PR	5.816,6	5.863,1	3.155	3.598	18.351,4	21.095,4
SC	792,1	819,8	3.750	3.710	2.970,4	3.041,5
RS	6.764,9	6.839,3	2.905	2.494	9.652,0	17.064,1
BRASIL	46.148,8	47.450,7	3.201	3.527	147.718,7	167.369,5

Fonte: Conab (2025a).

Outro aspecto crucial é que as principais tecnologias utilizadas na produção de soja como correção de solo, fixação biológica de nitrogênio, sistema de plantio direto (SPD) e manejo integrado de pragas, doenças e plantas daninhas são inclusivas, ou seja, adequadas tanto para a agricultura familiar quanto para a produção em grande escala. Dessa forma, a soja é a planta mais cultivada nos estabelecimentos agrícolas do Brasil, independentemente do tamanho do módulo rural. No entanto, condições climáticas extremas, como déficit hídrico, podem impactar a produção de soja em várias regiões do país, como nos estados do Paraná e do Rio Grande do Sul, que são importantes centros de produção agrícola e frequentemente afetados por variações climáticas (Figura 24).

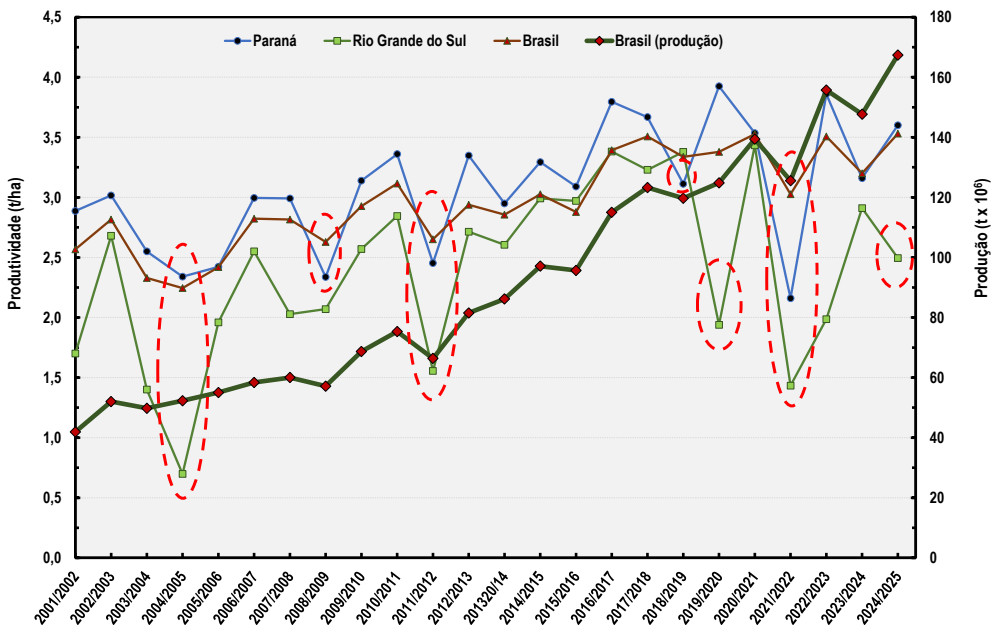


Figura 24. Produtividade da soja no Paraná, Rio Grande do Sul e Brasil (t/ha) e produção de soja no Brasil.

Fonte: Conab (2025a).

Apesar das variações ao longo da série observada, tanto a produtividade quanto a produção de soja têm apresentado um crescimento contínuo. Além do avanço tecnológico, a distribuição da cultura no território nacional faz com que estresses produtivos não afetem todos os estados produtores, na mesma safra, o que possibilita compensa-

ções entre as regiões. Por exemplo, na safra 2023/2024, as variações climáticas causadas pelo fenômeno ‘El Niño’ resultaram em temperaturas elevadas e déficit hídrico em algumas áreas da região Centro-Oeste e do Paraná, onde se concentram as maiores áreas de produção. Como consequência, os levantamentos atualizados registram uma queda de 4,7% na produção nacional em relação à safra anterior. No entanto, é importante destacar que as quebras na produção nacional devido a eventos climáticos não são mais expressivas, graças à compensação gerada pela produção em outras regiões. Como exemplo, na safra atual, enquanto a produtividade média no Rio Grande do Sul é estimada em torno de 2,5 t/ha, em Goiás, a produtividade média será ligeiramente superior a 4,0 t/ha..

Devido à sua ampla capilaridade de produção, as áreas de cultivo de soja no Brasil estão estrategicamente localizadas em diversos contextos: (a) nas proximidades de grandes centros urbanos e aeroportos, como Londrina-PR, Maringá-PR, Cascavel-PR, Uberlândia-MG, Ribeirão Preto-SP, Palmas-TO e Luís Eduardo Magalhães, entre outros, facilitando o deslocamento de pessoas e a criação de importantes hubs logísticos; (b) no interior do país, onde contribuem para a formação de centros populacionais, como Sinop-MT, Sorriso-MT, Maracajú-MS, Cascavel-PR, Rio Verde-GO, Balsas-MA, Paragominas-PA, Paracatu-MG e Vilhena-RO, onde a riqueza gerada pela produção de soja tem promovido o desenvolvimento socioeconômico e melhorado a logística regional; (c) em novas regiões de expansão, onde o cultivo da soja pode desempenhar um papel crucial no desenvolvimento e na melhoria da infraestrutura logística local.

Além da logística de produção de grãos, a cadeia produtiva da soja tem potencial para atender a produção de biocombustíveis, seja o biodiesel produzido por esterificação/transesterificação, o HVO (Hydrotreated Vegetable Oil) e o HEFA (Hydrotreated Esters and Fatty Acids) produzidos por hidrodessoxigenação/hidroisomerização (diesel verde), o combustível sustentável de aviação (SAF, Sustainable Aviation Fuels) produzido por hidrodessoxigenação/hidrocraqueamento/hidroisomerização e o óleo diesel co-processado (H-BIO) processo patenteado pela Petrobras (apêndice). Vale lembrar que, o H-Bio pode ser o menos sustentável dos biocombustíveis, porque sua produção exige o coprocessamento do combustível de origem fóssil com diferentes matérias-primas vegetais em refinarias já existentes (Figura 25).

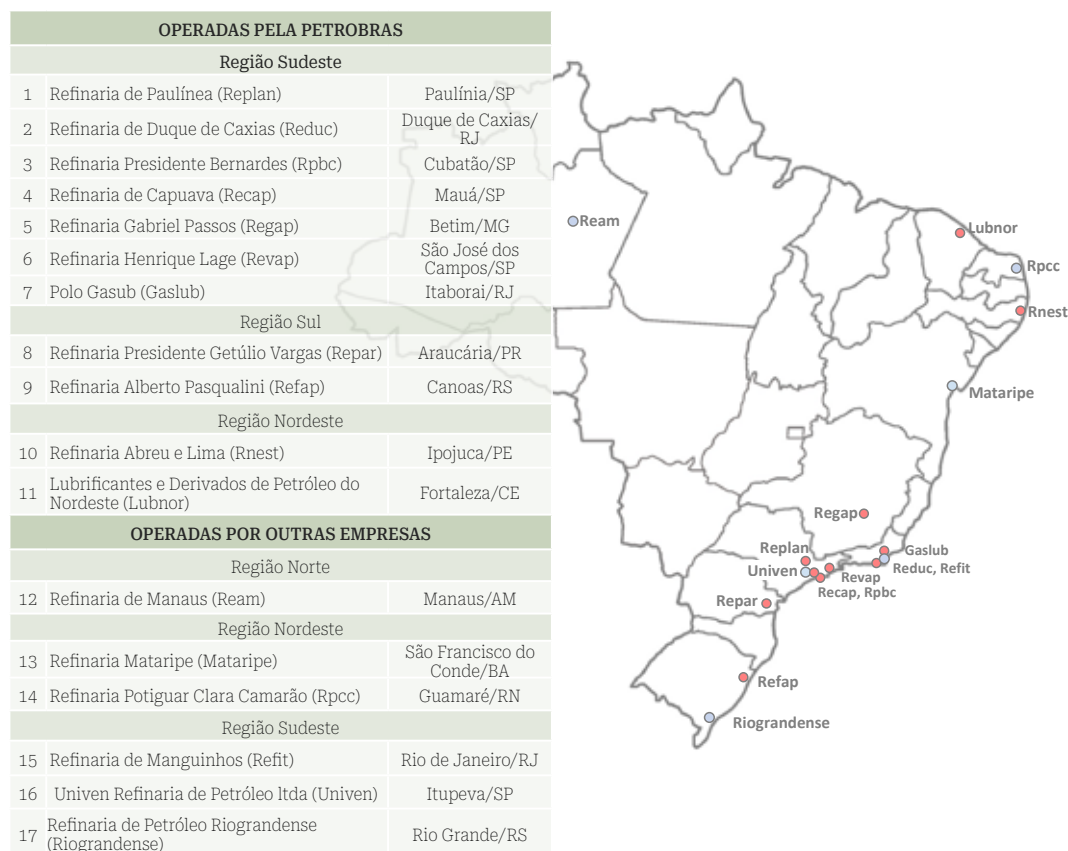


Figura 25. Distribuição das refinarias de petróleo no Brasil.

Como observado, em função da distribuição geográfica das áreas produtivas ou centros de recepção e armazenagem de grãos, a soja é a cultura, em escala e logística, que melhor atenderia a maioria das refinarias do Brasil. Essas informações podem respaldar os processos de tomada de decisão, seja na indústria ou na esfera política, para a concretização de estratégias sustentáveis para a produção eficiente de combustível. Por outro lado, é provável que apenas uma ou algumas refinarias recebam os investimentos necessários para o coprocessamento de óleo diesel e óleo vegetal na produção de hidrocarbonetos. Portanto, ao considerar a utilização de outras matérias-primas, será crucial avaliar tanto a oferta de óleo vegetal em termos de volume quanto a logística de fornecimento para as refinarias que possuam a capacidade de coprocessamento.

A maioria dos trabalhos que indicam as vantagens de fontes alternativas de óleos, destacam os maiores teores de óleo ou a maior produtividade por área quando comparados à soja. Contudo, não são essas características isoladas que definem uma matéria-prima competitiva. Ainda assim, a suposta vantagem comparativa é normalmente referendada, por indicadores desatualizados sobre o potencial genético e os avanços tecnológicos dos sistemas produtivos da soja.

A produtividade da soja é crescente e os teores médios de óleo atualmente são maiores do que os normalmente citados (~18%). Estudos conduzidos pela Embrapa Soja sobre avaliação da características físico-químicas e biotecnológicas dos grãos de soja (teor de proteína, teor de óleo, acidez do óleo e teor de clorofila), em quatro safras (2014/2015 a 2017/2018), com um total de 3479 amostras coletadas nas principais regiões edafoclimáticas do Brasil em diversos estados (RS, SC, PR, RO, MS, MT, TO, GO e BA) mostraram que os teores médios de proteína e óleo foram, em média, 36,70% e 22,30%, respectivamente (Lorini, 2016, 2017, 2018, 2019), (Figura 26).

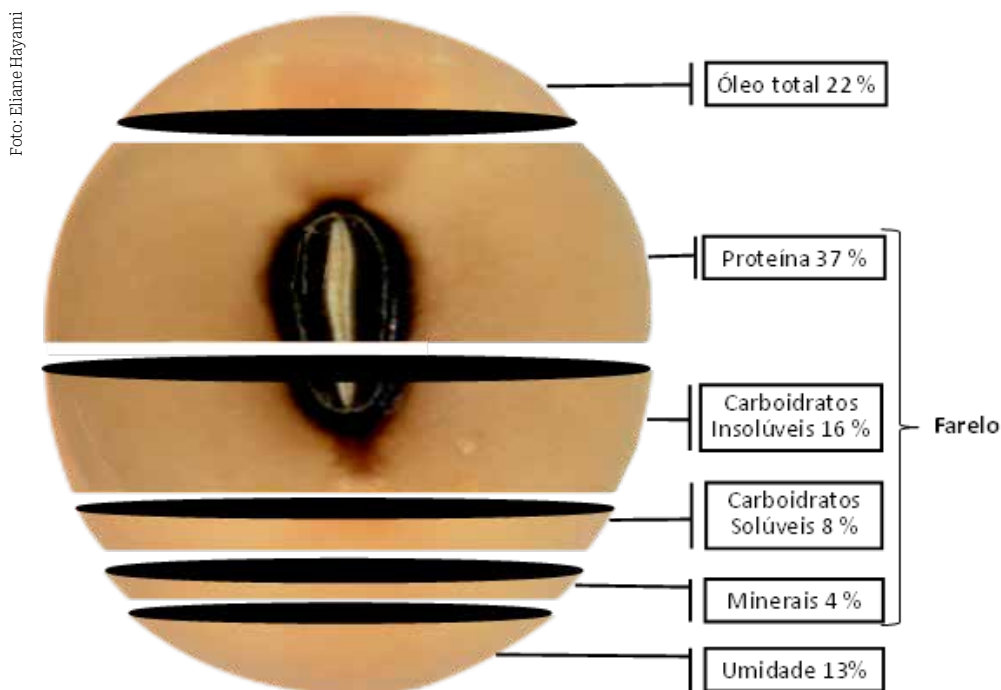


Figura 26. Composição centesimal aproximada dos grãos de soja no Brasil.

Ressalta-se que em algumas regiões/estados, os teores de óleos foram muito superiores, alcançando até 26,06%. Isso demonstra que não se deveria considerar a produção de soja de forma estática, pois tanto o ambiente de produção quanto as características genéticas de cultivares, ou mesmo a interação entre estes fatores, podem afetar a produção de óleo por hectare da cultura.

Uma consideração importante, frequentemente negligenciada, é que a soja é cultivada em milhares de pequenas e médias propriedades. Essa diversidade na estrutura das propriedades agrícolas é fundamental para entender a dinâmica do setor, pois essas propriedades não apenas contribuem significativamente para a produção nacional, mas também promovem a inclusão social e a geração de renda nas comunidades rurais. Conforme o Censo Agropecuário de 2017 (IBGE, 2019), quase 11,6 milhões de hectares de soja estão ligados ao Programa Nacional de Apoio ao Médio Produtor Rural (PRONAMP), enquanto mais de 3,0 milhões de hectares estão vinculados ao Programa Nacional de Fortalecimento da Agricultura Familiar (IBGE, 2024b).

Um aspecto relevante é que a falta de acesso a tecnologias e ao conhecimento sobre culturas alternativas impede que os agricultores familiares dominem seus métodos de produção, dificultando a viabilização dessas culturas na prática. Essa lacuna em conhecimento e tecnologia não apenas limita a confiança nas opções de cultivo, mas também compromete a sustentabilidade e a competitividade desses agricultores no mercado.

CUSTOS DO ÓLEO DE SOJA PARA A PRODUÇÃO DE BIODIESEL

A diferença entre preço e valor é revelada pelas consequências ao longo do tempo.

O biodiesel, independentemente do processo de produção, se apresenta como uma alternativa viável aos combustíveis não renováveis, especialmente o petróleo. Os biocombustíveis têm recebido incentivos crescentes para sua inclusão na matriz energética, sustentados pela argumentação de que são mais sustentáveis e menos prejudiciais ao meio ambiente. Esse panorama é favorecido pela vasta extensão territorial do Brasil, que permite o cultivo de diversas espécies em diferentes ambientes, além da pressão social por soluções energéticas mais limpas e sustentáveis.

Do ponto de vista econômico, as discussões se intensificam em razão da necessidade de grandes investimentos em infraestrutura para a transformação das matérias-primas, além de desafios logísticos significativos. Um fator relevante é a relação entre os preços do petróleo e dos óleos vegetais. Quando essa relação é analisada apenas sob a perspectiva dos preços, conforme ilustrado na Figura 27, pode impactar diretamente a competitividade dos biocombustíveis. Essa dinâmica ressalta a importância de uma abordagem estratégica para viabilizar a inclusão dos biocombustíveis na matriz energética, considerando tanto os custos de produção quanto as variações de mercado.

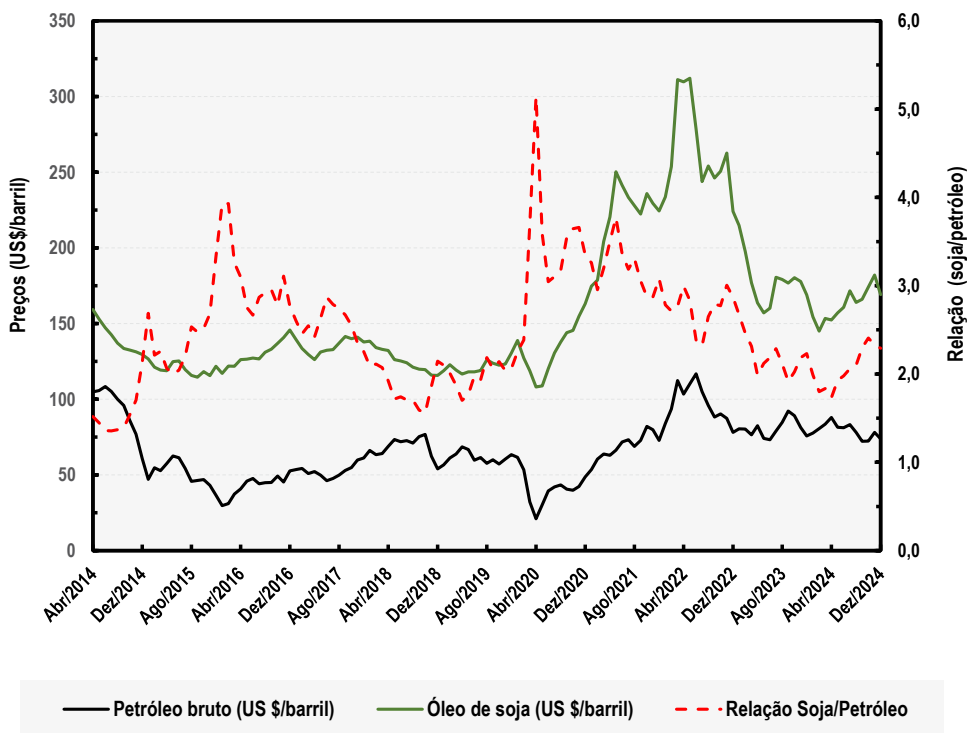


Figura 27. Evolução dos preços do barril de petróleo bruto e do barril de óleo de soja e a relação entre ambos (1 barril = 158,98 L).

Fonte: World Bank (2025).

O mercado de petróleo é fortemente influenciado por questões geopolíticas, resultando em considerável volatilidade. Essa volatilidade reflete instabilidades na oferta e incertezas geradas por fatores como conflitos armados (Disavino, 2024), disputas de interesse e crises econômicas, que afetam diretamente os movimentos do mercado.

Por outro lado, os mercados de óleos e gorduras também apresentam flutuações ao longo do tempo, motivadas por razões distintas, como fatores climáticos e a relação com os preços de outros óleos. O óleo de palma é particularmente influente devido aos altos volumes de produção e às peculiaridades da indústria, desempenhando um papel crucial na dinâmica de preços e na competitividade no setor.

Os fatores citados acima são complexos e podem ser analisados sob diferentes perspectivas, incluindo não apenas a oferta e a demanda, mas também a sustentabilidade ambiental e a segurança alimentar. A interação entre esses aspectos deve moldar as dinâmicas do mercado e destacar a importância de políticas integradas que considerem as necessidades econômicas, sociais e ambientais. Por exemplo, a crescente demanda por biocombustíveis, impulsionada por preocupações ambientais, deve ser equilibrada com a necessidade de garantir a segurança alimentar, em que a soja desempenha um papel significativo, além de considerar a disponibilidade de recursos para a produção agrícola.

Na série histórica, o preço do barril de petróleo variou de 41,3 dólares em 2020 a 97,1 dólares em 2022, alcançando um preço mínimo de 21,0 dólares em abril de 2020 e um preço máximo de 116,8 dólares em junho de 2022. Em comparação, ao converter os preços do óleo de soja para valores equivalentes ao barril, também houve grandes flutuações, variando de 120,1 dólares em 2015 ao máximo de 265,0 dólares em 2022. O preço mínimo para o óleo de soja equivalente ao barril foi registrado em abril de 2020, com 108,1 dólares, enquanto o pico foi alcançado em maio de 2022, com 312,1 dólares.

A relação de preços para o mesmo volume (equivalente ao barril) entre o óleo de soja e o petróleo é representada pela linha tracejada na Figura 27. Essa relação sempre se mantém acima de 1,0, indicando que o óleo de soja tem um valor superior ao do petróleo. A menor diferença registrada foi em junho e julho de 2014, com uma razão de 1,36, enquanto a maior diferença ocorreu em abril de 2020, quando o óleo de soja chegou a custar 5,14 vezes mais que o petróleo.

A relação de preços entre o óleo de soja e o petróleo (Figura 27), que excede 1,0, demonstra que o óleo de soja tem um valor superior ao do petróleo. Portanto, ao considerar apenas os preços e sem levar em conta outros fatores como os custos de refino, a eficiência de produção, a finitude dos recursos petrolíferos e as questões ambientais, verifica-se que ainda há uma vantagem financeira na produção de diesel a partir do petróleo, em comparação ao diesel de soja. Essa disparidade torna-se particularmente

evidente em momentos de maior diferença de preços, como em abril de 2020, quando o petróleo custava 5,14 vezes menos que o óleo de soja. Embora ambas as commodities sejam voláteis, os custos e a estrutura de produção do diesel de petróleo continuam sendo, em geral, mais competitivos.

De acordo com Zapparoli (2022), o Brasil possui o conhecimento tecnológico e os insumos necessários para se consolidar como um dos principais produtores globais de SAF. Com a sanção da Lei dos Combustíveis do Futuro, o Brasil prevê, segundo a CNN, a produção de 1,6 bilhão de litros de SAF a partir de 2027 (Queiroz, 2024). A partir desse ano, as empresas aéreas também serão obrigadas a reduzir as emissões de gases de efeito estufa nos voos domésticos, utilizando o combustível sustentável de aviação como alternativa para cumprir essas metas de descarbonização.

No entanto, embora esse combustível possa reduzir a pegada de carbono da aviação, o custo do SAF ainda é superior ao do combustível fóssil (Ibexus, 2024; Watson et al., 2024). Vários desafios precisam ser enfrentados, incluindo a capacidade de produção interna e os volumes crescentes de matérias-primas. Outra questão é a infraestrutura de produção, que pode ocorrer em refinarias de petróleo, com adaptações, ou em plantas especializadas em biocombustíveis, que são diferentes das usinas tradicionais utilizadas para a produção de biodiesel por transesterificação, distribuídas pelo Brasil.

Interessante observar que, feliz ou infelizmente, dependendo da perspectiva, o petróleo é um recurso abundante, e o planeta é muito grande e oferece ainda uma vasta reserva para sua extração. Lawton (2016) aponta que existem cerca de 65 mil campos conhecidos de petróleo e gás, com descobertas contínuas, ainda que em menor escala. No entanto, o futuro desses projetos pode ser fortemente influenciado pelo avanço do mercado de carros elétricos.

À medida que cresce tanto a demanda quanto a confiabilidade dos veículos elétricos, a expectativa de consumo de combustíveis fósseis pode diminuir, levando à reconsideração ou desaceleração de novos projetos de exploração petrolífera. Assim, os carros elétricos podem, com alguma intensidade, atuar como um balizador, regulando a expansão ou contração do mercado de petróleo, dependendo de como o setor automotivo evolui em relação às tecnologias de energia limpa.

Conforme mencionado no item 3, as reservas atuais de petróleo estão em torno de 1,6 trilhão de barris. À medida que máquinas e equipamentos se tornam mais eficientes, produzindo mais “trabalho” com menores quantidades de energia, e com a crescente

adoção de veículos elétricos, espera-se que a vida útil das reservas se prolongue. No entanto, mesmo considerando o tempo como um fator crucial, as discussões sobre as vantagens e desvantagens dos combustíveis fósseis em comparação com os biocombustíveis não devem se limitar à análise, por mais relevante que seja, dos preços das commodities.

Se por um lado a exploração de petróleo é dominada por algumas empresas e as reservas significativas estão localizadas em poucos países, a produção agrícola e, em especial de soja, também tem alguns gargalos quase intransponíveis, sobretudo no Brasil: a crônica dependência de insumos como fertilizantes e produtos fitossanitários que impactam significativamente nos custos de produção e até na segurança alimentar.

A produção em solos tropicais torna a fertilidade um aspecto sensível da sojicultura brasileira, com destaque para a adubação com fósforo e potássio. Embora sejam essenciais para a obtenção das elevadas produtividades, o uso significativo faz com que os fertilizantes sejam os principais itens na composição dos custos variáveis da soja, normalmente representando mais de 30% do total, podendo chegar a 40% (Conab, 2024b). Um ponto que adiciona complexidade à questão é a dependência do País em relação ao mercado externo, pois insere a geopolítica como variável na definição dos preços dos fertilizantes.

O panorama para os produtos fitossanitários é tão complexo quanto o quadro observado para os fertilizantes. Primeiramente, a representatividade de inseticidas, fungicidas, herbicidas e acaricidas no custo operacional da soja, quando agregados, costuma ser quase igual ao verificado para os fertilizantes, podendo ser superior em condições críticas (Conab, 2024b). Embora o número de empresas fabricantes de defensivos utilizados no País não seja restrito, o processo lento e burocrático de aprovação de novos produtos e a necessidade de importação de matérias-primas para sua produção, constituem significativos desafios a serem vencidos para reduzir o custo de produção de soja.

