



Programa de Pós-Graduação em Energia - PPGE  
Instituto de Energia e Ambiente - IEE  
Universidade de São Paulo - USP

## **PEN 5002: Recursos e Oferta de Energia**

**Prof. Célio Bermann**

**Profa. Virgínia Parente**

### **6ª aula - Biomassa (Biodiesel de óleos vegetais, sebo e de algas)**

- . biodiesel - transesterificação e biodiesel de microalgas
- . características físico-químicas; aspectos sócio-ambientais

## Processos biológicos:

- digestão anaeróbica com a produção de gás metano
- fermentação de açúcares (cana-de-açúcar) para produção de etanol
- hidrólise (sacarificação) da madeira e resíduos vegetais seguida de fermentação dos açúcares para produção de etanol

### **Biomassas com alto conteúdo de óleo vegetal:**

para produção de biodiesel:

- babaçu
- dendê (palm oil)
- soja
- mamona

**Biodiesel é uma denominação genérica para combustíveis produzidos a partir de óleos vegetais e gorduras animais para serem usados em motores de ignição por compressão, conhecidos como motores diesel. Além disso, o biodiesel pode ser usado em usinas termelétricas para geração de energia elétrica, em substituição do diesel e do óleo combustível. Atualmente, apenas o diesel vegetal obtido pelo processo de transesterificação tem recebido o nome de “biodiesel”, pois esse processo garante que o produto resultante mantenha características próprias, distintas das do diesel convencional, o que não ocorre com os outros processos.**

**O combustível é composto de mono-alquil-ésteres de ácidos graxos de cadeia longa obtidos a partir do processo de transesterificação de óleos vegetais ou gordura animal com um álcool de cadeia curta, metanol ou etanol.**

## Características de alguns vegetais com potencial para produção de biodiesel

Espécie	Origem do óleo	Conteúdo de óleo (%)	Rendimento em óleo (t/ha)
Dendê ( <i>Elaeis guineensis</i> N.)	Amêndoa	26	3,0-6,0
Babaçu ( <i>Attalea speciosa</i> M.)	Amêndoa	66	0,4-0,8
Girassol ( <i>Helianthus annuus</i> )	Grão	38-48	0,5-1,5
Canola ( <i>Brassica campestris</i> )	Grão	40-48	0,5-0,9
Mamona ( <i>Ricinus communis</i> )	Grão	43-45	0,5-1,0
Amendoim ( <i>Arachis ipogaea</i> )	Grão	40-50	0,6-0,8
Soja ( <i>Glycine max</i> )	Grão	17	0,2-0,6
Pinhão manso ( <i>Jatropha curca</i> L.)	Amêndoa	52-62	2,0-4,0

Fonte: Adaptado de Macedo, Nogueira (2005) ; Arruda *et al.* (2004)

\* Essa variação em relação aos meses de colheita deve-se à origem das plantas, pois aquelas oriundas de sementes atingem idade produtiva após quatro anos; já as provenientes de estacas começam a produzir no segundo ano.

Obs: No Brasil, as alternativas para a produção de óleos vegetais são diversas, e incluem o nabo forrageiro, o pequi, o buriti, a macaúba além de uma grande variedade de oleaginosas a serem exploradas.



**PLANTAÇÃO DE DENDÊ (PALMA AFRICANA / OIL PALM)**



**CACHOS DE DENDÊ**



### Semente do Óleo de Palma

Disponível em: <http://www.saflora.lt/images/cms/images/Close-up-palm-oil-fruit.jpg>



A fruta da Palma contém dois tipos de óleo: óleo de palma (combustível), obtido do mesocarpio ou da polpa da fruta, e o óleo de palmiste (produtos cosméticos), obtido da semente da fruta. O óleo de palmiste tem um alto valor comercial.



**PLANTAÇÃO DE SOJA**



**SEMENTES DE SOJA**

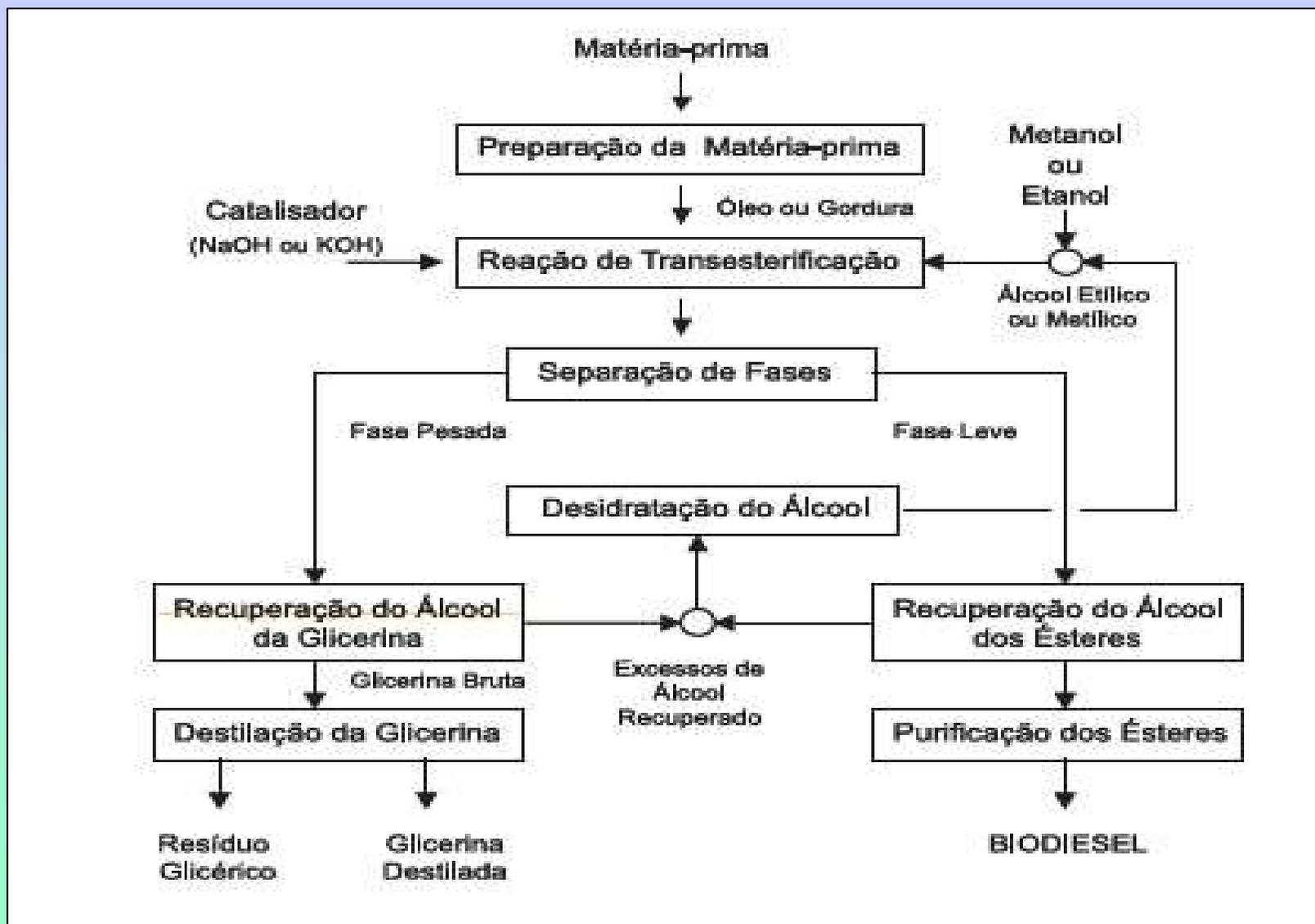


**JATROPHA OU PINHÃO MANSO**

A conversão de óleos vegetais e gorduras vegetais ou animais em combustíveis pode ser feita por meio dos processos de transesterificação ou craqueamento. Porém, a literatura mundial tem definido biodiesel somente como o biocombustível obtido a partir da reação de transesterificação.

A transesterificação consiste na reação química de triglicerídeos (óleos e gorduras vegetais ou animais) em que os ácidos graxos formam ésteres com o glicerol a partir de álcoois (metanol ou etanol), na presença de um catalisador (ácido, base ou enzimático), resultando na substituição do grupo éster do glicerol pelo grupo do etanol ou metanol. O glicerol é um subproduto da reação.

# Processo de obtenção de biodiesel a partir da transesterificação



Fonte: Plano Nacional de Agroenergia, 2005.

Os catalisadores básicos mais empregados são o hidróxido de potássio (KOH) e o hidróxido de sódio (NaOH). O metóxido de sódio (MeONa) também é empregado, e é considerado o melhor catalisador, porém é mais caro. As grandes plantas de produção de biodiesel da Europa e dos Estados Unidos utilizam esse tipo de catalisador. Porém, os catalisadores básicos de um modo geral, devido à formação de sabões, são associados à presença de emulsões no final da reação, tornando mais difícil a etapa de purificação do biodiesel.

Os catalisadores ácidos, como o ácido sulfúrico ( $H_2SO_4$ ), evitam a formação de sabões, mas estão associados à corrosão e apresentam atividades catalíticas muito inferiores às aquelas verificadas nos sistemas básicos. São cerca de 100 vezes mais lentos.

Os catalisadores enzimáticos oferecem vantagens frente aos catalisadores ácidos e básicos, pois não estão associados à corrosão, além de possibilitarem uma melhor recuperação do catalisador e melhor separação do biodiesel, por não produzirem emulsões. Porém, o alto custo desses catalisadores aliado à sua rápida desativação na presença de álcoois tem inviabilizado seu uso em escala comercial.

Um dos desafios tecnológicos para a indústria de biodiesel é a busca de sistemas catalíticos alternativos que evitem a formação de emulsões e apresentem alta atividade, permitindo uma redução do tempo do processo.

Um dos rejeitos do processo de produção do biodiesel é a glicerina. Ela possui um valor de mercado que pode tornar o biocombustível ainda mais atraente do ponto de vista econômico. Entretanto, há grande incerteza quanto ao que ocorrerá com uma oferta excessiva no mercado de glicerina. Em média, para cada 90 m<sup>3</sup> de biodiesel são produzidos 10 m<sup>3</sup> de glicerina. É utilizada notadamente na produção de cosméticos, fármacos, sabões e sabonetes.

O processo de obtenção do biodiesel a partir da reação de transesterificação pode ser realizado por duas rotas tecnológicas diferentes: a rota etílica (que utiliza o etanol como reagente) e a metílica (que utiliza o metanol).

No mundo (na Europa e nos Estados Unidos, inclusive), há predominância de transesterificação pela rota metílica, pois a reação via metanol é mais econômica que a via etanol por conta da disponibilidade daquele álcool.

No entanto, além de ser tóxico, o metanol é produzido a partir de gás natural (combustível de origem fóssil) ou, em menores quantidades, por destilação seca da madeira. No caso do Brasil, em particular, o metanol teria de ser importado.

O etanol apresenta a vantagem de não ser tóxico, ser biodegradável e ser produzido a partir de fontes renováveis (cana-de-açúcar).

## **Comparação entre as rotas metílica e etílica**

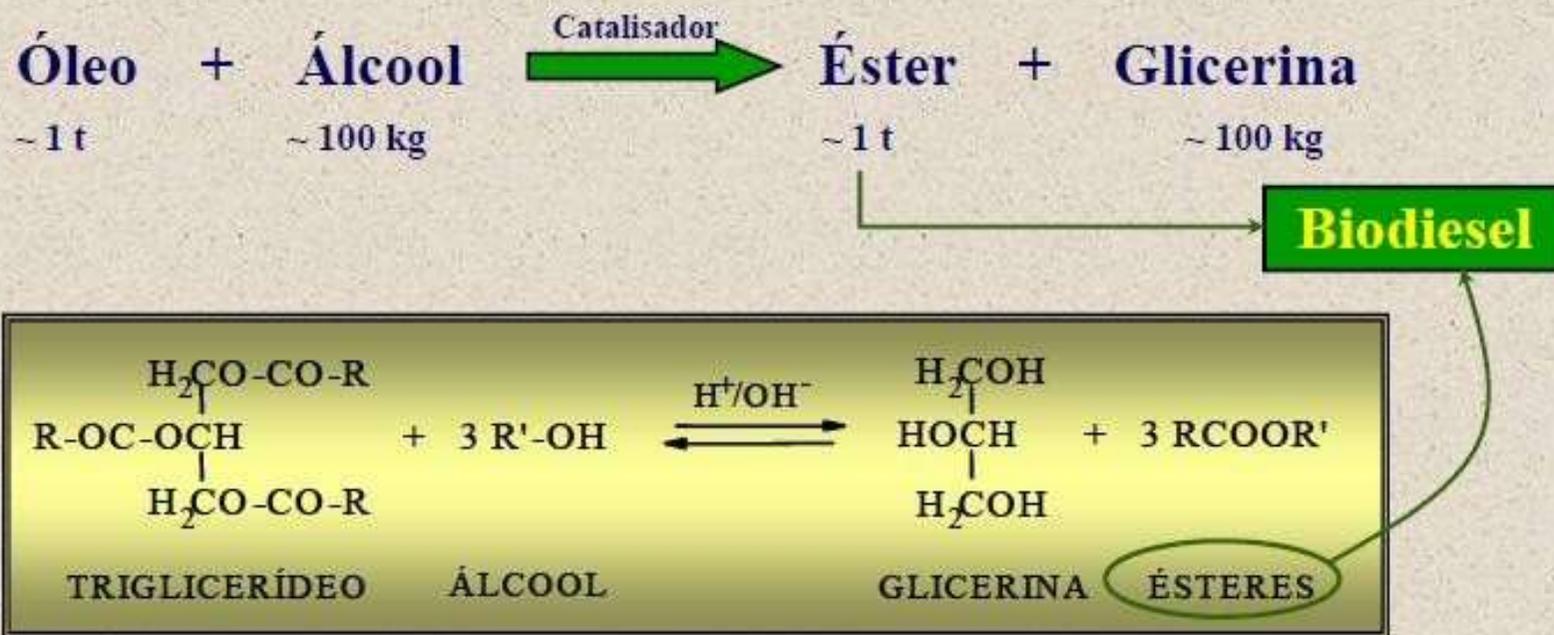
<b>Quantidade e condições usuais médias aproximadas</b>	<b>Rotas de Processo</b>	
	<b>Metílica</b>	<b>Etílica</b>
Quantidade consumida de álcool (Kg) por de biodiesel	90	130
Preço médio do álcool (US\$/m <sup>3</sup> )	190	360
Excesso recomendado de álcool recuperável, por destilação, após a reação	100%	650%
Temperatura recomendada da reação	60°C	85°C
Tempo de reação (minutos)	45	60

Fonte: PARENTE, E.J.S. Uma aventura tecnológica num país engraçado, Ceará, 2003.

