



Instituto de Energia e Ambiente - IEE
Universidade de São Paulo - USP
Prof. Célio Bermann

Instituto de Energia e Ambiente da USP

Curso de Engenharia Ambiental da Escola Politécnica da USP

IEE 0005 - Produção e Consumo de Combustíveis e o Meio Ambiente

8a. aula: Biodiesel: produção a partir de gordura animal - principais fontes matérias primas, processos de produção, qualidade dos óleos, propriedades, principais usos

- Características básicas
- Aspectos ambientais
- Biodiesel de 2ª geração (Biodiesel das Algas)

Características de alguns vegetais com potencial para produção de biodiesel

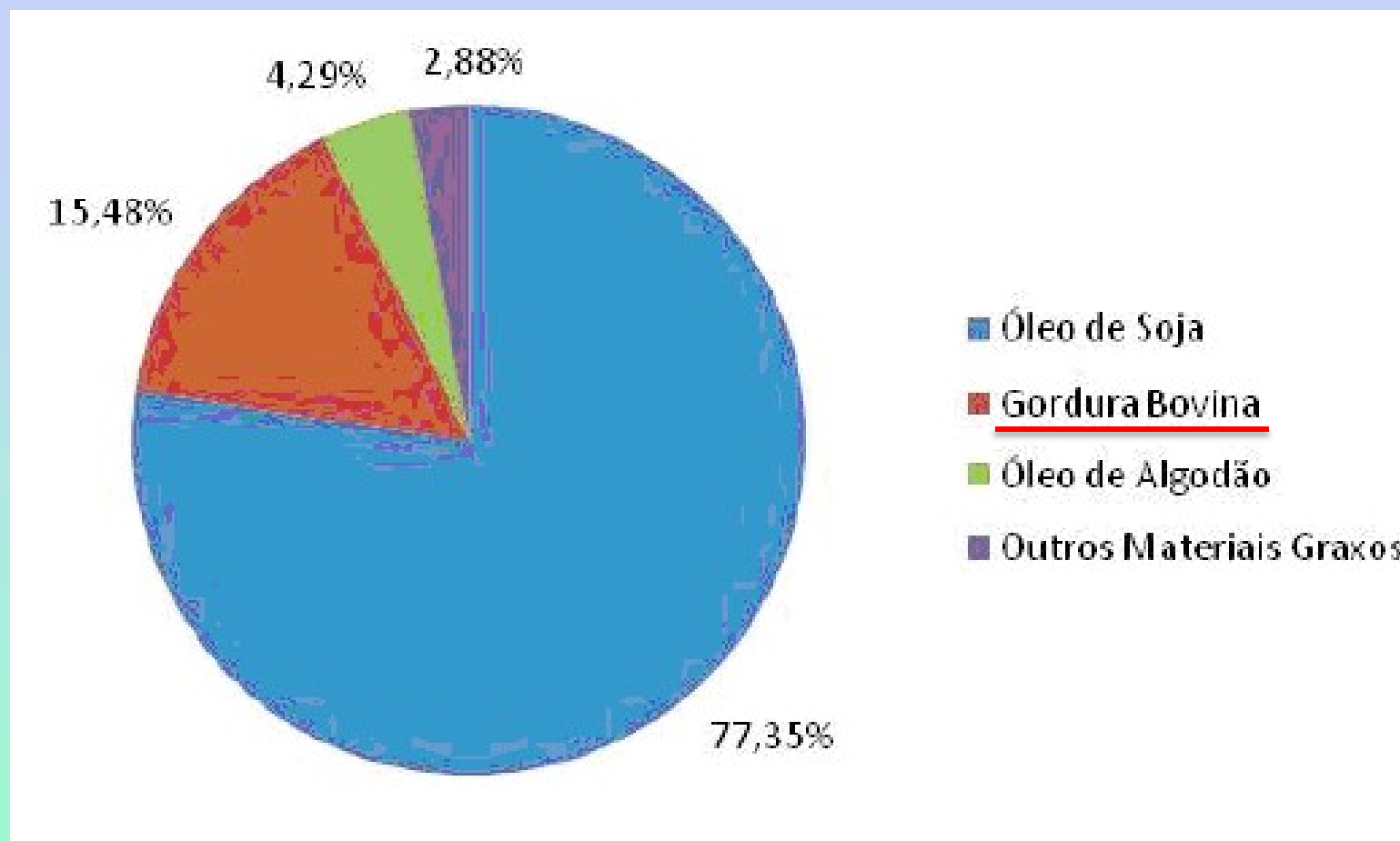
Espécie	Origem do óleo	Conteúdo de óleo (%)	Rendimento em óleo (t/ha)
Dendê (<i>Elaeis guineensis</i> N.)	Amêndoa	26	3,0-6,0
Babaçu (<i>Attalea speciosa</i> M.)	Amêndoa	66	0,4-0,8
Girassol (<i>Helianthus annuus</i>)	Grão	38-48	0,5-1,5
Canola (<i>Brassica campestreis</i>)	Grão	40-48	0,5-0,9
Mamona (<i>Ricinus 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.