Outra questão pouco abordada consiste nos objetivos econômico-financeiros do agricultor. Enquanto o agricultor já estabelecido em uma área e negócio busca maximizar sua remuneração, o agricultor que investe em uma nova área e um novo negócio busca minimizar seu payback. Existem levantamentos sobre custos de produção de cultivos e pontos de equilíbrio (onde o lucro é zero). Porém, deve-se perguntar ao empresário rural (grande, médio ou pequeno): quanto quer ganhar? Em quanto tempo deseja que seu investimento retorne?

De forma simplista, dois aspectos são cruciais para o agricultor alcançar seu objetivo de remuneração: receita de venda das safras das culturas agrícolas e seus custos de produção. Nesse sentido, não basta uma cultura ter uma elevada receita por hectare. Esta receita deve superar o custo unitário de produção na magnitude estabelecida pelo agricultor. Como exemplo fictício, se o agricultor estabelece um lucro operacional de R\$ 1.000,00/ha/ano para um determinado cultivo e se tem uma receita de R\$ 10.000,00/ha, seu custo de produção neste ano deve ser inferior a R\$ 9.000,00/ha.

Quando se fala em objetivo de retorno de investimento, além do fluxo de caixa anual a partir do balanço entre receita e custo, será necessário considerar os investimentos realizados no ano zero (compra de terra, aquisição de infraestrutura produtiva e preparação da área) a serem retornados.

Enfatiza-se que a definição e alcance de objetivos de remuneração e de retorno de investimento dependem da estrutura fundiária. Enquanto grandes produtores podem definir um lucro unitário menor, beneficiando-se da escala produtiva para alcançar um lucro total definido (e.g. R\$ 500,00/ha de lucro unitário para alcançar R\$ 500.000,00 de lucro total em 1.000 hectares), pequenos e médios produtores geralmente necessitam de um lucro unitário elevado para alcançar seu objetivo (por exemplo, R\$ 1.500,00/ha de lucro unitário para alcançar R\$ 75.000,00 de lucro total em 50 hectares). Com isso, pequenos e médios produtores necessitam integrar estratégias, escolher culturas mais remuneradoras, diversificar os cultivos comerciais (minimizar riscos) e otimizar o uso de espaço produtivo (maior ocupação durante a safra, reduzindo o pousio).

Dito de outra forma, além de atender requisitos agronômicos, logísticos, mercadológicos, técnicos e ambientais, uma matéria-prima potencial precisa estar alinhada aos objetivos econômico-financeiros do produtor, como retorno de investimento, lucratividade e rentabilidade do negócio, independentemente do modo de produção empregado (patronal ou familiar). De uma forma direta, não basta ter produtividades elevadas, também precisa fazer bem à saúde financeira do produtor. Para as indústrias de biodiesel, o contexto é análogo, pois a fonte de óleo precisa atender ao conjunto de requisitos supracitados e propiciar o alcance dos objetivos econômico-financeiros do empresário.



COMPOSIÇÃO DE ÁCIDOS GRAXOS E CARACTERÍSTICAS DESEJÁVEIS DO BIODIESEL

O motor a diesel pode ser alimentado por óleos vegetais, e ajudará no desenvolvimento agrário dos países que vierem a utilizá-lo⁶.

O petróleo é uma fonte de energia não renovável e um combustível natural composto por uma complexa mistura de hidrocarbonetos. A partir dele, são produzidos diversos derivados, como óleo diesel, gasolina, querosene, nafta e gases inflamáveis, obtidos diretamente por meio do processo de refino ou pelo craqueamento das frações pesadas resultantes do processamento do petróleo (Branco, 2014).

O biodiesel é um combustível renovável formado por uma mistura de ésteres de ácidos graxos de cadeia longa, resultante da reação de transesterificação de óleos vegetais (como soja, algodão, girassol e canola) ou de gordura animal (como sebo bovino, suíno ou de aves) com um álcool, geralmente metanol ou etanol, na presença de um catalisador (Parente et al., 2003; Knothe, 2018). Vale ressaltar que os ésteres graxos também podem ser obtidos por meio da esterificação dos ácidos graxos correspondentes, uma reação particularmente importante quando óleos e gorduras residuais são utilizados no processo de produção.

Os combustíveis derivados do petróleo e o biodiesel apresentam composições químicas distintas, que conferem a cada um propriedades físico-químicas particulares e, por essa razão, determinam diferentes finalidades.

Entre os subprodutos derivados do petróleo, a principal diferença entre a gasolina, o diesel e o querosene de aviação é a quantidade de átomos de carbono presente em suas moléculas de hidrocarbonetos e que caracterizam a faixa de temperatura de ebulição. Enquanto a gasolina possui de 5 a 10 átomos de carbono e é utilizada como combustível para os veículos leves automotores de ciclo Otto, o óleo diesel, com 14 a 20 átomos, é empregado em veículos pesados automotores ciclo Diesel, como caminhões, ônibus, máquinas e tratores. Já o querosene de aviação, com 10 a 16 átomos, é destinado aos aviões. Uma característica importante deste combustível é seu ponto de congelamento, que deve ser menor do que -47°C para que não congele em grandes altitudes (ANP, 2006).

⁶Rudolf Diesel em 1912 (Harford, 2016)

A cadeia carbônica do biodiesel mais comum tem, em média, 18 átomos de carbono, com faixa de temperatura de ebulição variável e determinada pela composição de ésteres de ácidos graxos. Ao contrário dos combustíveis fósseis, que são relativamente estáveis e mantêm as suas propriedades físico-químicas inalteradas ao longo do tempo, o biodiesel pode conter contaminantes como gliceróis parcialmente reagidos, triacilgliceróis não reagidos, glicerol e ácidos graxos livres que alteram sua estabilidade com o tempo (Knothe, 2018). Assim, a legislação estabelece limites de especificação para que ésteres graxos possam ser classificados como “biodiesel”.

A estabilidade das propriedades físico-químicas do biodiesel determina o tempo de armazenamento e deve ser um dos fatores avaliados na escolha das matérias-primas para sua produção. Basicamente, existem quatro tipos de estabilidade relacionados ao biodiesel: oxidativa, térmica, hidrolítica e fotoquímica (Ramos et al., 2017; Knothe et al., 2018).

Em geral, ésteres alquílicos de ácidos graxos podem ser produzidos por transesterificação a partir de qualquer tipo de matéria-prima oleaginosa. Contudo, as diferentes matérias-primas apresentam composições distintas de ácidos graxos (Tabela 7) que resultarão em biodiesel com propriedades e estabilidades também distintas. Algumas fontes, inclusive, apresentam propriedades não ideais que são transferidas para o biocombustível, tornando-o inadequado para aplicação em motores, principalmente quando adicionados em maiores concentrações.

Para fins de comparação, a Tabela 7 apresenta a composição dos ácidos graxos de diversas fontes vegetais, como macaúba, dendê, canola, girassol, soja e oliveira. No caso do girassol e da soja, são detalhadas as composições dos óleos comuns e do tipo alto oleico (HO). A proposta de incluir a composição dos ácidos graxos do óleo de soja com alto teor oleico foi apresentada como uma emenda à norma para óleos vegetais nomeados (CXS 210-1999), com o intuito de estabelecer um novo padrão para o produto (Standard [...], 2024). Segundo o Estados Unidos (2024d), o Codex Committee on Fats and Oils (CCFO) aprovou o padrão para o Óleo de Soja com Alto Teor Oleico (HOSO), que foi finalmente aceito no final de 2024.

O óleo de oliva foi incluído devido às suas destacadas qualidades organolépticas e ao elevado teor de ácido graxo oleico (Standard [...], 2021). Contudo, vale ressaltar que o azeite de oliva é o segundo produto alimentar mais fraudado do mundo, ficando atrás apenas do pescado (Leal, 2024). Talvez isso explique por que a produção mundial de azeite de oliva está estagnada há anos, ao redor de 3,0 milhões de toneladas por ano, enquanto o consumo continua a aumentar.

Tabela 7. Composição de ácidos graxos (%) da macaúba, dendê, canola, girassol e soja comum e alto oleico e de oliva.

Ácidos graxos	No Carb. ¹	Macaúba ²	Dendê ³ (palm oil)	Canola ³	Girassol ³		Soja		Oliva ⁴
					Comum	HO-Gira	Comum ³	HO-Soja ³	
Láurico	C12:0	-	≤ 0,5	-	≤ 0,1	-	≤ 0,1	≤ 0,1	-
Mirístico	C14:0	-	0,5 - 2,0	-	≤ 0,2	≤ 0,1	≤ 0,2	≤ 0,5	≤ 0,05
Palmítico	C16:0	22,08	39,3 - 47,5	2,5 - 7,0	5,0 - 7,6	2,6 - 5,0	8,0 - 13,5	2,5 - 8,0	7,5 - 20,0
Palmitoleico	C16:1	2,65	≤ 0,6	≤ 0,6	≤ 0,3	≤ 0,1	≤ 0,2	≤ 0,1	0,3 - 3,5
Heptadecanoico	C17:0	-	≤ 0,2	≤ 0,3	≤ 0,2	≤ 0,1	≤ 0,1	≤ 0,8	≤ 0,3
Heptadecenoico	C17:1	-	-	≤ 0,3	≤ 0,1	≤ 0,1	≤ 0,1	≤ 1,5	≤ 0,3
Estearico	C18:0	3,13	3,5 - 6,0	0,8 - 3,0	2,7 - 6,5	2,9 - 6,2	2,0 - 5,4	3,2 - 5,0	0,5 - 5,0
Oleico	C18:1	58,19	36,0 - 44,0	51,0 - 70,0	14,0 - 43,0	75,0 - 90,7	17,0 - 30,0	65,0 - 87,0	55,0 - 83,0
Linoleico	C18:2	11,60	9,0 - 12,0	15,0 - 30,0	45,4 - 74,0	2,1 - 17,0	48,0 - 59,0	1,0 - 12,0	3,5 - 21,0
Linolênico	C18:3	1,45	≤ 0,5	5,0 - 14,0	≤ 0,3	≤ 0,3	4,5 - 11,0	1,0 - 6,0	≤ 1,5
Araquídico	C20:0	0,23	≤ 1,0	0,2 - 1,2	0,1 - 0,5	0,2 - 0,5	0,1 - 0,6	≤ 0,1	≤ 0,6
Gadoléico	C20:1	-	≤ 0,4	0,1 - 4,3	≤ 0,3	0,1 - 0,5	≤ 0,5	≤ 0,1	≤ 0,4
Behêmico	C22:0	-	≤ 0,2	≤ 0,6	0,3 - 1,5	0,5 - 1,6	≤ 0,7	≤ 0,7	≤ 0,2
Erúxico	C22:1	-	-	≤ 2,0	≤ 0,3	≤ 0,3	≤ 0,3	≤ 0,4	-
Lignocérico	C24:0	-	-	≤ 0,3	≤ 0,5	≤ 0,5	≤ 0,5	≤ 0,5	≤ 0,2

¹ Número de carbono e instaurações; ² Evaristo et al. (2017) [Média de três locais em Minas Gerais (mesocarpo) - Norte (município de Montes Claros), Central (município de Sete Lagoas) e Zona da Mata (município de Acaiaca)]; ³ Standard [...] (2024); ⁴ Standard [...] (2021).

É importante observar que as percentagens de ácidos graxos apresentadas na Tabela 7 representam composições típicas e não valores absolutos, pois são influenciadas por fatores climáticos. Por exemplo, de maneira surpreendente, mas cientificamente explicável, o girassol tradicional cultivado em algumas regiões de baixa latitude no Brasil apresenta elevadas concentrações de ácido oleico (Unger, 1980; Jones, 1984; Ahmad; Hassan, 2000; Grunvald et al., 2013). O mesmo fenômeno provavelmente ocorre com a macaúba, uma espécie que se distribui em diversas latitudes e altitudes no Brasil. Natu-

ralmente encontrada na América tropical e subtropical, desde o México e as Antilhas até o Paraguai e a Argentina (Henderson et al., 1995), a macaúba está sujeita a uma ampla variação de condições climáticas, especialmente durante a fase de formação dos frutos e o acúmulo de lipídios. Essa diversidade de ambientes pode influenciar significativamente o desenvolvimento, a qualidade dos frutos e o acúmulo de lipídios.

A qualidade do biodiesel é fortemente influenciada pela composição dos ésteres de ácidos graxos presentes em sua molécula. Em particular, os ésteres metílicos de ácidos graxos saturados que mais limitam o fluxo a frio do biodiesel são os derivados do ácido palmítico (C16:0) e do ácido esteárico (C18:0), que apresentam elevados pontos de fusão, respectivamente 30,5 °C e 39 °C (Nelson; Cox, 2011). O biodiesel derivado de óleo de palma e de sebo bovino apresenta elevada composição desses ésteres.

A estabilidade dos ácidos graxos diminui à medida que o número de ligações duplas na molécula aumenta. Por exemplo, as proporções das taxas de oxidação do ácido oleico (uma ligação dupla), do ácido linoleico (duas ligações duplas) e do ácido linolênico (três ligações duplas) foram relatadas como 1:10:20, respectivamente. Isso significa que os ácidos linoleico e linolênico oxidam 10 e 20 vezes mais rápido que o ácido oleico (Economic [...], 1990; Dunford, 2020).

Segundo Frankel (2012), o ácido graxo linoleico (C18:2) pode ser 40 vezes mais reativo do que o oleico (C18:1), enquanto McClements e Decker (2017) estimam que o ácido graxo linoleico é 10 a 40 vezes mais susceptível à oxidação do que o ácido oleico. A grande diferença de susceptibilidade à oxidação expressa a importância da escolha das diferentes matérias-primas, em função do perfil característico de ácidos graxos. Com base na grandeza dos números, matérias-primas com maior concentração de ácido graxo oleico, como a soja alto oleica, apresentam menor susceptibilidade à oxidação.

À medida que são adicionadas ligações duplas aos ácidos graxos poliinsaturados, um grupo metilênico é adicionado, resultando na adição de outro sítio para abstração do hidrogênio. Na maioria dos casos, as taxas de oxidação duplicam com a adição de uma dupla ligação. Assim o ácido graxo linolênico (C18:3) oxida duas vezes mais rápido que o ácido graxo linoleico (C18:2) e o araquidônico (C20:4) oxida duas vezes mais rápido que o linolênico (C18:3). Ou seja, quatro vezes mais rápido que o linoleico (Frankel, 2012; McClements; Decker, 2017). Portanto, desconsiderando a possível ação de antioxidantes, a velocidade de oxidação depende do número de duplas ligações nos ácidos graxos. Ou seja, da matéria-prima utilizada.

Na soja comum, os ácidos graxos saturados compõem aproximadamente 10 a 19 % do total. Por outro lado, ácidos graxos poli-insaturados, como o linoleico (C 18:2) e o linolênico (C 18:3), estão presentes na proporção de 52 a 70%. Apesar de melhorarem a fluidez do biodiesel, estes ácidos graxos poli-insaturados apresentam menor estabilidade oxidativa. Portanto, ainda que o óleo de soja seja a principal fonte para a produção de biodiesel brasileiro, observa-se que existem oportunidades para aprimorar suas qualidades.

A modificação do perfil de ácidos graxos dos grãos de soja pode ser alcançada por meio de melhoramento genético convencional, associado ao uso de ferramentas biotecnológicas modernas. Essa modificação permite obter uma composição lipídica mais equilibrada, capaz de influenciar positivamente propriedades físico-químicas relevantes, como a estabilidade oxidativa, o ponto de névoa, o ponto de entupimento a frio, o ponto de congelamento e a viscosidade.

A Embrapa Soja tem reconhecida experiência no melhoramento genético, com centenas de cultivares desenvolvidas para diferentes regiões edafoclimáticas e demandas. Com um dos maiores bancos de germoplasma do mundo, a instituição se destaca também pelo domínio de técnicas avançadas, como marcadores moleculares e edição gênica, que permitem ajustar o perfil do óleo em materiais com alto potencial produtivo. Embora essas modificações exijam tempo, testes e equipe qualificada, a tradição e a capacidade operacional da Embrapa a posicionam como um agente estratégico na melhoria do perfil dos ácidos graxos e da qualidade do óleo de soja, aos diferentes propósitos.

A soja, em todos os cenários reais ou potenciais, é a cultura que demonstra melhor possibilidade de atender os mercados de produção de biodiesel. Outra possibilidade é alimentar a ilusão de que se poderiam desenvolver plantas que desafiassem as leis da natureza, combinando elevado teor de óleo nos grãos ou frutos, alto rendimento de óleo, vastas áreas de cultivo adaptadas ao território nacional, além de uma infinidade de coprodutos com alto valor agregado, capazes de competir com cultivos tradicionais, como o dendê, o algodão e a própria soja.

Quando se observa que instituições, matérias jornalísticas e, até mesmo, cientistas e formadores de opinião apostam em culturas como a camelina, o pinhão-manso, o tucumã e o pequi, surge a questão: existe, de fato, um interesse genuíno na produção de biodiesel? O que se depreende da insistência em deslustrar a soja, mesmo sendo

uma base sólida de produção de biodiesel, é que esse comportamento não tornará as culturas alternativas mais eficientes ou viáveis.

Uma questão importante a se refletir é que, embora as fontes fósseis de energia sejam finitas e não renováveis, muitas matérias-primas e recursos naturais renováveis já se extinguíram, e outros correm sérios riscos de desaparecer, mesmo antes do esgotamento de petróleo, gás ou carvão. Humphreys et al. (2019) destaca que, embora a maioria das pessoas consiga nomear um mamífero ou pássaro extinto nos últimos séculos, poucas são capazes de citar uma planta recentemente extinta. Quase 600 espécies já foram extintas, a uma taxa superior à da extinção de fundo.

A SOJA ALTO OLEICA

As propriedades de uma substância são determinadas não apenas pelos átomos que a compõem, mas também pela configuração tridimensional exata de sua molécula.

O melhoramento genético convencional tem desenvolvido plantas com alto teor de ácido oleico, a exemplo, da soja, do girassol e do cártamo. A disponibilidade de novas técnicas biotecnológicas também permitiu o desenvolvimento de genótipos de soja com alto teor de ácido oleico, bem como de outras espécies de oleaginosas como amendoim, milho, algodão e canola (Flider, 2022).

As modificações ou seleções dessas espécies buscam alcançar um perfil de ácidos graxos semelhantes ao produzido pelos frutos da oliveira (*Olea europaea* L.), donde se extrai um azeite historicamente consagrado e muito apreciado na culinária por ser considerado mais saudável (Keys et al., 1984; Gorzynik-Debicka et al., 2018). Na natureza, algumas oleaginosas são conhecidas pela composição característica de seus ácidos graxos e, em especial, aquele com maior concentração ou aquele que foi isolado pela primeira vez, recebe seu nome em função do nome da planta. O consagrado óleo de oliva empresta seu nome ao ácido graxo em maior concentração nos frutos da oliveira, o oleico, o qual deriva da palavra latina *oleum*, que significa óleo.

A importância do azeite de oliva remonta a Idade do Bronze (aproximadamente 3.300 a 1.200 a.C.) quando floresceu a importância do cultivo da oliveira na região do Mediterrâneo (Kiple; Ornelas, 1999; Clodoveo et al., 2014; Kailis, 2017) e até na mitologia este óleo é consagrado. Na Grécia antiga, ele foi presente da Deusa Athena (Manoussis; Moore, 1988; McCaughrean; Ross, 2001; Olive Oil Times, 2024) e, posteriormente,

após a Segunda Guerra Mundial, principalmente em função dos trabalhos de Ancel Keys (Keys et al., 1984), houve grande divulgação mundial a um hábito regional antigo, a dieta Mediterrânea, em que a oliva desempenharia papel especial. Assim, mesmo que estudos mais modernos enxerguem vantagens nutricionais do azeite, a história já vem o consagrando desde tempos imemoriais e na mitologia.

Por outro lado, segundo Teicholz (2020), o azeite de oliva não consta em nenhuma tradução da Odisseia de Homero. Resumidamente, conforme a mesma autora diz, Odisseu (Ulisses) recebe o azeite de oliva num frasco de ouro para friccionar no corpo. Ou seja, apesar de muito antigo, era empregado sobretudo como cosmético, em ritos religiosos e em competições atléticas para aumentar a beleza física.

O óleo de oliva é composto de elevada concentração de ácido oleico, classificado como ômega 9 e apontado por vários estudos, como vantajoso para cocção e uso doméstico (Nogoy et al., 2020; Farag; Gad, 2022; Flider, 2022). O ácido oleico é um ácido graxo de cadeia longa de 18 átomos de carbono e monoinsaturado (Figura 28). Esta composição confere melhor equilíbrio entre as suas propriedades de fluxo a frio e estabilidade à oxidação, características desejáveis para cocção e para a produção de biocombustíveis. Por essa razão, matérias-primas com elevado teor de ácido oleico têm despertado atenção para os novos projetos de produção de biodiesel.

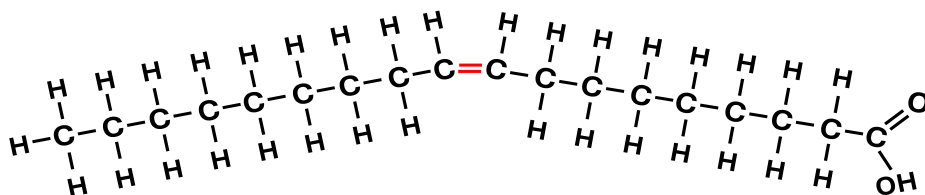


Figura 28. Representação do ácido cis-9-octadecenoico ou ácido graxo oleico (nome comum).

O potencial de crescimento da demanda e emprego de óleos ricos em ácido oleico é enorme e diversificado em vários ramos de negócios, mas os mercados de saúde humana (Jenkins et al., 2010) e indústria de alimentos e de combustíveis, poderão ser os destinos mais nobres e de maior demanda volumétrica para a sociedade.

As aplicações e produtos que permitem o uso industrial de óleo de soja com alto teor de ácido oleico têm desenvolvimento mais recente do que aqueles usados para produção de alimentos/biodiesel. Há duas razões para isso. Primeiro, os usos industriais

geralmente requerem processamento ou formulação adicional para torná-los eficazes e, portanto, esses produtos não são vistos como substitutos imediatos para os já existentes. Em segundo lugar, enquanto o uso alimentar de óleos vegetais tem uma longa história de sucesso comercial, o uso industrial deles é mais recente e ainda há menos produtos desenvolvidos

ÓLEO ALTO OLEICO PARA COCÇÃO E INDÚSTRIA DE ALIMENTO

Que teu alimento seja teu remédio e que teu remédio seja teu alimento.

Hipócrates 460 - 377 a.C.; Pai da Medicina ocidental

É mais prudente cuidar da saúde enquanto se é jovem e saudável, do que quando estiver velho e doente.

Cesar de Castro - 2017 d.C.

A crescente conscientização sobre as propriedades nutricionais dos óleos comestíveis tem estimulado muitas pesquisas no sentido do desenvolvimento de novas fontes de óleo com composição mais saudável (Hernandez; Hosokawa, 2011). Os autores abordam principalmente a importância dos ácidos graxos essenciais (ômega 3), tais como eicosapentaenóico (EPA) e o docosahexaenoico (DHA), em vários aspectos da saúde humana. Entretanto, apesar desses ômegas 3 serem reconhecidamente importantes na saúde humana, são instáveis para a indústria, sofrendo rápido processo de oxidação o que reduz seu tempo de prateleira ou sua utilização para biodiesel. Assim, nem sempre o que é bom para o coração, é bom para combustão.

A soja é amplamente reconhecida como um alimento funcional, oferecendo diversos benefícios à saúde humana, especialmente na Ásia, onde é consumida de várias maneiras (Cai et al., 2021). Além de seu valor nutricional, a soja alta oleico pode desempenhar um papel significativo em outros nichos específicos da alimentação animal. Um exemplo notável, mas com foco em outro ácido graxo, é a certificação *Bleu-Blanc-Coeur*, que promove práticas de criação de animais baseadas em diretrizes específicas para aumentar a qualidade nutricional dos produtos.

Nesta abordagem, os animais são alimentados com grãos ricos em ácido graxo ômega-3, o que resulta em um aumento significativo do teor desses ácidos graxos em produtos derivados, como ovos, leite e carne. Isso não apenas melhora a qualidade nutricional dos alimentos, mas também pode promover a saúde dos consumidores.

Portanto, mesmo que essa ideia tenha sido mencionada anteriormente, é válido lembrar que: Se você é o que come, também é o que comeu o que você come.

Po outro lado, as potenciais vantagens da soja com alto teor de ácido oleico podem ser observadas na formulação de ração para vacas. Weld e Armentano (2018) destacam que a alimentação de gado leiteiro com ração contendo soja alto oleica resulta em uma produção maior de gordura no leite em comparação com dietas baseadas em soja convencional, que é rica em ácido graxo linoleico. Essa diferença é especialmente notável em rações contendo sojas moídas com alto teor de ácido oleico, em comparação com as sojas convencionais.

Graças à plasticidade genética da soja, aliada a ferramentas de edição gênica e biotecnológica, a produção de óleo com alto teor de ômega-3 tem o potencial de atender a mercados mais segmentados, favorecendo um equilíbrio mais adequado entre ômega-6 e ômega-3. Com o objetivo de melhorar os componentes do óleo, Yeom et al. (2020) desenvolveram plantas transgênicas com maior teor de ômega-3, especificamente o ácido α -linolênico (C18:3), que é o ômega-3 de cadeia mais longa produzido por plantas. No organismo, o ALA passa por uma série de processos de alongação (mediados por enzimas elongases) e dessaturação (por enzimas dessaturases), sendo convertido em EPA e DHA (Fernandez; Hosokawa, 2011; National Center for Biotechnology Information, 2024). No entanto, a discussão sobre o ômega-3 e seus benefícios para a saúde não será abordada nesta publicação, pois o enfoque está em outros aspectos.