Disponível em: <http://www.tecbio.com.br>.

Nota: A primeira patente mundial de biodiesel foi obtida no Brasil, em 1980, pelo professor doutor Exedito Parente, da Universidade Federal do Ceará. No entanto, o processo de industrialização do biodiesel foi iniciado apenas na Europa nos anos 1990, sendo este hoje o principal mercado produtor e consumidor de biodiesel puro ou misturado com óleo diesel.

Na produção de biodiesel pela tecnologia da reação de transesterificação, óleos vegetais e/ou gorduras animais são inicialmente convertidos a ácidos graxos, na presença de um álcool (metanol ou etanol) e de um catalisador alcalino (NaOH ou KOH), e finalmente transformados em outros ésteres, tendo como sub-produto o glicerol (glicerina), segundo os esquemas reacionais abaixo.



- ★ Ácidos graxos livres devem estar ausentes no produto final. Sua presença é indicada por testes de índice de acidez e corrosividade ao cobre.
- ★ O teor de glicerina livre ou ligada estimula a ocorrência de reações de desidratação durante a combustão, gerando acroleína, que, através de reações de condensação, proporciona aumento de depósitos de carbono no motor;
- ★ Sabões e ácidos graxos livres acarretam a degradação de componentes do motor;
- ★ A umidade interfere na acidez do éster e provoca sua hidrólise sob condições inadequadas de estocagem;
- ★ Resíduos de carbono aumentam a tendência do combustível em formar depósitos e relacionam-se à presença de ácidos graxos livres, glicerídeos, sabões, polímeros, ácidos graxos altamente insaturados e impurezas inorgânicas.

- ★ A qualidade de ignição do biodiesel é semelhante à do óleo diesel, pois apresenta altos valores de número de cetano, devido a sua composição de substâncias com longas cadeias lineares e saturadas, provenientes das moléculas de ácidos graxos;
- ★ O alto teor de ácidos graxos saturados afeta a tendência do biodiesel em solidificar-se (definindo o ponto de entupimento de filtro a frio). A temperatura de utilização deve ser a mais alta possível, sem afetar sua qualidade, a fim de evitar aumento da viscosidade e cristalização dos ésteres;
- ★ O alto teor de ácidos graxos insaturados pode resultar na formação de depósitos pela degradação oxidativa do biodiesel, resultando menor desempenho, aumento da susceptibilidade à corrosão e diminuição da vida útil dos motores.
- ★ A otimização da produção depende de fatores como a razão molar álcool:óleo, a concentração e o tipo do catalisador, a acidez da matéria-prima e a temperatura e agitação do meio reacional.

## ***Craqueamento Catalítico ou Térmico***

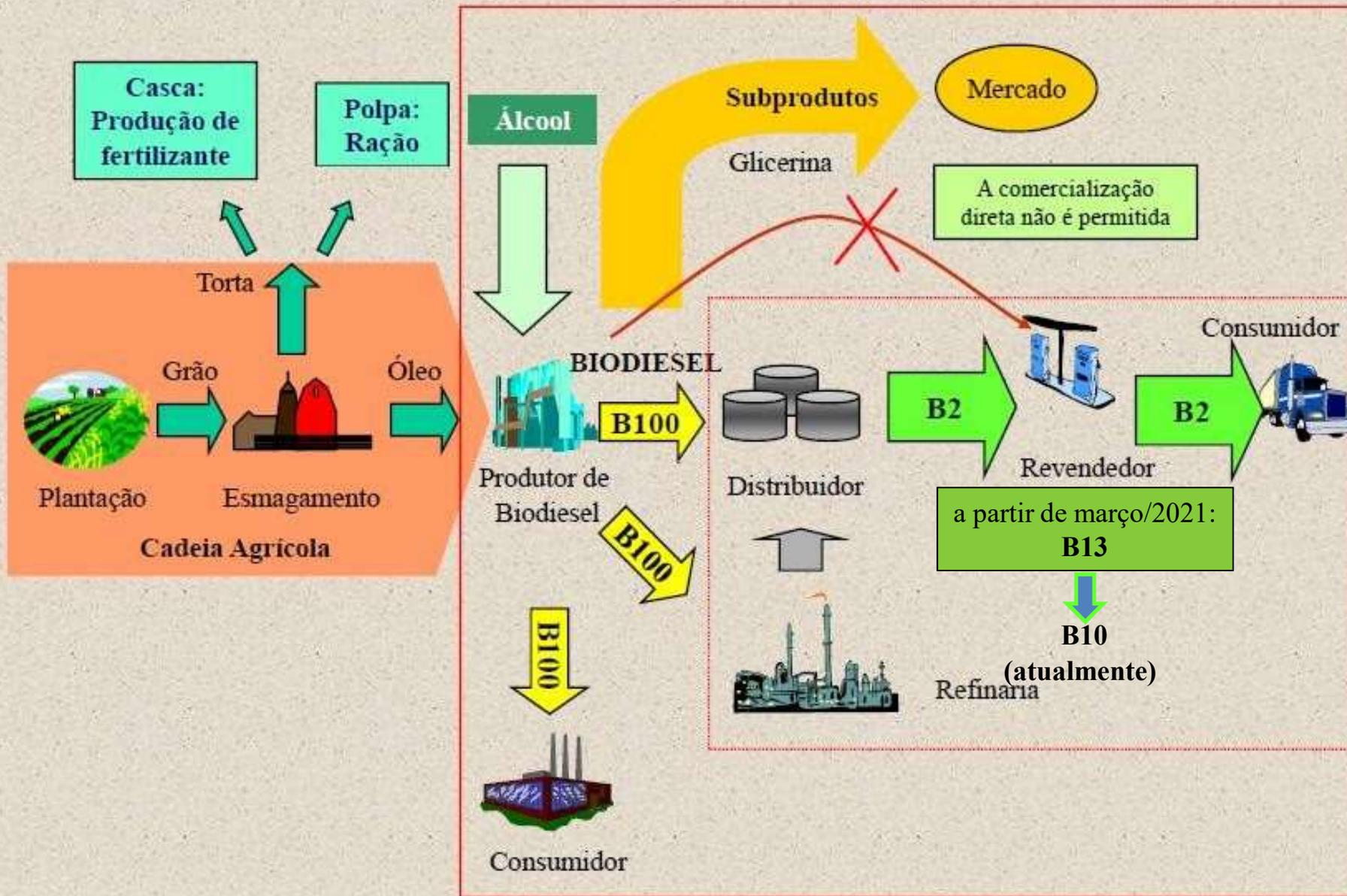
O processo de craqueamento catalítico ou térmico consiste na quebra de moléculas do óleo vegetal ou animal levando à formação de uma mistura de compostos químicos com propriedades muito semelhantes às do diesel de petróleo. Esse composto pode ser usado diretamente em motores convencionais.

A reação de conversão do óleo em outro composto é realizada pelo aquecimento da substância na ausência de ar ou oxigênio a temperaturas que podem chegar a 450 °C. Esse processo de pirólise pode ser auxiliado por um catalisador, para a quebra das ligações químicas, de modo a dar origem a moléculas menores. Catalisadores típicos para serem empregados na pirólise são o óxido de silício ( $\text{SiO}_2$ ) e o óxido de alumínio ( $\text{Al}_2\text{O}_3$ ).

## ***Craqueamento Catalítico ou Térmico***

**O craqueamento tem sido investigado há mais de 100 anos, sobretudo em países com pequenas reservas de petróleo. Durante as grandes guerras mundiais foi pesquisado como uma alternativa ao petróleo.**

**No Brasil, pesquisadores do Instituto de Química da Universidade de Brasília (IQ/UnB) desenvolveram uma unidade de craqueamento térmico para a produção em pequena escala de diesel vegetal. O desenvolvimento desse projeto, financiado pela Embrapa, tem como objetivo construir um equipamento de baixo custo para que comunidades isoladas tenham a capacidade de produzir seu próprio combustível.**



## Evolução do percentual de teor de biodiesel presente no diesel fóssil no Brasil:

- Nov/2005 a Fev/2007 - Facultativo
- Nov/2007 - 2%
- Jul/2008 - 3%
- Jul/2009 - 4%
- Jan/2010 - 5%
- Ago/2014 - 6%
- Nov/2014 - 7%
- Mar/2017 - 8%
- Mar/2018 - 10%
- Mar/2019 - 11%
- Mar/2020 - 12%
- Mar/2021 - 13% —————> 10% (atualmente)

**Misturas de diesel de petróleo com biodiesel adequadamente especificado, em teores de até 20%, podem ser empregadas em motores convencionais sem qualquer ajuste ou modificação, não acarretando problemas operacionais ou de desempenho.**

**Todos os fabricantes de motores mantêm a garantia de seus equipamentos quando estes operam com B20 (mistura de diesel com 20% de biodiesel). Porém, tais condições pressupõem o atendimento das especificações definidas pela ANP.**

**A especificação do biodiesel para o uso comercial é feita pela ANP – Agência Nacional de Petróleo, Gás Natural e Biocombustíveis que é também a instituição responsável pela fiscalização.**

**RESOLUÇÃO ANP Nº 7, DE 19.3.2008**

Estabelece a especificação do biodiesel a ser comercializado pelos diversos agentes econômicos autorizados em todo o território nacional.

Parágrafo único. O biodiesel deverá ser adicionado ao óleo diesel na proporção de 5%, em volume, a partir de 1º de janeiro de 2010.

CARACTERÍSTICA	UNIDADE	LIMITE
Aspecto	-	LII (1)
Massa específica a 20° C	kg/m <sup>3</sup>	850-900
Viscosidade Cinemática a 40°C	Mm <sup>2</sup> /s	3,0-6,0
Teor de Água, máx. (2)	mg/kg	500
Contaminação Total, máx.	mg/kg	24
Ponto de fulgor, mín. (3)	°C	100,0
Teor de éster, mín	% massa	96,5
Resíduo de carbono (4)	% massa	0,050
Cinzas sulfatadas, máx.	% massa	0,020
Enxofre total, máx.	mg/kg	50
Sódio + Potássio, máx.	mg/kg	5
Cálcio + Magnésio, máx.	mg/kg	5
Fósforo, máx.	mg/kg	10
Corrosividade ao cobre, 3h a 50 °C, máx.	-	1
Número de Cetano (5)	-	Anotar
Ponto de entupimento de filtro a frio,máx.	°C	19 (7)
Índice de acidez, máx.	mg KOH/g	0,50
Glicerol livre, máx.	% massa	0,02
Glicerol total, máx.	% massa	0,25
Mono, di, triacilglicerol (5)	% massa	Anotar
Metanol ou Etanol, máx	% massa	0,20
Índice de lodo (5)	g/100g	Anotar
Estabilidade à oxidação a 110°C, mín.(2)	h	6

Nota:

- (1) Límpido e isento de impurezas com anotação da temperatura de ensaio.
- (2) O limite indicado deve ser atendido na certificação do biodiesel pelo produtor ou importador.
- (3) Quando a análise de ponto de fulgor resultar em valor superior a 130°C, fica dispensada a análise de teor de metanol ou etanol.
- (4) O resíduo deve ser avaliado em 100% da amostra.
- (5) Estas características devem ser analisadas em conjunto com as demais constantes da tabela de especificação a cada trimestre civil.
- (6) Poderá ser utilizado como método alternativo o método ASTM D6890 para número de cetano.
- (7) O limite máximo de 19°C é válido para as regiões Sul, Sudeste, Centro-Oeste e Bahia, devendo ser anotado para as demais regiões. O biodiesel poderá ser entregue com temperaturas superiores ao limite supramencionado, caso haja acordo entre as partes envolvidas. Os métodos de análise indicados não podem ser empregados para biodiesel oriundo apenas de mamona.
- (8) Os métodos referenciados demandam validação para as matérias-primas não previstas no método e rota de produção etílica.