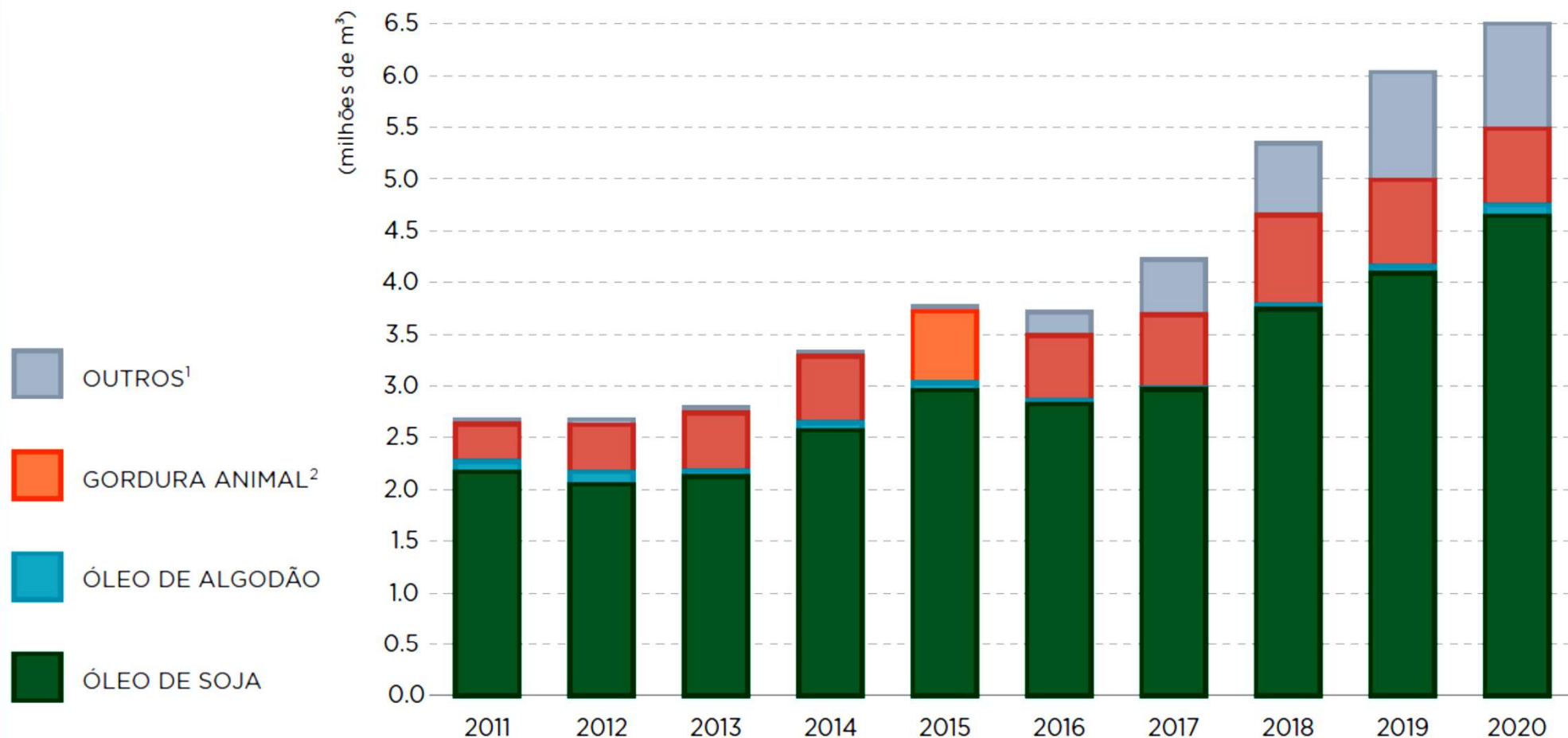
Obs: No Brasil, as alternativas para a produção de óleos vegetais são diversas, e incluem o nabo forrageiro, o pequi, o buriti, a macaúba além de uma grande variedade de oleaginosas a serem exploradas.

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).

¹Inclui 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. ²Inclui gordura bovina, gordura de frango e gordura de porco.

Capacidade Instalada em 2020: 10,2 milhões de m³

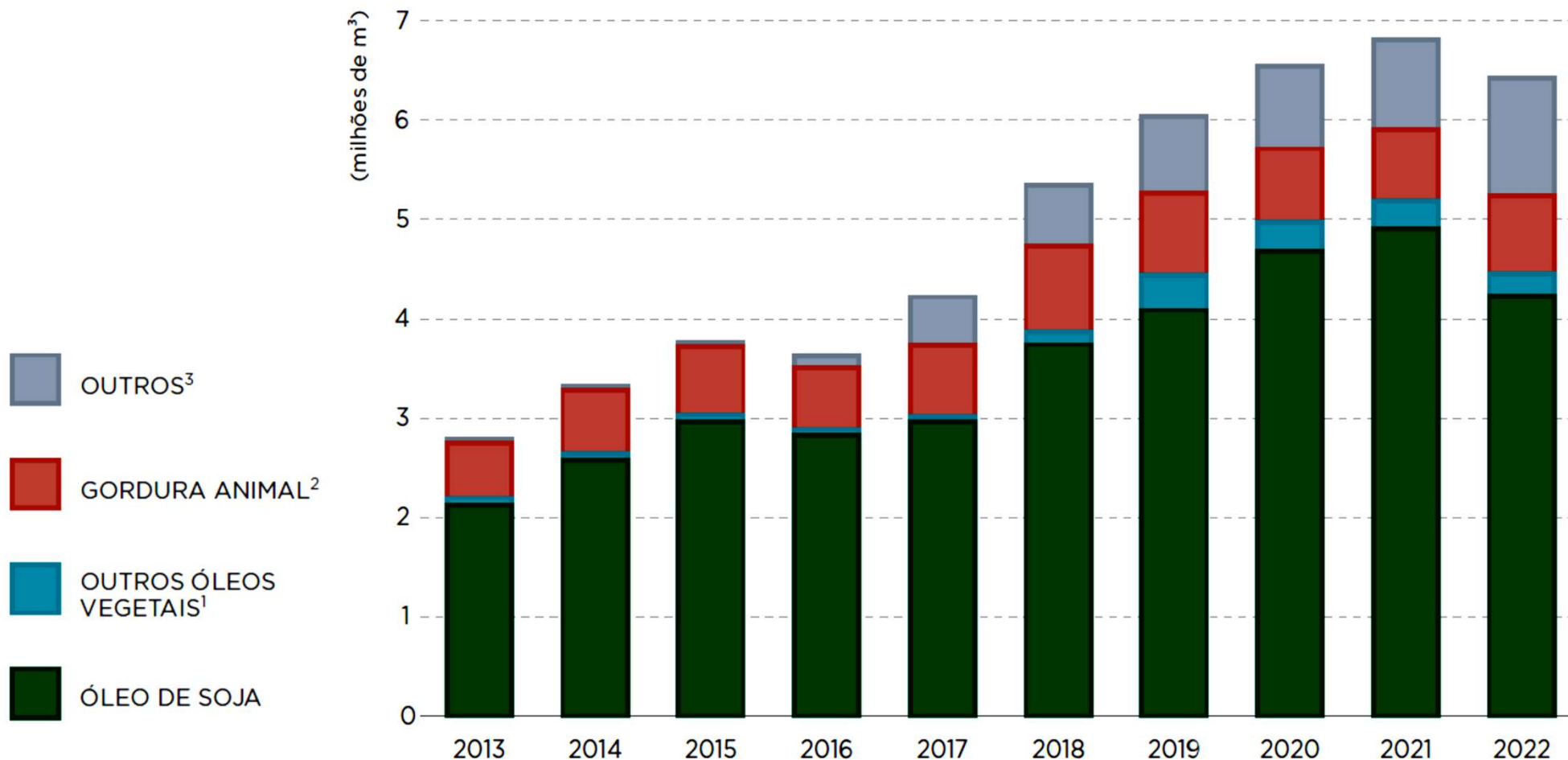
Produção total em 2018: 6,4 milhões de m³ (62,9%)

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.

GRÁFICO 4.14. MATÉRIAS-PRIMAS UTILIZADAS NA PRODUÇÃO DE BIODIESEL (B100) - 2013-2022



FONTE: ANP/SPC (Tabela 4.13).