Os óleos de soja com alto teor de ácido oleico foram desenvolvidos para fornecer uma alternativa naturalmente estável aos óleos parcialmente hidrogenados na produção de alimentos. No entanto, a estabilidade oxidativa do óleo e sua pureza como fonte de ácido oleico têm valor em usos que vão além das finalidades alimentares inicialmente pretendidas. Com uma composição de ácido oleico superior a 75% e de ácidos graxos poli-insaturados inferior a 10%, o óleo de soja alto oleico é atualmente um dos óleos mais estáveis comercializados nos Estados Unidos (Estados Unidos, 2024c).

Esse óleo é especialmente preferido em aplicações que exigem alta resistência à oxidação, como frituras, óleos em spray e produtos que necessitam de longa vida útil (Knowlton, 2022). De acordo com a autora, testes de laboratório que compararam a durabilidade de óleos de fritura mostraram que o óleo de soja alto oleico teve uma duração de aproximadamente duas a três vezes maior na fritadeira em relação ao óleo de soja convencional.

O emprego do óleo de soja com alto teor de ácido graxo oleico está em crescimento nos Estados Unidos, cujo mercado interno é ávido por óleos de qualidade superior. Além do maior consumo, o mercado tem buscado diferentes usos e aplicações junto à indústria de alimentos, devido a sua maior estabilidade, possibilidade de composição com outros óleos e possíveis efeitos benéficos na saúde humana (Huth et al., 2015; Baer et al., 2021). Em decorrência da maior demanda, as projeções de Sanders; Tegeder (2023) indicam que na safra 2024 o cultivo será de aproximadamente 400.000 hectares de soja alto oleica, com tendência de franca expansão da área cultivada no curto prazo (Figura 29).

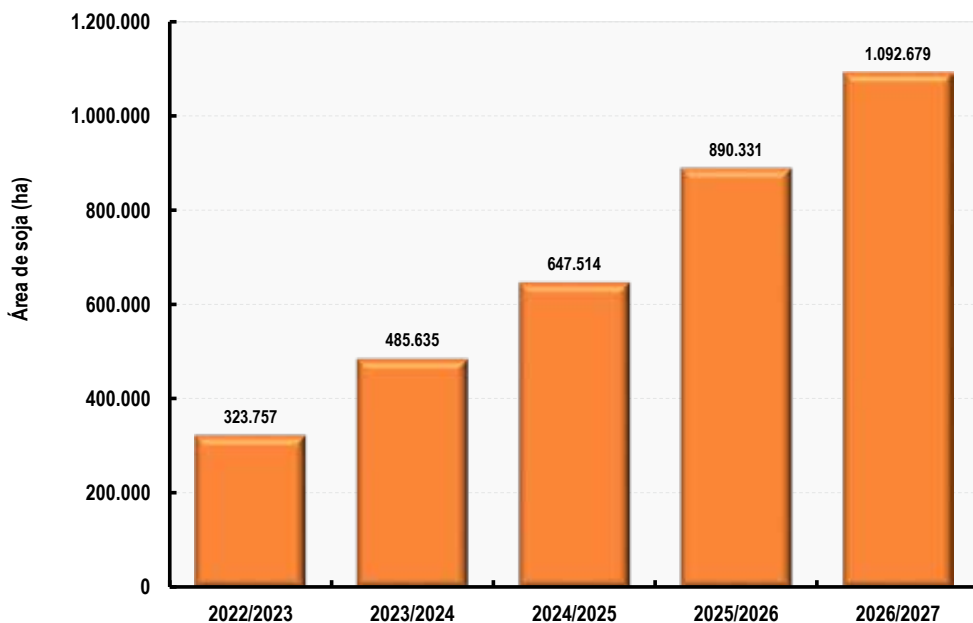


Figura 29. Evolução da área de soja alto oleica nos Estados Unidos.

Fonte: Estados Unidos (2024c).

Para Napolitano et al. (2018), o óleo de soja com alto teor de ácido oleico e baixo linolênico (HOLLSB) é um óleo emergente com projeções de rápida expansão nos EUA, em função das vantagens tecnológicas que deverão impulsionar a substituição gradual de óleos básicos (commodity), que são atualmente usados na alimentação, por óleos especiais.

A indústria alimentícia dispense grandes recursos no uso de óleos especiais ou misturas industriais de óleos que atendam aos padrões de qualidade de seus produtos mais nobres. O método mais simples para alterar a composição de ácidos graxos e o perfil de fusão, é realizar misturas ácidos graxos com diferentes composições de triacilgliceróis. Essa prática é realizada em produtos como óleos de fritura e margarinas (McClements; Decker, 2017).

Estão disponíveis nos mercados dos EUA uma série de “óleos industriais”, que são misturas em diferentes proporções e combinações contendo óleo de soja, canola, girassol, milho, algodão e azeites, para atender a diferentes propósitos. Esses óleos compostos são projetados para melhorar o valor nutricional, reduzir o teor de ácidos graxos saturados e aumentar o teor de ácido oleico (Frankel, 2012). Essas diferentes misturas buscam, além das características físico-químicas, alcançar melhor composição de preços.

Além de misturas especiais de óleos, a indústria utiliza o HOSO (*high oleic soybean oil*) e o HOSO (*high oleic sunflower oil*), entre outros. Embora tenha ocorrido tardiamente, o desenvolvimento de óleos especiais também foi impulsionado pela proibição de gorduras trans. Soja e girassol com alto teor de ácido oleico podem suprir essas necessidades. Essas preocupações são relevantes, pois, apesar de os perigos das gorduras trans em alimentos já estivessem bem documentados há décadas, a proibição legal de sua presença em muitos países e a conscientização pública demoraram a se consolidar.

Existem óleos de soja desenvolvidos por algumas empresas (Bayer [...], 2022; Missouri Soybean Merchandising Council, 2023; Corteva Agriscience, 2024) com diferentes composições de ácidos graxos (Tabela 8), com o objetivo de atender com qualidade aos novos mercados representados pela indústria de alimentos. Essas empresas buscam, essencialmente, aumentar o teor de ácido graxo oleico (C18:1) para acima de 75%, assegurando, ao mesmo tempo, que a soma dos ácidos linoleico (C18:2) e linolênico (C18:3) se mantenha em torno de 24%.

Tabela 8. Composição típica do óleo de soja (controle), composição modificada de óleos alto oleicos.

Empresa	Nome	Ácidos graxos (%)			
		Oleico	Linoleico	Linolênico	Saturados ¹
		C18:1	C18:2	C18:3	-
Soja commodity	Soja	17 - 30	48 - 59	≥ 3,5 ≤ 8,0	~ 14
Bayer CropScience	Vistive®Gold	65-74 ²	17	3	6
Corteva Agriscience	Plenish®	75 - 80	4 - 7	2	< 12
Missouri Soy	Soyleic®	78 - 84	6 - 8	1 - 3	< 12
Embrapa Soja	Linhagens ³	> 75	~ 7	~ 3	~ 11

¹Principalmente C16:0 e C18:0; ²Dependente do local de produção; ³Média de 8 linhagens
 Fonte: Bayer (2022); Missouri [...] (2023); Corteva Agriscience (2024).

Conforme Wallis et al. (2022) observaram, a identificação e clonagem do gene FAD2, que codifica a enzima chave da síntese de ácidos graxos poliinsaturados (PUFA) em 1994, forneceu a possibilidade para desenvolver linhagens de oleaginosas com alto teor de oleico e baixo teor de PUFA, o que significa que a solução para o problema das gorduras trans estava disponível há mais de 25 anos.

Contudo, além da composição de ácidos graxos, o conteúdo de tococromanóis, também afeta a estabilidade dos diferentes óleos (Napolitano et al., 2018; Xu et al., 2020). Sabores estranhos e compostos químicos nocivos são formados durante a oxidação e degradação do óleo. As reações químicas que ocorrem durante o processo de oxidação dos óleos são complexas e geram produtos sensorialmente desagradáveis. Consequentemente, um óleo com teor de ácidos graxos altamente insaturados que tenham sido oxidados pode ser mais prejudicial à saúde humana do que uma gordura saturada ou óleo de boa qualidade.

Os avanços na biotecnologia permitiram que os cientistas de plantas modificassem a composição de ácidos graxos das sementes oleaginosas e desenvolvessem produtos adequados para diversas aplicações alimentares e não alimentares, durante décadas. Hoje, óleos de algumas culturas, como a soja ou girassol com alto teor dos ácidos oleico, palmítico ou esteárico, e com baixo teor de linolênico estão disponíveis, comercialmente, para diferentes usos (Neff; List, 1999; Pérez-Vich et al., 2016).

O objetivo dessas transformações é equilibrar a estabilidade, a funcionalidade e as características nutricionais dos óleos. A funcionalidade do óleo em uma aplicação específica é tão importante quanto sua estabilidade e os potenciais benefícios para a saúde. Por exemplo, embora os óleos insaturados possam ser considerados saudáveis, eles não oferecem a textura necessária para determinadas aplicações, como na panificação, onde a consistência da matéria-prima é importante.

Nesse sentido, o uso de matérias-primas estáveis, como a soja com alto teor de ácido oleico, é importante para a indústria de alimentos e pode evitar ou reduzir a adição de antioxidantes, inclusive quando utilizadas na produção de biodiesel, o que implica uma produção mais sustentável desse biocombustível e menores problemas nos motores. (Muskat; Mosier, 2017).

Segundo Frankel (2012), foram alcançados progressos significativos, por meio do melhoramento convencional e da modificação genética da soja, canola e do girassol para produzir óleos comestíveis de melhor estabilidade oxidativa, alterando as suas composições de ácidos graxos e o conteúdo de tocoferóis e outros antioxidantes.

Interessante notar que, de modo geral, os óleos classificados como alto oleico são caracterizados pelo teor desse ácido ao redor de 70%. No entanto, observa-se que todas as transformações na soja, girassol ou mesmo na canola buscam um perfil de ácidos graxos semelhante ao óleo de oliva (Tabela 7), que apresenta uma produção ao redor de 2,9 milhões de t/ano, é mais caro e que seria uma ofensa queimar num motor.

Embora o ácido graxo oleico possa ser comum em vários óleos vegetais modificados, como soja, girassol ou canola, o teor elevado desse ácido não é, por si só, o fator que distingue o azeite de oliva de outros óleos com essa característica. Mesmo com a crescente popularidade dos óleos altos oleicos em diversas indústrias, como a de alimentos e biodiesel, o azeite de oliva continua a ser insubstituível. Isso se deve não apenas às suas propriedades organolépticas, que conferem sabor e aroma incomparáveis, mas também aos seus compostos bioativos exclusivos. O azeite de oliva contém substâncias como o oleocanthal, que possui propriedades anti-inflamatórias, e outros fitonutrientes que conferem ao produto benefícios únicos à saúde, tornando-o verdadeiramente singular. Mesmo com a evolução das estratégias de transformação ou o emprego de outras plantas com altas concentrações de ácido oleico, nenhum óleo será capaz de replicar a combinação de atributos que fazem do azeite de oliva um produto indispensável na culinária mundial.

Dependendo das condições climáticas, principalmente da temperatura mínima durante a formação do óleo nos grãos, a composição de ácidos graxos do óleo de girassol tradicional pode ser alterada. Esse fenômeno é fisiológica e bioquimicamente conhecido na literatura internacional e ocorre em diversas regiões do mundo. No Brasil, estudos conduzidos pela Embrapa Soja mostram que há uma ampla variação nos teores médios de ácido graxo oleico em aquênios produzidos em diferentes regiões do país (Grunvald et al., 2013), onde essa variação é significativamente influenciada pela temperatura durante o desenvolvimento das sementes.

Na região Nordeste, por exemplo, o teor de ácido oleico em óleo de girassol tradicional pode atingir valores próximos a 70%, sendo, portanto, muito semelhante ao azeite de oliva. Nos estados de Mato Grosso e Goiás, o teor de ácido oleico no óleo pode atingir valores acima de 40%. Vale ressaltar que os grãos de girassol são geralmente produzidos, em condições de clima temperado, onde as temperaturas mínimas durante a formação dos aquênios é menor que as prevalentes em regiões tropicais, como ocorre no Brasil.

O que se depreende dessas alterações é que a composição de ácidos graxos é afetada não apenas pela variedade ou cultivar, mas também pelas práticas agronômicas utilizadas e pelo clima reinante na região de cultivo. Assim, a composição do óleo pode variar ligeiramente, mesmo dentro da mesma variedade/cultivar, dependendo das condições de crescimento.

ÓLEO ALTO OLEICO PARA A INDÚSTRIA DE BIOENERGIA

A variabilidade genética e a plasticidade fenotípica da soja têm possibilitado a cultura atender diferentes cadeias de produção.

O crescente interesse por alternativas sustentáveis tem impulsionado a busca por produtos renováveis e ecológicos que possam substituir os derivados de fontes não renováveis, como o petróleo. Nesse contexto, produtos de base biológica, como biocombustíveis e biolubrificantes, entre outros, têm apresentado destaque. Essa preocupação com a sustentabilidade é legítima e necessária.

Segundo Lanjekar e Deshmukh (2016), os óleos ideais para a produção de biodiesel, com base no desempenho dos motores e na redução das emissões de NOx, devem conter entre 60% e 80% de ácidos graxos monoinsaturados e entre 10% e 20% de ácidos graxos saturados. Os autores destacam que qualquer alteração no teor de ácidos

graxos pode impactar positivamente ou negativamente a qualidade do biodiesel. Os ácidos graxos monoinsaturados, em particular, oferecem um equilíbrio intermediário, pois não são saturados nem apresentam o alto grau de insaturação característico de outros ácidos graxos, que podem comprometer uma ou mais propriedades do óleo utilizado na produção de biodiesel.

De acordo com Woyann et al. (2019), um ideótipo ideal de soja para a produção de biodiesel deveria apresentar cerca de 80% de ácido oleico, além de níveis reduzidos de ácidos linoleico e linolênico. Esse perfil pode ser obtido por meio da incorporação dos genes mutantes *FAD2-1A* e *FAD2-1B*, utilizando programas de melhoramento genético ou estratégias biotecnológicas. Outra estratégia, seria também a incorporação dos genes *FAD3A* e *FAD3C* para redução dos teores de ácido graxo linolênico. Conforme estudo conduzido por Willette et al. (2021), o efeito aditivo dessas quatro mutações é necessário para atingir teores de ácido linolênico ($\leq 3\%$), o que é especialmente importante para garantir a estabilidade oxidativa do óleo, mesmo quando a soja é cultivada condições climáticas distintas como no Brasil.

Todas as quatro mutações de *FAD2-1A*, *FAD2-1B*, *FAD3A* E *FAD3C* foram determinadas como necessárias para produzir uma soja com o novo padrão da indústria (>750 g kg⁻¹ de ácido oleico e <30 g kg⁻¹ de ácido linolênico) em uma cultivar de grupo de maturidade IV-Tardia para produtores do Tennessee.

Utilizando técnicas que empregam ferramentas genéticas e biotecnológicas, a Embrapa vem desenvolvendo produto semelhante visando melhorar a qualidade de óleos vegetais, qual seja, de produzir óleos com elevado teor de ácido graxo oleico, maior de 75%, e teores dos ácidos linoleico e linolênico variando de 7% e 3%, respectivamente. Antevendo os mercados crescentes de óleos especiais, para a indústria de alimento, ou de biocombustíveis de elevada qualidade, a Embrapa Soja está trabalhando via edição gênica para redução dos teores de ácido graxo palmítico (C16:0), o que resultaria numa tecnologia semelhante ao evento *VistiveGold* (Tabela 8).

Uma questão indesejada nos óleos é a baixa estabilidade à oxidação, geralmente associada ao teor de ácidos graxos poli-insaturados (Canakci et al., 1999), que torna o armazenamento do biodiesel mais complexo e compromete o seu uso direto em motores pelo desenvolvimento de micro-organismos em função da higroscopicidade (Soares et al., 2019) e de borras decorrentes da degradação química ou oligomerização proporcional ao número de insaturações. Nesse aspecto, o biodiesel produzido com uma soja com elevada concentração de ácido oleico pode alcançar destacada vantagem frente a outras matérias-primas.

Embora a soja seja a principal fonte do programa de biodiesel e atenda aos padrões legais, sua composição ainda pode ser aprimorada. A qualidade do biodiesel (FAME) é limitada pelas propriedades físico-químicas das matérias-primas, especialmente aquelas com altos teores de ácidos graxos saturados. Esse desafio tende a se intensificar com o possível aumento da mistura para B15 em 2025, ou maior.

Murad et al. (2014) observaram que, embora o óleo de soja seja usado como biocombustível, sua composição tradicional compromete a qualidade. Para melhorar suas propriedades, é necessário aumentar os ácidos graxos monoinsaturados e reduzir os saturados e poli-insaturados. O estudo focou na redução do ácido palmítico e mostrou que o óleo plantas de soja modificadas elevaram o ácido oleico para 94,58% e reduziram o palmítico para menos de 3%.

Assim, a composição de ácidos graxos das matérias-primas utilizadas na produção de biodiesel exerce influência direta sobre a qualidade final do combustível. Portanto, a introdução de óleos vegetais com elevado teor de ácidos graxos monoinsaturados, como o ácido oleico, pode ser uma estratégia promissora para elevar a estabilidade oxidativa do biodiesel, reduzir problemas de armazenamento e corrosão, e melhorar seu desempenho em condições de baixa temperatura. Essas melhorias estão associadas às propriedades físico-químicas dos ésteres metílicos formados, impactando parâmetros críticos como o Ponto de Entupimento a Frio, o Ponto de Névoa e o Ponto de Congelamento. Portanto, o desenvolvimento e a adoção de cultivares de soja com perfil lipídico otimizado representam um avanço significativo para a produção de biodiesel com maior estabilidade e funcionalidade, inclusive em climas frios.

Winfield et al. (2024) caracterizaram a composição de ácidos graxos de três cultivares de soja: uma variedade comercial e duas outras, Ellis e TN18-4110, para aplicações como lubrificantes (estolídeos) e biodiesel. Duas cultivares (soja comercial e Ellis) apresentaram composições de ácidos graxos semelhantes, enquanto a TN18-4110 se possuía alta concentração de ácido graxo oleico. Em comparação com o biodiesel de soja comercial, tanto Ellis quanto TN18-4110 demonstraram certas vantagens de desempenho como biodiesel e lubrificantes. O biodiesel de TN18-4110 apresentou as melhores propriedades de fluxo a frio, enquanto o de Ellis exibiu a maior estabilidade oxidativa. Como lubrificantes, todas as três variedades produziram estolídeos com propriedades vantajosas de fluxo a frio, mas os estolídeos de TN18-4110 (High oleic) também mostraram excelente estabilidade térmica e menor viscosidade em comparação com os outros estolídeos. Esses estudos reforçam as vantagens da soja alto oleica para as indústrias de biodiesel e automotiva.



CONSIDERAÇÕES FINAIS

- A soja é uma importante referência agronômica para atender às demandas crescentes das sociedades por óleos e alimentos, e montantes significativos de biocombustíveis. Contudo, está muito claro que o Brasil precisa de todas as soluções possíveis.
- A soja apresenta dois produtos principais (farelo proteico e óleo) e se distingue das demais matérias-primas pela maturidade tecnológica do sistema de produção, pela grande oferta e pela diversidade de aplicação dos seus produtos em cadeias agropecuárias e industriais.
- A produção de soja no Brasil é suficiente para atender à crescente demanda dos mercados interno e externo, além de suprir a busca da sociedade por óleos vegetais de alta qualidade. Isso inclui a crescente demanda para o uso de soja no programa de biodiesel para motores terrestres (B100) e na produção de Combustível de Aviação Sustentável (SAF) para motores aeronáuticos no Brasil.
- O potencial de produção de biodiesel e farelo proteico de soja poderá aumentar proporcionalmente com a elevação dos tetos produtivos da cultura no Brasil (kg/ha) ou com o possível aumento do teor de óleo nos grãos (% de óleo).
- A soja com alto teor de ácido graxo oleico possui grande potencial para abrir novos mercados e criar oportunidades para produtores e para a indústria. Seu perfil de ácidos graxos oferece benefícios significativos às indústrias alimentícia, de biocombustíveis e a outros setores relacionados.
- Matérias-primas secundárias como algodão e dendê contribuem de forma relevante para atendimento regional do Renovabio.
- Plantas ou cultivos sem o domínio tecnológico, sem cadeia de produção e mercados estruturados, entre muitos outros pré-requisitos, têm chances periféricas de atender demandas mínimas do mercado, a médio prazo.
- Dado o potencial produtivo da macaúba, essa promissora oleaginosa pode fomentar o desenvolvimento de uma nova cadeia produtiva e integrar o mercado de óleos vegetais.
- Não é o teor de óleo nos frutos ou nos grãos que define se uma matéria-prima é capaz de atender os volumes crescentes de biodiesel dos mercados, mas o volume de produção, a demanda dos mercados, o domínio tecnológico, a cadeia produtiva, logística e o valor agregado dos coprodutos.
- Com base na expertise da Embrapa na geração de tecnologias de produção e na análise de cadeias produtivas, consideramos que a integração de pesquisa científica consistente, transferência de tecnologia e estruturação de cadeias produtivas pode viabilizar, em um horizonte de médio a longo prazo, o cultivo de espécies ainda sem domínio tecnológico consolidado..

EPÍLOGO

O título desta publicação, “Biodiesel no Brasil: reflexões sobre o potencial das principais matérias-primas”, reflete o desejo de estimular uma análise mais cuidadosa sobre a viabilidade e eficiência das diversas matérias-primas para o programa de biocombustíveis no Brasil. Nosso país é rico em uma grande diversidade de espécies vegetais oleaginosas, muitas das quais possuem um imenso potencial agrícola e podem ser exploradas para a produção de biodiesel.

O Brasil possui uma plethora de espécies de interesse agrícola, como macaúba, indaiá, buriti, pequi, babaçu, cotieira, tingui, bacaba, miriti, castanha de arara, curupira, maúba, murumuru, patauí, piquiá, pupunha, tucumã, ucuuba, umari, entre outras. No entanto, embora algumas dessas culturas possam parecer inadequadas ou possuir defeitos à primeira vista, elas possuem características que precisam ser estudadas, compreendidas e ajustadas às demandas comerciais, para que sejam utilizadas de maneira eficiente na desejada bioeconomia.

Embora o Brasil tenha uma vasta gama de opções, uma das principais limitações está na falta de políticas públicas consistentes e de longo prazo que planejem e implementem o uso dessas espécies de forma eficiente e sustentável. O foco, portanto, deveria estar em estudos científicos mais profundos, planejados para viabilizar soluções aos gargalos do processo de transformação de uma espécie nativa em cultura agrícola, e não apenas em iniciativas de curto prazo, movidas por modismos ou interesses financeiros.

O propósito deste opúsculo não é criticar ou desmerecer as propostas de cientistas ou influenciadores, mas sim alertar para a importância de uma abordagem mais crítica e fundamentada sobre as alternativas ao uso da soja, que hoje ocupa uma posição central no programa de biodiesel. A soja, assim como o titã Atlas, não deve ser vista – e nem é – como a única responsável por sustentar toda a produção de biodiesel no Brasil.

Minhas reflexões sobre o tema surgiram a partir de algumas reuniões virtuais, onde ouvi cientistas e empresários exaltando as grandes vantagens das diversas alternativas à soja. Muitas dessas opiniões, contudo, estavam eivadas de preconceitos contra a espécie exótica onipresente no Brasil ou careciam de uma análise mais profunda, o que me motivou a escrever este texto. Inicialmente, não via grande valor em publicar,

pois as informações que eu tinha eram, em grande parte, para consumo próprio. No entanto, com o tempo, percebi que o silêncio diante de tantas certezas, com pouca fundamentação, não seria mais aceitável. Como disse Martin Luther King Jr., e guardadas as devidas proporções, *A pior coisa não é o grito dos maus, mas o silêncio dos bons*, ou daqueles que se consideram bons

Ao lembrar das palavras de Carl Sagan, no livro *O Mundo Assombrado pelos Demônios*⁷, que afirma que “os verdadeiros patriotas fazem perguntas”, decidi finalmente compartilhar minhas reflexões — e as dúvidas que surgiram ao longo desse processo. Este trabalho é, portanto, um convite à análise mais profunda e a uma ação mais consciente e informada, tanto por parte dos pesquisadores e políticos quanto dos empreendedores e agricultores envolvidos no setor. O futuro do biodiesel no Brasil depende de escolhas bem fundamentadas, e o caminho para isso passa pela pesquisa e uma visão de longo prazo.

É essencial, portanto, adotar um olhar mais cuidadoso e fundamentado para que o programa brasileiro de biocombustíveis se fortaleça com uma cesta mais diversificada de matérias-primas alternativas à soja.

César de Castro

⁷SAGAN, C. *O mundo assombrado pelos demônios*. São Paulo: Companhia das Letras, 1996. 448 p.