**Tabela 99 – Série histórica de produção, área plantada e produtividade de mamona no Brasil**

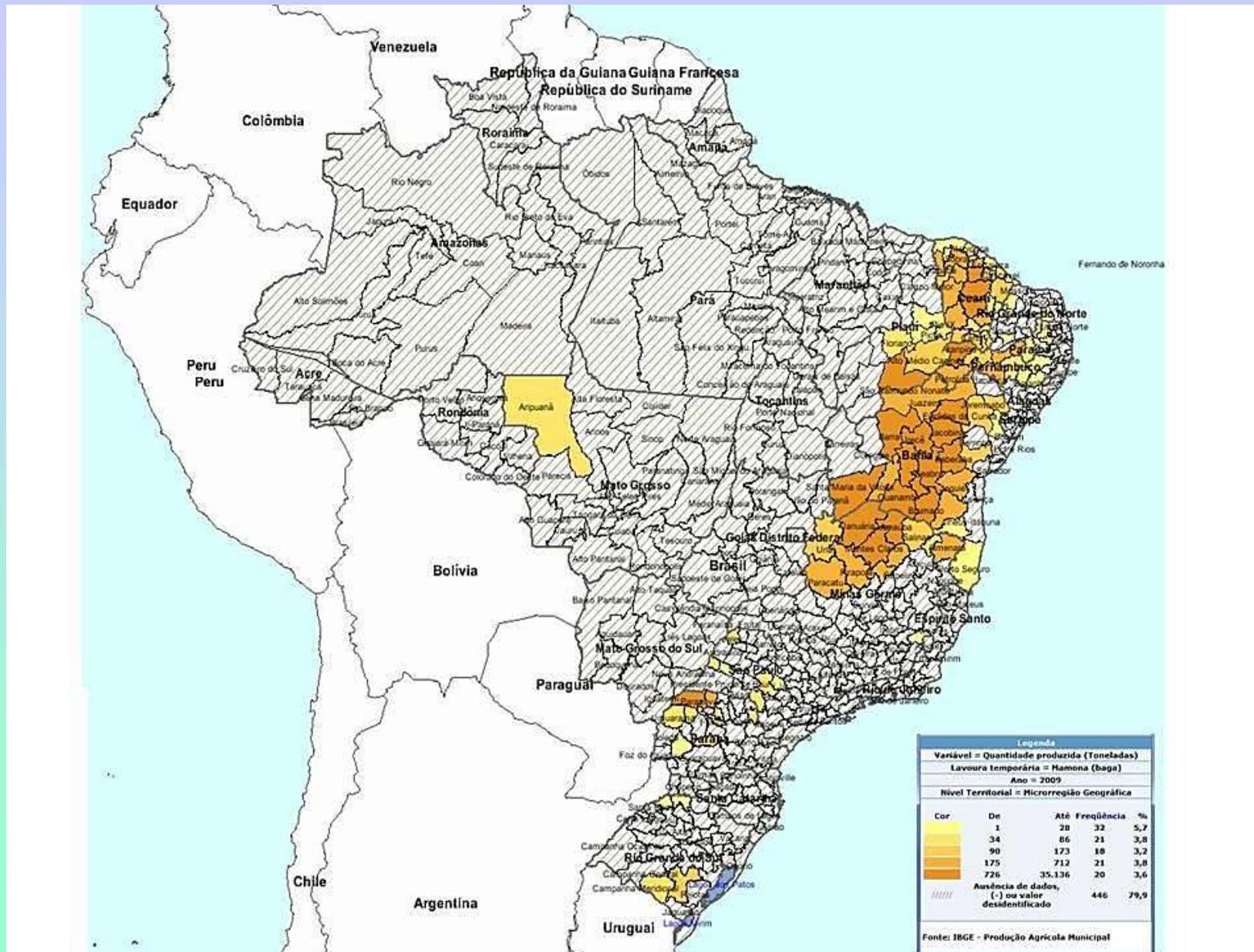
**Table 99 – Castorbean production, planted area and productivity in Brazil**

<b>Safra Harvest</b>	<b>Produção (mil toneladas) Production (thousand tons)</b>	<b>Área (mil hectares) Planted area (thousand ha)</b>	<b>Produtividade (kg/ha) Productivity (kg/ha)</b>
2004/05	210	215	975
2005/06	104	148	703
2006/07	94	156	602
2007/08	123	163	758
2008/09	93	158	587
2009/10	101	158	637
2010/11	141	219	644
2011/12	25	128	193
2012/13	16	87	180
2013/14	61	103	588

Fonte (source): Mapa/Conab

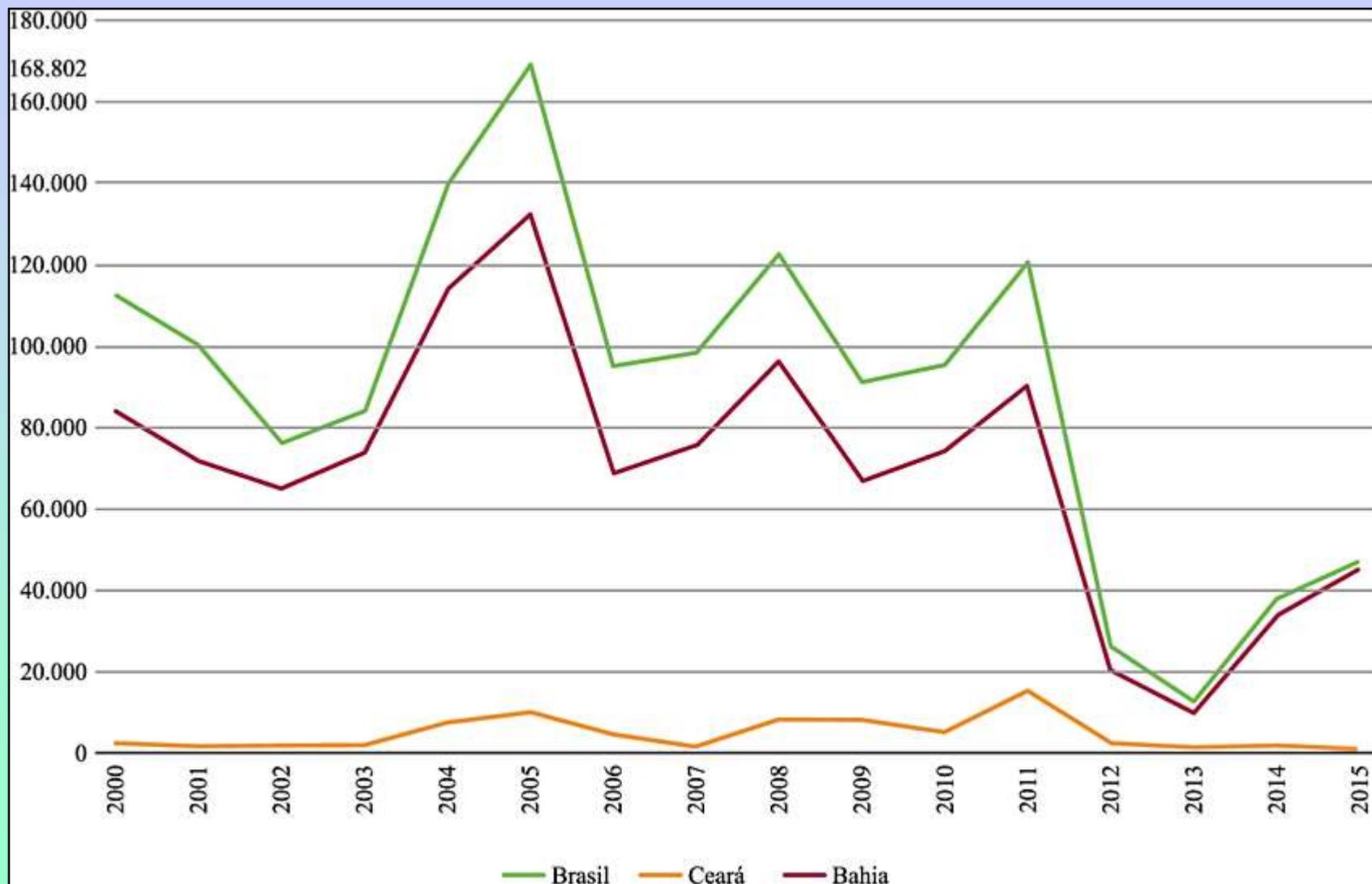
Fonte: MAPA/SPA-Ministério da Agricultura, Pecuária e Abastecimento/Secretaria de Produção e Agroenergia.  
Anuário Estatístico da Agroenergia: 2014, 2015.

Figura: Distribuição da produção de mamona no Brasil em 2009.



Fonte: EMBRAPA, 2013.

**Figura: Produção de Mamona no Brasil, na Bahia e no Ceará, no período de 2000 a 2015**



Fonte: Borba, M. M.; Ferreira, M. D. P. Variação da renda dos agricultores familiares e a competição por área agrícola no contexto do PNPB na Bahia e no Ceará. Revista econômica do Nordeste 50(2), p. 163-181, agosto/2019.



**RESOLUÇÃO ANP Nº 7, DE 19.3.2008**

Estabelece a especificação do biodiesel a ser comercializado pelos diversos agentes econômicos autorizados em todo o território nacional.

Parágrafo único. O biodiesel deverá ser adicionado ao óleo diesel na proporção de 5%, em volume, a partir de 1º de janeiro de 2010.

CARACTERÍSTICA	UNIDADE	LIMITE
Aspecto	-	LII (1)
Massa específica a 20° C	kg/m <sup>3</sup>	850-900
Viscosidade Cinemática a 40°C	Mm <sup>2</sup> /s	3,0-6,0
Teor de Água, máx. (2)	mg/kg	500
Contaminação Total, máx.	mg/kg	24
Ponto de fulgor, mín. (3)	°C	100,0
Teor de éster, mín	% massa	96,5
Resíduo de carbono (4)	% massa	0,050
Cinzas sulfatadas, máx.	% massa	0,020
Enxofre total, máx.	mg/kg	50
Sódio + Potássio, máx.	mg/kg	5
Cálcio + Magnésio, máx.	mg/kg	5
Fósforo, máx.	mg/kg	10
Corrosividade ao cobre, 3h a 50 °C, máx.	-	1
Número de Cetano (5)	-	Anotar
Ponto de entupimento de filtro a frio,máx.	°C	19 (7)
Índice de acidez, máx.	mg KOH/g	0,50
Glicerol livre, máx.	% massa	0,02
Glicerol total, máx.	% massa	0,25
Mono, di, triacilglicerol (5)	% massa	Anotar
Metanol ou Etanol, máx	% massa	0,20
Índice de Iodo (5)	g/100g	Anotar
Estabilidade à oxidação a 110°C, mín.(2)	h	12

Nota:

- (1) Límpido e isento de impurezas com anotação da temperatura de ensaio.
- (2) O limite indicado deve ser atendido na certificação do biodiesel pelo produtor ou importador.
- (3) Quando a análise de ponto de fulgor resultar em valor superior a 130°C, fica dispensada a análise de teor de metanol ou etanol.
- (4) O resíduo deve ser avaliado em 100% da amostra.
- (5) Estas características devem ser analisadas em conjunto com as demais constantes da tabela de especificação a cada trimestre civil.
- (6) Poderá ser utilizado como método alternativo o método ASTM D6890 para número de cetano.
- (7) O limite máximo de 19°C é válido para as regiões Sul, Sudeste, Centro-Oeste e Bahia, devendo ser anotado para as demais regiões. O biodiesel poderá ser entregue com temperaturas superiores ao limite supramencionado, caso haja acordo entre as partes envolvidas. Os métodos de análise indicados não podem ser empregados para biodiesel oriundo apenas de mamona.
- (8) Os métodos referenciados demandam validação para as matérias-primas não previstas no método e rota de produção etílica.

## Biodiesel – Especificação

A estabilidade à oxidação e o índice de cetano são parâmetros que merecem destaque, sobretudo em climas quentes, na medida em que é relevante assegurar que, mesmo depois de algumas semanas armazenado em condições normais, o biodiesel mantenha sua adequada especificação.

**Estabilidade à oxidação:** O biodiesel é suscetível à oxidação quando exposto ao ar e o processo de oxidação deteriora a qualidade do combustível, podendo resultar em elevada acidez e viscosidade, formação de gomas e sedimentos, e conseqüentemente entupimento dos filtros. A composição do óleo vegetal utilizado como matéria-prima em termos de ácidos graxos é um fator importante na determinação da estabilidade à oxidação. O índice à oxidação é conhecido como PI. Trata-se de um parâmetro comparativo muito utilizado para controle de qualidade de matérias-primas e de processo para se avaliar diferentes tipos de óleo, alterações na composição de ácidos graxos, eficiência na adição de antioxidantes, entre outros.

**Índice de cetano:** O número de cetano mede a qualidade de ignição de um combustível para máquina diesel e tem influência direta na partida do motor e no seu funcionamento sob carga. Baixos valores de índice de cetano acarretam dificuldades de partida a frio, depósito nos pistões e mau funcionamento do motor. Valores altos de índice de cetano apresentam as seguintes influências: facilita a partida a frio do motor; permite aquecimento mais rápido do motor; reduz a possibilidade de erosão dos pistões; impede a ocorrência de pós-ignição; possibilita funcionamento do motor com baixo nível de ruído; minimiza a emissão de poluentes como hidrocarbonetos, monóxido de carbono e material particulado.

Nota: relação de equivalência de 0,919 do biodiesel comparado com o diesel mineral, em termos de poder calorífico.

Cf. ENERS (2010), biodiesel possui uma média de 0,792 tep/1.000 litros, enquanto que o diesel mineral possui uma média de 0,862 tep/1.000 litros.