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.

Capacidade Instalada em 2022: 13,7 milhões de m³ (37,4 mil m³/dia)

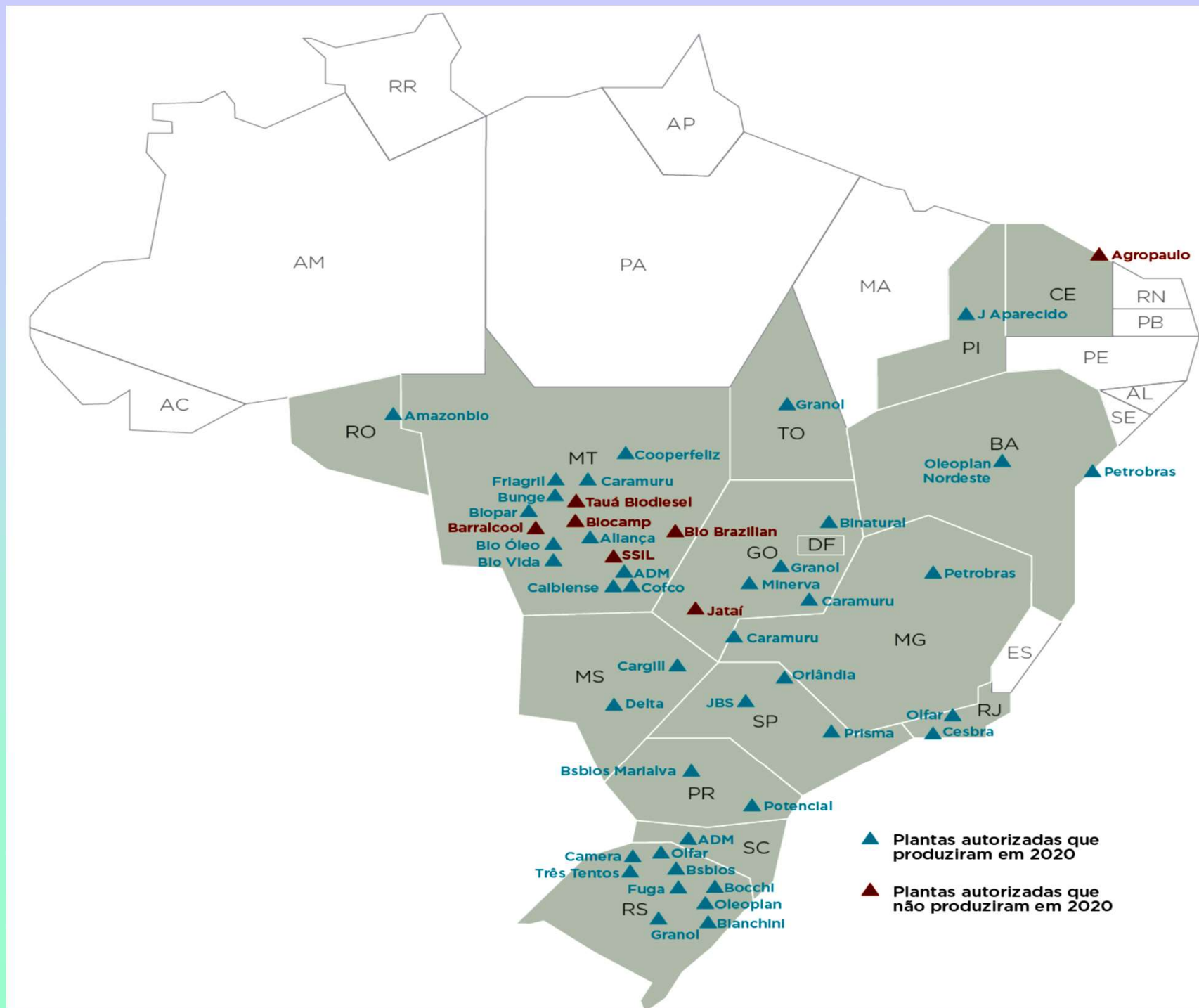
Produção total em 2022: 6,2 milhões de m³ (46,4%)

Óleo de soja: 65,8% Outros óleos vegetais: 3,6%

Gordura animal: 12,1% Outros: 18,5%

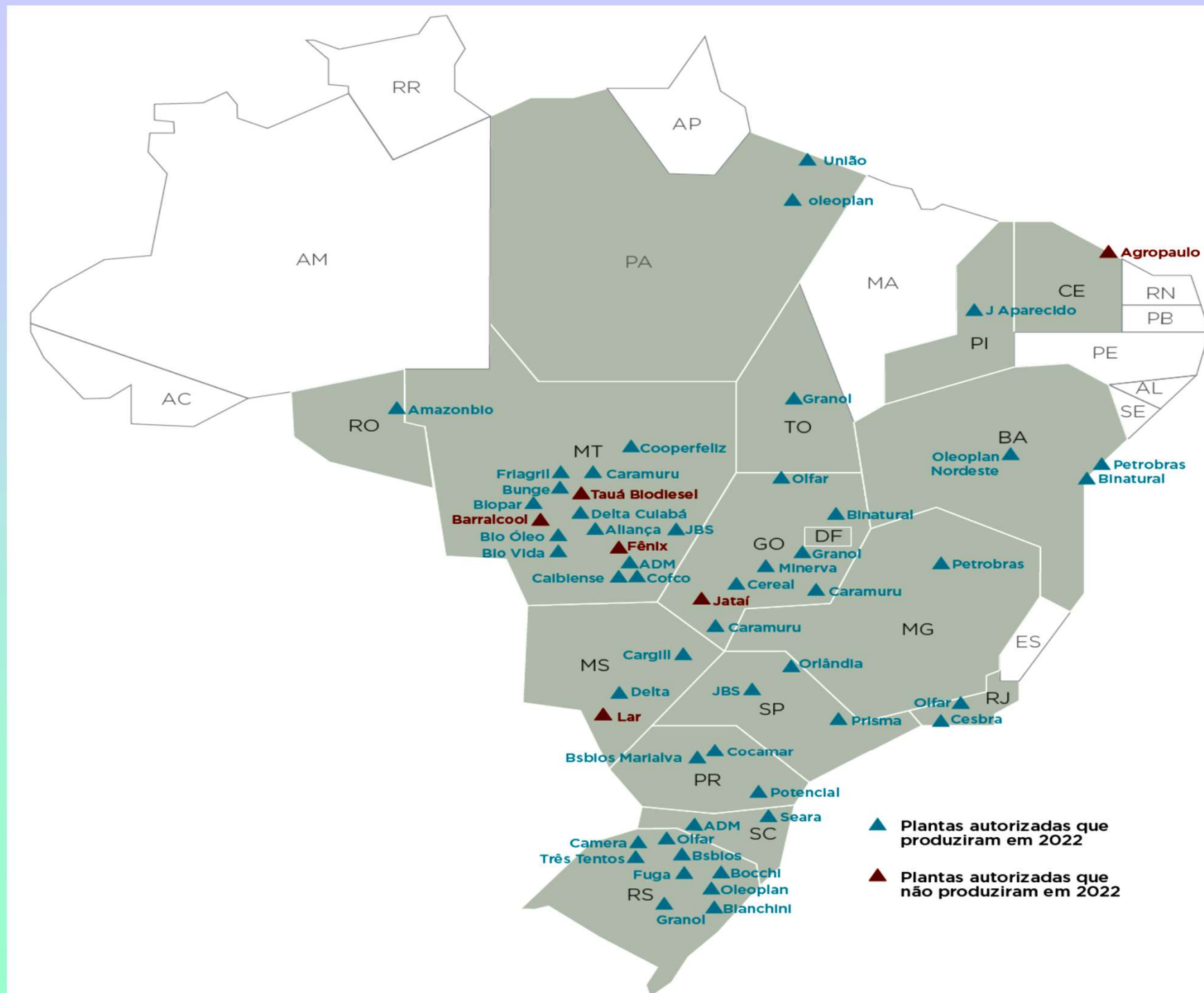
Fonte: ANP. Anuário estatístico brasileiro do Petróleo, Gás natural e Biocombustíveis 2022, 2023.