REFERÊNCIAS

- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DAS INDÚSTRIAS DE ÓLEOS VEGETAIS. **Exportação**. Brasil - Exportação do complexo soja. fev. 2025a Disponível em: <https://abiove.org.br/estatisticas-cadeia-da-soja/>. Acesso em: 26 mar. 2025.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DAS INDÚSTRIAS DE ÓLEOS VEGETAIS. **Mensal**: Estatísticas cadeia de soja 2024. 2025b. Disponível em: <https://abiove.org.br/estatisticas-cadeia-da-soja-mensal/>. Acesso em: 14 mar. 2025.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DAS INDÚSTRIAS DE ÓLEOS VEGETAIS. **Programa Óleo Sustentável realiza ações com comerciantes de Bertioga**. 2 jan. 2024. Disponível em: <https://abiove.org.br/programa-oleo-sustentavel-realiza-acoes-com-comerciantes-de-bertioga/>. Acesso em: 28 out. 2024
- ABPA. **Relatório anual 2024**. 2024. 150 p. Disponível em: https://abpa-br.org/wp-content/uploads/2024/04/ABPA-Relatorio-Anual-2024_capa_frango.pdf. Acesso em: 28 out. 2024.
- ABRAPALMA. **Associados**. c2015. Disponível em: <http://www.abrapalma.org/pt/associados/>. Acesso em: 18 set. 2024.
- ACELEN. **Uma nova aliança para a expansão da macaúba brasileira**.c2021. Disponível em: <https://www.acelem.com.br/comunicacao/embrapa-e-acelem-renovaveis-iniciam-domesticacao-da-macauba-para-combustivel-de-aviacao-e-bioproductos/>. Acesso em: 20 ago. 2024.
- AHMAD, S.; HASSAN, F. U. Oil yield and fatty acid composition of spring sunflower. **Pakistan Journal of Biological Sciences**, v. 3, n. 12, p. 2063-2064, 2000. DOI: 10.3923/pjbs.2000.2063.2064.
- ALMEIDA, M. D.; BORGES, L. E. P.; SANTOS, C. M. C.; PASTURA, N. M. R.; GONZALEZ, M de A. Matéria prima para produção de biodiesel – óleos vegetais. In: BARRETO, E J. F. (coord.). Biodiesel e óleo vegetal in natura: soluções energéticas para a amazônia. Brasília, DF: MME, 2008. p. 23-47.
- ALTMAN, R. F. A. **A exploração industrial de sementes oleaginosas amazônicas**. Rio de Janeiro: INPA, 1958. 24 p.
- AGÊNCIA NACIONAL DO PETRÓLEO, GÁS NATURAL E BIOCOMBUSTÍVEIS. Resolução ANP nº 3, de 25 de janeiro de 2006. Estabelece a especificação para comercialização

do querosene de aviação, destinado exclusivamente ao consumo em turbinas de aeronaves, em todo o território nacional e define obrigações dos agentes econômicos sobre o controle de qualidade do produto. **Diário Oficial da União**: seção 1, 26 jan. 2006. Disponível em: https://www.normasbrasil.com.br/norma/resolucao-3-2006_104361.html. Acesso em: 18 set. 2024.

AGÊNCIA NACIONAL DO PETRÓLEO, GÁS NATURAL E BIOCOMBUSTÍVEIS. Resolução ANP n° 7, de 19 de março de 2008. Estabelece a especificação do biodiesel a ser comercializado pelos diversos agentes econômicos autorizados em todo o território nacional. **Diário Oficial da União**: seção 1, 20 mar. 2008. Disponível em: <https://www.legisweb.com.br/legislacao/?id=109704>. Acesso em: 18 set. 2024.

AGÊNCIA NACIONAL DO PETRÓLEO, GÁS NATURAL E BIOCOMBUSTÍVEIS. **Renovacalc**. 13 jul. 2020. Disponível em: <https://www.gov.br/anp/pt-br/assuntos/renovabio/renovacalc#:~:text=A%20RenovaCalc%20%C3%A9%20a%20ferramenta,todas%20as%20rotas%20de%20produ%C3%A7%C3%A3o>. Acesso em: 18 set. 2024.

AGÊNCIA NACIONAL DO PETRÓLEO, GÁS NATURAL E BIOCOMBUSTÍVEIS. Resolução ANP n° 842, de 14 de maio de 2021. Estabelece a especificação do diesel verde, bem como as obrigações quanto ao controle da qualidade a serem atendidas pelos agentes econômicos que o comercializem em território nacional. **Diário Oficial da União**: seção 1, 17 maio 2021. Disponível em: <https://www.legisweb.com.br/legislacao/?id=414353>. Acesso em: 18 set. 2024.

AGÊNCIA NACIONAL DO PETRÓLEO, GÁS NATURAL E BIOCOMBUSTÍVEIS. **Renovabio**. 28 ago. 2023a. Disponível em: <https://www.gov.br/anp/pt-br/assuntos/renovabio/sobre-o-renovabio>. Acesso em: 12 ago. 2024.

AGÊNCIA NACIONAL DO PETRÓLEO, GÁS NATURAL E BIOCOMBUSTÍVEIS. Resolução ANP n° 920, de 4 de abril de 2023b. Estabelece a especificação do biodiesel e as obrigações quanto ao controle da qualidade a serem atendidas pelos agentes econômicos que comercializem o produto em território nacional. **Diário Oficial da União**: seção 1, 05 abr. 2023b. Disponível em: <https://www.legisweb.com.br/legislacao/?id=443945>. Acesso em: 18 set. 2024.

AGÊNCIA NACIONAL DO PETRÓLEO, GÁS NATURAL E BIOCOMBUSTÍVEIS. **Painel dinâmico**: produtores de biodiesel. 20 fev. 2025a. Disponível em: <https://app.powerbi.com/view?r=eyJrIjoiTlksODYyODctMGJjNS00MGYyLWJmMWItNGJINDg0ZTg5NjBliiwidCI6IjQ0OTlmNGZmLTl0YTYtNGIOMi1iN2VmLTExNGFmY2FkYzIxMyJ9&pageName=ReportSection8aa0cee5b2b8a941e5e0%22>. Acesso em: 26 fev. 2025.

AGÊNCIA NACIONAL DO PETRÓLEO, GÁS NATURAL E BIOCOMBUSTÍVEIS. **Painel dinâmico**: produtores de etanol. 18 fev. 2025b. Disponível em: <https://app.powerbi.com/view?r=eyJrIjoiMmRhZWU2NDUtZWE2Yi00NzI5LWJjMGQtNjIwNjE0MjMOMjEzIiwid-CI6IjQOOTlmNGZmLTIOYTYtNGIOMi1iN2VmLTEyNGFmY2FkYzlkxMyJ9>. Acesso em: 28 fev. 2025.

AGÊNCIA NACIONAL DO PETRÓLEO, GÁS NATURAL E BIOCOMBUSTÍVEIS. **Anuário Estatístico Brasileiro do Petróleo, Gás Natural e Biocombustíveis 2024**: seção 4. 28 ago. 2024a. Disponível em: <https://www.gov.br/anp/pt-br/centrais-de-conteudo/publicacoes/anuario-estatistico/anuario-estatistico-brasileiro-do-petroleo-gas-natural-e-biocombustiveis-2024#Secao4>. Acesso em 26 mar. 2025.

AGÊNCIA NACIONAL DO PETRÓLEO, GÁS NATURAL E BIOCOMBUSTÍVEIS. **Especificação do biodiesel**. 18 jan. 2024b. Disponível em: <https://www.gov.br/anp/pt-br/assuntos/producao-e-fornecimento-de-biocombustiveis/biodiesel/biodiesel/especificacao-do-biodiesel>. Acesso em: 18 set. 2024.

AGÊNCIA NACIONAL DO PETRÓLEO, GÁS NATURAL E BIOCOMBUSTÍVEIS. **Dados de entrega por produtores**. 10 jan. 2022. Disponível em: <https://www.gov.br/anp/pt-br/assuntos/distribuicao-e-revenda/leiloes-biodiesel/dados-de-entregas-por-produtores>. Acesso em: 23 out. 2024.

AGÊNCIA NACIONAL DO PETRÓLEO, GÁS NATURAL E BIOCOMBUSTÍVEIS. **Seção 4 - Biocombustíveis**: matérias-primas utilizadas na produção de biodiesel (B100) no Brasil - 2014-2023. 28 ago. 2024d. Disponível em: <https://www.gov.br/anp/pt-br/centrais-de-conteudo/publicacoes/anuario-estatistico/anuario-estatistico-brasileiro-do-petroleo-gas-natural-e-biocombustiveis-2024#Secao4>. Acesso em: 20 ago. 2024.

AGÊNCIA NACIONAL DO PETRÓLEO, GÁS NATURAL E BIOCOMBUSTÍVEIS. **Biodiesel**. 28 ago. 2024c. Disponível em: <https://www.gov.br/anp/pt-br/assuntos/producao-e-fornecimento-de-biocombustiveis/biodiesel#:~:text=Em%20janeiro%20de%202008%2C%20entrou,CNPE%20n%C2%BA%2016%2F2018>). Acesso em: 18 fev. 2025.

ANTONIASSI, R.; FREITAS, S. C. de; SILVA, T. dos S.; SANTIAGO, M. C. P. de A.; WILHELM, A. E.; JUNQUEIRA, N. T. V. Impact of genotype on fatty acid profile, oil content and nutritional value of the sweet fruits of *Acrocomia aculeata*. **Revista Brasileira de Fruticultura**, v. 42, n. 6, e-796, 2020. 10 p. DOI: 10.1590/0100-29452020796.

ATABANI, A. E.; SILITONGA, A. S.; BADRUDDIN, I. A.; MAHLIA, T. M. I.; MASJUKI, H. H.; MEKHILEF, S. A comprehensive review on biodiesel as an alternative energy resource and

its characteristics. **Renewable and Sustainable Energy Reviews**, v. 16, n. 4, p. 2070-2093, 2012. DOI: 10.1016/j.rser.2012.01.003.

AZEVEDO FILHO, J. A.; COLOMBO, C. A.; BERTON, L. H. C. Macaúba: palmeira nativa como opção bioenergética. **Pesquisa & Tecnologia**, v. 9, n. 2, 2012. 10 p. Disponível em: <https://www.agricultura.sp.gov.br/documents/1007647/0/94.%20MACA%C3%9ABA%20-%20PALMEIRA%20NATIVA%20COMO%20OP%C3%87%C3%83O%20BIOENERG%C3%89TI-CAISSN.pdf/75ccca72-0a04-982e-8280-affc4ae7ffff>. Acesso em: 07 out. 2024.

BAER, D. J.; HENDERSON, T.; GEBAUER, S. K. Consumption of high-oleic soybean oil improves lipid and lipoprotein profile in humans compared to a palm oil blend: a randomized controlled trial. **Lipids**, v. 56, n. 3, p. 257-353, 2021. DOI: 10.1002/lipid.12298.

BAYER Collaboration with Perdue AgriBusiness to Bring Vistive® Gold Xtend Soybeans to Market. 3 maio 2022. Disponível em: <https://www.bayer.com/en/us/bayer-collaboration-with-perdue-agribusiness-to-bring-vistiver-gold-xtend-soybeans-to-market>. Acesso em: 5 fev. 2024.

BELTRÃO, N. E. de M.; CARDOSO, G. D.; SEVERINO, L. S.; PEREIRA, J. R.; GONDIM, T. M. de S.; CARTAXO, W. V. **O biodiesel do óleo da mamona e a produção de fitomassa: considerações gerais e singularidades**. Campina Grande: Embrapa Algodão, 2006. 1 folder.

BELTRÃO, N. E. de M.; OLIVEIRA, M. I. P. **Oleaginosas e seus óleos: vantagens e desvantagens para produção de biodiesel**. Campina Grande: Embrapa Algodão, 2008. 28 p. (Embrapa Algodão. Documentos, 201).

BERTON, L. H. C. **Avaliação de populações naturais, estimativas de parâmetros genéticos e seleção de genótipos elite de macaúba (*Acrocomia aculeata*)**. 2013. 154 f. Tese (Doutorado em Agricultura Tropical e Subtropical) - Instituto Agrônomo de Campinas, Campinas.

BERTON, L. H. C.; AZEVEDO FILHO, J. A.; SIQUEIRA, W. J.; COLOMBO, C. A. Seed germination and estimates of genetic parameters of promising macaw palm (*Acrocomia aculeata*) progenies for biofuel production. **Industrial Crops and Products**, v. 51, p. 258-266, 2013. DOI: 10.1016/j.indcrop.2013.09.012.

BHERING, L. Macaúba: matéria-prima nativa com potencial para a produção de biodiesel. **Portal do Agronegócio**, 17 nov. 2009. Disponível em: <https://www.portaldoagronegocio.com.br/energias-renovaveis/biodiesel/artigos/macauba-materia-prima-nativa-com-potencial-para-a-producao-de-biodiesel>. Acesso em: 07 out. 2024.

BNDES aprova R\$ 258 mi à Acelen para inovação e desenvolvimento da macaúba para combustíveis. **Agência BNDES de Notícias**, 17 out. 2024. Disponível em: <https://agencia->

denoticias.bndes.gov.br/detalhe/noticia/BNDES-aprova-R\$-258-mi-a-Acelen-para-inovacao-e-desenvolvimento-da-macauba-para-combustiveis/. Acesso em: 04 nov. 2024.

BONATO, E. R.; BONATO, A. L. V. **A soja no Brasil: história e estatística**. Londrina: EMBRAPA-CNPSO, 1987. 61 p. (EMBRAPA-CNPSO. Documentos, 21).

BOUND, K. **Brazil: the natural knowledge-economy**. London: Demos, 2008. 158 p.

BRANCO, P. de M. Petróleo. In: SERVIÇO GEOLÓGICO DO BRASIL. **Nossos produtos**. 18 ago. 2014. Disponível em: <https://www.sgb.gov.br/petroleo>. Acesso em: 19 set. 2024.

BRASIL. Ministério da Agricultura e Pecuária. Portaria nº 2, de 6 de fevereiro de 2024. Aprova o Zoneamento Agrícola de Risco Climático - ZARC para a cultura da macaúba, em sistema de cultivo de sequeiro, no Brasil. **Diário Oficial da União**: seção 1, 07 fev. 2024. Disponível em: <https://www.gov.br/agricultura/pt-br/assuntos/riscos-seguro/programa-nacional-de-zoneamento-agricola-de-risco-climatico/portarias/safra-vigente/distrito-federal/PORTN2MACABASEQUEIROBRASIL.pdf>. Acesso em: 19 set. 2024.

BRASIL. Ministério da Indústria e do Comércio. Secretaria de Tecnologia Industrial. Coordenadoria de Informações Tecnológicas. **Produção de combustíveis líquidos a partir de óleos vegetais**. Brasília, DF: MIC, 1985. 364 p. (STI-CIT. Documentos, 16).

BRASIL. Ministério de Minas e Energia. **Programa Nacional de Produção e Uso do Biodiesel (PNPB)**. 2023b. Disponível em: <https://www.gov.br/mme/pt-br/assuntos/secretarias/petroleo-gas-natural-e-biocombustiveis/biodiesel/pnpb>. Acesso em: 08 maio. 2023.

BRASIL. Ministério do Desenvolvimento Agrário. **Macaúba**: diretrizes e recomendações técnicas para adoção de boas práticas de manejo para o extrativismo do fruto da macaúba/bocaiúva (*Acrocomia* spp.). Brasília, DF: SAF/DGRAV/CGBio, 2014a. 52 p.

BRASIL. Ministério do Desenvolvimento, Indústria, Comércio e Serviços. **Comex Stat**: exportação e importação geral. 2023a. Disponível em: <http://comexstat.mdic.gov.br/pt/geral>. Acesso em: 08 maio. 2023.

BRASIL. Presidência da República. Casa Civil. Subchefia para Assuntos Jurídicos. Lei nº 11.097, de 13 de janeiro de 2005. Dispõe sobre a introdução do biodiesel na matriz energética brasileira. **Diário Oficial da União**: seção 1, 14 jan. 2005. Disponível em: https://www.planalto.gov.br/ccivil_03/_Ato2004-2006/2005/Lei/L11097.htm. Acesso em: 19 set. 2024.

BRASIL. Presidência da República. Casa Civil. Subchefia para Assuntos Jurídicos. Lei nº 13.033, de 24 de setembro de 2014. Dispõe sobre a adição obrigatória de biodiesel ao óleo diesel comercializado com o consumidor final. **Diário Oficial da União**: seção 1, 24 set. 2014b. Disponível em: https://www.planalto.gov.br/ccivil_03/_Ato2011-2014/2014/Lei/L13033.htm. Acesso em: 19 set. 2024.

BYERLEE, D.; FALCON, W. P.; NAYLOR, R. L. (ed.). **The tropical oil crop revolution: food, feed, fuel, and forests**. New York: Oxford University Press, 2017. 242 p. DOI:10.1093/acprof:oso/9780190222987.001.0001.

CAI, J.-S.; FENG, J.-Y.; NI, Z.-J.; MA, R.-H.; THAKUR, K.; WANG, S.; HU, F.; ZHANG, J.-G.; WEI, Z.-J. An update on the nutritional, functional, sensory characteristics of soy products, and applications of new processing strategies. **Trends in Food Science & Technology**, v. 112, p. 676-689, 2021. DOI: 10.1016/j.tifs.2021.04.039.

CANAKCI, M.; MONYEM, A.; VAN GERPEN, J. Accelerated oxidation processes in biodiesel. **Transactions of the ASAE**, v. 42, n. 6, p. 1565-1572, 1999.

CANOLA COUNCIL OF CANADA. **History of canola seed development**. [2024]. Disponível em: <https://www.canolacouncil.org/canola-encyclopedia/history-of-canola-seed-development/>. Acesso em: 19 set. 2024.

CARDOSO, A. N.; LAVIOLA, B. G.; SANTOS, G. S.; SOUSA, H. U. de; OLIVEIRA, H. B. de; VERRAS, L. C.; CIANNELLA, R.; FÁVARO, S. P. Opportunities and challenges for sustainable production of *A. aculeata* through agroforestry systems. **Industrial Crops and Products**, v. 107, p. 573-580, 2017. DOI: 10.1016/j.indcrop.2017.04.023

CARDOSO, A. N.; SANTOS, G. S.; FÁVARO, S. P.; DINIZ, C. B.; SOUSA, H. U. de. Extrativismo da macaúba na região do Cariri Cearense: comercialização e oportunidades. **Brazilian Journal of Development**, v. 6, n. 5 p. 25261-25279, 2020. DOI: 10.34117/bjdv6n5-108.

CARGNIN, A.; JUNQUEIRA, N. T. V.; FOGAÇA, C. M. **Potencial da macaubeira como fonte de matéria-prima para produção de biodiesel**. Planaltina, DF: Embrapa Cerrados, 2008. (Embrapa Cerrados. Documentos, 217).

CASE do campeão nacional 14/15 141 sc/ha, Alison Hildemberg. CESB, [2015]. Relatores: Leandro Zancanaro e Henry Sako. Disponível em: <https://www.cesbrasil.org.br/wp-content/uploads/2022/03/Caso-Campeao-Sul-Nacional-1415.pdf>. Acesso em: 23 set. 2023.

CASTRO, A. M. G. de; LIMA, S. M. V.; SILVA, J. F. V. (ed.). **Complexo agroindustrial de biodiesel no Brasil: competitividade das cadeias produtivas de matérias-primas**. Brasília, DF: Embrapa Agroenergia, 2010. 712 p.

CÉSAR, A. da S.; ALMEIDA, F. de A.; SOUZA, R. P. de; SILVA, G. C.; ATABANI, A. E. The prospects of using *Acrocomia aculeata* (macaúba) a non-edible biodiesel feedstock in Brazil. **Renewable and Sustainable Energy Reviews**, v. 49, p. 1213-1220, 2015. DOI: 10.1016/j.rser.2015.04.125.

CICONINI, G. **Caracterização de frutos e óleo de polpa de macaúba dos biomas Cerrado e Pantanal do estado de Mato Grosso do Sul, Brasil**. 2012. 127 f. Dissertação (Mestrado) - Universidade Católica Dom Bosco, Campo Grande.

CICONINI, G.; FÁVARO, S. P.; ROSCOE, R.; MIRANDA, C. H. B.; TAPETI, C. F.; MIYAHIRA, M. A. M.; BEARARI, L.; GALVANI, F.; BORSATO, A. V.; COLNAGO, L. A.; NAKA, M. H. Biometry and oil contents of *Acrocomia aculeata* fruits from the Cerrados and Pantanal biomes in Mato Grosso do Sul, Brazil. **Industrial Crops and Products**, v. 45, p. 208-214, 2013. DOI: 10.1016/j.indcrop.2012.12.008.

CLODOVEO, M. L.; CAMPOSEO, S.; GENNARO, B. de; PASCUZZI, S.; ROSELLI, L. In the ancient world, virgin olive oil was called “liquid gold” by Homer and “the great healer” by Hippocrates. Why has this mythic image been forgotten? **Food Research International**, v. 62, p. 1062-1068, 2014. DOI: 10.1016/j.foodres.2014.05.034.

CNPE. Resolução CNPE nº 16, de 29 de outubro de 2018. Dispõe sobre a evolução da adição obrigatória de biodiesel ao óleo diesel vendido ao consumidor final, em qualquer parte do território nacional. **Diário Oficial da União**: seção 1, 08 nov. 2018. Disponível em: https://www.gov.br/mme/pt-br/assuntos/conselhos-e-comites/cnpe/resolucoes-do-cnpe/arquivos/2018/resolucao_16_cnpe_29-10-18.pdf. Acesso em: 19 set. 2024.

CNPE. Resolução CNPE nº 4/2021, de 9 de abril de 2021. Estabelece como de interesse da Política Energética Nacional a redução do teor de mistura obrigatória do biodiesel no óleo diesel fóssil de 13% (treze por cento) para 10% (dez por cento), no 79º Leilão de Biodiesel. **Diário Oficial da União**: seção 1, edição extra, 13 abr. 2021a. Disponível em: https://www.gov.br/mme/pt-br/assuntos/conselhos-e-comites/cnpe/resolucoes-do-cnpe/resolucoes-2021/ResCNPE_4_2021_.pdf. Acesso em: 19 set. 2024.

CNPE. Resolução CNPE nº 11, de 2 de junho de 2021. Estabelece como de interesse da Política Energética Nacional a redução do teor de mistura obrigatória do biodiesel no óleo diesel fóssil de 13% (treze por cento) para 12% (doze por cento), no 81º Leilão de Biodiesel. **Diário Oficial da União**: seção 1, edição extra, 12 jul. 2021b. Disponível em: https://www.gov.br/mme/pt-br/assuntos/conselhos-e-comites/cnpe/resolucoes-do-cnpe/resolucoes-2021/ResC-NPE_11_2021_.pdf. Acesso em: 19 set. 2024.

CNPE. Resolução CNPE nº 16, de 6 de setembro de 2021. Estabelece como de interesse da Política Energética Nacional a redução do teor de mistura obrigatória do biodiesel no óleo diesel fóssil de 13% (treze por cento) para 10% (dez por cento), no 82º Leilão de Biodiesel. **Diário Oficial da União**: seção 1, 13 set. 2021c. Disponível em: https://www.gov.br/mme/pt-br/assuntos/conselhos-e-comites/cnpe/resolucoes-do-cnpe/resolucoes2021/ResC-NPE_16_2021_.pdf. Acesso em: 19 set. 2024.

CNPE. Resolução CNPE nº 25, de 22 de novembro de 2021. Estabelece como de interesse da Política Energética Nacional a fixação do teor de mistura obrigatória do biodiesel no óleo diesel fóssil em 10% (dez por cento), para o ano de 2022. **Diário Oficial da União**: seção 1, 17 dez. 2021d. Disponível em: <https://www.gov.br/mme/pt-br/assuntos/conse>

lhos-e-comites/cnpe/resolucoes-do-cnpe/resolucoes-2021/ResCNPE252021revogada.pdf. Acesso em: 19 set. 2024.

CNPE. Resolução CNPE nº 12, de 21 de novembro de 2022. Estabelece, como de interesse da Política Energética Nacional, a fixação do teor de mistura obrigatória do biodiesel no óleo diesel fóssil em 10% (dez por cento), no período de 1º de janeiro a 31 de março de 2023 e a participação, em igualdade de condições, de outras rotas tecnológicas de produção na parcela obrigatória de biodiesel no óleo diesel B, e dá outras providências. **Diário Oficial da União**: seção 1, edição extra, 25 nov. 2022. Disponível em: https://www.gov.br/mme/pt-br/assuntos/conselhos-e-comites/cnpe/resolucoes-do-cnpe/2022/ResCNPE122022_revogada.pdf. Acesso em: 19 set. 2024.

CNPE. Resolução CNPE nº 8, de 19 de dezembro de 2023. Reduz o prazo para os aumentos dos teores de biodiesel, previstos pela Resolução CNPE nº 16, de 29 de outubro de 2018, alterada pela Resolução CNPE nº 3, de 20 de março de 2023, com base em estudos de oferta, demanda e impactos econômicos. **Diário Oficial da União**: seção 1, 26 dez. 2023. Disponível em: <https://www.gov.br/mme/pt-br/assuntos/conselhos-e-comites/cnpe/resolucoes-do-cnpe/2023/ResolucaoCNPE8Publicada.pdf>. Acesso em: 19 set. 2024.

COIMBRA, M. C.; JORGE, N. Fatty acids and bioactive compounds of the pulps and kernels of Brazilian palm species, guariroba (*Syagrus oleraces*), jervivá (*Syagrus romanzoffiana*) and macaúba (*Acrocomia aculeata*). **Journal of the Science of and Food Agriculture**, v. 92, n. 3, p. 679-684, 2012. DOI: 10.1002/jsfa.4630.

COLOMBO, C. A.; BERTON, L. H. C.; DIAZ, B. G.; FERRARI, R. A. Macauba: a promising tropical palm for the production of vegetable oil. **Oilseeds and Fats, Crops and Lipids**, v. 25, n. 1, D108, 2017. DOI: 10.1051/ocl/2017038.