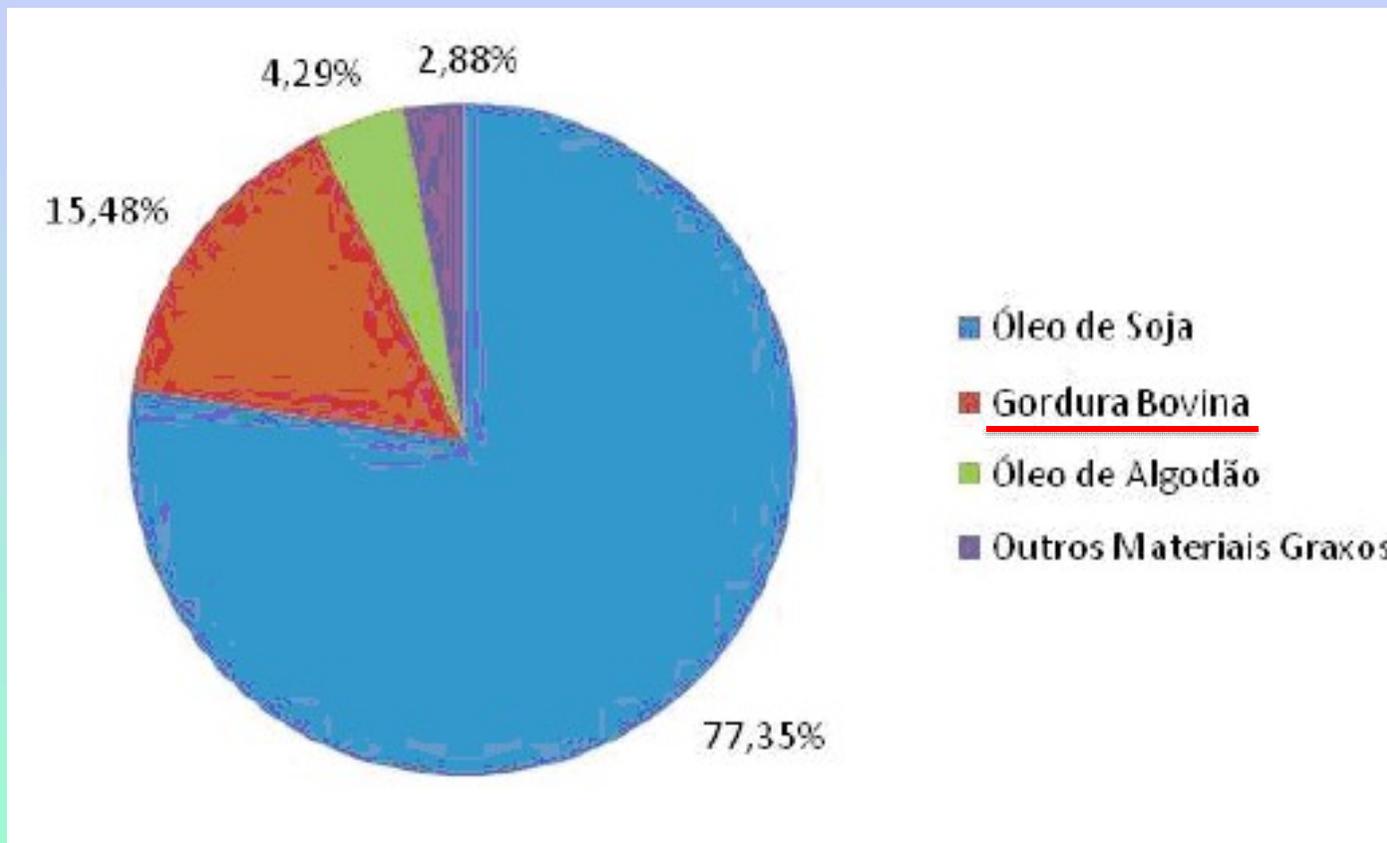
**A relação entre a eficiência dos motores e o uso de biodiesel parece ainda não estar bem definida no meio científico-tecnológico. Entretanto, estudos preliminares feitos na Europa indicam que a mistura de até 20% do biodiesel não representa perdas de eficiência no rendimento dos motores de combustão interna.**

**Knothe *et al.* (2003) e Korus *et al.* (2002) realizaram testes com uma mistura de 20% de biodiesel no diesel usado em ônibus e outros veículos pesados. Verificaram uma pequena diminuição da performance dos motores, indicada por um pequeno aumento no consumo de combustível e pela diminuição de 2% a 5% no rendimento do motor.**

KNOTHE, G.; DUNN, R. O.; BAGBY, M.O. Biodiesel:the use of vegetable oils and their derivatives as alternative diesel fuel. National Center for Agricultural Utilization Reaserch, Peoria, 2003.

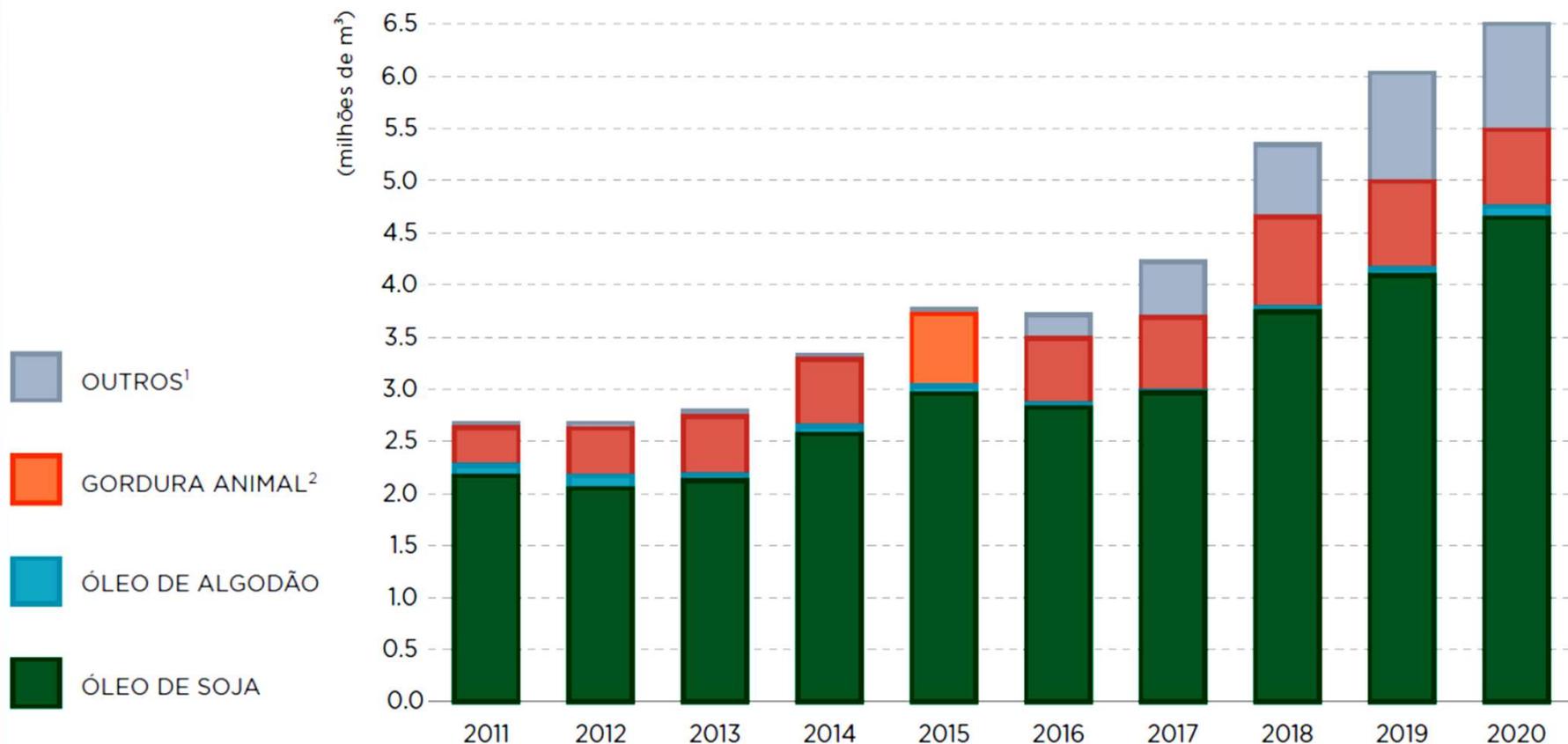
KORUS, R.A.; HOFFMAN D.S.; BAN, N.; PETERSON, S.L. Transterification process to manufacture ethyl ester of rape oil. Department of Chemical Engineering, Universidade of Idaho, Moskow, 2002.

## Matérias-primas utilizadas para produção de biodiesel no Brasil



Fonte: ANP, outubro de 2009.

**GRÁFICO 4.14. MATÉRIAS-PRIMAS UTILIZADAS NA PRODUÇÃO DE BIODIESEL (B100) - 2011-2020**



**FONTE:** ANP/SPC (Tabela 4.13).

<sup>1</sup>Inclui óleo de palma, óleo de amendoim, óleo de nabo-forrageiro, óleo de girassol, óleo de canola, óleo de milho, óleo de palmiste, óleo de fritura usado e outros materiais graxos. <sup>2</sup>Inclui gordura bovina, gordura de frango e gordura de porco.

Capacidade Instalada em 2020: 10,2 milhões de m³

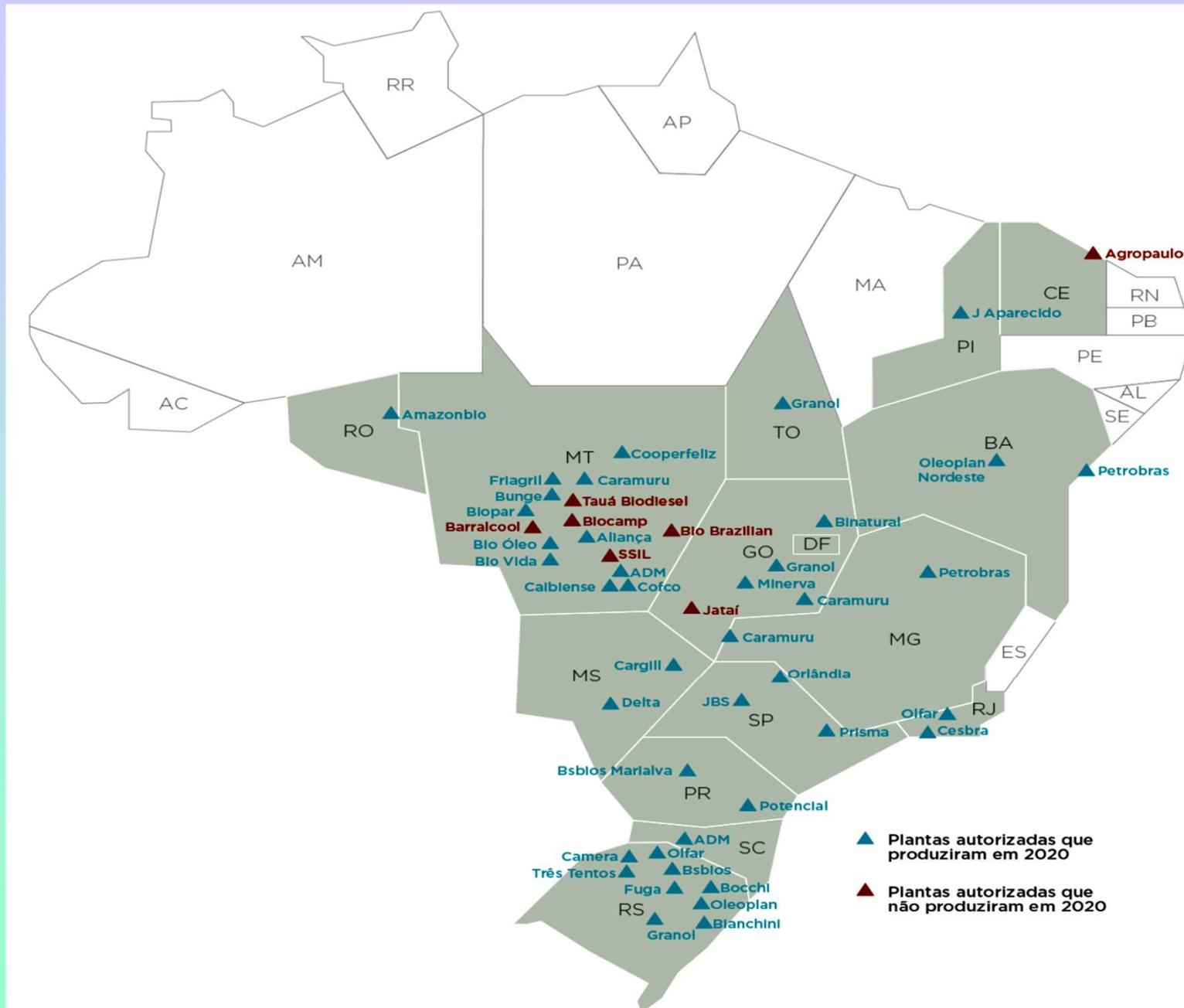
Produção total em 2018: 6,4 milhões de m³ (62,9%)

Óleo de soja: 71,4%      Óleo de algodão: 1,7%

Gordura animal: 11,3%      Outros: 15,6%

Fonte: ANP. Anuário estatístico brasileiro do Petróleo, Gás natural e Biocombustíveis 2021, 2022.

## Infraestrutura da produção de biodiesel no Brasil - 2020



Fonte: ANP. Anuário estatístico brasileiro do Petróleo, Gás natural e Biocombustíveis 2021, 2022.

O **sebo bovino** é uma gordura de origem animal que se apresenta pastosa à temperatura ambiente, de cor esbranquiçada com odor característico, o qual pode ser extraído de qualquer parte do animal.

A qualidade do produto final está relacionada com a qualidade da matéria-prima utilizada e com um bom controle de qualidade do processo e transporte.

Cada boi abatido fornece, em média, 15 quilos de sebo aproveitável, sendo que o sebo junto da pele não é usado.