Infraestrutura da produção de biodiesel no Brasil - 2020



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

Infraestrutura da produção de biodiesel no Brasil - 2022



Fonte: ANP. Anuário estatístico brasileiro do Petróleo, Gás natural e Biocombustíveis 2022, 2023.

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).



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.

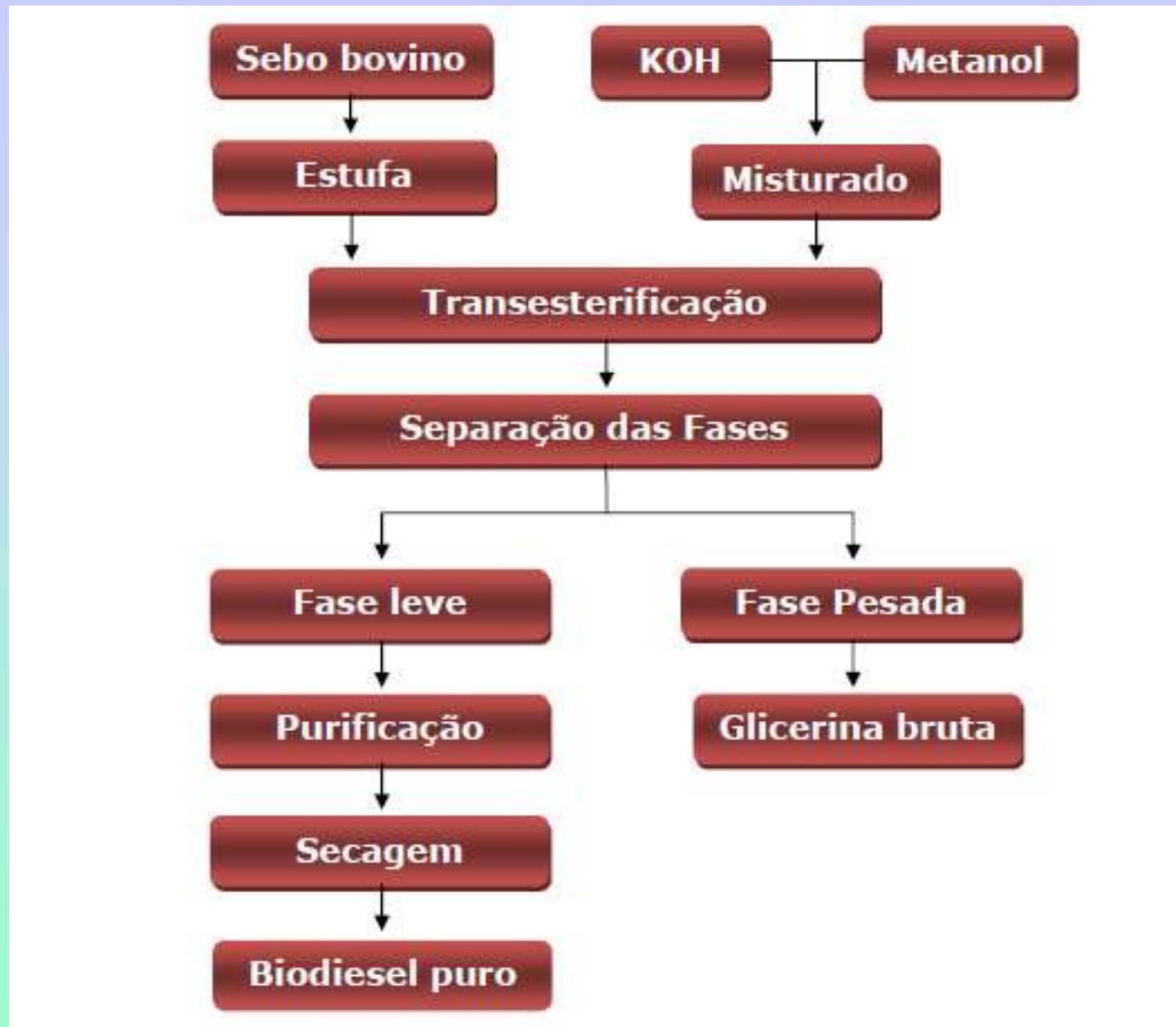
O primeiro biodiesel obtido a partir de sebo bovino foi produzido na Itália. No Brasil, foi inicialmente produzido pela Petrobrás, apresentando características físico-químicas dentro dos limites estabelecido pela ANP.

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 alcançado 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.