CONAB. **Acompanhamento da safra brasileira**: grãos. 13 fev. 2025b. Disponível em: <https://www.conab.gov.br/info-agro/safras/graos/boletim-da-safra-de-graos>. Acesso em: 19 fev. 2025.

CONAB. **Cana-de-açúcar - indústria**. 28 nov. 2024a. Disponível em: <https://www.conab.gov.br/info-agro/safras/serie-historica-das-safras/itemlist/category/893-cana-de-acucar-industria>. Acesso em: 15 mar. 2025

CONAB. **Oferta e demanda de carnes**. 27 jan. 2025c. Disponível em: <https://www.conab.gov.br/info-agro/analises-do-mercado-agropecuario-e-extrativista/analises-do-mercado/oferta-e-demanda-de-carnes>. Acesso em: 15 mar. 2025.

CONAB. **Séries históricas das safras**: grãos. 13 mar. 2025a. Disponível em: <https://www.conab.gov.br/info-agro/safras/serie-historica-das-safras#grãos-2>. Acesso em: 14 mar. 2025.

CONAB. **Soja**: série histórica - custos - soja - 1997 a 2024. 5 set. 2024b. Disponível em: <https://www.conab.gov.br/info-agro/custos-de-producao/planilhas-de-custo-de-producao/itemlist/category/824-soja>. Acesso em: 20 set. 2024.

CONCEIÇÃO, L. D. H. C. S. da; JUNQUEIRA, N. T. V.; MOTOIKE, S. Y.; PIMENTEL, L. D.; FÁVARO, S. P.; BRAGA, M. F.; ANTONIASSI, R. Macaúba. In: LOPES, R.; OLIVEIRA, M. do S. P. de; CAVALLARI, M. M.; BARBIERI, R. L.; CONCEIÇÃO, L. D. H. C. S. da (ed.). **Palmeiras nativas do Brasil**. Brasília, DF: Embrapa, 2015. p. 271-305.

CORTEVA AGRISCIENCE. **Plenish® high oleic soybean oil**. 2024. Disponível em: <https://www.healthyoils.corteva.com/about/plenish.html>. Acesso em: 01 maio 2024.

COSTA JUNIOR, M. B.; AROUCA, C. L. C.; MACIEL, M. P.; AIURA, F. S.; FONTES, D. O.; ROSA, B. O.; LIMA, C. A.; FERNANDES, I. S. Torta da polpa da macaúba para suínos em terminação. **Revista Brasileira de Saúde e Produção Animal**, v. 16, p. 325-336, 2015. DOI: 10.1590/S1519-99402015000200008.

COSTA NETO, P. R.; ROSSI, L. F. S.; ZAGONEL, G. F.; RAMOS, L. P. Produção de bio-combustível alternativo ao óleo diesel através da transesterificação de óleo de soja usado em frituras. **Química Nova**, v. 23, n. 4, p. 531-537, 2000. DOI: 10.1590/S0100-40422000000400017.

DEL RÍO, J. C.; EVARISTO, A. B.; MARQUES, G.; MARTÍN-RAMOS, P.; MARTÍN-GIL, J.; GUTIÉRREZ, A. Chemical composition and thermal behavior of the pulp and kernel oils from macauba palm (*Acrocomia aculeata*) fruit. **Industrial Crops and Products**, v. 84, p. 294-304, 2016. DOI: 10.1016/j.indcrop.2016.02.018.

DELATORRE, A. B.; RODRIGUES, P. M.; AGUIAR, C. J.; ANDRADE, V. V. V.; ARÊDES, A.; PEREZ, V. H. Produção de biodiesel: considerações sobre as diferentes matérias-primas e rotas tecnológicas de processos. **Perspectivas online: Ciências Biológicas & da Saúde**, v. 1, n. 1, p. 21-47, 2011. DOI:10.25242/8868112011510.

DENDÊ: produtos, mercado e potencialidade. Manaus: Embrapa Amazônia Ocidental, 2007. 1 folder.

DIAMOND, J. M. **Guns, germs, and steel**: the fates of human societies. New York: W. W. Norton & Company, 1999. 457 p.

DIEGUEZ, C. A. A agrobombeira. **Piauí**, n. 156, set. 2019. Disponível em: <https://piaui.folha.uol.com.br/materia/a-agrobombeira/>. Acesso em: 31 jan. 2024.

DISAVINO, S. Oil prices rise 3% after Iran launches missiles at Israel. Reuters, 01 Oct., 2024. Disponível em: <https://www.reuters.com/business/energy/oil-steady-prospect-more-supply-offsets-middle-east-conflict-worries-2024-10-01/>. Acesso em: 2 out. 2024.

DISPONIBILIDADE de matéria-prima para combustível de aviação no brasil: desafios e oportunidades: relatório 2021. Geneva: RSB, [2021]. Disponível em: https://www.boeing.com.br/content/dam/boeing/po_br/sustentabilidade/combustiveis/RSB-jetfuel-saf-factsheets_portuguese.pdf. Acesso em: 28 out. 2024

DU BOIS, C. M. **The story of soy**. London: Reaktion Books, 2018. 272 p.

DUNFORD, N. **Properties of high oleic seed oils**. Stillwater: Oklahoma State University, 2020. (OSU Extension. FAPC-236). Disponível em: <https://extension.okstate.edu/factsheets/properties-of-high-oleic-seed-oils.html>. Acesso em: 20 set. 2024.

ECONOMIC implications of modified soybeans traits. Ames, Iowa: Iowa Soybean Promotion Board: American Soybean Association, 1990. 88 p. (Special Report, 92).

EMBRAPA SUÍNOS E AVES. **Central de Inteligência de Aves e Suínos - CIAS**. 2024. Disponível em: <https://www.embrapa.br/suinos-e-aves/cias/custos/icpfrango>. Acesso em: 12 jun. 2024.

ENERGY INSTITUTE. **Statistical review of world energy**. 73rd ed. 2024. 72 p. Disponível em: https://www.energyinst.org/_data/assets/pdf_file/0006/1542714/684_EI_Stat_Review_V16_DIGITAL.pdf. Acesso em: 20 set. 2024.

EMPRESA DE PESQUISA ENERGÉTICA (Brasil). **Estudos do Plano Decenal de Expansão de Energia 2032**: preços internacionais de petróleo. Rio de Janeiro: EPE, 2022. 30 p. Disponível em: https://www.epe.gov.br/sites-pt/publicacoes-dados-abertos/publicacoes/PublicacoesArquivos/publicacao-689/topico-640/Caderno%20de%20Pre%C3%A7os%20de%20Petr%C3%B3leo_PDE%202032.pdf. Acesso em: 20 set. 2024.

ESCOLA SUPERIOR DE AGRICULTURA LUIZ DE QUEIROZ. Centro de Estudos Avançados em Economia Agrícola. **PIB da cadeia de soja e biodiesel**. [2024]. Disponível em: <https://cepea.esalq.usp.br/br/pib-da-cadeia-de-soja-e-biodiesel-1.aspx>. Acesso em: 20 abr. 2024.

ESTADOS UNIDOS. Department of Agriculture. Foreign Agricultural Service. **Commodities & Products**. 2019. Disponível em: <http://www.fas.usda.gov/commodities>. Acesso em: 02 set. 2023.

ESTADOS UNIDOS. Department of Agriculture. Foreign Agricultural Service. **Market and trade data**. 2024a. Disponível em: <https://apps.fas.usda.gov/psdonline/app/index.html#/app/advQuery>. Acesso em: 20 set. 2024.

ESTADOS UNIDOS. Department of Agriculture. Foreign Agricultural Service. **Commodity intelligence report**. Global markets analysis. 13 out. 2022. Disponível em: <https://ipad.fas.usda.gov/highlights/2022/10/Brazil/index.pdf>. Acesso em: 10 jan. 2025.

ESTADOS UNIDOS. Department of Agriculture. Foreign Agricultural Service. **Oilseeds: Production, supply and distribution.** 11 fev. 2025b. Disponível em: <https://apps.fas.usda.gov/psdonline/app/index.html#/app/downloads?tabName=dataSets>. Acesso em: 22 fev. 2025.

ESTADOS UNIDOS. Department of Agriculture. Foreign Agricultural Service. **Oilseeds: world markets and trade.** 05 fev. 2025a. Disponível em: <https://apps.fas.usda.gov/psdonline/circulars/oilseeds.pdf>. Acesso em: 18 fev. 2025.

ESTADOS UNIDOS. Department of Energy. Fossil Energy and Carbon Management. **Industry guide to carbon capture and storage at cement plants.** 29 nov. 2023. Disponível em: <https://www.energy.gov/fecm/articles/fact-sheet-industry-guide-carbon-capture-and-storage-cement-plants>. Acesso em: 20 set. 2024.

ESTADOS UNIDOS. **Production, Supply and Distribution.** 11 nov. 2024b. Disponível em: <https://apps.fas.usda.gov/psdonline/app/index.html#/app/downloads>. Acesso em: 17 mar. 2025. arquivo csv.

ESTADOS UNIDOS. Soybean Export Council. **Codex committee on fats and oils approves high oleic soybean oil standard.** 7 mar. 2024d. Disponível em: <https://ussec.org/codex-committee-on-fats-and-oils-approves-high-oleic-soybean-oil-standard/>. Acesso em: 20 set. 2024.

ESTADOS UNIDOS. Soybean Export Council. **US high oleic soybeans & high oleic soybean oil sourcing guide for international customers.** 4th ed. Washington DC, 2024c. 39 p.

EVARISTO, A. B.; GOULART, S. M.; MARTINS, A. D.; PIMENTEL, L. D.; GROSSI, J. A. S. Caracterização físico-química de frutos de macaúba provenientes de três regiões do Estado de Minas Gerais. **Agrotecnologia**, v. 8, n. 2, p. 81-92, 2017. DOI:10.12971/2179-5959/agrotecnologia.v8n2p81-92.

EVARISTO, A. B.; GROSSI, J. A. S.; CARNEIRO, A. de C. O.; PIMENTEL, L. D.; MOTOIKE, S. Y.; KUKI, K. N. Actual and putative potentials of macauba palm as feedstock for solid biofuel production from residues. **Biomass and Bioenergy**, v. 85, p. 18-24, 2016a. DOI: 10.1016/j.biombioe.2015.11.024.

EVARISTO, A. B.; GROSSI, J. A. S.; PIMENTEL, L. D.; GOULART, S. M.; MARTINS, A. D.; SANTOS, V. I.; MOTOIKE, S. Y. Harvest and post-harvest conditions influencing macauba (*Acrocomia aculeata*) oil quality attributes. **Industrial Crops and Products**, v. 85, p. 63-73, 2016b. DOI:10.1016/j.indicrop.2016.02.052.

FAGUNDES, A. R. **Icofort inaugura indústria de óleo de algodão em Nova Mutum**. 29 nov. 2024b. Disponível em: <https://fiemt.ind.br/noticias/4813/icofort-inaugura-industria-de-oleo-de-algodao-em-nova-mutum>. Acesso em: 25 fev. 2025.

FAGUNDES, A. R. **Mato Grosso terá maior indústria de óleo do algodão do país**. FIEMT, 30 ago. 2024a. Disponível em: <https://www.fiemt.ind.br/noticias/4507/mato-grosso-tera-maior-industria-de-oleo-do-algodao-do-pais>. Acesso em: 11 set. 2024.

FALASCA, S.; ULBERICH, A.; PITTA-ALVAREZ, S. Development of agroclimatic zoning model to delimit the potential growing areas for macaw palm (*Acrocomia aculeata*). **Theoretical and Applied Climatology**, v. 129, p. 1321-1333, 2017. DOI: 10.1007/s00704-016-1850-6.

FAO. **Forests and energy**: key issues. Rome, 2008. 56 p. (FAO Forestry paper, 154). Disponível em: <https://www.fao.org/4/i0139e/i0139e00.pdf>. Acesso em: 21 abr. 2024.

FAO. Sustainable Food and Agriculture. **Land use in agriculture by the numbers**. 7 may 2020. Disponível em: <https://www.fao.org/sustainability/news/detail/en/c/1274219/>. Acesso em: 20 abr. 2024.

FAO. **The hidden power of wood fuel**. Rome, 2023. Disponível em: <https://openknowledge.fao.org/server/api/core/bitstreams/9d8515bc-827d-45dd-a087-e7965757188a/content/forest-products-statistics-2023/hidden-importance-of-wood-fuel.html>. Acesso em: 20 ago. 2024.

FARAG, M. A.; GAD, M. Z. Omega-9 fatty acids: potential roles in inflammation and cancer management. **Journal of Genetic Engineering and Biotechnology**, v. 20, n. 1, 48, 2022. 11p. DOI: 10.1186/s43141-022-00329-0.

FARFAN, F.; FASIHI, M.; BREYER C. Trends in the global cement industry and opportunities for long-term sustainable CCU potential for Power-to-X. *Journal of Cleaner Production*. v. 217, p. 821-835, 2019. DOI: 10.1016/j.jclepro.2019.01.226

FARIA, L. A. de. **Hidrólise do óleo da amêndoa da macaúba com lipase extracelular de *Colletotrichum gloesporioides* produzida por fermentação em substrato líquido**. 2010. 146 f. Dissertação (Mestrado em Ciência de Alimentos) - Universidade Federal de Minas Gerais, Faculdade de Farmácia, Belo Horizonte.

FARIAS, J. R. B.; MONTEIRO, J. E. B. de A.; VICTORIA, D. de C.; SIBALDELLI, R. N. R.; CRUSIOL, L. G. T.; GONCALVES, S. L. Zoneamento agrícola de risco climático da soja para seis classes de água disponível no solo (ZARC SOJA - 06 ADS). In: REUNIÃO DE PESQUISA DE SOJA, 38., 2023, Londrina. **Resumos expandidos...** Londrina: Embrapa Soja, 2023. p. 27-31. (Embrapa Soja. Eventos técnicos & científicos, 1).

FÁVARO, S. P.; MIRANDA, C. H. B. **Aproveitamento de espécies nativas e seus coprodutos no contexto de biorrefinaria**. Brasília, DF: Embrapa Agroenergia, 2013. 38 p. (Embrapa Agroenergia. Documentos, 14).

FÁVARO, S. P.; ROCHA, J. D. **A nova cadeia produtiva da macaúba para bioprodutos e descarbonização**. Brasília, DF: Embrapa Agroenergia, 2022. 31 p. (Embrapa Agroenergia. Documentos, 46).

FÁVARO, S. P.; SMIDT, M. A.; MIRANDA, C. H. B.; LEAL, W. G. de O.; CARVALHO, F. B. de P.; RIVALDI, J. D. Aqueous extraction to high yield and quality of macauba (*Acrocomia aculeata*) pulp oil. **Applied Food Research**, v. 2, 100060, 2022. DOI: 10.1016/j.afres.2022.100060.

FERREIRA, A. B. de H. **Novo Dicionário Aurélio da Língua Portuguesa**. 2. ed. Rio de Janeiro: Nova Fronteira, 1986. p. 950.

FERREIRA, E. A. B.; SA, M. A. C. de; SANTOS JUNIOR, J. de D. G. dos; MEIRELLES, M. L.; CARVALHO, A. M. de. Estimativa de sequestro de carbono numa população espontânea de palmeiras macaúba. In: CONGRESSO INTERNACIONAL DE BIOENERGIA, 9., 2014. São Paulo. **Anais...** Paraná: Porths Eventos, 2014.

FERRO, A. F. P.; BONACELLI, M. B. M.; ASSAD, A. L. D. Oportunidades tecnológicas e estratégias concorrenciais de gestão ambiental: o uso sustentável da biodiversidade brasileira. **Gestão & Produção**, v. 13, n. 3, p. 489-501, 2006. DOI: 10.1590/S0104-530X2006000300011.

FINATEC. **Projeto recuperação e proteção dos serviços relacionados ao clima e à biodiversidade no corredor sudeste da Mata Atlântica do Brasil**. Seleção Pública PSA Nº 002/2021. 2021. 39 p. Disponível em: https://www.finatec.org.br/site/wp-content/uploads/2021/05/edital_PSA_002_2021_edital.pdf. Acesso em: 23 set. 2024.

FIRJAN. **Índice FIRJAN de Desenvolvimento Municipal (IFDM)**. c2023. Disponível em: <https://www.firjan.com.br/ifdm/consulta-ao-indice/>. Acesso em: 23 set. 2024.

FISCHETTI, M.; BOCKELMAN, N.; SRUBAR, W. V. Solving cement's massive carbon problem. **Scientific American**, 1 fev. 2023. Disponível em: <https://www.scientificamerican.com/article/solving-cements-massive-carbon-problem/>. Acesso em: 23 set. 2024.

FLIDER, F. J. (ed.). **High oleic oils: development, properties, and uses**. London: Academic Press and AOCS Press, 2022. 283 p. DOI:10.1016/C2019-0-04022-8.

FONSECA, F. A. **Extração de óleo residual das tortas de polpa e amêndoa da macaúba (*Acrocomia aculeata*) utilizando como solvente o etanol e isopropanol**. 2016. 128 f.

Dissertação (Mestrado em Engenharia Química) - Universidade Federal de Minas Gerais, Escola de Engenharia, Belo Horizonte.

FRANCO, W. C. G. **Frequência de queda e avaliação do uso de coletor na conservação pós-colheita de frutos de macaúba**. 2019. 38 f. Dissertação (Mestrado em Fitotecnia) - Universidade Federal de Viçosa, Viçosa.

FRANKEL, N. **Lipid oxidation**. 2nd ed. Cambridge: Woodhead, 2012. 470 p.

FRÖHLICH, A.; RICE, B. Evaluation of *Camelina sativa* oil as a feedstock for biodiesel production. **Industrial Crops and Products**, v. 21, n. 1, p. 25-31, 2005. DOI: 10.1016/j.indcrop.2003.12.004.

FUNDAÇÃO CENTRO TECNOLÓGICO DE MINAS GERAIS. **Programa Energia**: produção de combustíveis líquidos a partir de óleos vegetais. v. 1, Estudo de oleaginosas nativas de Minas Gerais. Belo Horizonte: CETEC-MG, 1983. 152 p.

FURTADO, M. B. **Produção de biodiesel a partir do processamento das oleaginosas amazônicas compadre-do-azeite (*Plukenetia polyadenia*) e comadre-do-azeite (*Onphalea diandra*)**. 2014. 164 f. Tese (Doutorado em Engenharia de Recursos Naturais da Amazônia) - Universidade Federal do Pará, Belém.

GAONKAR, V.; ROSENTRATER, K. A. Soybean. In: PAN, Z.; ZHANG, R.; ZICARI, S. (ed.). **Integrated processing technologies for food and agricultural by-products**. London: Academic Press. 2019. cap.4, p. 73-104. DOI: 10.1016/B978-0-12-814138-0.00004-6.

GOES, T.; MARRA, R. Biocombustíveis: uma alternativa para o mundo, uma oportunidade para o Brasil. **A Lavoura**, v. 111, n. 668, p. 15-19, out. 2008. (Especial Agroenergia).

GOMES-SILVA, D. A. P.; WADT, L. H. de O.; EHRINGHAUS, C. **Ecologia e manejo de pataú (*Oenocarpus batana* Mart.) para produção de frutas e óleo**. Rio Branco: Embrapa Acre, 2004. 37 p. (Embrapa Acre. Documentos, 88).

GORZYNIK-DEBICKA, M.; PRZYCHODZEN, P.; CAPPELLO, F.; KUBAN-JANKOWSKA, A.; MARINO-GAMMAZZA, A.; KNAP, N.; WOZNIAK, M.; GORSKA-PONIKOWSKA, M. Potential health benefits of olive oil and plant polyphenols. **International Journal of Molecular Sciences**, v. 19, n. 3, 686, 2018. DOI: 10.3390/ijms19030686.

GRUNVALD, A. K.; CARVALHO, C. G. P. de; LEITE, R. S.; MANDARINO, J. M. G.; ANDRADE, C. A. de B.; AMABILE, R. F.; GODINHO, V. de P. C. Influence of temperature on the fatty acid composition of the oil from sunflower genotypes grown in tropical regions. **Journal of the American Oil Chemists' Society**, v. 90, n. 4, p. 545-553, 2013. DOI: 10.1007/s11746-012-2188-6.

HAIRE, B. 218 bushels breaks world-record soybean yield. **FarmProgress**, 13 ago. 2024. Disponível em: <https://www.farmprogress.com/soybean/world-record-soybean-yield-breaks-with-218-bushel-average>. Acesso em: 21 out. 2024.

HARFORD, T. **How Rudolf Diesel's engine changed the world**. BBC News, 19 dez. 2016. 50 things that made the modern economy, BBC World Service. Disponível em: <https://www.bbc.com/news/business-38302874>. Acesso em: 10 jul. 2024.

HENDERSON, A.; GALEANO, G.; BERNAL, R. **Palms of the Americas**. Princeton: Princeton University Press, 1995. 352 p.

HERNANDEZ, E. M.; HOSOKAWA, M. (ed). **Omega-3 Oils: applications in functional foods**. Urbana: AOCS Press, 2011. 305 p. DOI: 10.1016/B978-1-893997-82-0.50002-5.

HIRAKURI, M. H.; CONTE, O.; PRANDO, A. M.; CASTRO, C. de; BALBINOT JUNIOR, A. A.; CAMPOS, L. J. M. Análise financeira da produção de soja na macrorregião sojícola 5. In: HIRAKURI, M. H.; CONTE, O.; PRANDO, A. M.; CASTRO, C. de; BALBINOT JUNIOR, A. A. (ed.). **Diagnóstico da produção de soja na macrorregião sojícola 5**. Londrina: Embrapa Soja, 2018a. p. 63-98. (Embrapa Soja. Documentos, 405).

HIRAKURI, M. H.; CONTE, O.; PRANDO, A. M.; CASTRO, C. de; BALBINOT JUNIOR, A. A.; CAMPOS, L. J. M. A cultura da soja no Brasil e metodologia utilizada para o diagnóstico. In: HIRAKURI, M. H.; CONTE, O.; PRANDO, A. M.; CASTRO, C. de; BALBINOT JUNIOR, A. A. (ed.). **Diagnóstico da produção de soja na macrorregião sojícola 5**. Londrina: Embrapa Soja, 2018b. p. 11-22. (Embrapa Soja. Documentos, 405).

HIRAKURI, M. H.; CONTE, O.; PRANDO, A. M.; CASTRO, C. de; BALBINOT JUNIOR, A. A.; CAMPOS, L. J. M. Análise econômico-financeira da produção de soja na macrorregião sojícola 4. In: HIRAKURI, M. H.; CONTE, O.; PRANDO, A. M.; CASTRO, C. de; BALBINOT JUNIOR, A. A. (ed.). **Diagnóstico da produção de soja na macrorregião sojícola 4**. Londrina: Embrapa Soja, 2019a. p. 63-95. (Embrapa Soja. Documentos, 412).

HIRAKURI, M. H.; CONTE, O.; PRANDO, A. M.; CASTRO, C. de; BALBINOT JUNIOR, A. A.; CAMPOS, L. J. M.; RAMOS JUNIOR, E. U. A cultura da soja no Brasil e metodologia utilizada para o diagnóstico. In: HIRAKURI, M. H.; CONTE, O.; PRANDO, A. M.; CASTRO, C. de; BALBINOT JUNIOR, A. A. (ed.). **Diagnóstico da produção de soja na macrorregião sojícola 4**. Londrina: Embrapa Soja, 2019b. p. 11-23. (Embrapa Soja. Documentos, 412).

HIRAKURI, M. H.; RICHETTI, A.; GARCIA, R. A.; CONTE, O.; PRANDO, A. M.; CASTRO, C. de; BALBINOT JUNIOR, A. A.; CAMPOS, L. J. M. Análise econômico-financeira da produção de soja nas macrorregiões sojícolas 2 e 3. In: HIRAKURI, M. H.; CONTE, O.; PRANDO, A. M.; CASTRO, C. de; BALBINOT JUNIOR, A. A. (ed.). **Diagnóstico da produção de soja nas macrorregiões sojícolas 2 e 3**. Londrina: Embrapa Soja, 2020. p. 67-101. (Embrapa Soja. Documentos, 435).

HOMMA, A. K. O. Propostas agrícolas para a Amazônia. In: HOMMA, A. K. O. (ed.). **Sinergias de mudança da agricultura amazônica: conflitos e oportunidades**. Brasília, DF: Embrapa, 2022. p. 464-487.

HOSSAIN, Z.; JOHNSON, E. N.; WANG, L.; BLACKSHAW, R. E.; CUTFORTH, H.; GAN, Y. Plant establishment, yield and yield components of Brassicaceae oilseeds as potential biofuel feedstock. **Industrial Crops and Products**, v. 141, 111800, 2019. DOI: 10.1016/j.indcrop.2019.111800.

HUMPHREYS, A. M.; GOVAERTS, R.; FICINSKI, S. Z.; LUGHADHA, E. N.; VORONTSOVA, M. S. Global dataset shows geography and life form predict modern plant extinction and rediscovery. **Nature Ecology & Evolution**, v. 3, p. 1043-1047, 2019. DOI: 10.1038/s41559-019-0906-2.

HUTH, P. J.; FULGONI, V. L.; LARSON, B. T. A systematic review of high-oleic vegetable oil substitutions for other fats and oils on cardiovascular disease risk factors: implications for novel high-oleic soybean oils. **Advances in Nutrition**, v. 6, n. 6, p. 674-693, 2015. DOI:10.3945/an.115.008979.