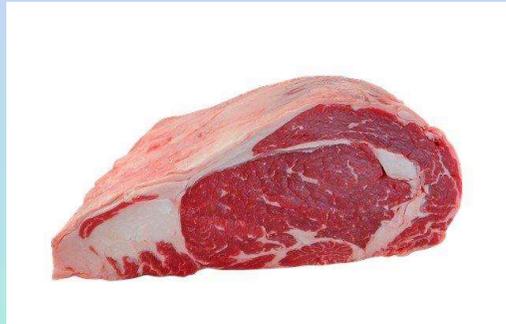
A principal utilização do sebo atualmente é na fabricação de sabão, tanto os mais simples, para uso em limpeza, até os mais sofisticados sabonetes. O sebo também pode ser utilizado na fabricação de ração, por ser uma boa fonte de energia para os animais, na produção de lubrificante, uso veterinário e conservação de couro, entre outros.

O sebo bovino é uma das matérias-primas mais baratas dentre as disponíveis atualmente para a produção de biodiesel no Brasil. Enquanto a mamona custa R\$ 4.100,00 por tonelada, o preço do sebo bovino é da ordem de R\$ 2.000,00 por tonelada (REVISTA BIODIESEL, 2008).

Estima-se que no Brasil sejam abatidas mais de 40 milhões de cabeças de gado por ano, das quais se extrai aproximadamente 800 milhões de quilos de sebo.

Metade dessa produção, ou seja, algo como 400 milhões de quilos, é destinada à fabricação do biodiesel utilizado nos veículos brasileiros. (MAPA, 2014). De qualquer forma, esse contexto conduz a um grande excedente de sebo animal. Só na Grande São Paulo, estima-se que os frigoríficos e açougues gerem diariamente 800 toneladas de resíduos oriundos de restos de animais, especialmente bois e aves (MAPA, 2014).

## Biodiesel - Processos de Produção



Para ser utilizado na produção de biodiesel, o sebo deve estar líquido. O transporte da gordura até a indústria de biodiesel deve possuir sistema de aquecimento adequado, pois a 45 °C o sebo já apresenta fase sólida. O ponto de congelamento do sebo puro é de aproximadamente 12 °C.

O primeiro biodiesel obtido a partir de sebo bovino foi produzido na Itália. No Brasil, foi inicialmente produzido pela Petrobrás, apresentando características físico-químicas dentro dos limites estabelecido pela ANP.

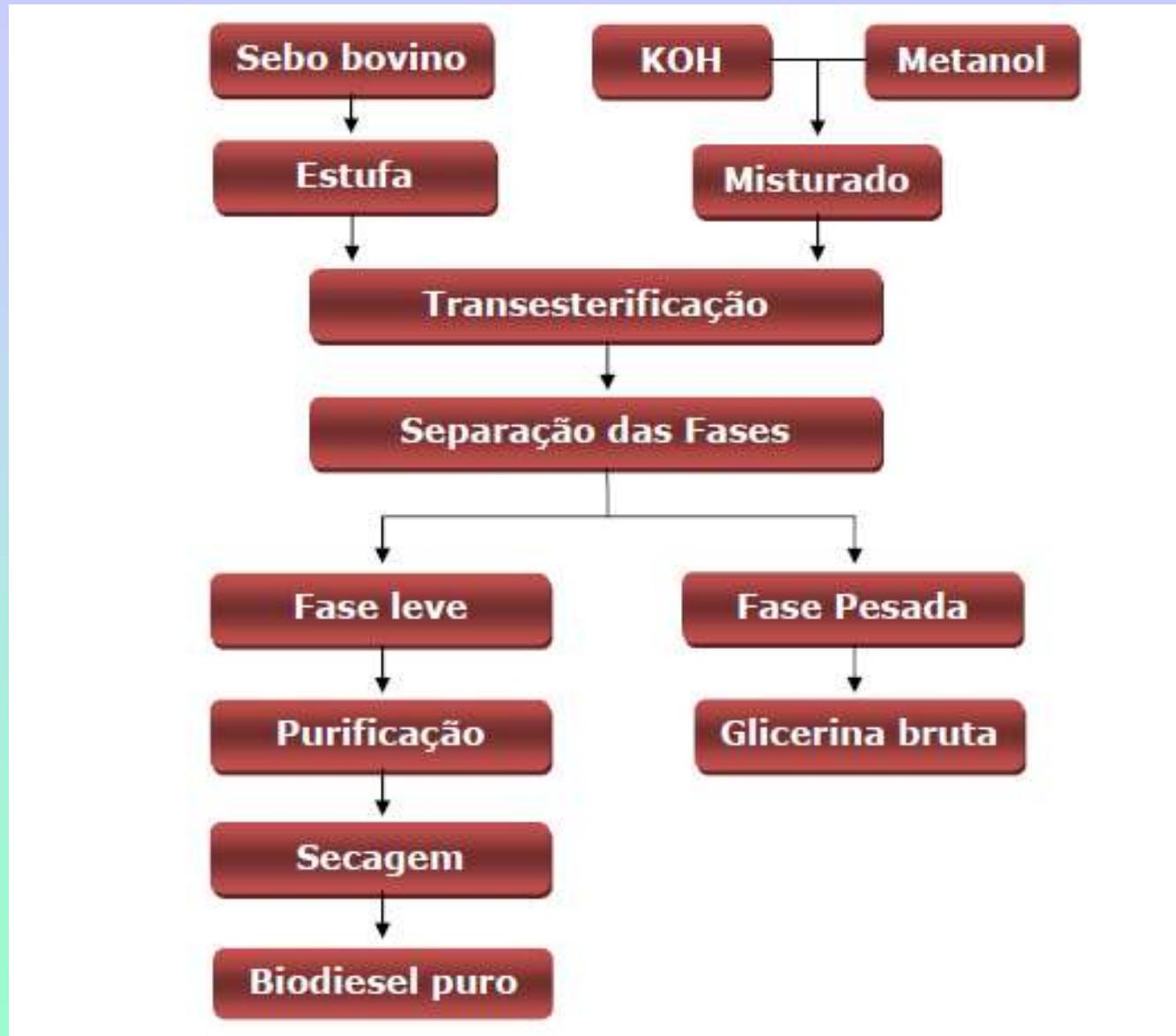
Na preparação da matéria-prima para sua transformação em biodiesel, visa-se obter condições favoráveis para a reação de transesterificação e assim alcançar a maior taxa de conversão possível.

Primeiramente, a matéria prima deve ter o mínimo de umidade e acidez, o que pode ser realizado através dos processos de desumidificação e de neutralização.

As diferenças estão nos tipos e distribuições dos ácidos graxos combinados com o glicerol. As empresas que produzem biodiesel normalmente exigem de seus fornecedores o sebo nas condições ideais para a fabricação de biodiesel. Os tratamentos físico-químicos são realizados em graxarias, ou seja, dentro do próprio local de abate.

A complicação de se utilizar o sebo bovino na transesterificação consiste no fato da matéria-prima se oxidar com o tempo, aumentando sua acidez e elevando o custo do processo.

## Biodiesel - Processos de Produção

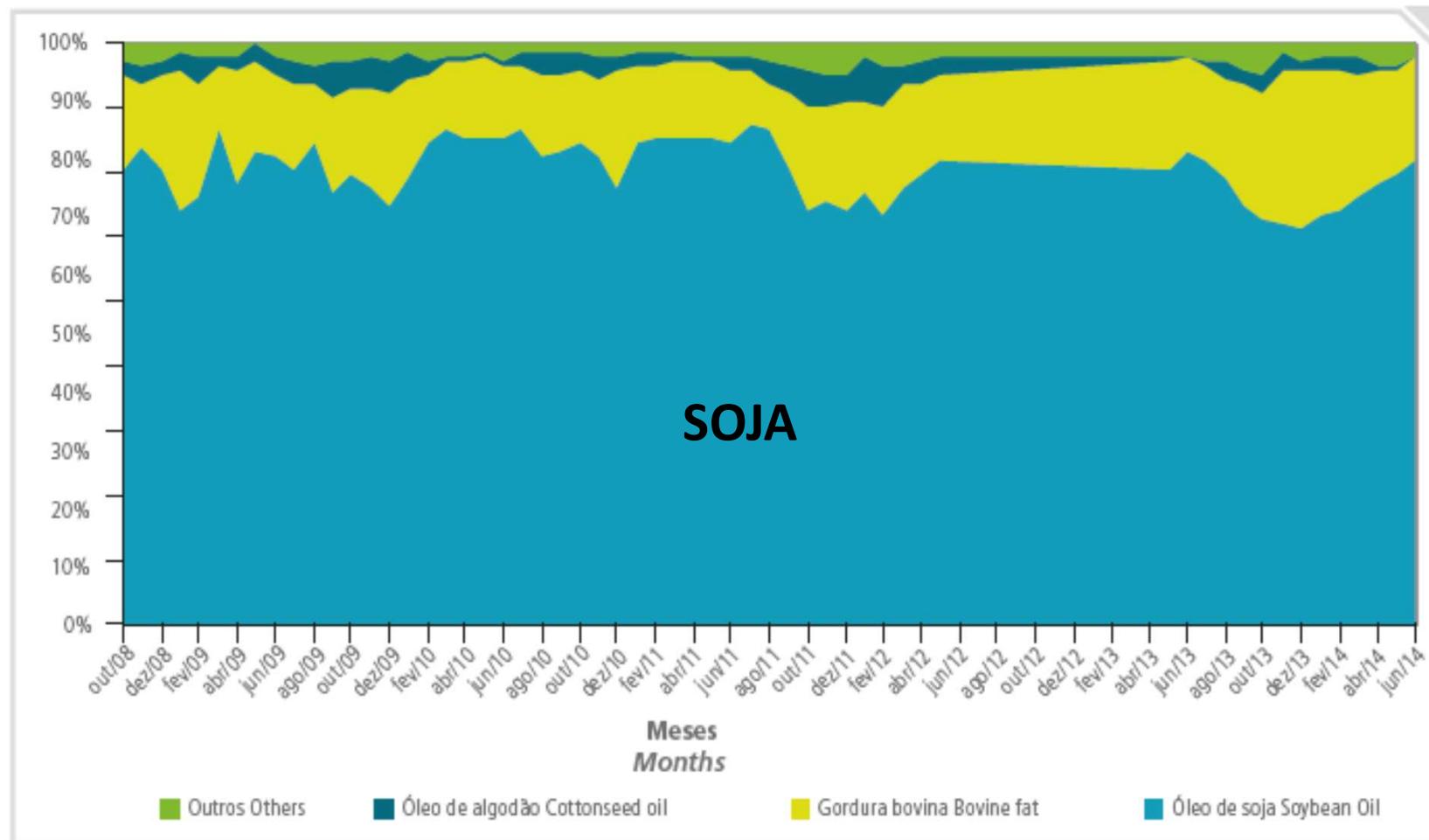


**Esquema do processo utilizado para produção do biodiesel a partir do sebo bovino**

Fonte: MOURA, Kátia R.M. "Otimização do processo de produção de biodiesel metílico do sebo bovino (...). Tese de Doutorado. Universidade Federal da Paraíba, 2008.

**Gráfico 130 – Participação das matérias-primas utilizadas na produção de biodiesel no Brasil, em porcentagem**

**Chart 130 – Share of raw materials used in biodiesel production in Brazil, in percentage**



Fonte: MAPA/SPA-Ministério da Agricultura, Pecuária e Abastecimento/Secretaria de Produção e Agroenergia. Anuário Estatístico da Agroenergia: 2014, 2015.

**Evolução da produção, área plantada e produtividade da soja no Brasil – 1990 a 2014**

<b>Safra</b>	<b>Produção (milhões t)</b>	<b>Área Plantada (milhões ha)</b>	<b>Produtividade (kg/ha)</b>
1990/91	15,39	9,7	1.580
1995/96	23,19	10,7	2.175
2000/01	38,43	14,0	2.751
2003/04	49,79	21,4	2.329
2005/06	55,03	22,7	2.419
2007/08	60,02	21,3	2.816
2008/09	57,63	21,56	2.674
2009/10	68,69	23,47	2.927
2010/11	75,32	24,18	3.115
2011/12	66,38	25,04	2.651
2012/13	81,50	27,74	2.938
2013/14	86,27	30,11	2.865

Fonte: MAPA/SPA-Ministério da Agricultura, Pecuária e Abastecimento/Secretaria de Produção e Agroenergia.  
Anuário Estatístico da Agroenergia: 2014, 2015. (Dados 1990/91 a 2003/04 em MAPA, 2009).