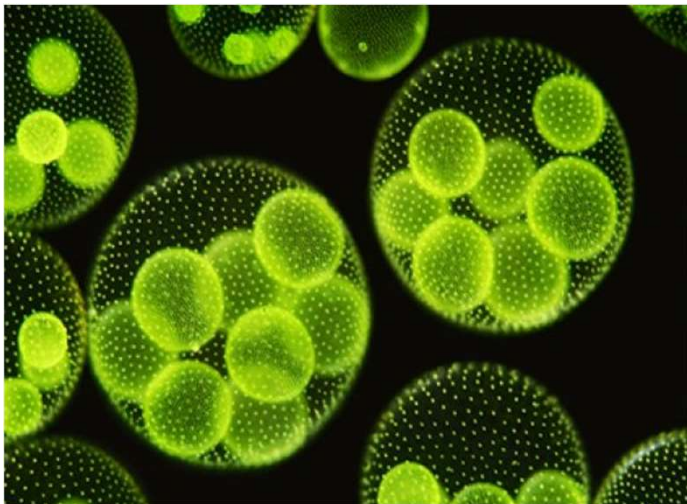
Esquema do processo utilizado para produção do biodiesel a partir do sebo bovino

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

Biodiesel das Algas

Algas

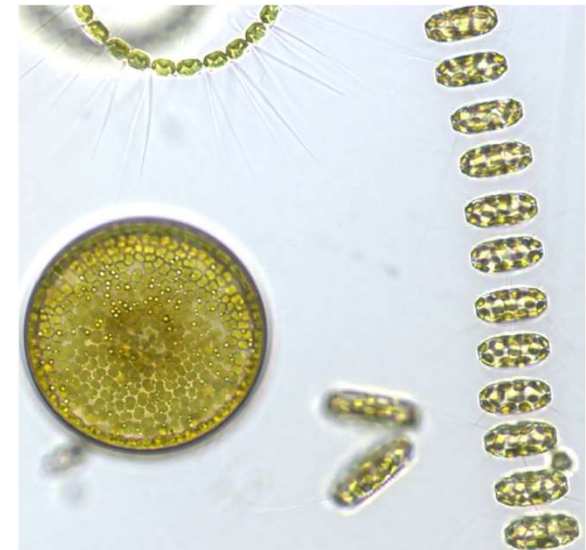
- Organismos unicelulares e multicelulares fotossintetizantes
- Grupo bem diversificado e amplo
- Podem ser encontradas em águas marinhas, doces, até mesmo em ambientes com condições adversas
- **Microalgas**, macroalgas e cianobactérias



(AUN USP, 2016. Disponível em:

<http://www.usp.br/aun/antigo/exibir?id=7678&ed=133>

4&f=24)



(Diatoms of North America, 2021. Disponível em:

<https://diatoms.org/what-are-diatoms>)

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_2 quando queimado, mas ao contrário dos combustíveis fósseis, o CO_2 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, 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 km²), 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) 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

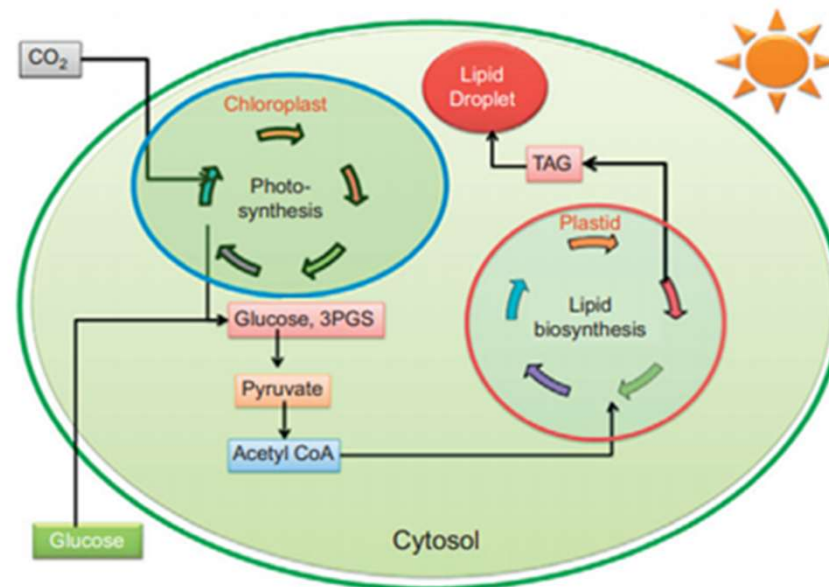
A quantidade de óleo que cada linhagem de algas produz varia amplamente. Segue abaixo, uma lista de microalgas e seus diversos rendimentos de óleo vegetal. O rendimento do biocombustível é proporcional à quantidade de conteúdo de lipídios presente nestas espécies de microalgas (unidade em ms: matéria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

- Ankistrodesmus TR 87: 28–40% ms
- Botryococcus braunii: 29–75% ms
- Chlorella sp.: 29% ms
- Chlorella protothecoides (autotrophic/ heterothrophic): 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
- Neochloris oleoabundans: 35–54% ms
- Schiochytrium: 50–77% ms

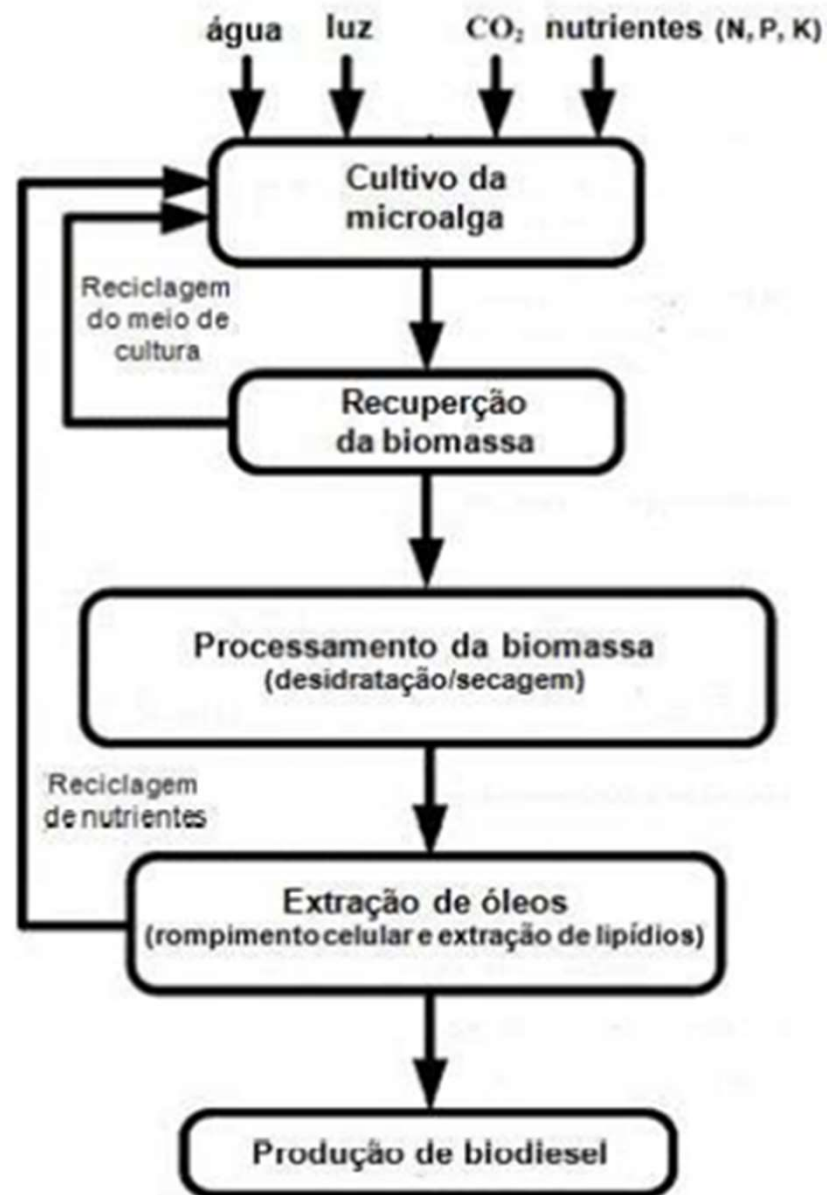
Note: US universities which are working on producing oil from algae include: Washington State University, Oregon State University, Arizona State University, The University of Arizona, University of Illinois at Urbana-Champaign, University of California San Diego, University of Nebraska Lincoln, University 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.