IBEXUS, B. **Is Sustainable Aviation Fuel (SAF) Really More Expensive?** 2024. Disponível em: <https://ibexpub.media/is-sustainable-aviation-fuel-really-more-expensive/>. Acesso em: 11 nov. 2024.

IBGE. Biblioteca IBGE. **Produção da pecuária municipal**. [2025b]. Disponível em: <https://www.ibge.gov.br/estatisticas/economicas/agricultura-e-pecuaria/9107-producao-da-pecuaria-municipal.html?edicao=17941&t=downloads>. Acesso em: 17 mar.2025.

IBGE. **Censo Agropecuário 2017**: resultados definitivos. 2019. Disponível em: <https://sidra.ibge.gov.br/pesquisa/censo-agropecuario/censo-agropecuario-2017/resultados-definitivos>. Acesso em: 23 set. 2024.

IBGE. **Censo Agropecuário**: tabela 6769 - Número de estabelecimentos agropecuários e Área dos estabelecimentos agropecuários, por tipologia, condição do produtor em relação às terras e grupos e classes de atividade. 2024b. Disponível em: <https://sidra.ibge.gov.br/tabela/6769>. Acesso em: 18 abr. 2024.

IBGE. **Indicadores IBGE**: estatística da produção agrícola. maio 2024a. Disponível em: <https://biblioteca.ibge.gov.br/index.php/biblioteca-catalogo?view=detalhes&id=72415>. Acesso em: 8 maio 2024.

IBGE. **Pesquisa Trimestral do Abate de Animais**: primeiros resultados. [2025a]. Disponível em: <https://www.ibge.gov.br/estatisticas/economicas/agricultura-e-pecuaria/21119-primheiros-resultados-2abate.html>. Acesso em: 14 mar. 2025a.

IBGE. **Produção de Dendê**. 2023. Disponível em: <https://www.ibge.gov.br/explica/producao-agropecuaria/dende/br>. Acesso em: 28 abr 2025.

INFOCOWEB. Mato Grosso inaugura a maior indústria de óleo de algodão do Brasil. **Radar Digital Brasília**, 3 set. 2024. Disponível em: <https://radardigitalbrasil.com.br/agronego-cio/mato-grosso-inaugura-a-maior-industria-de-oleo-de-algodao-do-brasil>. Acesso em: 11 Set. 2024

INNOCENT, O. P. Application of machine learning in predicting crude oil production volume. In: SPE NIGERIA ANNUAL INTERNATIONAL CONFERENCE AND EXHIBITION, 2021, Lagos. **Paper...** (Paper Number: SPE-207079-MS). DOI: 10.2118/207079-MS2021.

JARDINE, J. G.; BARROS, T. D. Dendê. In: JARDINE, J. G. (ed.). **Agroenergia**. Campinas: Embrapa Informática Agropecuária, 2021. Disponível em: <https://www.embrapa.br/agencia-de-informacao-tecnologica/tematicas/agroenergia/biodiesel/materias-primas/dende>. Acesso em: 12 dez. 2023.

JARDINE, J. G.; DISPATO, I.; PERES, M. R. **Considerações sobre biodiesel como biocombustível alternativo ao diesel**. Campinas: Embrapa Informática Agropecuária, 2009. 25 p. (Embrapa Informática Agropecuária. Documentos, 93).

JENKINS, D. J. A.; CHIAVAROLI, L.; WONG, J. M. W.; CYRIL KENDALL, R. D.; LEWIS, G. F.; VIDGEN, E.; CONNELLY, P. W.; LEITER, L. A.; MD, JOSSE, R. G.; LAMARCHE, B. Adding monounsaturated fatty acids to a dietary portfolio of cholesterol-lowering foods in hypercholesterolemia. **Canadian Medical Association Journal**, v. 182, n. 18, p. 1961-1967, 2010. DOI: 10.1503/cmaj.092128.

JEWETT, F.G. *Camelina sativa*: for biofuels and bioproducts. In: CRUZ, V. M. V.; DIERIG, D. A. (ed.). **Industrial Crops: Handbook of Plant Breeding**. v. 9. New York: Springer, 2015. cap. 8., p. 157-170. DOI: 10.1007/978-1-4939-1447-0_8.

JOHNSON, L. A.; MYERS, D. J. Industrial uses for soybeans. In: ERICKSON, D. R. (ed.). **Practical handbook of soybean processing and utilization**. Urbana: AOCs Press, 1995. cap. 21. p. 380-427. DOI: 10.1016/B978-0-935315-63-9.50025-5.

JONES, O. R. Yield, water-use efficiency and oil concentration and quality of dryland sunflower grown in the southern High Plains. **Agronomy Journal**, v. 76, n. 2, p. 229-235, 1984. DOI: 10.2134/agronj1984.00021962007600020014x.

JUNQUEIRA, N. T. V. Proposta de plano de boas práticas de manejo de maciços naturais de macaúbeiras visando o extrativismo de frutos de forma sustentável. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE MACAÚBA, 1., 2013, Patos de Minas, MG. **Consolidação da cadeia produtiva**: anais. Brasília, DF: MAPA, 2013.

JUNQUEIRA, N. T. V.; CONCEIÇÃO, L. D. H. C. S.; ANTONIASSI, R.; BRAGA, M. F.; MALAQUIAS, J. V. **Caracterização de populações naturais de macaúba e avaliação do potencial produtivo**. Planaltina, DF: Embrapa Cerrados, 2019. 32 p. (Embrapa Cerrados. Documentos, 354).

KAILIS, S. G. Olives. In: THOMAS, B; MURRAY, B. G.; MURPHY, D. J. (ed.). **Encyclopedia of Applied Plant Sciences**, v. 3, Crop Systems. 2nd ed. London: Elsevier, 2017. p. 236-245. DOI: 10.1016/B978-0-12-394807-6.00183-0.

KEYS, A.; MENOTTI, A.; ARAVANIS, C.; BLACKBURN, H.; DJORDEVIC, B. S.; BUZINA, R.; DONTAS, A. S.; FIDANZA, F.; KARVONEN, M. J.; KIMURA, N.; MOHACEK, I.; NEDELJKO VIC, I. S.; PUDDU, N.; PUNSAR, S.; TAYLOR, H. L.; CONTI, S.; KROMHOUT, D.; TOSHIMA, H. The seven countries study: 2,289 deaths in 15 years. **Preventive Medicine**, v. 13, n. 2, p. 141-154, 1984. DOI: 10.1016/0091-7435(84)90047-1.

KIPLE, K. F.; ORNELAS, K. C. Animal, marine, and vegetable oils. In: KIPLE, K. F.; ORNELAS, K. C. (ed.). **The Cambridge World History of Food**. Cambridge: Cambridge University Press, 1999. p. 375-430.

KNOTHE, G. Estabilidade à oxidação do biodiesel. In: KNOTHE, G.; VAN GERPEN, J.; KRAHL, J.; RAMOS, L. P. (ed.). **Manual de biodiesel**. São Paulo: Edgard Blücher, 2018. p. 133-138.

KNOTHE, G.; VAN GERPEN, J.; KRAHL, J.; RAMOS, L. P. (ed.). **Manual de biodiesel**. São Paulo: Edgard Blücher, 2018. 340 p.

KNOWLTON, S. High-oleic soybean oil. In: FLIDER, F. J. (ed.). **High oleic oils: development, properties, and uses**. London: Academic Press and AOCS Press, 2022. cap. 3, p. 53-88. DOI:10.1016/C2019-0-04022-8.

KOMBRINK, H. **Hydrocarbon find at the far eastern end of Brazil's equatorial margin**. 10 abr. 2024. Disponível em: <https://geoexpro.com/hydrocarbon-find-at-the-far-eastern-end-of-brazils-equatorial-margin/>. Acesso em: 25 fev. 2025.

KOZLOWSKI, L. da S.; SOARES, R. B.; MATOS, S. M. de; RODRIGUES, T. G.; ALVES, R. N.; ALVES, G. J. T. Aplicação dos extratos dos frutos de inajá, bacaba e tucumã como aditivos no biodiesel. In: FÓRUM DE INTEGRAÇÃO ENSINO, PESQUISA, EXTENSÃO E INOVAÇÃO TECNOLÓGICA DO IFRR, 8. 2019, Boa Vista. **Resumos...** FORINT, v. 6, n. 1, 2019. Disponível em: https://periodicos.ifrr.edu.br/index.php/anais_forint/article/view/1246. Acesso em: 24 set. 2024.

LANGTHALER, E; MARTSCH, M; TOBER, G. Conceptualizing historical commodity studies: the case of soy. In: CARMONA-ZABALA, J. (ed.). **Commodities in history: theoretical**

reflections and empirical case studies. Crete: Institute for Mediterranean Studies, 2023. p. 24-60.

LANJEKAR, R. D.; DESHMUKH, D. A review of the effect of the composition of biodiesel on NOx emission, oxidative stability and cold flow properties. **Renewable and Sustainable Energy Reviews**, v. 54, p. 1401-1411, 2016. DOI: 10.1016/j.rser.2015.10.034.

LAURANCE, W. Will increased food production devour tropical forest lands? **Yale Environment** **360**, 10 abr. 2014. Disponível em: https://e360.yale.edu/features/will_increased_food_production_devour_tropical_forest_lands. Acesso em: 24 set. 2024.

LAVIOLA, B. G.; RODRIGUES, E. V.; ALVES, A. A.; CONCEIÇÃO, L. D. H. C. S. da; BRAGA, M. F.; JUNQUEIRA, N. T. V. Potencial do pinhão-manso e de palmeiras para a diversificação de matéria-prima na produção de biodiesel. In: MENEZES, R. S. (org.). **Biodiesel no Brasil: impulso tecnológico**. Lavras: UFLA, 2016. cap. 6, p. 119-140.

LAWTON, G. **New scientist**: the origin of (almost) everything. London: Hachette Quercus, 2016. 256 p.

LEAL, A. Ministério da Agricultura manda recolher dez marcas de azeite. **Agência Brasil, EBC**, 16 mar. 2024. Disponível em: <https://agenciabrasil.ebc.com.br/geral/noticia/2024-03/ministerio-da-agricultura-manda-recolher-dez-marcas-de-azeite>. Acesso em: 24 set. 2024.

LEMOES, R. BOCAIUVA, Quintino. In: ABREU, A. A. de. **Dicionário Histórico-Biográfico da Primeira República (1889-1930)**. FGV, 2010. 21 p. Disponível em: <https://cpdoc.fgv.br/sites/default/files/verbetes/primeira-republica/BOCAIUVA,%20Quintino.pdf>. Acesso em: 14 dez. 2023.

LESCANO, C. H.; OLIVEIRA, I. P.; SILVA, L. R.; BALDIVIA, D. S.; SANJINEZ-, ARGANDONA, E. J.; ARRUDA, E. J.; MORAES, I. C. F.; LIMA, F. F. Nutrients content, characterization and oil extraction from *Acrocomia aculeata* (Jacq.) Lodd. fruits. **African Journal of Food Science**, v. 9, n. 3, p. 113-119, 2015. DOI:10.5897/AJFS2014.1212.

LI, Y.; XU, H.; NORTHRUP, D.; WANG, M. Effects of soybean varieties on life-cycle greenhouse gas emissions of biodiesel and renewable diesel. **Biofuels, Bioproducts and Biorefining**, v. 17, n. 3, p. 449-462, 2023. DOI: 10.1002/bbb.2462.

LIMA, A. M. de. **Estudos recentes e perspectivas da viabilidade técnico-econômica da produção de biodiesel**. Brasília, DF: Embrapa Agroenergia, 2011. 23 p. (Embrapa Agroenergia, 8).

LIMA, J. R. de O.; SILVA, R. B. da; SILVA, C. C. M. da; SANTOS, L. S. S. dos; SANTOS JR, J. R. dos; MOURA, E. E.; MOURA, C. V. R. de. Biodiesel de babaçu (*Orbignya* sp.) obtido por via etanólica. **Química Nova**, v. 30, n. 1, p. 600-603, 2007. DOI: 10.1590/S0100-40422007000300019.

LIMA, R. N.; PAIXÃO, R. L.; MARQUES, R. B.; MALVEIRA, J. Q.; FURTINI, J. A. O.; RIOS, M. A. de S. Investigação do potencial do talo e da palha da carnaúba para utilização como biocombustível. **Matéria**, v. 24, n. 2, e-12375, 2019. DOI: 10.1590/S1517-707620190002.0690.

LOBATO, M. **O escândalo do petróleo**. São Paulo: Companhia Editora Nacional, 1936. 314 p.

LÖBBE, H. **Cultura da soja no Brasil**. 2. ed. Rio de Janeiro: Ministério da Agricultura. Directoria de Estatística da produção, 1935. 32 p.

LÖBBE, H. **Cultura da soja no Brasil**. 3. ed. Rio de Janeiro: Ministério da Agricultura. Serviço de Informação Agrícola, 1938. 32 p.

LÖBBE, H. **Cultura da soja no Brasil**. 5. ed. Rio de Janeiro: Imprensa Nacional, 1942a. 35 p.

LÖBBE, H. **Cultura da soja no Brasil**. 6. ed. Rio de Janeiro: Ministério da Agricultura. Serviço de Informação Agrícola, 1942b. 35 p.

LÖBBE, H. **Cultura da soja no Brasil**. 7. ed. Rio de Janeiro: Serviço de Informação Agrícola, 1945. 74 p.

LOPES, A. N.; ROCHA, A. M.; SILVA, M. S.; SOARES, P. M. Perfil patentário da Camelina Sativa com potencial para produção de biodiesel. **Revista Tecnologia e Sociedade**, v. 15, n. 37, p. 389-402, 2019. DOI: 10.3895/rts.v15n37.9665.

LOPES, D. de C.; STEIDLE NETO, A. J.; MENDES, A. A.; PEREIRA, D. T. V. Economic feasibility of biodiesel production from Macauba in Brazil. **Energy Economics**, v. 40, p. 819-824, 2013. DOI: 10.1016/j.eneco.2013.10.003

LOPES, M. A.; FÁVARO, S. P. Macaúba, uma palmeira nativa na bioeconomia. **Correio Brasileiro**, 11 jul. 2021. Opinião. 1 p. Disponível em: <https://www.correiobrasiliense.com.br/opinioao/2021/07/4936832-artigo-macauba-uma-palmeira-nativa-na-bioeconomia.html>. Acesso em: 24 set. 2024.

LORENZI, G. M. A. C. **Acrocomia aculeata (Jacq.) Lodd. Ex Mart. - Arecaceae**: bases para o extrativismo sustentável. 2006. 156 f. Tese (Doutorado em Ciências Agrárias) - Universidade Federal do Paraná, Curitiba.

LORINI, I. (ed.). **Qualidade de sementes e grãos comerciais de soja no Brasil - safra 2014/15**. Londrina: Embrapa Soja, 2016. 190 p. (Embrapa Soja. Documentos, 378).

LORINI, I. (ed.). **Qualidade de sementes e grãos comerciais de soja no Brasil - safra 2015/16**. Londrina: Embrapa Soja, 2017. 227 p. (Embrapa Soja. Documentos, 393).

LORINI, I. (ed.). **Qualidade de sementes e grãos comerciais de soja no Brasil - safra 2016/17**. Londrina: Embrapa Soja, 2018. 234 p. (Embrapa Soja. Documentos, 403).

LORINI, I. (ed.). **Qualidade de sementes e grãos comerciais de soja no Brasil - safra 2017/18**. Londrina: Embrapa Soja, 2019. 220 p. (Embrapa Soja. Documentos, 422).

LUCAS, K. R. G.; VENTURA, M. U.; BARIZON, R. R. M.; MATSUURA, M. I. da S. F.; RALISCH, R.; MRTVI, P. R.; POSSAMAI, E. J. Environmental performance of phytosanitary control techniques on soybean crop estimated by life cycle assessment (LCA). **Environmental Science and Pollution Research**, v. 30, n. 20, p. 58315-58329, 2023. DOI: 10.1007/s11356-023-26633-x

MANDARINO, J. M. G. Valor nutricional da soja. **Canal Rural**: Blog da Embrapa Soja, 13 mar. 2018. Disponível em: <https://blogs.canalrural.com.br/embrapasoja/2018/03/13/valor-nutricional-da-soja/>. Acesso em: 23 set. 2024.

MANFIO, C. E.; MOTOIKE, S. Y.; RESENDE, M. D. V. de; SANTOS, C. E. M. dos; SATO, A. Y. Avaliação de progênies de macaúba na fase juvenil e estimativas de parâmetros genéticos e diversidade genética. **Pesquisa Florestal Brasileira**, v. 32, n. 69, p. 63-68, 2012. DOI:10.4336/2012.pfb.32.69.63.

MANOUSIS, T.; MOORE, N. F. The olive tree. **Biologist**, v. 35, n. 1, p. 7-12, 1988.

MARKLEY, K. S. (ed.). **Soybeans and soybean products**. New York: Interscience, 1950. v. 1, 540 p. (Fats and oils: a series of monographs).

MARKLEY, K. S. **Fatty acids**: their chemistry and physical properties. New York: Interscience, 1947. 668 p.

MARKLEY, K. S. **Indústria e reservas de óleos e gorduras do Brasil**. [Rio de Janeiro: MRE, 1955]. 46 p.

MARKLEY, K. S. Mbocayá or Paraguay cocopalme - an important source of oil. **Economic Botanic**, v. 10, p. 3-32, 1956. DOI: 10.1007/BF02985312.

MARKLEY, K. S.; GOSS, W. H. **Soybean chemistry and technology**. Brooklyn: Chemical Publishing Company, 1944. 261 p.

MATSUURA, M. I. da S. F.; DIAS, F. R. T.; PICOLI, J. F.; LUCAS, K. R. G.; CASTRO, C. de; HIRAKURI, M. H. Life-cycle assessment of the soybean-sunflower production system in the Brazilian Cerrado. **International Journal of Life Cycle Assessment**, v. 22, n. 4, p. 492-501, 2017. DOI: 10.1007/s11367-016-1089-6.

MATSUURA, M. I. da S. F.; DIAS, F. R. T.; POCOLI, J. F.; LUCAS, K. R. G.; CASTRO, C. de; HIRAKURI, M. H. Life cycle assessment of soybean-sunflower production system in the Brazilian Cerrado. In: INTERNATIONAL CONFERENCE ON LIFE CYCLE ASSESSMENT, 6. 2015, Lima. LCA, **Tool for innovation in Latin America**: proceedings. Lima: Pontifical Catholic University of Peru, 2015. p. 224-230.

MATSUURA, M. I. da S. F.; SCACHETTI, M. T.; CHAGAS, M. F.; SEABRA, J. E. A.; MOREIRA, M. M. R.; BONOMI, A. M.; BAYMA, G.; ÍCOLI, J. F.; MORANDI, M. A. B.; RAMOS, N. P.; CAVALETT, O.; NOVAES, R. M. L. **RenovaCalc**: Método e ferramenta para a contabilidade da Intensidade de Carbono de Biocombustíveis no Programa RenovaBio. Nota Técnica, março 2018, 58 p. Disponível em: https://www.gov.br/anp/pt-br/assuntos/consultas-e-audiencias-publicas/consulta-audiencia-publica/2018/arquivos-consultas-e-audiencias-publicas-2018/cap-10-2018/cp10-2018_nota-tecnica-renova-calc.pdf. Acesso em: 24 set. 2024.

MCCAUGHREAN, G.; ROSS, T. **Athena and the olive tree and other greek myths**. v. 4. London: Orchard Books, 2001. 48 p.

MCCLEMENTS, D. J.; DECKER, E. A. Lipids. In: DAMODARAN, S.; PARKIN, K. L. (ed.). **Fennema's Food Chemistry**. Boca Raton: CRC Press, 2017. p. 171-234. DOI: 10.1201/9781315372914.

MCDONALD, M. J. **Revisión de la situación actual de mbokaja (*Acrocomia totai*) en Paraguay**: Informe Final, Enero. 2007. [Asuncion: GEAN, 2007]. 78 p. Disponível em: https://www.geam.org.py/v3/uploads/2011/11/Mbokaja_Informe_Final1.pdf. Acesso em: 24 set. 2024.

MEIJAARD, E.; BROOKS, T. M.; CARLSON, K. M.; SLADE E. M.; GARCIA-ULLOA, J.; GA-VEAU, D. L.; LEE, J. S. H.; SANTIKA, T.; JUFFE-BIGNOLI, D.; STRUEBIG, M. J.; WICH, S. A.; ANCRENAZ, M.; KOH, L. P.; ZAMIRA, N.; ABRAMS, J. F.; PRINS, H. H. T.; SENDASHONGA, C. N.; MURDIYARSO, D.; FURUMO, P. R.; MACFARLANE, N.; HOFFMANN, R.; PERSIO, M.; DESCALS, A.; SZANTOI, Z.; SHEIL, D. The environmental impacts of palm oil in context. **Nature Plants**, v. 6, n. 12, p. 1418-1426, 2020. DOI: 10.1038/s41477-020-00813-w.

METADE da madeira mundial é usada como lenha para cozinhar e aquecer. **Florestas**, 13 jan. 2021. Disponível em: <https://florestas.pt/valorizar/metade-da-madeira-mundial-e-usada-como-lenha-para-cozinhar-e-aquecer/>. Acesso em: 20 set. 2024.

MINAS GERAIS (Estado). Lei ordinária nº 19.485, de 13 de janeiro de 2011. Institui a política estadual de incentivo ao cultivo, à extração, à comercialização, ao consumo e à transformação da macaúba e das demais palmeiras oleaginosas - Pró- Macaúba. **Diário Oficial [do] Estado de Minas Gerais**, 6 jul. 2011. Disponível em: <https://leisestaduais.com.br/mg/lei-ordinaria-n-19485-2011-minas-gerais-institui-a-politica-estadual-de-incentivo-ao-cultivo-a-extracao-a-comercializacao-ao-consumo-e-a-transformacao-da-macauba-e-das-demas-palmeiras-oleaginosas-pro-macauba>. Acesso em: 20 out. 2024.

MISSOURI SOYBEAN MERCHANDISING COUNCIL. **Soyleic**: non-GMO high oleic soybeans. [2023]. Disponível em: https://7zga59.p3cdn1.secureserver.net/wp-content/uploads/2022/09/Soyleic-Fact-Sheet_PROD1_082522_LR.pdf. Acesso em: 24 set. 2024.

MONTOYA, S. G.; MOTOIKE, S. Y.; KUKI, K. N.; COUTO, A. D. Fruit development, growth, and stored reserves in macauba palm (*Acrocomia aculeata*), an alternative bioenergy crop. **Planta**, v. 244, n. 4, p. 927-938, 2016. DOI: 10.1007/s00425-016-2558-7.

MOREIRA, S. L. S.; IMBUZEIRO, H. M. A.; SILVERT, C.; DIETRICH, O. H. S.; PIMENTEL, L. D.; FERNANDES, R. B. A. Above- and below-ground carbon accumulation in cultivated macauba palm and potential to generate carbon credits. **Journal of Cleaner Production**, v. 265, 121628, 2020. DOI: 10.1016/j.jclepro.2020.121628.

MOSER, B. R.; VAUGHN, S. F. Evaluation of alkyl esters from *Camelina sativa* oil as biodiesel and as blend components in ultralow-sulfur diesel fuel. **Bioresource Technology**, v. 101, n. 2, p. 646-653, 2010. DOI: 10.1016/j.biortech.2009.08.054.

MOTOIKE, S. Y.; CARVALHO, M.; PIMENTEL, L. D.; KUKI, K. N.; VALENTE PAES.; DIAS, H. C. T.; SATO, A. Y. **A cultura da macaúba**: implantação e manejo de cultivos racionais. Viçosa: Editora UFV, 2013. 61 p.

MOTTA, C. S.; CORRÊA, T. R.; GROSSI, J. A. S.; CASTRICINI, A.; RIBEIRO, A. S. Exploração sustentável da Macaúba para a produção de biodiesel: colheita, pós-colheita e qualidade dos frutos. **Informe Agropecuário**, v. 32, n. 265, p. 41-51, 2011.

MULLER, A. A.; FURLAN JUNIOR, J.; CELESTINO FILHO, P. **A Embrapa Amazônia Oriental e o agronegócio do dendê no Pará**. Belém, PA: Embrapa Amazônia Oriental, 2006. 67 p. (Embrapa Amazônia Oriental. Documentos, 257).

MURAD, A. M.; VIANNA, G. R.; MACHADO, A. M.; CUNHA, N. B. da; COELHO, C. M.; LACERDA, V. A. M.; COELHO, M. C.; RECH, E. L. Mass spectrometry characterisation of fatty acids from metabolically engineered soybean seeds. **Analytical and Bioanalytical Chemistry**, v. 406, n. 12, p. 2873-2883, 2014.

MUSKAT, J. M.; MOSIER, N. Characterization of high oleic acid biodiesel: improving biofuel properties. In: THE SUMMER UNDERGRADUATE RESEARCH FELLOWSHIP (SURF)

SYMPOSIUM, 2017, West Lafayette. **Abstracts...** West Lafayette: Purdue University, 2017. (Paper, 111).

NAPOLITANO, G. E.; YE, Y.; CRUZ-HERNANDEZ, C. Chemical characterization of a high-oleic soybean oil. **Journal of the American Oil Chemists' Society**, v. 95, n. 5, p. 583-589, 2018. DOI: 10.1002/aocs.12049.

NATIONAL CENTER FOR BIOTECHNOLOGY INFORMATION. **PubChem Pathway Summary for Pathway R-HSA-2046106, alpha-linolenic acid (ALA) metabolism, Source:** Reactome. Retrieved 22 Sept., 2024. Disponível em: <https://pubchem.ncbi.nlm.nih.gov/pathway/Reactome:R-HSA-2046106>. Acesso em: 24 set. 2024.