## Biodiesel da soja

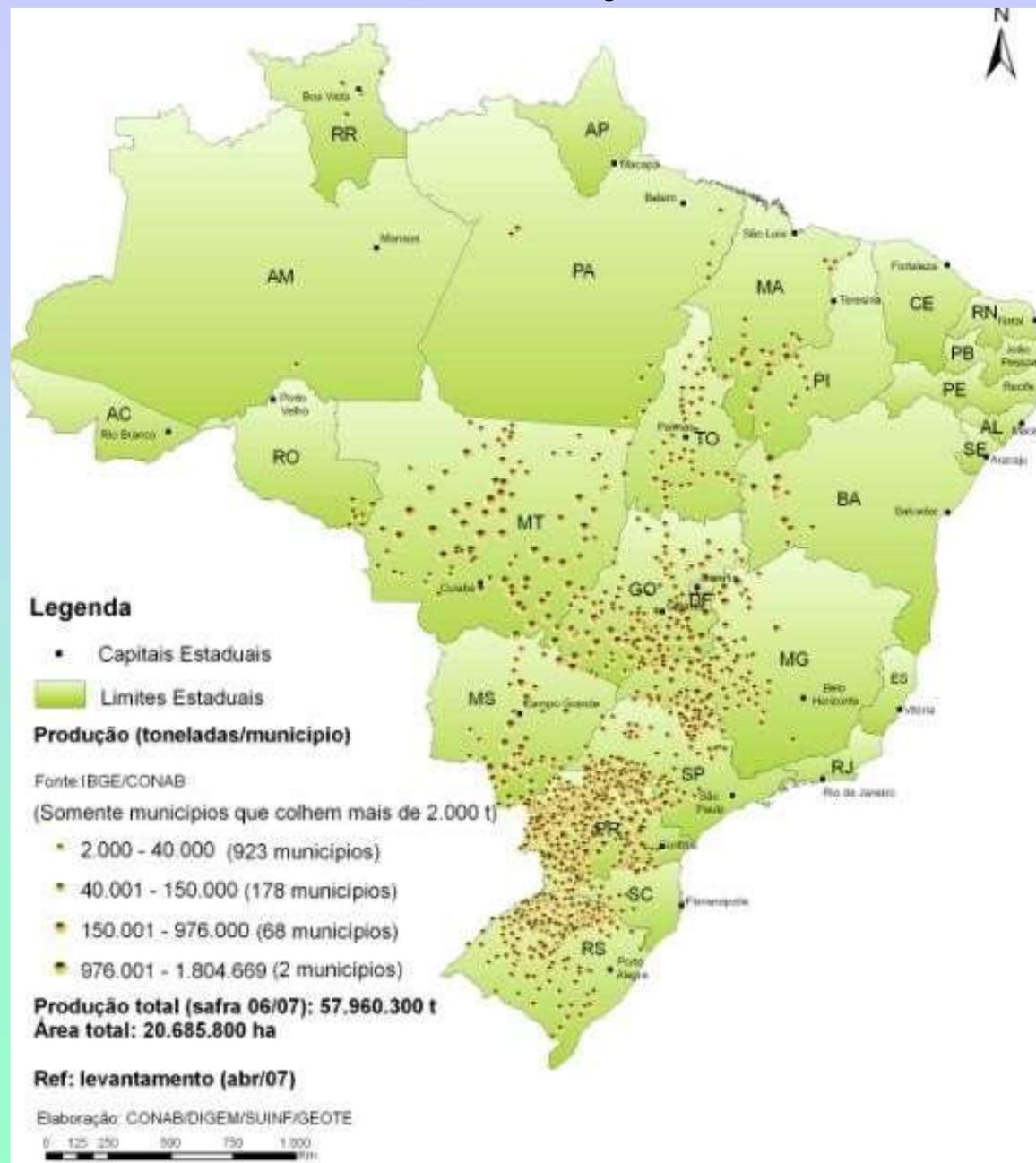
<b>Safra</b>	<b>Produção (milhões t)</b>	<b>Área Plantada (milhões ha)</b>	<b>Produtividade (kg/ha)</b>
2013/2014	86,27	30,11	2.865
2020/2021 <sup>1</sup>	135,41	38,50	3.517
2021/2022 <sup>2</sup>	142,79	40,35	3.359

Fonte: <sup>1</sup> EMBRAPA, Soja em números (safra 2020/21), com base em CONAB, 05/2021.

<sup>2</sup> CONAB, Acompanhamento: safra brasileira de grãos, v.9, 12/2021.

# Produção de Soja no Brasil

## Biodiesel da soja



Fonte: CONAB, 2008.

## Biodiesel da soja



Fonte: <http://www.socioambiental.org/esp/soja.br>

**Figura 1: Soja na Floresta Amazônica**



Fonte: <http://www.socioambiental.org/esp/soja.br>

**Figura 2: Trator encoberto pela poeira preparando o plantio, com floresta remanescente ao fundo em Canarana – MT.**

## Biodiesel da soja



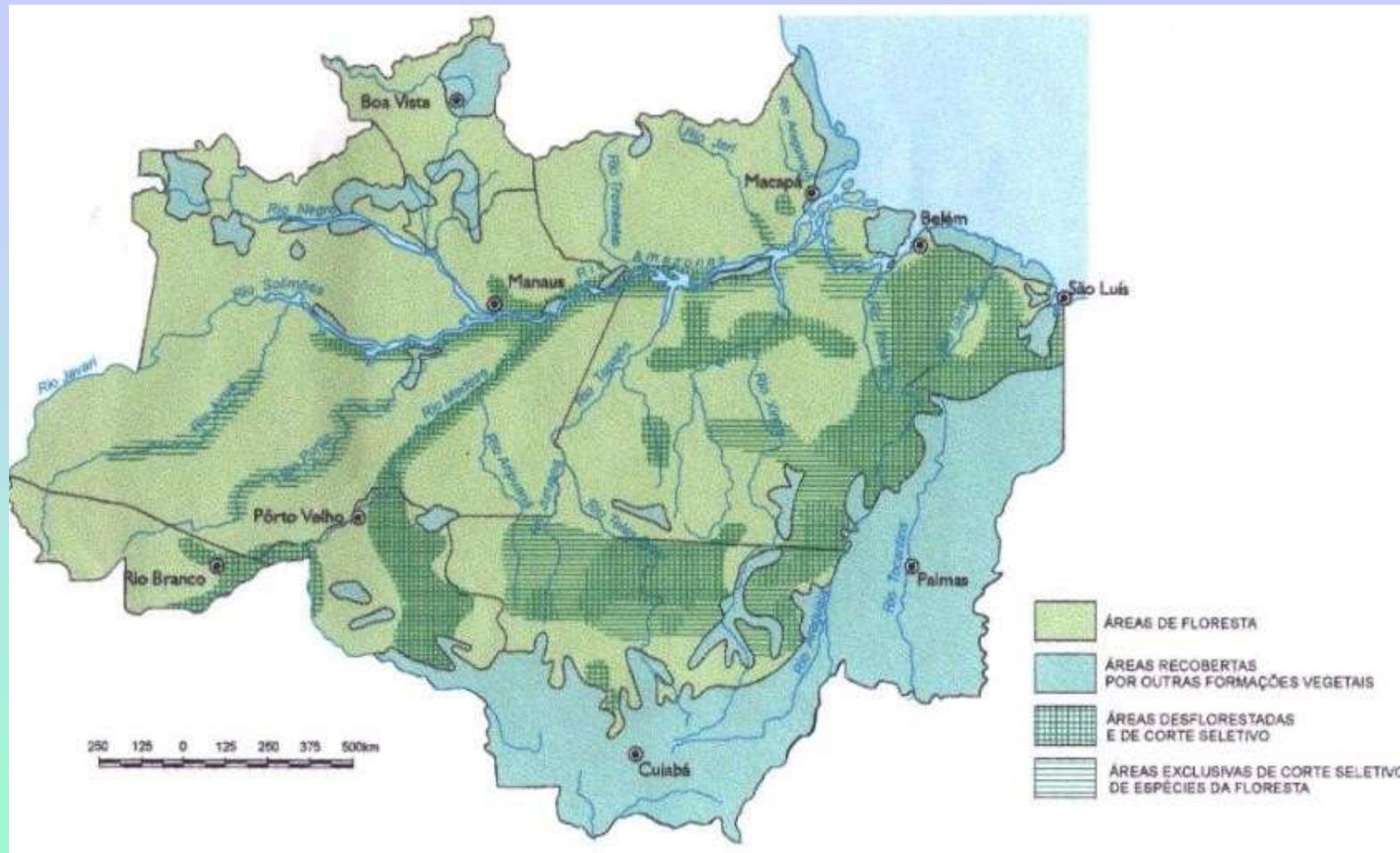
Fonte: Pesquisa de campo, 26/09/2009.

**Figura 3: Interface entre área de preparo de solo para Plantio de soja e Floresta Amazônica.**



Fonte: <http://www.socioambiental.org/esp/soja.br>

**Figura 4: Plantação de soja na floresta.**



Fonte: IBGE, 2000

**Figura – Arco de deflorestamento da Amazônia**

**Problemas ambientais da cultura da soja (Mueller, 1995):**

- a) compactação e impermeabilização dos solos pelo uso intensivo de máquinas agrícolas;
- b) erosão;
- c) contaminação por agrotóxicos nas águas, alimentos e animais;
- d) impactos danosos da retirada da vegetação nativa de áreas contínuas extensas;
- e) assoreamento de rios e reservatórios;
- f) aparecimento de novas pragas ou aumento das já conhecidas;
- g) risco à sobrevivência de espécies vegetais e animais com a perda de habitat natural devido a expansão agrícola (Cunha, 1994).

Bibliografia:

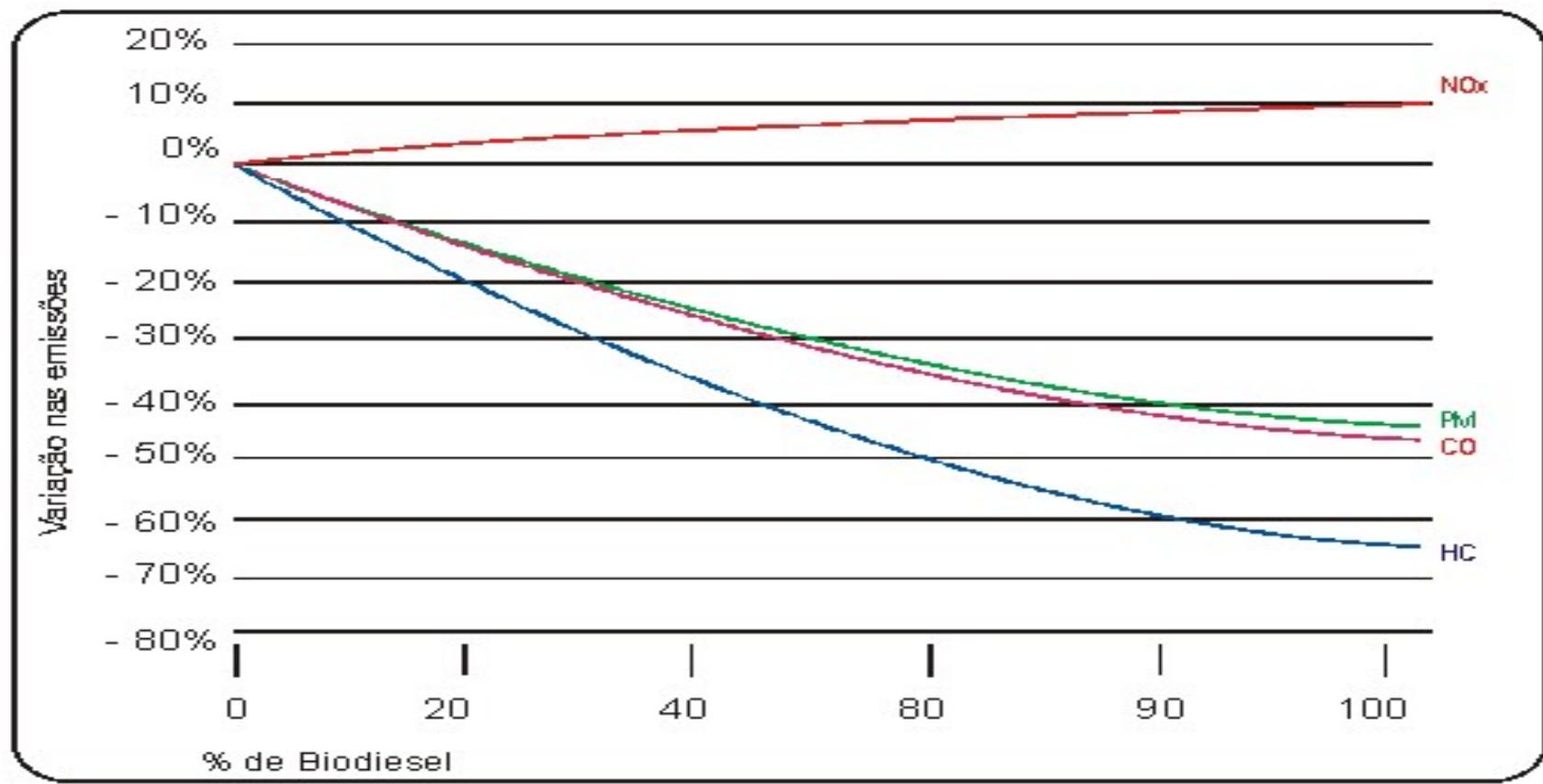
CUNHA, A. S. (coord.) *Uma avaliação da sustentabilidade da agricultura nos cerrados*. Brasília: IPEA, 1994.

MUELLER, C. *A sustentabilidade da expansão agrícola nos cerrados*. Instituto Sociedade, População e Natureza. Documento de Trabalho n.36, 1995. (mimeo).

## Emissões de poluentes das diversas composições de Biodiesel

<b>Poluente</b>	<b>B100</b> (100% de biodiesel)	<b>B20</b> (20% de biodiesel)	<b>B10</b> (10% de biodiesel)	<b>B5</b> (5% de biodiesel)
Gases de Efeito Estufa	-78	-15	-7,5	-3,75
Óxidos de Enxofre (SO <sub>x</sub> )	-98	-19	-9,5	-4,95
Material Particulado	-50	-10	-5	-2,5
Óxidos de Nitrogênio (NO <sub>x</sub> )	+13	+2,5	+1,3	+0,65

Fonte: BERMANN, C. (org.). As novas energias no Brasil: Dilemas da inclusão social e programas de Governo. Rio de Janeiro,: FASE, 2007.



Fonte: Meirelles, 2005.

### Gráfico – Efeito do biodiesel sobre as emissões associadas ao diesel

MEIRELLES, Fabio de Salles. *O Biodiesel no Brasil e seus impactos sobre agricultura*. São Paulo: Federação da Agricultura do Estado de São Paulo, 2005.

# **Biodiesel das Algas**

Combustível de algas ou biocombustível de algas é uma alternativa ao combustível fóssil que utiliza algas como fonte para a obtenção de óleo vegetal.