Condições de cultivo

- Fotossíntese: luz, CO₂ e água;
- Nutrientes essenciais: N, P, K ;
- Temperatura e pH;
- Autotróficas, heterotróficas e mixotróficas.



(Pandey, 2014)



(Azeredo, 2012)

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 CO₂ 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.

Espécie	Produtividade (g/m².d)
<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.

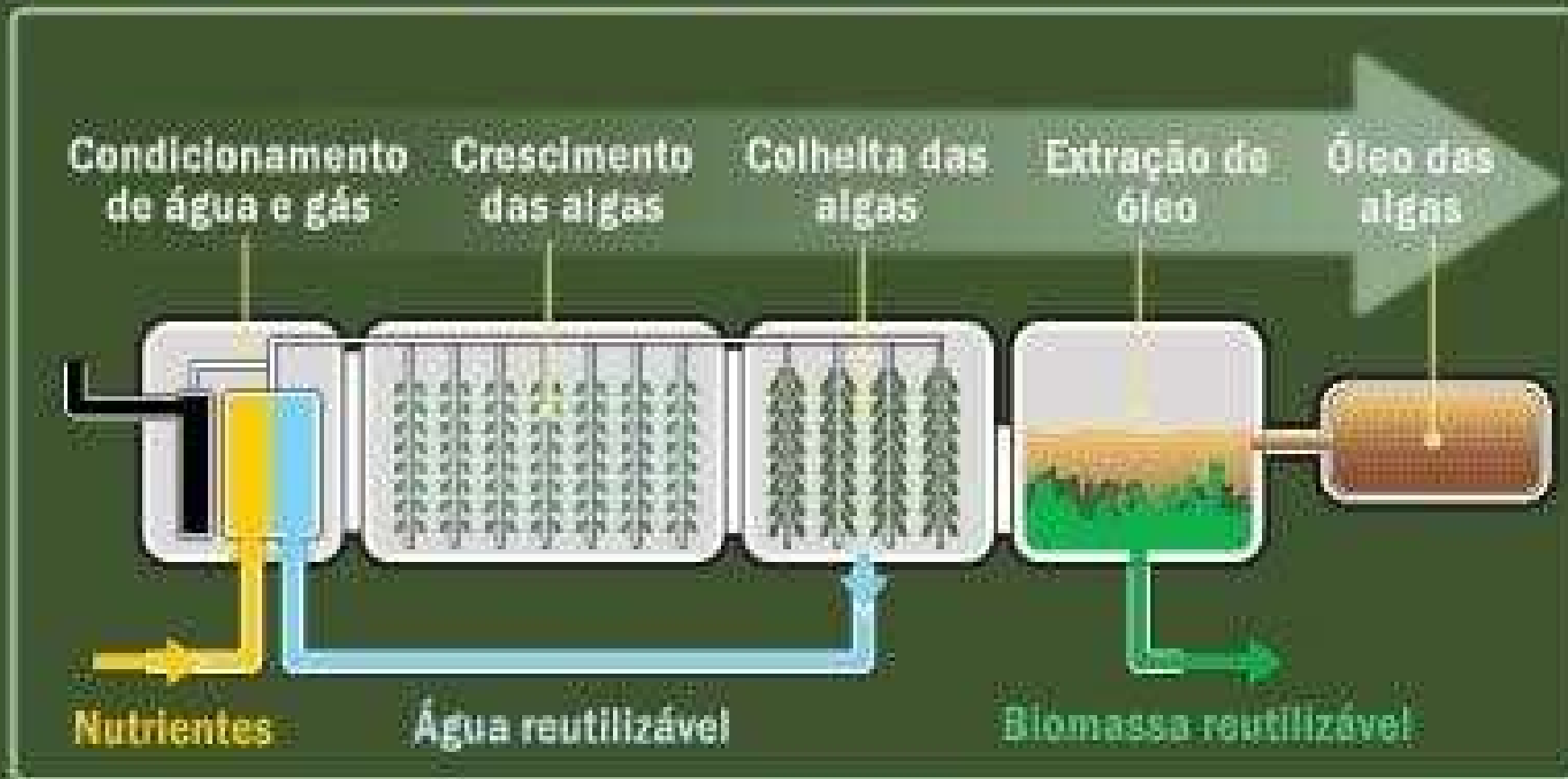
Sistemas fechados- fotobiorreatores

- 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.



Como funciona o biodiesel de algas

Processo do biorreator



LD © 2008 HowStuffWorks

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 = 4.047m² 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 borosilicato (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 CO₂ concentrado para aumentar a taxa de produção.