NATIONAL GEOGRAPHIC. **Tropics.** Washington: National Geographic Headquarters, 2024. Disponível em: <https://education.nationalgeographic.org/resource/tropics/>. Acesso em: 25 set. 2024.

NATURA. **Natura Ekos Patauí:** À descoberta do Patauí, a força escondida da Amazônia. 2024. Disponível em: <https://www.naturabrasil.fr/pt-pt/acerca-da-natura-brasil/as-nos-sas-gamas/ekos/ekos-pataua>. Acesso em: 24 set. 2024.

NEFF, W. E.; LIST, G. R. Oxidative stability of natural and randomized high palmitic-and high-stearic-acid oils from genetically modified soybean varieties. **Journal of the American Oil Chemists' Society**, v. 76, p. 825-831, 1999. DOI: 10.1007/s11746-999-0072-9.

NELSON, D. L.; COX, M. M. **Princípios de Bioquímica de Lehninger.** 5. ed. Porto Alegre: Artmed, 2011. 1274 p.

NEPOMUCENO, A. L.; BALBINOT JUNIOR, A. A.; RUFINO, C. F. G.; DEBIASI, H.; NOGUEIRA, M. A.; FRANCHINI, J. C.; ALVES, F. V.; MONTEIRO, R. A. C.; ALMEIDA, R. G. de; BUNGENTAB, D. J.; AGNOL, V. F. D. Programa SBC - **Soja Baixo Carbono:** um novo conceito de soja sustentável. 2. ed. Londrina: Embrapa Soja, 2023. 11 p. (Embrapa Soja. Comunicado Técnico, 100).

NOBRE, I.; NOBRE, C. Projeto “Amazônia 4.0”: definindo uma terceira via para a Amazônia. **Revista Futuribles**, v. 2, p. 7-20, 2019.

NOGOY, K. M. C.; KIM, H.J.; LEE, Y.; ZHANG, Y.; YU, J.; LEE, D. H.; LI, X. Z.; SMITH, S. B.; SEONG, H. A.; CHOI, S. H. High dietary oleic acid in olive oil-supplemented diet enhanced omega-3 fatty acid in blood plasma of rats. **Food Science & Nutrition**, v. 8, n. 7, p. 3617-3625, 2020. DOI: 10.1002/fsn3.1644.

NORBERG, M. B.; DEUTSCH, L. **The soybean through world history:** lessons for sustainable agrofood systems. London: Routledge, 2023. 266 p. DOI: 10.4324/9780367822866.

NUCCI, S. M. **Desenvolvimento, caracterização e análise da utilização da marcadores microssatélites em genética de população de macaúba**. 2007. 84 f. Dissertação (Mestrado em Genética) - Instituto Agronômico de Campinas, Campinas.

NYSVEEN, P. M.; BUSBY, E. Global recoverable oil reserves hold steady at 1,536 billion barrels; insufficient to meet demand without swift electrification. **Rystad Energy**, press release, 24 jul. 2024. Disponível em: <https://www.rystadenergy.com/news/global-recoverable-oil-barrels-demand-electrification>. Acesso em: 25 set. 2024.

OECD-FAO Agricultural Outlook 2018-2027. 2018. DOI: 10.1787/agr_outlook-2018-em.

ÓLEO SUSTENTÁVEL. **Passo a passo para o descarte adequado**. c2024. Disponível em: <https://www.oleosustentavel.org.br/>. Acesso em: 28 out. 2024.

OLIVE OIL TIMES. **Olive Oil History**. The Olive Tree and the Rise of Athens. 2024. Disponível em: <https://www.oliveoiltimes.com/topic/olive-oil-history>. Acesso em: 24 set. 2024.

OLIVEIRA, B. **Flexibilização das normas ambientais na União Europeia**. Digital Agro, c2024. Disponível em: <https://digitalagro.com.br/2024/03/28/flexibilizacao-normas-ambientais-ue/>. Acesso em: 04 fev. 2024.

OSORIO-GONZÁLEZ, C. S.; GÓMEZ-FALCON, N.; SANDOVAL-SALAS, F.; SAINI, R.; BRAR, S. K.; RAMÍREZ, A. A. Production of biodiesel from castor oil: a review. **Energies**, v. 13, n. 10, 2467, 2020. DOI: 10.3390/en13102467.

PAÍSES da União Europeia aprovam normas ambientais flexíveis para agricultores do bloco. **Folha de S. Paulo**, 26 mar. 2024. Disponível em: <https://www1.folha.uol.com.br/ambiente/2024/03/paises-da-uniao-europeia-aprovam-normas-ambientais-flexiveis-para-agricultores-do-bloco.shtml>. Acesso em: 20 set. 2024.

PANDOLFO, C. **A Amazônia e sua excepcional vocação oleífera**. Rio de Janeiro: SPVEA, 1964. 31 p. (SPVEA. Coleção Araujo Lima, 15).

PARENTE, E. J. de S.; SANTOS JUNIOR, J. N.; PEREIRA, J. A. B.; PARENTE JUNIOR, E. J. do S. **Biodiesel**: uma aventura tecnológica num país engraçado. Fortaleza: Tecbio, 2003. 66 p.

PASTORE JUNIOR, F.; ARAÚJO, V. F. de; FERNANDES, E. C.; PETRY, A. C.; ECHEVERRIA, R. M.; LEITE, F. H. F. **Plantas da Amazônia para produção cosmética**: uma abordagem química - 60 espécies do extrativismo florestal não-madeireiro da Amazônia. Brasília, DF: UnB, 2005. 244 p.

PEREIRA, J. H. B.; CABRAL FILHO, L. S., RORIZ, G. Q.; BERNARDES, B. C.; BARBOSA, M. T.; ROOS, R. L.; SANTANA, A.; LOPES, B. J.; MURATA, S. L. Nutritional value of macauba pulp presscake (*Acrocomia aculeata*) for growing pigs. In: JOINT ANNUAL MEETING, 2014,

Kansas. **Abstracts...** ASAS, 2014. abstract 1347. Disponível em: <https://asas.confex.com/asas/jam2014/webprogram/Paper3888.html>. Acesso em: 18 set. 2024.

PEREIRA, M. L.; CARDOSO, L. S. **Annual Report 2022**. Concórdia: Embrapa Suínos e Aves, 2023. 20 p. (Embrapa Suínos e Aves. Documentos, 243).

PÉREZ-VICH, B.; DEL MORAL, L.; VELASCO, L.; BUSHMAN, B. S.; KNAPP, S. J.; LEON, A.; FERNÁNDEZ-MARTÍNEZ.; BERRY, S. T. Molecular basis of the high-palmitic acid trait in sunflower seed oil. **Molecular Breeding**, v. 36, article 43, 2016. DOI: 10.1007/s11032-016-0462-2.

PETROBRAS. **Entenda o que é a margem equatorial brasileira e do que se trata o licenciamento solicitado ao Ibama**. 31 maio 2023. Disponível em: <https://agencia.petrobras.com.br/w/entenda-o-que-e-a-margemequatorial-brasileira-e-do-que-se-trata-o-licenciamento-solicitado-aoibama>. Acesso em: 21 fev. 2025.

PETROBRAS. **Margem equatorial: novas fronteiras de exploração**. c2025. Disponível em: [https://petrobras.com.br/quem-somos/novasfronteiras#:~:text=Quanto%20petr%C3%B3leo%20tem%20na%20Margem,Natural%20e%20Biocombust%C3%ADveis%20\(ANP\)](https://petrobras.com.br/quem-somos/novasfronteiras#:~:text=Quanto%20petr%C3%B3leo%20tem%20na%20Margem,Natural%20e%20Biocombust%C3%ADveis%20(ANP)). Acesso em: 21 jan. 2025.

PETROBRAS. **New frontiers of exploration**. c2024. Disponível em: <https://petrobras.com.br/en/quem-somos/novas-fronteiras>. Acesso em: 22 fev.2025.

PINKER, E. **O novo iluminismo: em defesa da razão, ciência e do humanismo**. São Paulo: Companhia das Letras, 2018. 686 p.

PINTO, G. P. **O óleo de pataua: seu estudo químico**. Belém: IAN, 1951. p. 67-77. (IAN. Boletim Técnico, 23).

PIPER, C. V.; MORSE, W. J. **The soy bean, with special reference to its utilization for oil, cake, and other products**. Washington, D. C.: U.S. Dept. of Agriculture, 1916. 20 p. (Bulletin of the U.S. Department of Agriculture, 439).

PIPER, C. V.; MORSE, W. J. **The soy bean**. New York: McGraw-Hill, 1923. 329 p.

PIRES, T. P.; SOUZA, E. dos S.; KUKI, K. N.; MOTOIKE, S. Y. Ecophysiological traits of the macaw palm: a contribution towards the domestication of a novel oil crop. **Industrial Crops and Products**, v. 44, p. 200-210, 2013. DOI: 10.1016/j.indcrop.2012.09.029.

PLATH, M.; MOSER, C.; BAILIS, R.; BRANDT, P.; HIRSCH, H.; KLEIN, A. M.; WALMSLEY, D.; VON WEHRDEN, H. A novel bioenergy feedstock in Latin America? Cultivation potential of *Acrocomia aculeata* under current and future climate conditions. **Biomass and Bioenergy**, v. 91, p. 186-195, 2016. DOI: 10.1016/j.biombioe.2016.04.009.

PLESSERS, A. G.; MCGREGOR, W. G.; CARSON, R. B.; NAKONESHNY, W. Species trials with oilseed plants: II. camelina. **Canadian Journal of Plant Science**, v. 42, p. 452-459, 1962. DOI: 10.4141/cjps62-073.

QUEIROZ, V. Brasil estima produzir 1,6 bi de litros de combustível sustentável de aviação. **CNN Brasil**, 9 nov. 2024. Disponível em: <https://www.cnnbrasil.com.br/economia/negocios/brasil-estima-produzir-16-bi-de-litros-de-combustivel-sustentavel-de-aviacao/>. Acesso em: 27 nov. 2024.

RAMOS, L. P.; KOTHE, V.; CÉSAR-OLIVEIRA, M. A. F.; MUNIZ-WYPYCH, A. S.; NAKAGAKI, S.; KRIEGER, N.; WYPYCH, F.; CORDEIRO, C. S. Biodiesel: matérias-primas, tecnologias de produção e propriedades combustíveis. **Revista Virtual de Química**, v. 9, n. 1, p. 317-369, 2017. DOI: 10.21577/1984-6835.20170020.

RAMOS, L. P.; SILVA, F. R.; MANGRICH, A. S.; CORDEIRO, C. S. Tecnologias de produção de biodiesel. **Revista Virtual de Química**, v. 3, n. 5, p. 385-405, 2011. DOI: 10.5935/1984-6835.20110043.

RAMOS, N. P.; MATSUURA, M. I. da S. F.; BAYMA, G.; NOVAES, R. M. L.; MORANDI, M. A. B.; PIGHINELLI, A. L. M. T.; MENDES, N. C.; SAVIOLI, J. P. D.; DEBIASI, H.; BALBINOT JUNIOR, A. A. **Regionalização dos perfis típicos da produção de soja para uso no Renovabio**. Jaguariúna: Embrapa Meio Ambiente, 2023. 38 p. (Relatório final de trabalhos).

RESENDE, J. C. F. de; MOTOIKE, S. Y.; PIMENTEL, L. D.; GROSSI, F. A. S. Macaúba (*Acrocomia aculeata* (Jacq.) Lodd.). In: PAULA JÚNIOR, T. J. de; VENZON, M. (ed.). **101 Culturas: manual de tecnologias agrícolas**. Belo Horizonte: EPAMIG, 2019. p. 554-564.

RESENDE, R. T.; KUKI, K. N.; CORRÊA, T. R.; ZAIDAN, U. R.; MOTA, P. H. S.; TELLES, L. A. A.; GONZALES, D. G. E.; MOTOIKE, S. Y.; RESENDE, M. D. V. de; LEITE, H. G.; LORENZON, A. S. Data-based agroecological zoning of *Acrocomia aculeata*: GIS modeling and ecophysiological aspects into a Brazilian representative occurrence area. **Industrial Crops and Products**, v. 154, 112749, 2020. DOI: 10.1016/j.indcrop.2020.112749.

RESERVAS mundiais de petróleo chegam a 1,6 trilhão de barris. Engie, 28 set. 2023b. Disponível em: <https://www.alemnaenergia.engie.com.br/reservas-mundiais-de-petroleo-chegam-a-16-trilhao-de-barris/>. Acesso em: 20 set. 2024.

RESERVAS mundiais de petróleo crescem, mas barris podem ficar pelo caminho com transição energética. EIXOS, 29 jun. 2023a. Disponível em: <https://eixos.com.br/petroleo-e-gas/reservas-mundiais-de-petroleo-crescem-mas-barris-podem-ficar-pelo-caminho-com-transicao-energetica/>. Acesso em: 30 jul. 2024.

RICHARDS, G.; AGRANOVSKI, I. E. Dioxin-like pcb emissions from cement kilns during the use of alternative fuels. **Journal of Hazardous Materials**, v. 323, p. 698-709, 2017. DOI: 10.1016/j.jhazmat.2016.10.040.

RICHARDS, P.; PELLEGRINA, H.; VANWEY, L.; SPERA, S. Soybean development: The impact of a decade of agricultural change on urban and economic growth in Mato Grosso, Brazil. **PLoS ONE**, v. 10, n. 4, e0122510, 2015. DOI: 10.1371/journal.pone.0122510.

RINALDI, M. M.; CONCEIÇÃO, L. D. H. C. S. da; BRAGA, M. F.; JUNQUEIRA, N. T. V.; CARDOSO, A. N.; SÁ, S. F. de. **Estudos preliminares sobre colheita e armazenamento de frutos de macaúba**. Planaltina, DF: Embrapa Cerrados, 2020. 20 p. (Embrapa Cerrados. Boletim de Pesquisa e Desenvolvimento, 355).

ROCHA, A. do A. Brasil joga cerca de 1 bilhão de litros de óleo de cozinha no ralo a cada ano. **Estadão**, 16 set. 2021. Disponível em: https://www.estadao.com.br/economia/coluna-do-broad/brasil-joga-cerca-de-1-bilhao-de-litros-de-oleo-de-cozinha-no-ralo-a-cada-ano/?utm_source=facebook:newsfeed. Acesso em: 28 out. 2024.

ROCHA, M. G. da; CASTRO, A. M. G. de. Fatores limitantes à expansão dos sistemas produtivos de palma na Amazônia. Brasília, DF: Embrapa, 2012. 185 p. (Embrapa. Departamento de Transferência e Tecnologia. Texto para discussão, 43).

RODRIGUES, F. Soyminas: do pioneirismo a melancolia. **Biodieselbr**: notícias. 20 maio 2009. Disponível em: <https://www.biodieselbr.com/revista/010/pioneirismo-melancolia-1>. Acesso em: 19 set. 2024.

RODRIGUES, J. B. **Sertum palmarum brasiliensium, ou, Relation des palmiers nouveaux du Brésil**: découverts, décrits et dessinés d'après nature. Bruxelles: Imprimerie Typographique Veuve Monnom, 1903. 114 p. Disponível em: <http://www2.senado.leg.br/bdsf/handle/id/242529>. Acesso em: 25 set. 2024.

ROSCOE, R.; RICHETTI, A.; MARANHO, E. Análise de viabilidade técnica de oleaginosas para produção de biodiesel em Mato Grosso do Sul. **Revista de Política Agrícola**, v. 16, n. 1, p. 48-59, 2007.

RUMOS do dendê. **Globo Rural**, v. 39, n. 465, fev. 2025.

RUTKOWSKI, E.; PITT, H.; LARSEN, K. The global cement challenge. **Rhodium Group**, 21 mar. 2024. Disponível em: <https://rhg.com/research/the-global-cement-challenge/>. Acesso em: 23 set. 2024.

SAINGER, M.; JAIWAL, A.; SAINGER, P. A.; CHAUDHARY, D.; JAIWAL, R.; JAIWAL, P. K. Advances in genetic improvement of *Camelina sativa* for biofuel and industrial bio-product

ts. **Renewable and Sustainable Energy Reviews**, v. 68, p. 623-637, 2017. DOI: 10.1016/j.rser.2016.10.023.

SANCHES, P. A. O meio ambiente humano dos trópicos. In: SANCHES, P. A. (ed.). **Propriedades e manejos de solos nos trópicos**. São Paulo: A Gazeta Maçônica, 2022. cap. 2, p. 47-90.

SANDERS, R.; TEGEDER, D. **US high oleic soybeans & high oleic soybean oil sourcing guide for international customers**. 3rd ed. Chesterfield: USSEC, 2023. 39 p. Disponível em: https://ussec.org/wp-content/uploads/2023/05/USSEC-High-Oleic-Sourcing-Guide_2023-Update-Third-Edition-Final-003.pdf. Acesso em: 23 set. 2024.

SANJINEZ-ARGANDOÑA, E. J.; CHUBA, C. A. M. Caracterização biométrica, física e química de frutos da palmeira bociuíva *Acrocomia aculeata* (Jacq) Lodd. **Revista Brasileira de Fruticultura**, v. 33, n. 3, p. 1023-1028, 2011. DOI: 10.1590/S0100-29452011000300040.

SARDANS, J.; PEÑUELAS, J. Potassium: A neglected nutrient in global change. **Global Ecology and Biogeography**, v. 24, n. 3, p. 261-275, 2015. DOI: 10.1111/geb.12259.

SCHMITZ, J. F.; ERHAN, S. Z.; SHARMA, B. K.; JOHNSON, L. A.; MYERS, D. J. Biobased products from soybeans. In: JOHNSON, L.A.; WHITE, P. J.; GALLOWAY, R. (ed.). **Soybeans: chemistry, production, processing, and utilization**. Urbana: AOCS Press, 2008. cap. 17, p. 539-612. DOI: 10.1016/B978-1-893997-64-6.50020-2.

SCHWARCZ, J. **Superfoods, Silkworms, and Spandex: Science and Pseudoscience in Everyday Life**. Toronto: ECW Press, 2024. 223 p.

SEIXAS, C. D. S.; NEUMAIER, N.; BALBINOT JUNIOR, A. A.; KRZYZANOWSKI, F. C.; LEITE, R. M. V. B. de C. (ed.). **Tecnologias de produção de soja**. Londrina: Embrapa Soja, 2020. 347 p. (Embrapa Soja. Sistemas de Produção, 17).

SHAHIDI, F.; CAMARGO, A. C. de. Tocopherols and tocotrienols in common and emerging dietary sources: occurrence, applications, and health benefits. **International Journal of Molecular Sciences**, v. 17, n. 10, 1745, 2016. DOI: 10.3390/ijms17101745.

SILVA, G. N. **Uso da secagem e ozonização na conservação pós-colheita de frutos de macaúba**. 2017. 116 f. Tese (Doutorado em Fitotecnia) - Universidade Federal de Viçosa, Departamento de Fitotecnia, Viçosa.

SIVASHANKARI, M.; AKASH, P.; VIJAYAKUMAR S.; SADVATHA, R.H.; BORKAR, N. Value addition of soybean. **Food and Scientific Reports**, v. 2, n. 2, p. 60-65, 2021.

SMIL, V. **Invention and innovation: a brief history of hype and failure**. Cambridge: MIT Press, 2023. 219 p.

SOARES, I. P.; FÁVARO, L. C. de L.; QUIRINO, B. F.; COSTA, P. P. K. G.; SOUTO, B. de M.; FRANCO, P. F.; BRUNALE, P. P. M.; ARANTES, A. F. B.; ARUJO, A. C. B.; MORAES, B. R. de L.; OLIVEIRA, N. G. **Monitoramento químico e microbiano da mistura biodiesel/diesel durante armazenamento**. Brasília-DF: Embrapa Agroenergia, 2019. (Embrapa Agroenergia. Boletim de Pesquisa e Desenvolvimento, 23).

SONG, Y.; JIAO, J. G.; CHEN, Z. J. Exploring on the elderly health management model in tropic area. **Asian Pacific Journal of Tropical Medicine**, v. 10, n. 6, p. 614-618, 2017. DOI: 10.1016/j.apjtm.2017.06.013.

SOUZA, C. F. T. de. **Maturação, sistemas de colheita e quantificação lipídica de frutos de macaúba (*Acrocomia aculeata*)**. 2013. 71 f. Dissertação (Mestrado em Biotecnologia) - Universidade Católica Dom Bosco, Campo Grande.

SOUZA, G. K.; SCHUQUEL, A. I. T.; MOURA, V. M.; BELLOTO, A. C.; CHIAVELLI, R. L. U.; RUIZ, A. L. T. G.; SHIOZAWA, L.; CARVALHO, J. E. de; GARCIA, F. P.; KAPLUM, V.; RODRIGUES, J. H. S.; SCARIOT, D. B.; DELVECCHIO, R.; MACHADO-FERREIRA, E.; SANTANA, R.; SOARES, C. A. G.; NAKAMURA, C. V.; SANTIN, S. M. O.; POMINI, A. M. X-ray structure of O-methyl-acrocol and anti-cancer, anti-parasitic, anti-bacterial and anti-Zika virus evaluations of the Brazilian palm tree *Acrocomia totai*. **Industrial Crops and Products**, v. 109, p. 483-492, 2017. DOI: 10.1016/j.indcrop.2017.08.066.

SOYATA, A.; HASANAH, A. N.; RUSDIANA, T. Isoflavones in soybean as a daily nutrient: the mechanisms of action and how they alter the pharmacokinetics of drugs. **Turkish Journal of Pharmaceutical Sciences**, v. 18, n. 6, p. 799-810, 2021. DOI: 10.4274/tjps.galenos.2020.79106.

STANDARD for named vegetable oils: CXS 210-1999. In: FAO. **Codex alimentarius: international food standards**. 2024. Disponível em: https://www.fao.org/fao-who-codexalimentarius/sh-proxy/en/?lnk=1&url=https%253A%252F%252Fworkspace.fao.org%252Fsites%252Fcodex%252Fstandards%252FCXS%2B210-1999%252FCXS_210e.pdf. Acesso em: 15 jan. 2025.

STANDARD for olive oils and olive pomace oils: CXS 33-1981. In: FAO. **Codex alimentarius: international food standards**. 2021. Disponível em: https://www.fao.org/fao-who-codexalimentarius/sh-proxy/en/?lnk=1&url=https%253A%252F%252Fworkspace.fao.org%252Fsites%252Fcodex%252Fstandards%252FCXS%2B33-1981%252FCXS_033e.pdf. Acesso em: 20 set. 2024.

SUFRAMA. **Projeto potencialidades regionais estudo de viabilidade econômica: dendê**. Manaus, 2003. 29 p. Disponível em: http://www.suframa.gov.br/publicacoes/proj_pot_regionais/dende.pdf. Acesso em: 24 set. 2024.

SUQUILA, F. A. C. **Extração e caracterização do óleo de cultivares de inverno visando a produção de biodiesel no estado do Paraná**. 2015. 127 f. Dissertação (Mestrado em Bioenergia) - Universidade Estadual de Londrina, Londrina.

TALAMINI, D. J. D.; MARTINS, F. M. A avicultura brasileira e o mercado mundial de carnes. **Anuário 2024 da Avicultura Industrial**, ed. 1330, ano 114, n. 7, p. 18-25, 2023.

TALAMINI, D. J. D.; SCHEUERMANN, G. N.; BERTOL, T. M.; LUDKE, J. V. **Viabilidade do uso de DDGS e DDG de milho na alimentação de frangos e suínos em Santa Catarina**. Concórdia: Embrapa Suínos e Aves, 2022. 11 p. (Embrapa Suínos e Aves. Comunicado Técnico, 594).

TALEB, N. N. **Skin in the game**: hidden asymmetries in daily life. New York: Random House, 2018. 279 p.

TAVARES, J. O fim das primeiras usinas de biodiesel do Brasil. **Biodieselbr**, notícias. 15 dez. 2011. Disponível em: <https://www.biodieselbr.com/revista/026/naufragio-dos-pio-neiros>. Acesso em: 19 set. 2024.

TEICHOLZ, N. **Gordura sem medo**: por que a manteiga, a carne e o queijo devem fazer parte de uma dieta saudável. São Paulo: WMF Martins Fontes, 2020. 448 p.

TEIXEIRA, L. C. Potencialidades de oleaginosas para produção de biodiesel. **Informe Agropecuário**, v. 26, n. 229, p. 18-27, 2005.

TELES, B. Suriname becomes a new giant in Latin America: 13 billion barrels of oil discovered on the Equatorial Margin! **CPG**, 01 mar. 2025. Disponível em: <https://en.clickpetroleogas.com.br/Suriname-becomes-new-giant-in-Latin-America-13-billion-barrels-of-oil-discovered-on-the-equatorial-margin/>. Acesso em: 18 mar. 2025.

TELHADO, S. F. P. e; CAPDEVILLE, G. de (ed.). **Tecnologias poupa-terra 2021**. Brasília, DF: Embrapa, 2021. 162 p.

THE HORSELESS Age: the worlds first automotive magazine, published from 1895 to 1918. Electric Car Society, c2003. Disponível em: <http://www.thehorselessage.com/>. Acesso em: 28 out. 2024.

THE SOY bean's day coming. **The Wilmington Morning Star**, 31 dez. 1915. p. 4. Disponível em: <https://newspapers.digitalnc.org/lccn/sn78002169/1915-12-31/ed-1/seq-4/>. Acesso em: 23 set. 2024.