Várias empresas e agências governamentais financiam os esforços para reduzir os custos de capital e operacionais e melhorar a produção de combustível de algas comercialmente viável.

O óleo vegetal das algas, como os combustíveis fósseis, libera CO<sub>2</sub> quando queimado, mas ao contrário dos combustíveis fósseis, o CO<sub>2</sub> é retirado da atmosfera pelo crescimento de algas e outras fontes de biocombustível. A crise energética e a crise mundial de alimentos tem despertado o interesse na aquacultura (agricultura de algas) para produzir óleo vegetal, biodiesel, bioetanol, biogasolina, biometanol, biobutanol e outros biocombustíveis.

Entre as características atraentes dos combustíveis das algas: elas podem ser cultivadas com impacto mínimo sobre os recursos de água doce, podem ser produzidas usando o oceano e águas residuais e são biodegradáveis e relativamente inofensivas ao meio ambiente.

As algas custam mais por unidade de massa (cerca de US\$ 5000 por tonelada em 2010) devido ao elevado de capital e custos operacionais. No entanto, apresentam um rendimento entre 10 e 100 vezes de mais combustível por unidade de área em comparação com outras culturas de biocombustível, inclusive as de segunda geração.

O Departamento de Energia dos Estados Unidos estima que para substituir todo o combustível de petróleo consumido nos EUA, seriam necessárias 15.000 milhas quadradas (39.000 km<sup>2</sup>), ou apenas 0,42% da superfície do território dos EUA. Isto é menos do que 1/7 a área de milho colhida nos Estados Unidos em 2000.

## **Espécies de Algas**

A pesquisa com algas para a produção em massa de óleo vegetal concentra-se principalmente em microalgas (organismos capazes da fotossíntese com menos de 0,4 mm de diâmetro, incluindo as diatomáceas e as cianobactérias) e em oposição a macroalga. A preferência por microalgas advém em grande parte de sua estrutura menos complexa, taxas de crescimento rápido e elevado teor de óleo (para algumas espécies).

No entanto, pesquisas estão sendo feitas para utilizar algas para biocombustíveis, provavelmente devido à alta disponibilidade deste recurso. A partir de 2012, pesquisadores em vários locais em todo o mundo começaram a investigar as seguintes espécies para sua adequação para a produção de óleo vegetal:

- Botryococcus braunii
- Chlorella
- Dunaliella tertiolecta
- Gracilaria
- Pleurochrysis carterae (também chamado CCMP647)
- Sargassum, (com 10 vezes o volume de produção da Gracilaria).

## Espécies de Algas

A quantidade de óleo que cada linhagem de algas produz varia amplamente. Segue abaixo, uma lista de microalgas e seus diversos rendimentos de óleo vegetal. O rendimento do biocombustível é proporcional à quantidade de conteúdo de lipídios presente nestas espécies de microalgas (unidade em ms: matéria seca):

- Ankistrodesmus TR 87: 28–40% ms
- Botryococcus braunii: 29–75% ms
- Chlorella sp.: 29% ms
- Chlorella protothecoides (autotrophic/ heterotrophic): 15–55% ms
- Cyclotella DI-35: 42% ms
- Dunaliella tertiolecta : 36–42% ms
- Hantzschia DI-160: 66% ms
- Nannochloris: 31 (6–63)% ms
- Nannochloropsis : 46 (31–68)% ms
- Nitzschia TR-114: 28–50% ms
- Phaeodactylum tricornutum: 31% ms
- Scenedesmus TR-84: 45% ms
- Stichococcus: 33 (9–59)% ms
- Tetraselmis suecica: 15–32% ms
- Thalassiosira pseudonana: 21–31% ms
- Cryptocodinium cohnii: 20% ms
- Nannochloris oleoabundans: 35–54% ms
- Schiochytrium: 50–77% ms

Note: US universities which are working on producing oil from algae include: Washington State University, Oregon State University, Arizona State University, The University of Arizona, University of Illinois at Urbana-Champaign, University of California San Diego, University of Nebraska Lincoln, University of Texas at Austin, University of Maine, University of Kansas, The College of William and Mary, Northern Illinois University, University of Texas at San Antonio, Old Dominion University, Utah State University, New Mexico State University, and Missouri University of Science and Technology.

# Sistemas de cultivo

- Sistemas abertos, fechados e híbridos;
- Dependem de:
- Características da microalga, custo da terra, disponibilidade da água, uso da luz, controle da temperatura e do pH, nível de contaminação e condições climáticas.

## Sistemas abertos

- Mais difundidos;
- Podem ser lagoas ou tanques;
- Operação e manutenção mais fáceis;
- Mais econômicos;
- Grandes áreas e baixas profundidades;
- Baixas concentrações e produtividade de biomassa ;
- Alto risco de contaminação;
- Perda de CO<sub>2</sub> e limitação luminosa e evaporação da água.



(Azeredo, 2012)



(Pandey, 2014)



Lagoa utilizada para cultivo de microalgas em larga escala

Fonte: Microalgenkwekerij te Heure bij Borculo.jpg

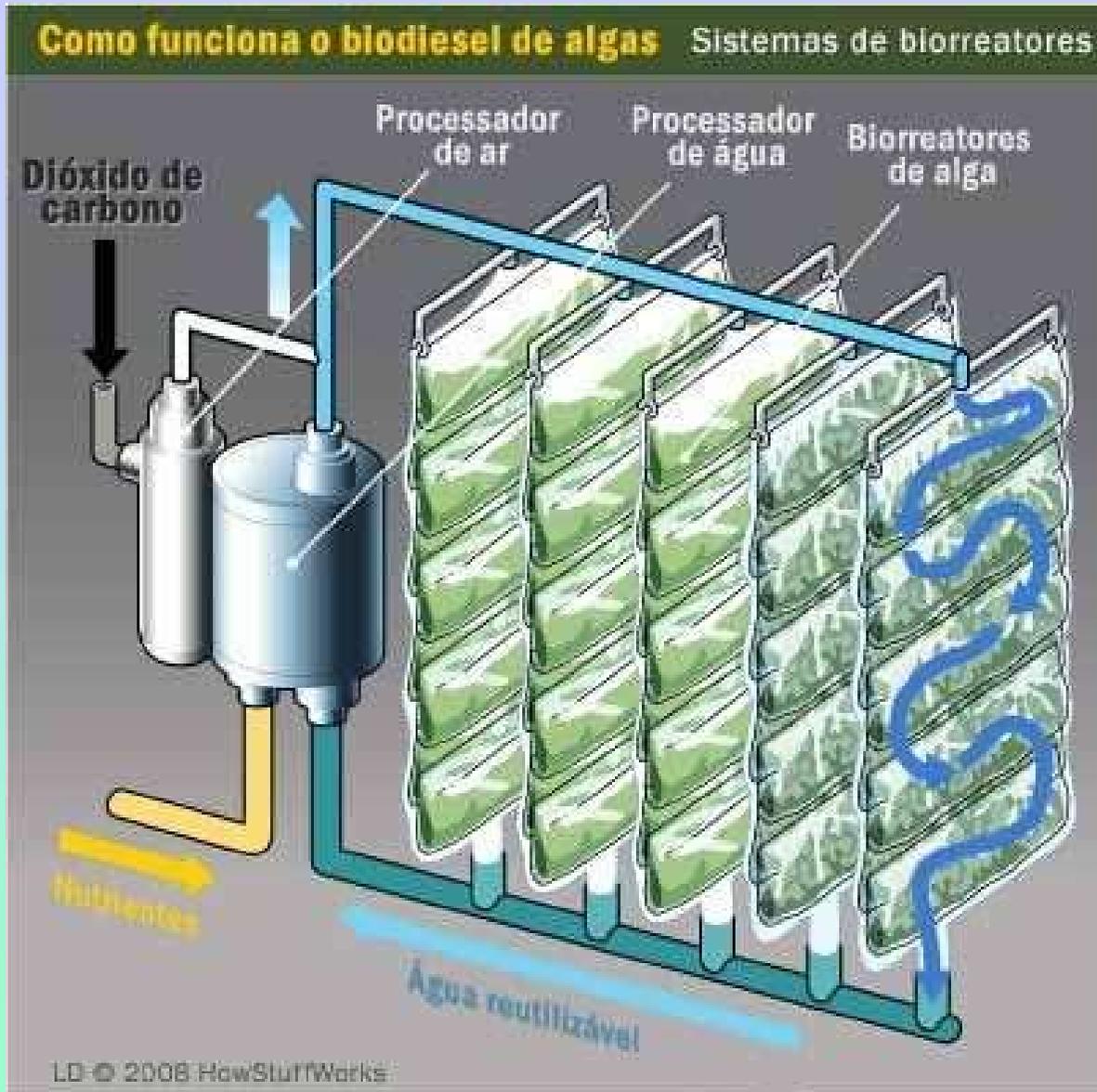
**Tabela 6: Produtividade em sistemas abertos.**

<b>Espécie</b>	<b>Produtividade (g/m<sup>2</sup>.d)</b>
<i>Chlorella sp.</i>	25
<i>Spirulina platensis</i>	14
<i>Haematococcus pluvialis</i>	15,1
<i>Spirulina sp.</i>	69,16
<i>Diversas</i>	19
<i>Spirulina platensis</i>	12,2
<i>Spirulina platensis</i>	19,4
<i>Anabaena sp.</i>	23,5
<i>Chlorella sp.</i>	23,5
<i>Chlorella sp.</i>	11,1
<i>Chlorella sp.</i>	32,2
<i>Chlorella sp.</i>	18,1

Fonte: Azeredo, 2012.

## **Sistemas fechados- fotobiorreatores**

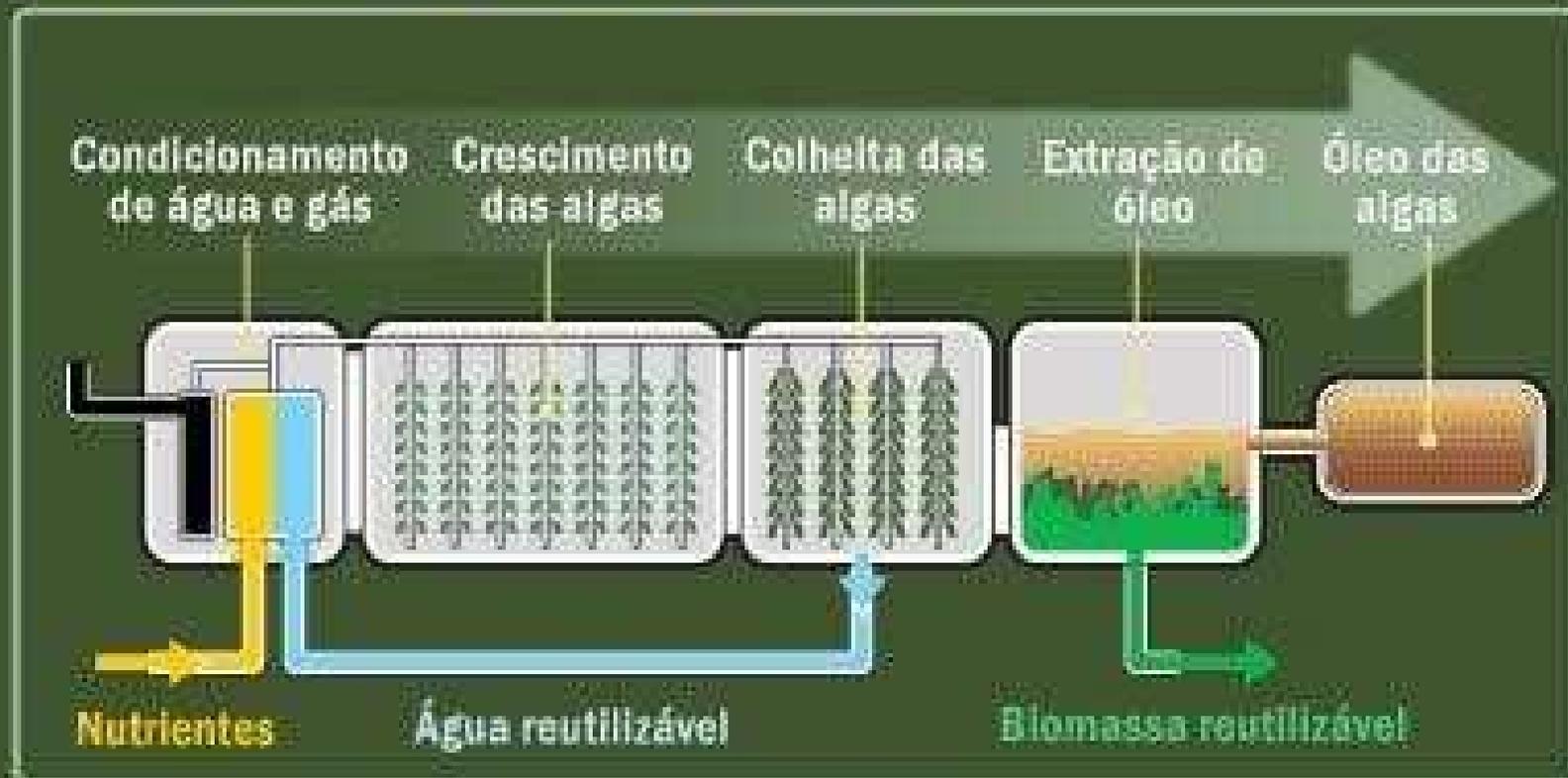
- Menos difundidos;
- Maior controle no processo de cultivo;
- Menor risco de contaminação e perdas;
- Maior produtividade, reprodutibilidade e concentração de biomassa;
- Alto custo de implantação e operacional;
- Formas construtivas: tubulares e planares.