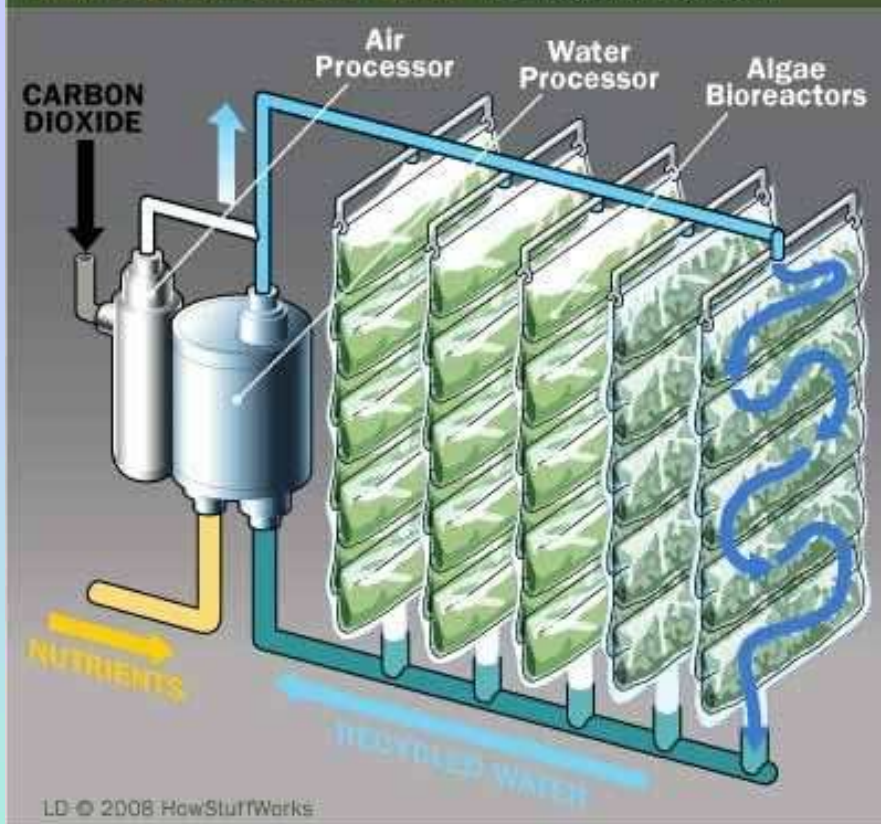


Fotobiorreator tubular para a cultura de microalgas e de outros organismos fotossintéticos

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://algaeorbiofuels.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 ₂ -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).

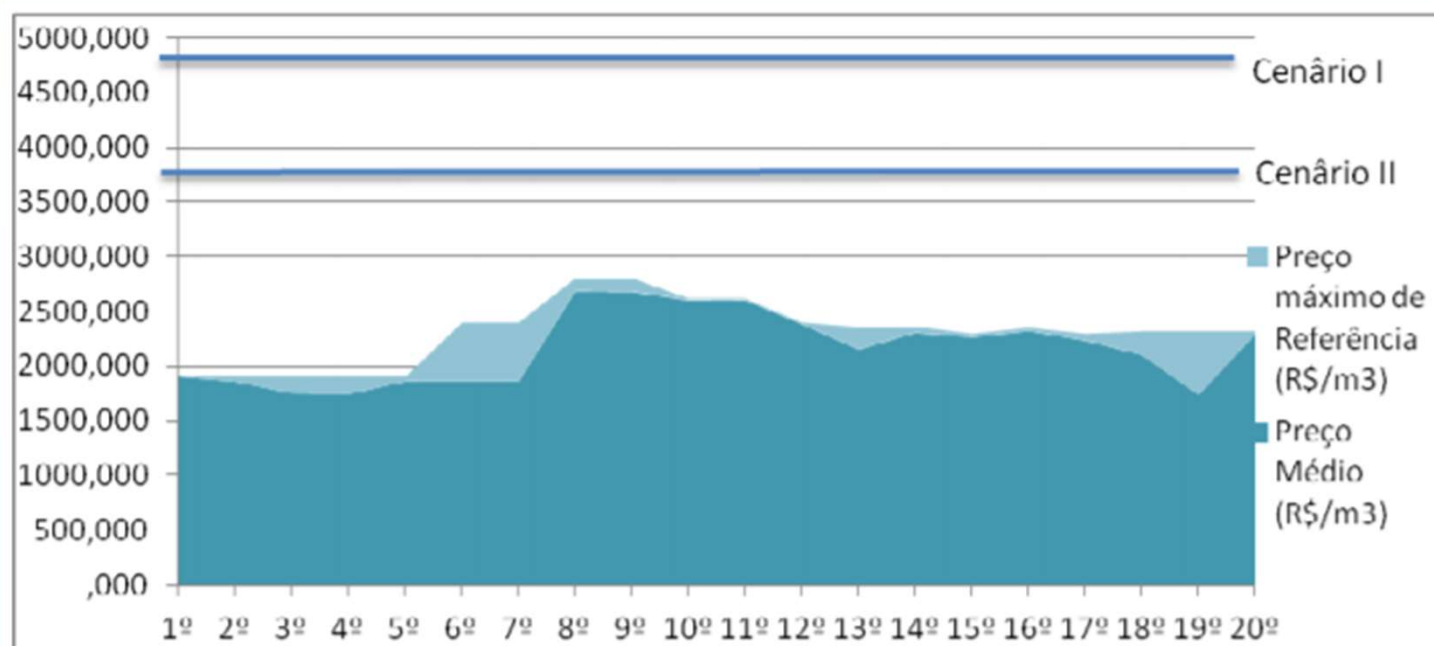
- Ex: usando *Scenedesmus* spp., que produziu 0,21 g/litro/dia de biomassa, com um teor de lipídios de 21%, o diesel à base de petróleo teria que custar aproximadamente US \$ 710 por barril para que este organismo fosse economicamente viável
- Ex: Considerando uma espécie que tem uma taxa de crescimento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

Estimativa de Custos no Brasil

Resumo das características dos cenários.

	Área de Cultivo (ha)	Sistema de Cultivo	Fonte de CO ₂	Produto
Cenário I	200	Raceway Open Ponds	CO ₂ Puro	Biodiesel
Cenário II	200	Raceway Open Ponds	CO ₂ Puro	Biodiesel + Biogás



Preços médios e de referencia praticados nos primeiros 20 leilões de biodiesel e os custos de produção do biodiesel para os cenários I e II.

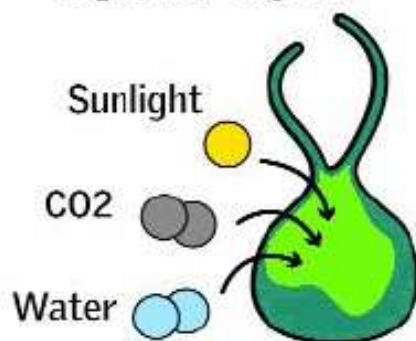
Não viável a curto prazo

Biodiesel from algae

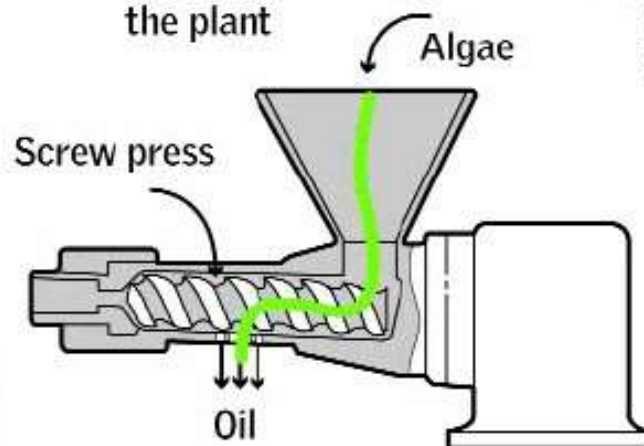
High oil prices and advances in biotech over the past decade have refueled the algae biofuel race.

