



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 (lenha, carvão vegetal, derivados da cana, óleos vegetais, biogás)

- . características físico-químicas; aspectos sócio-ambientais
- . produção de biogás em aterros de RSU
- . álcool etílico carburante – fermentação e etanol de 2ª geração

- . Grupo de alunos: reservas estimadas das biomassas (mundial, ALC e Brasil)/usinas de etanol e biodiesel em operação (mundial, ALC e Brasil).

Biomassa: lenha, carvão vegetal; bagaço de cana-de-açúcar; resíduos de matéria orgânica, animais e agrícolas

Processos não-biológicos:

- combustão direta da madeira para produção de calor
- produção de carvão vegetal para uso posterior como combustível ou fins energéticos
- gaseificação da madeira ou carvão vegetal para fins combustíveis (gasogênio) ou para produção de gás de síntese de metanol

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

Lenha	pirólise (300°C) →	Carvão Vegetal
50-52%	C	+83%
6-6,5%	H	2-3%
40-44%	O	3-4%
20-60%	água	≤7%
0,5%	cinzas	≤7%
2.524 kcal/kg (10% umidade)	poder calorífico	6.800 kcal/kg
-	N e S	traços

quantidades:

1m³ lenha → 280 kg lenha

relações:

1.000 t madeira seca → 419 t carvão vegetal

2,0 a 2,5 m³ madeira → 1m³ carvão vegetal

volumes:

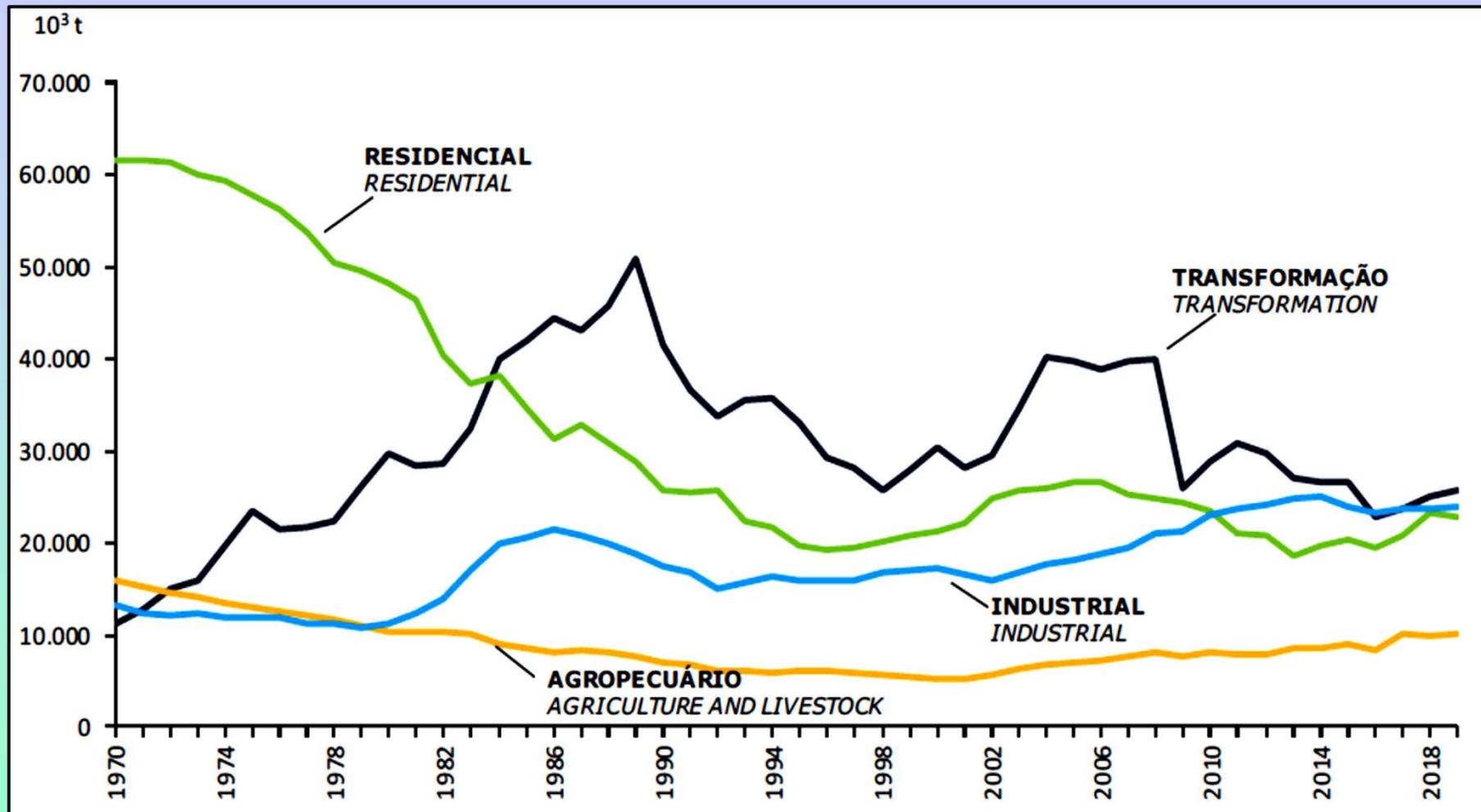
(eucalipto)

madeira verde = 109 t/ha (45% umidade)

madeira úmida = 80 t/ha (25% umidade)

madeira seca = 55,5 t/ha (0% umidade)

Evolução do consumo de Lenha: 1970-2019



Fonte: MME – Balanço Energético Nacional, 2020.