Fonte: <http://1.bp.blogspot.com/-2G2IVbgT8K8/T85BIQN2w3I/AAAAAAAAA0k/31ca102VDIQ/s1600/algae-biodiesel-5.jpg>

## Como funciona o biodiesel de algas

## Processo do biorreator



LD © 2008 HowStuffWorks

Fonte: <http://alsanlab.com.br/home/wp-content/uploads/2013/09/algae-biodiesel-6.jpg>

Durante o processo de produção de biodiesel, as algas consomem dióxido de carbono. Em outras palavras, através da fotossíntese, as algas sugam o dióxido de carbono do ar, substituindo-o por oxigênio. Por esta razão, os produtores de biodiesel estão construindo usinas de biodiesel perto de usinas de produção de energia que produzem muito dióxido de carbono. A reciclagem do dióxido de carbono reduz a poluição.

As algas também podem ser usadas para a criação de alguns outros derivados úteis – fertilizante e matérias primas industriais – sem ocasionar o esgotamento de outras fontes de alimento.

O mais significativo do biodiesel de algas é a enorme quantidade que pode ser produzida. Produtores de biodiesel afirmam que poderão produzir mais de 100 mil galões de óleo de alga por acre anualmente, dependendo:

- do tipo de alga usada;
- do modo como as algas são plantadas;
- do método de extração de óleo.

Uma usina de algas de 100 acres teria potencial para produzir 10 milhões de galões de biodiesel em apenas um ano. A cada ano, estima-se que seriam necessários 140 bilhões de galões de biodiesel de algas para substituir o diesel derivado de petróleo. Assim, seriam necessários apenas de 95 milhões de acres de terras para construir usinas de biodiesel.

---

*Conversão: 1 acre = 4.047m<sup>2</sup> ou 0,4047 hectares  
1 galão = 3,79 litros*

A **prensagem de óleo** é o método mais simples e mais popular. É um conceito similar ao da prensagem do azeite. Até 75% do óleo das algas pode ser extraído através da prensagem.

Trata-se, basicamente de um processo em duas partes. O **método com solvente hexano** (combinado com a prensagem) extrai até 95% do óleo das algas. Primeiro, a prensa extrai o óleo. Depois, a sobra das algas é misturada com hexano, filtrada e limpa para não deixar nenhum químico no óleo.

Outro método é o de **fluidos supercríticos** que extrai até 100% do óleo das algas. O dióxido de carbono age como um fluido supercrítico quando a substância é prensada e aquecida para mudar sua composição tanto para líquido quanto para gás. Nesse ponto, o dióxido de carbono é misturado às algas. Quando combinados, o dióxido de carbono transforma totalmente a alga em óleo. O equipamento e o trabalho extras fazem desse método uma opção menos utilizado.

Uma vez extraído, o óleo é refinado usando-se cadeias de ácidos graxos no processo de **transesterificação**. Aqui, um catalisador como o hidróxido de sódio é misturado com um álcool como o metanol. Isto cria um combustível biodiesel combinado com um glicerol. A mistura é refinada para remover o glicerol. O produto final é o biodiesel das algas.

O processo de extração do óleo das algas é universal, mas as empresas que produzem biodiesel de algas estão usando diversos métodos para plantar algas em número suficiente para produzir grandes quantidades de óleo.

## **Cultivo das Algas**

Algas podem produzir cerca de 300 vezes mais óleo por unidade de área em relação a outras culturas convencionais de oleaginosas como soja, canola, jatropha, ou palma.

Como as algas têm um ciclo de crescimento de 1-10 dias, seu cultivo permite diversas colheitas num curto período de tempo, o que confere uma estratégia de aproveitamento bastante distinta das oleaginosas com ciclos anuais de cultura.

Algas podem crescer em terras impróprias para a agricultura: solos áridos, solos com salinidade excessiva, e terras atingidas pela seca. Isso minimiza a questão da substituição de terras de cultivo de alimentos (Schenk et al. 2008). Ainda, as algas podem crescer de 20 a 30 vezes mais rápido que culturas de alimentos.

## **Fotobioreatores**

A maioria das empresas têm buscado a produção de algas utilizando tubos de plástico ou vidro de borossilicato (chamado "biorreatores") que são expostos à luz solar (denominados Fotobiorreatores ou PBR - Photobioreactors). Esta tecnologia pode fornecer um nível maior de controle e produtividade.

Cepas de algas com menor teor de lipídios podem crescer 30 vezes mais rápido do que aquelas com alto teor lipídico. Os desafios na produção eficiente de biodiesel de algas estão na procura de uma estirpe de algas com uma combinação de alto teor lipídico e rápida taxa de crescimento.

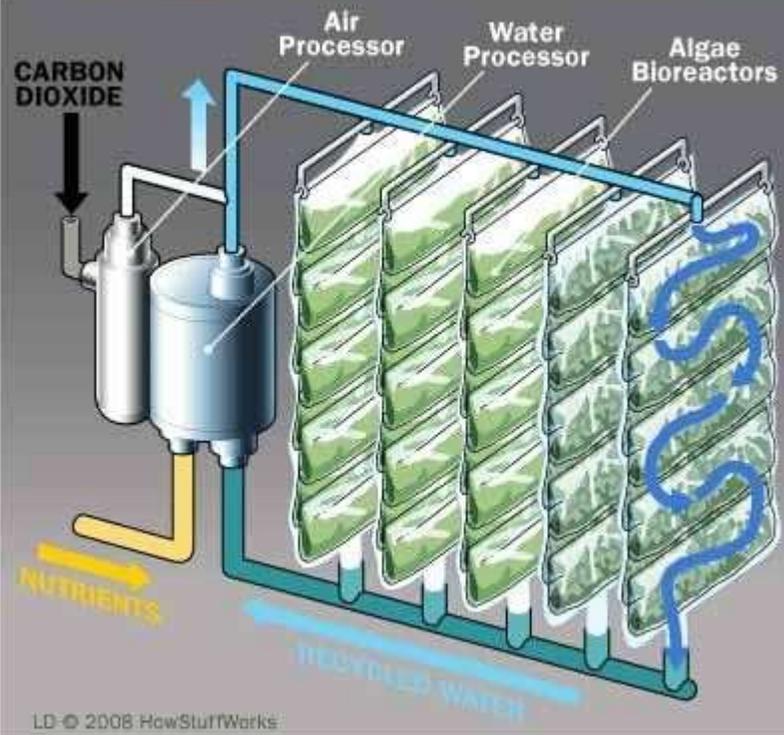
Há também uma necessidade de fornecer CO<sub>2</sub> concentrado para aumentar a taxa de produção.



Fotobiorreator tubular para a cultura de microalgas e de outros organismos fotossintéticos

Fonte: Photobioreactor PBR 4000 G IGV Biotech.jpg

### How Algae Biodiesel Works Bioreactor System



Available in: <http://static.ddmcdn.com/gif/algae-biodiesel-5.jpg>



Available in: <http://algaeformbiofuels.com/wp-content/uploads/2010/05/Biodiesel-and-Glycerine-from-Algae.jpg>

# Comparação dos Sistemas

## → Em relação ao sistema de cultivo

- Abertos
  - construção pode empregar materiais mais diversificados
  - manutenção facilitada
  - maior taxa de evaporação e suscetibilidade a contaminação
- Fechados
  - material de construção transparente
  - melhor aproveitamento da luz
  - maior controle de características

Parâmetro	Tanques ( <i>raceway</i> )	Sistemas fechados (fotobiorreatores)
Espaço requerido	muito	pouco
Risco de contaminação	alto	médio a baixo
Perdas de água	alto	baixo
Concentração de oxigênio	usualmente baixa	deve ser removido continuamente
CO <sub>2</sub> -perdas	alto	quase nenhuma
Reprodutibilidade da produção	variável, mas consistente	possível dentro de determinadas tolerâncias
Controle do processo	limitado	possível
Desgaste do material de construção	baixo	usualmente alto
Dependência de condições climáticas	alto	menor, por ser protegido
Temperatura	variável	necessário resfriamento
Custo de colheita	alto	médio
Manutenção	fácil	difícil
Custos de construção	médio	alto
Concentrações de biomassa na colheita	baixo	alto

Fonte: Franco et al., 2013.

## Outros sistemas de cultivo

- Sistemas híbridos: a parte inicial do processo é feita no sistema fechado e o restante no sistema aberto. Boa produtividade e minimização das desvantagens de cada sistema.
- Sistemas heterotróficos: uso de biorreatores ou fermentadores; alta produtividade lipídica; promissores na produção de biodiesel em larga escala; custos ainda elevados.

NOTA: O crescimento de algas em sistemas de lagoas abertas é capaz de produzir **0,06-0,231 g/litro/dia** de biomassa e, em biorreatores, quase **3 g/litro/dia**)

# Custos

- Análises do ponto de vista econômico são hipotéticas e preliminares, entretanto permitem estimar a discrepância dos custos de produção:

Custos estimados de um barril de combustível à base de **algas**, considerando a tecnologia de 2009, era de **US \$ 300–2600**

Preço médio do barril de **petróleo** em 2009 foi de **US \$ 40–80**

(Hannon et al., 2010).

- Ex: usando *Scenedesmus* spp., que produziu 0,21 g/litro/dia de biomassa, com um teor de lipídios de 21%, o diesel à base de petróleo teria que custar aproximadamente US \$ 710 por barril para que este organismo fosse economicamente viável
- Ex: Considerando uma espécie que tem uma taxa de crescimento de 0,3 g/litro/dia e teor de óleo de 40%, então o preço resultante do óleo de algas seria de aproximadamente \$ 310 por barril.

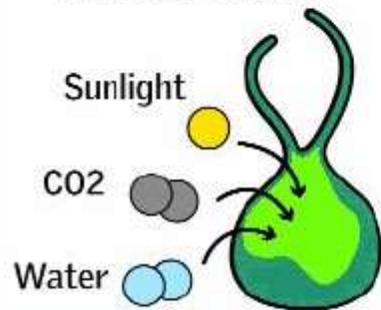
(Hannon et al., 2010).

# Biodiesel from algae

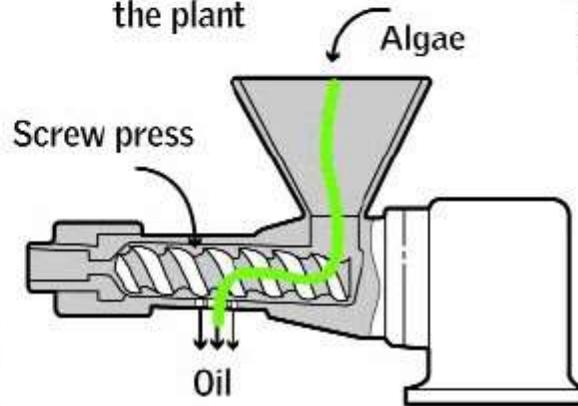
High oil prices and advances in biotech over the past decade have refueled the algae biofuel race.

## The process

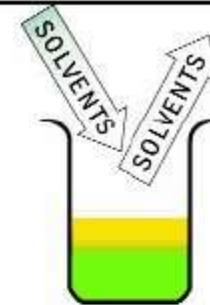
**1** After initial growth, algae is deprived of nutrients to produce a greater oil yield



**2** Extraction of oil  
A press produces 70-75% of the oils from the plant



**3** Solvents used to separate sugar from oil; solvents then evaporate



**4** Oil is ready  
Can be used as oil directly in diesel engines or refined further into fuel



## Yield of various plant oils

(Gallons per hectare)

Soy	118
Safflower	206
Sunflower	251
Castor	373
Coconut	605
Palm	1,572
Algae	26,417



## About algae

- Among the fastest growing plants; about 50% of their weight is oil
- Contains no sulfur; non toxic; highly biodegradable
- Algae fuel is also known as algal fuel or oilgae

26,417

Source: oilgae.com, MCT Photo Service  
Graphic: Scott Bell

© 2008 MCT

## Referências

- Azeredo, Vinicius Barbosa Salles. Produção de Biodiesel a Partir do Cultivo de Microalgas: Estimativa de Custo e Perspectivas Para o Brasil (2012). Tese de Mestrado em Planejamento Energético. Universidade Federal do Rio de Janeiro. Rio de Janeiro. RJ. p.140.
- Carneiro, M. L. N. M., Pradelle, F., Braga, S. L., Gomes, M. S. P., Martins, A. R. F. A., Turkovics, F., & Pradelle, R. N. C. (2017). Potential of biofuels from algae: Comparison with fossil fuels, ethanol and biodiesel in Europe and Brazil through life cycle assessment (LCA). *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 73, 632–653. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2017.01.152>.
- Doucha J, Livansky K. (2006). Productivity, CO<sub>2</sub>/O<sub>2</sub> exchange and hydraulics in outdoor open high density microalgal (*Chlorella* sp.) photobioreactors operated in a middle and southern european climate. *J Applied Phycology*. 18(6):811–826.
- Franco, A. L. C., Lôbo, I. P., da Cruz, R. S., Teixeira, C. M. L. L., de Almeida Neto, J. A., & Menezes, R. S. (2013). Biodiesel de microalgas: avanços e desafios. *Química Nova*, 36(3), 437–448. <https://doi.org/10.1590/s0100-40422013000300015>.
- Hannon, Michael & Gimpel, Javier & Tran, Miller & Rasala, Beth & Mayfield, Stephen. (2010). Biofuels from Algae: Challenges and Potential. *Biofuels*. 1. 763-784. 10.4155/bfs.10.44.
- Pandey, A. (2014). *Biofuels from Algae*. Burlington, Massachusetts: Elsevier.