TOSI, M. Árabes investem bilhões no Brasil em planta que pode virar uma “nova soja”. **Gazeta do Povo**, agronegócio, 28 jul. 2024. Disponível em: <https://www.gazetadopovo.com.br/agronegocio/arabes-investem-bilhoes-no-brasil-em-macaua-nova-soja>. Acesso em: 23 set. 2024.

UNGER, P. W. Planting date effects on growth, yield, and oil of irrigated sunflower. **Agronomy Journal**, v. 72, n. 6, p. 914-916, 1980. DOI: 10.2134/agron-j1980.00021962007200060012x.

UNIÃO Europeia flexibiliza regras ambientais mas quer impor às nossas exportações regras de antidesmantamento, critica presidente da Asplan. Asplan. **Notícias Agrícolas**, 28 mar. 2024. Disponível em: <https://www.noticiasagricolas.com.br/noticias/sucroenergetico/373374-uniao-europeia-flexibiliza-regras-ambientais-mas-quer-impor-as-nossas-exportacoes-regras-de-antidesmatamento-critica-presidente-da-asplan.html>. Acesso em: 24 set. 2024.

ÚNICA. **Etanol atinge maior oferta da história em 2024, relata Única**. Curitiba: Novacana, 28 jan. 2025. Disponível em: <https://www.novacana.com/noticias/etanol-atinge-maior-oferta-historia-2024-relata-unica-280125>. Acesso em: 05 mar. 2025.

VALOIS, A. C. C. **Possibilidades da cultura do dendê na Amazônia**. Brasília, DF: Embrapa Recursos Genéticos e Biotecnologia, 1997. 7 p. (Embrapa Recursos Genéticos e Biotecnologia. Comunicado Técnico, 19).

VARGAS-CARPINTEIRO, R.; HILGER, T.; MOSSINGER, J.; SOUZA, R. F.; ARMAS, J. C. B.; TIEDE, K.; LEWANDOWSKI, I. *Acrocomia* spp.: neglected crop, ballyhooed multipurpose palm or fit for the bioeconomy? A review. **Agronomy for Sustainable Development**, v. 41, article 75, 2021. DOI: 10.1007/s13593-021-00729-5.

VAZ JUNIOR, S. (ed.). **Biomassa para química verde**. Brasília, DF: Embrapa Agroenergia, 2013. 196 p.

VEIGA, A. S.; FURLAN JUNIOR, J.; KALTNER, F. J. Situação atual e perspectivas da dendecultura nas principais regiões produtoras - a experiência do Brasil. In: SEMINÁRIO INTERNACIONAL "AGRONEGÓCIO DO DENDÊ: UMA ALTERNATIVA SOCIAL, ECONÔMICA E AMBIENTAL PARA O DESENVOLVIMENTO SUSTENTÁVEL DA AMAZÔNIA", 2000, Belém, PA. **Resumos...** Belém, PA: Embrapa Amazônia Oriental, 2000. p. 23. (Embrapa Amazônia Oriental. Documentos, 60).

VIANNA, S. A.; BERTON, L. H. C.; POTT, A.; GUERREIRO, S. M. C.; COLOMBO, C. A. Biometric characterization of fruits and morphoanatomy of the mesocarp of *Acrocomia* species (Arecaceae). **International Journal of Biology**, v. 9, n. 3, p. 78-92, 2017. DOI:10.5539/ijb.v9n3p78.

VIEIRA, J. M. A. **Caracterização e pré-tratamento do óleo de oiticica para a produção de biodiesel**. 2011. 87 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Química) - Universidade Federal de Pernambuco, Recife.

VIEIRA, S. S.; MAGRIOTIS, Z. M.; SANTOS, N. A. V.; CARDOSO, M. G.; SACZK, A. A. Macaúba palm (*Acrocomia aculeata*) cake from biodiesel processing: an efficient and low cost substrate for the adsorption of dyes. **Chemical Engineering Journal**, v. 183, p. 152-161, 2012. DOI: 10.1016/j.cej.2011.12.047.

WALLIS, J. G.; BENGTTSSON, J. D.; BROWSE, J. Molecular approaches reduce saturates and eliminate trans fats in food oils. **Frontiers in Plant Science**, v. 13, 908608, 2022. DOI: 10.3389/fpls.2022.908608.

WANDECK, F. A.; JUSTO, P. G. A macaúba, fonte energética e insumo industrial: sua significação econômica no Brasil. In: SIMPOSIO SOBRE O CERRADO, 6, 1982, Brasília. **Savanas: alimento e energia: anais**. Planaltina, DF: EMBRAPA-CPAC, 1988. p. 541-577.

WATSON, M. J.; MACHADO, P. G.; SILVA, A. V. da; SALTAR, Y.; RIBEIRO, C. O.; NASCIMENTO, C. A. O.; DOWLING, A.W. Sustainable aviation fuel technologies, costs, emissions, policies, and markets: a critical review. **Journal of Cleaner Production**, v. 449, 141472, 2024. 17 p. DOI: 10.1016/j.jclepro.2024.141472.

WELD, K. A.; ARMENTANO, L. E. Feeding high oleic acid soybeans in place of conventional soybeans increases milk fat concentration. **Journal of Dairy Science**, v. 101, n. 11, p. 9768-9776, 2018. DOI: 10.3168/jds.2018-14498.

WENDT, L. G. **Potencial do biodiesel de babaçu motiva pesquisa e mais dois pedidos de patente para a Univates**. **Univates**, 22 jun. 2021. Disponível em: <https://www.univates.br/noticia/29817-potencial-do-biodiesel-de-babacu-motiva-pesquisa-e-mais-dois-pedidos-de-patente-para-a-univates>. Acesso em: 25 set. 2024.

WILLETTE, A.; FALLEN, B.; BHANDARI, H.; SAMS, C.; CHEN, F.; SYKES, V.; SMALLWOOD, C.; BILYEU, K.; LI, Z.; PANTALONE, V. Agronomic performance of high oleic, low linolenic soybean in Tennessee. **Journal of the American Oil Chemists' Society**, v. 98, n. 8, p. 861-869, 2021. DOI: 10.1002/aocs.12517.

WORLD BANK. **Commodity markets outlook**: Washington, DC, mar. 2025. Disponível em: <https://thedocs.worldbank.org/en/doc/18675f1d1639c7a34d-463f59263ba0a2-0050012025/related/CMO-Pink-Sheet-March-2025.pdf>. Acesso em: 13 mar. 2025.

WORLD POPULATION REVIEW. **Tropical countries 2024**. 2024. Disponível em: <https://worldpopulationreview.com/country-rankings/tropical-countries>. Acesso em: 29 set. 2024.

WOYANN, L. G.; MEIRA, D.; ZDZIARSKI, A. D.; METEL, G.; MILIOLI, A. S.; ROSA, A. C.; MADELLA, L. A.; BENIN, G. Multipletrait selection of soybean for biodiesel production in Brazil. **Industrial Crops and Products**, v. 140, 111721, 2019. DOI: 10.1016/j.ind-crop.2019.111721.

XU, Z.; YE, Z.; LI, Y.; LI, J.; LIU, Y. Comparative study of the oxidation stability of high oleic oils and palm oil during thermal treatment. **Journal of Oleo Science**, v. 69, n. 6, p. 573-584, 2020. DOI: 10.5650/jos.ess19307.

YEOM, W. W.; KIM, H. J.; LEE, K.-R.; CHO, H. S.; KIN, J.-Y.; JUNG, H. W.; OH, S.-W.; JUN, S. E.; KIM, H. U.; CHUNG, Y.-S. Increased production of alpha-linolenic acid in soybean seeds by overexpression of lesquerella FAD3-1. **Frontiers in Plant Science**, v. 10, article 1812, 2020. DOI: 10.3389/fpls.2019.01812.

ZAPAROLLI, D. O desafio do setor aéreo para anular sua pegada de carbono. **Pesquisa Fapesp**, v. 23, n. 317, jul. 2022. Disponível em: <https://revistapesquisa.fapesp.br/o-desafio-do-setor-aereo-para-anular-sua-pegada-de-carbono/>. Acesso em: 25 set. 2024.

ZEFERINO, M.; RAMOS, S. de F. Mercado mundial de óleos vegetais: panorama e perspectivas. **Análises e Indicadores do Agronegócio**, v. 18, n. 5, p. 1-8, 2023. Disponível em: <http://www.iea.agricultura.sp.gov.br/out/TerTexto.php?codTexto=16138>. Acesso em: 25 set. 2024.

ZELT, T. New oil plants and their potential as feedstock for biokerosene production. In: KALTSCHMITT, M.; NEULING, U. (ed.). **Biokerosene: status and prospects**. Berlin: Springer, 2018. p. 277-301.

ZUBR, J. Oil-seed crop: *Camelina sativa*. **Industrial Crops and Products**, v. 6, n. 2, p. 113-119, 1997. DOI: 10.1016/S0926-6690(96)00203-8.



APÊNDICE:

ALGUMAS DEFINIÇÕES E CONSIDERAÇÕES SOBRE COMBUSTÍVEIS

Diesel A (LCO): combustível derivado de petróleo produzido nas refinarias com matérias-primas petroquímicas, de uso rodoviário, sem adição de biodiesel. É o combustivel destinado à formulação do diesel B.

Biodiesel (FAME - fatty acid methyl ester): segundo a ANP, biodiesel é um “combustível composto de alquil ésteres de ácidos carboxílicos produzido a partir da transesterificação e/ou esterificação de matérias graxas de origem vegetal ou animal”. Ao ser produzido, recebe a denominação de biodiesel B100, ou seja, 100 % biodiesel que poderá ser misturado com óleo diesel A (100% diesel de petróleo), na formulação do Diesel B.

Diesel B: óleo diesel A (óleo diesel puro, derivado de petróleo) que contém biodiesel (B100). A mistura do diesel A com o B100 normalmente ocorre nas distribuidoras de combustivel e é este diesel que o consumidor encontra nos postos de combustivel. Na nomenclatura do Diesel B, a letra “B” seguida de um número que indica a percentagem de biodiesel na mistura. Atualmente 14%.

Misturas de biodiesel: uma mistura de biodiesel B100 com diesel fóssil, recebe a denominação referente a quantidade de biodiesel que é misturada com diesel de petróleo. Assim, o diesel B14 é aquele que tem 14% de biodiesel (B100) na composição do diesel existente nos postos.

SAF (sustainable aviation fuel): Combustível renovável formado por uma mistura de hidrocarbonetos, tem composição semelhante à do querosene de origem fóssil (QAv).

Diesel verde (diesel renovável): É uma denominação genérica de diesel parafínico obtido de matérias-primas renováveis, adequado aos motores de ciclo Diesel. O diesel verde é regulamentado pela resolução ANP nº 842, de 14/05/2021 (Agência Nacional do Petróleo, Gás Natural e Biocombustíveis, 2021), que é definido como “biocombustível composto por hidrocarbonetos parafínicos destinado a veículos dotados de motores do ciclo Diesel” e produzido a partir das seguintes rotas:

- I - hidrotreatamento de óleo vegetal (in natura ou residual), gordura animal e ácidos graxos de biomassa.
- II - gás de síntese proveniente de biomassa.
- III - fermentação de carboidratos presentes em biomassa.
- IV - oligomerização de álcool etílico (etanol) ou isobutílico (isobutanol). e
- V - hidrotermólise catalítica de óleo vegetal (in natura ou residual), gordura animal e ácidos graxos de biomassa.

O diesel verde tem composição semelhante ao diesel de origem fóssil, consequentemente maior estabilidade tornando-o uma boa alternativa e possivelmente mais sustentável.

HVO (Hydrotreated Vegetable Oil): É o tipo de diesel verde mais produzido no mundo, sendo o terceiro mais consumido (atrás do etanol e do biodiesel) e com o maior crescimento (incluindo o etanol e o biodiesel).

Esse crescimento é explicado pelo maior desenvolvimento tecnológico e pela qualidade do produto, tornando-o adequado às modernas tecnologias veiculares. Isso se deve à sua semelhança química ao diesel de petróleo. Em função das suas qualidades, ele pode ser usado em sua forma pura - chamada R100, ou ser misturado com diesel de petróleo ou com biodiesel, em variadas proporções.

As misturas de diesel verde e diesel de petróleo são rotuladas com um R seguido pela percentagem (por volume) do teor de diesel verde. Ou seja, uma mistura de 20% de diesel verde e 80% de diesel de petróleo é chamada de diesel R20. Uma mistura de 10% de biodiesel, 10% de diesel verde e 80% de diesel de petróleo é chamada de diesel B10R10.

Diesel R da Petrobras: é um diesel exclusivo da Petrobrás que contém uma parcela de diesel verde (HVO) na sua composição. Ele é atualmente produzido na Refinaria Presidente Getúlio Vargas (REPAR), em Araucária (PR), por coprocessamento de óleo diesel mineral com óleo vegetal em uma unidade de hidrotreatamento (HDT).

ÍNDICE REMISSIVO

A

Abacate48

Ácido docosahexaenoico (DHA)..... 115, 116

Ácido eicosapentaenóico (EPA)..... 115, 116

Ácido erúcico 60, 110

Ácido esteárico 110, 111, 119

Ácido fítico88

Ácido graxo

 insaturado.....119, 120

 linoleico 41, 110 a 112, 116, 118, 119, 122

 linolênico41, 110 a 112, 116 a 119, 122

 monoinsaturado..... 114, 121 a 123

 oleico41, 42, 49, 109 a 124

 poli-insaturado 41, 111, 112, 116,119, 122, 123

 saturado 111, 112, 118, 119, 122, 123

Ácido palmítico..... 119, 122, 123

Ácido ricinoleico.....43

Acre.....95

África..... 33 a 35

Aglutinantes.....88

Agricultura familiar ...15, 46, 48, 49, 53, 56, 77, 78, 97, 101, 106

Agrofloresta..... 65, 74, 78

Agroindústria..... 38, 77, 82

Alagoas.....95

Algodão 17, 30, 36, 37, 43, 44, 52, 54, 66, 92, 108, 112, 113, 118, 125

Alimento

 cocção 8, 27, 28, 93, 114, 115

 funcional..... 115

 indústria 114, 115, 117, 118, 120, 122

 procura..... 33

 produção.....7, 17, 27, 34, 35, 45, 47, 55, 59, 60, 62, 114, 116

Amapá 20, 57, 96

Amazonas 57, 96

Amazônia..... 38, 45, 50

Amêndoa..... 29, 56, 66, 68, 72, 73

Amendoim 17, 30, 36, 43, 44, 48, 52, 113

Análise bromatológica 71, 72

Aquicultura.....88

Arca de Noé19

Argentina32, 34, 111

Ásia 18, 23, 33, 50, 84, 115

Austrália.....34

Avaliação do ciclo de vida (ACV)..... 12, 27, 42, 80

Aves83 a 85, 88, 108

Aviação... 8, 9, 27, 61, 77, 95, 98, 104, 108, 124

Azeite de oliva 30, 31, 48, 49, 109, 110, 113, 114, 120, 121

B

Babaçu	44, 48, 49, 126
Bahia.....	38, 57, 77, 100
Banco Nacional de Desenvolvimento Econômico e Social (BNDES)	77
Barril de petróleo.....	20, 21, 102 a 104
Biodiversidade	46, 50
Bioeconomia	8, 46, 50, 91, 126
Biomassa.....	26, 43, 65, 67, 68, 127
Biotecnologia	19, 42, 89, 119
Biscoito	37, 87
Bolacha	37
Bovinos	9, 41, 54, 70, 68, 71, 82 a 85, 92 a 95, 108, 111
Brown, John M.....	26

C

Cadeia	
de produção.....	19, 27, 45, 46, 76, 82, 93, 124
produtiva	16, 23, 31, 32, 35, 37, 49, 53, 55 a 57, 65, 76, 80, 84, 85, 86, 89, 98, 125
Camelina.....	9, 51, 60 a 65, 112
Caminha, Pero Vaz	43
Cana-de-açúcar	15, 62, 82
Canola	17, 29, 30, 36 a 40, 43, 44, 47, 48, 52, 54, 59, 60, 64, 65, 92, 108 a 110, 113, 118, 120

Carbono	
atmosférico	19
átomo.....	108 a 110, 114
baixo.....	26, 32
crédito	16, 78
fixação.....	43, 67
pegada.....	104
precificação.....	12
sequestro	78
Carinata	17, 51
Carne	9, 15, 41, 82 a 85, 88, 115
Carro elétrico	21, 22, 104
Cártamo	48, 113
Carvão.....	19, 20, 23, 26, 68, 78, 113
Ceará	16, 20
Certificação.....	32, 115
China	18, 23, 32, 42
Cimento	89
Cimento asfáltico	22
Combustão	20, 22, 115
Combustível fóssil.....	104
Commodity.....	9, 37, 41, 49, 104, 105, 117, 119
COP (Conferência do Clima da ONU).....	5, 23, 24, 65
Cosmético.....	37, 49, 85, 87 a 89, 114
Crambe.....	17, 48

D

Dendê 17, 18, 29, 30, 35, 37, 38, 40, 43, 44, 47, 48, 52, 54, 57, 59, 61, 73, 75, 95, 109, 110, 112, 125

Descarbonização 16, 17, 20, 23, 78, 104

Desenvolvimento

agrário 108

econômico 20, 77, 78

rural 78

regional 44, 85, 91

tecnológico 35, 40, 78

Diesel

verde 76, 77, 98, 126, 127

petróleo 41, 104, 126, 127

Diesel, Rudolf 108

Digestibilidade 40, 71, 72

Dias, Gonçalves 65

Dispersantes 89

E

Edamame 87

Eficiência energética 16, 21, 28, 61

Energia

demanda 12, 26

fontes 5 a 9, 19, 26 a 29

hidroelétrica 26

limpa 8, 12, 28, 29, 101, 104

luminosa 29

química 29

renovável 26, 76

solar 21, 26, 28, 33

térmica 76

Emissões

CO₂ 22

NOx 121

Emulsificantes 89

Enxofre 41

Enzimas 116

Estados Unidos .. 13, 22, 23, 32, 85, 95, 116, 117

Evolução

sociedade 27

tecnológica 26

Extrativista 46, 49, 50, 76, 78

Etanol 15, 26, 80 a 83, 108, 127

F

Farmacêuticos 38, 85, 87 a 89

Farelo 40, 41, 43, 51, 83, 85, 86, 88, 125

Fertilizante 7, 34, 62, 68, 105

Fibra 34 a 37, 71, 72, 86 a 88

Floresta 26, 33, 46, 50, 76

Fontes renováveis 5, 8, 12, 17, 26, 57, 121

Fritura 37, 54, 89, 92, 93 a 95, 116, 118

G

Gases de efeito estufa (GEEs) 16, 26, 32, 42, 104

- Gasolina 22, 108
- Gergelim 48, 52
- Gestão de recursos 27
- Girassol 16, 17, 29, 30, 31, 36 a 40, 43, 44, 47, 48, 52, 54, 59, 64, 65, 92, 108 a 110, 113, 118 a 121
- Glicerol 89, 109
- Goiás 66, 96, 98, 100, 121
- Gordura
- bovina 9, 54, 92, 93, 95, 108
 - frango 9, 54, 92, 93, 95, 108
 - hidrogenada 89
 - suína 9, 54, 92, 93, 95, 108
 - trans 118, 119
- H**
- Hipócrates 115
- Holanda 62
- Homero
- Ulisses, Odisseu 114
 - Odisseia 114
- HOSO (High oleic soybean oil) 109, 118
- HOSO (High oleic sunflower oil) 118
- HVO (Hydrotreated Vegetable Oil).... 77, 89, 98, 127
- I**
- Idade da Pedra 22
- Índia 18, 23, 32, 34, 60
- Indonésia 17, 18, 23, 30,
- Índice de Desenvolvimento Econômico (IDH) 27, 82,
- Índice de Desenvolvimento Humano Municipal (IDHM) 82
- Índice FIRJAN de Desenvolvimento Municipal (IFDM) 82
- Impacto ambiental 15, 42, 80
- Inovação tecnológica 23, 77, 112
- Integral
- grão 86, 87
 - farinha 86, 87
- Indústria
- alimento 114, 117, 118, 120, 122
 - alimentícia 41, 118, 124
 - biodiesel 15, 54, 89, 104, 106, 120, 123, 124
- Integração
- lavoura-pecuária (ILP) 62, 74, 76
 - lavoura-pecuária-floresta (ILPF) 62, 78
- K**
- King, Martin Luther 126
- L**
- Lei de Murphy 29
- Lei de Kidlin 15
- Lenha 10, 26
- Lobato, Monteiro 20

Logística	15, 21, 38, 53 a 57, 76, 95, 98, 99, 125
Locomotiva.....	22
Lubrificante/biolubrificantes	9, 38, 86, 89, 99, 121, 123

M

Macaúba	11, 17, 48, 51, 60, 65 a 78, 92, 95, 109 a 111, 125, 126
Mamona	12, 17, 36, 38, 40, 44, 47, 52, 56, 65
Manejo do solo.....	12, 34, 58
Maranhão.....	20, 96
Margarina	37, 89, 118
Mato Grosso	37, 66, 96, 100, 121
Mato Grosso do Sul	66, 96, 100
Matriz energética.....	16, 17, 21, 26, 55, 83, 101, 102
Melhoramento genético	6, 41, 46, 58, 74, 77, 85, 112, 113, 122
Milho	26, 37, 48, 54, 64, 80 a 84, 92, 101, 113, 118
Minas Gerais.....	38, 66, 69, 76, 77, 96, 100, 110
Motor... ..	15, 20 a 22, 53, 108, 109, 120 a 122, 125, 126
Mudanças climáticas	10, 12, 21, 23, 65
Malásia.....	17, 30
Manuel I, Dom.....	43

N

Nabo Forrageiro.....	16, 17, 48
Navios	22
Nigéria.....	30
Nutracêuticos.....	86, 88

O

Oleocanthal.....	120
Ômega	
Ômega 3	115, 116
Ômega 6	116
Ômega 9	114
Oriente Médio	20
Organização Mundial da Saúde (OMS).....	92
Oxidação.....	111, 114 a 116, 119, 122

P

Palmiste	17, 29, 30, 37, 52, 72, 92
Pará.....	20, 38, 57, 96
Paraguai.....	34, 48, 66, 111
Paraná	64, 85, 96 a 98, 100
Patauí	48, 49, 125
Peixe.....	84, 85, 109
Pequi.....	48, 51, 113, 125
Peru	84

Petróleo..... 13, 19 a 23, 26, 42, 86, 99, 101 a 105, 108, 113, 124, 126, 127

Piauí..... 20, 96

Pinhão-manso..... 12, 17, 48, 51, 56, 63, 112

Plantio Direto..... 35, 97

Plástico 38, 88, 89

Políticas públicas 20, 61, 76, 126

População20, 23, 34, 46, 78, 82, 84

Preço..... 43, 92, 93, 101, 103,

Produção

de alimentos..... 7, 27, 34, 35, 45, 47, 55, 59, 60, 62, 114

de biodiesel 11, 12, 13, 16, 41 a 44, 47, 48, 53 a 55, 57, 58, 60 a 63, 80, 83, 84, 91, 92 a 95, 101, 104, 112 a 114, 120 a 125

de biocombustíveis 6, 9, 42, 67, 76, 83, 98, 114

de biomassa..... 65

de energia 6, 27, 65, 72, 81

de óleo17, 18, 29, 30, 35 a 37, 39, 47 a 49, 52, 57, 60, 61 66, 74, 77, 78, 83, 101, 116

sustentável 30, 74, 120, 125

Produtos fitossanitários.....

Inseticida..... 88, 89, 105

Fungicida..... 88, 89, 105

Herbicida 58, 89, 105

Acaricida..... 105

Programa Nacional de Apoio ao Médio

Produtor Rural (PRONAMP)101

Proteína 11, 27, 40 a 42, 69, 71, 72, 78, 82, 84, 88, 100

Q

Qualidade/Valor

nutricional115, 118

organoléptica 49, 109, 120

Querosene/Bioquerosene... 61, 76, 108, 126

Química verde.....86

R

Ração..... 11, 68, 87, 88, 116,

Refinaria/Biorrefinaria..... 77, 98, 99, 104, 126, 127

Revestimento 86, 88,

Renovabio.....16, 37, 56, 57, 65, 124

Recursos naturais..... 43, 113

Resistência

Oxidação..... 116

Seca..... 61, 78

Rio Grande do Norte20

Rio Grande do Sul..... 16, 38, 47, 67, 64, 85, 95 a 98, 100

Rondônia 96, 100

Roraima..... 95, 96

Rússia..... 23, 62

S

SAF (Sustainable Aviation Fuels) 61, 76, 77, 89, 95, 98, 104, 125, 126

Saúde	
humana	10, 60, 82, 88, 114 a 117, 119
financeira.....	106
Sagan, Carl	47, 127
Saponinas.....	88
Santa Catarina	96, 100
São Paulo	38, 96
Sebo.....	108, 111
Soja alto oleica.....	42, 111, 113, 116, 117, 123
Solventes	89
Suplementos	89
Sustentabilidade	32, 35, 45, 51, 86, 101, 103, 121
Suínos	11, 82, 83 a 85, 87, 88, 94
T	
Tailândia.....	30
Tocantins.....	96, 100
Torre de Babel.....	19
Transição energética	23, 78
Transporte.....	8, 20 a 22, 27, 28, 49, 54, 64
Trópico	
de Câncer	33
de Capricórnio	33
Tucumã	48, 112, 126
Tungue.....	48
U	
União Europeia	18, 23, 30
V	
Vantagem financeira.....	103
Venezuela.....	20
X	
Xisto	21
Z	
Zoneamento agrícola (ZARC).....	34, 58, 68, 74, 95



Embrapa



CGPE 19021