The process

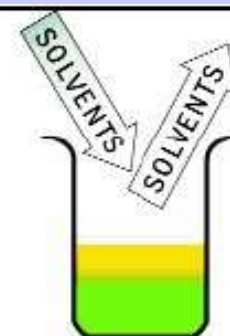
- 1 After initial growth, algae is deprived of nutrients to produce a greater oil yield



- 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

Tabela 5: Comparação entre as produtividades de diversas culturas e microalgas.

Matéria Prima	Produtividade (L/ha.a)
Soja*	450
Girassol*	955
Jatropha*	1.890
Palma*	6.000
Microalgas**	10.000 - 35.430

Fonte: Azeredo, 2012.

Tabela 1. Produção de energia e eficiência fotossintética de diferentes fontes de biomassa. Adaptada da ref. 13

Fonte de biomassa	Tipo de combustível produzido	Produtividade (bep ha ⁻¹ ano ⁻¹)	Eficiência fotossintética (%)
Milho	Etanol	20	0,2
Cana-de-açúcar	Etanol	210–250	2–3
Soja	Biodiesel	13–22	0,1–0,2
Girassol	Biodiesel	8,7–16	0,1–0,2
Microalgas	Biodiesel	390–700	4–7

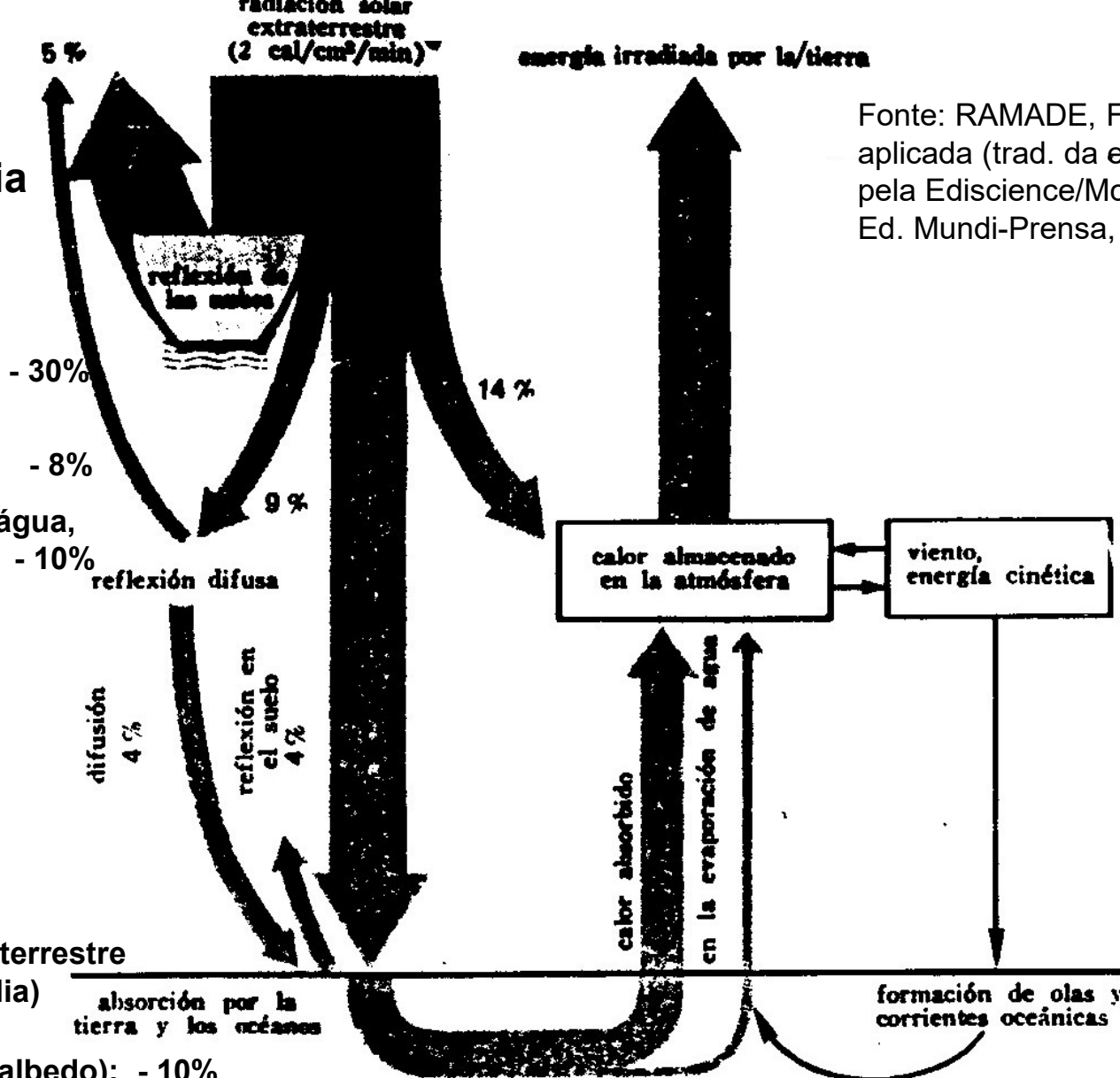
Fonte: Franco et al., 2013.


2.880 cal / cm² / dia

Reflexão das nuvens e atmosfera:

Materiais sólidos em suspensão no ar:

Absorção pelo vapor d'água, ozônio e outros gases:



Fonte: RAMADE, F. - Elementos de ecologia aplicada (trad. da edição francesa publicada pela Ediscience/McGraw-Hill, 1974). Madrid, Ed. Mundi-Prensa, 1977, pp. 7-88.

52% chega à superfície terrestre
(1.500 cal / cm² / dia)

Reflexão na superfície (albedo): - 10%

Fonte de calor no processo de evapotranspiração: - 2%

40% - Radiação Solar disponível (1.150 cal / cm² / dia)

1/4 : Fotossíntese dos vegetais (288 cal / cm² / dia)

10% : Transformação em Biomassa
(28,8 cal / cm² / dia)

Cultivos intensivos: 3%
Eficiência: 1% do fluxo luminoso global incidente

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, CO₂/O₂ 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.