Lenha: 2010-2019

	10 ³ t										
FLUXO	2010	2011	2012	2013	2014	2015	2016	2017	2018	2019	FLOW
PRODUÇÃO	83.862	83.860	82.847	79.290	80.437	80.322	74.500	78.785	82.293	82.985	PRODUCTION
IMPORTAÇÃO	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	IMPORTS
CONSUMO TOTAL	83.862	83.860	82.847	79.290	80.437	80.322	74.500	78.785	82.293	82.985	TOTAL CONSUMPTION
TRANSFORMAÇÃO ¹	28.856	30.946	29.718	27.090	26.657	26.548	22.898	23.761	24.959	25.638	TRANSFORMATION ¹
GERAÇÃO ELÉTRICA	996	924	978	1.080	1.215	1.356	1.217	1.329	1.463	1.411	ELECTRICITY GENERATION
PRODUÇÃO DE CARVÃO VEGETAL	27.860	30.022	28.740	26.010	25.442	25.192	21.680	22.433	23.496	24.228	CHARCOAL PRODUCTION
CONSUMO FINAL	55.006	52.914	53.129	52.200	53.780	53.774	51.602	55.024	57.334	57.346	FINAL CONSUMPTION
CONSUMO FINAL ENERGÉTICO	55.006	52.914	53.129	52.200	53.780	53.774	51.602	55.024	57.334	57.346	FINAL ENERGY CONSUMPTION
RESIDENCIAL	23.471	20.984	20.879	18.521	19.705	20.431	19.561	20.923	23.379	22.838	RESIDENTIAL
COMERCIAL	287	307	310	310	313	304	289	290	279	269	COMMERCIAL
PÚBLICO	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	PUBLIC
AGROPECUÁRIO	8.140	7.889	7.810	8.513	8.650	9.077	8.446	10.116	9.853	10.230	AGRICULTURE AND LIVESTOCK
TRANSPORTES	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	TRANSPORTATION
FERROVIÁRIO	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	RAILROADS
HIDROVIÁRIO	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	WATERWAYS
INDUSTRIAL	23.108	23.734	24.130	24.857	25.112	23.963	23.307	23.695	23.823	24.009	INDUSTRIAL

1. Produção de carvão vegetal e geração elétrica. / Input for charcoal production and electricity generation.

Carvão Vegetal: 2010-2019

	10 ³ t										
FLUXO	2010	2011	2012	2013	2014	2015	2016	2017	2018	2019	FLOW
PRODUÇÃO	7.379	7.636	7.310	6.615	6.507	6.444	5.545	5.738	6.010	6.197	PRODUCTION
IMPORTAÇÃO	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	IMPORTS
EXPORTAÇÃO	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	EXPORTS
VARIAÇÕES DE ESTOQUES, PERDAS E AJUSTES	-185	-201	-192	-174	-96	-95	-82	-85	-89	-92	STOCK VARIATIONS, LOSSES AND ADJUSTMENTS
CONSUMO TOTAL	7.195	7.435	7.117	6.441	6.411	6.348	5.463	5.653	5.921	6.105	TOTAL CONSUMPTION
CONSUMO FINAL	7.195	7.435	7.117	6.441	6.411	6.348	5.463	5.653	5.921	6.105	FINAL CONSUMPTION
CONSUMO FINAL ENERGÉTICO	7.195	7.435	7.117	6.441	6.411	6.348	5.463	5.653	5.921	6.105	FINAL ENERGY CONSUMPTION
RESIDENCIAL	788	748	740	622	740	734	664	595	629	628	RESIDENTIAL
COMERCIAL	133	143	140	140	141	137	130	131	126	121	COMMERCIAL
PÚBLICO	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	PUBLIC
AGROPECUÁRIO	12	11	11	12	13	13	12	14	14	14	AGRICULTURE AND LIVESTOCK
INDUSTRIAL	6.262	6.533	6.226	5.668	5.517	5.465	4.657	4.913	5.152	5.342	INDUSTRIAL

Fonte: MME – Balanço Energético Nacional, 2020.

Consumo de lenha (2017): 75.561 mil t

produção carvão vegetal: 20.466 mil t

geração elétrica: 1.267 mil t

consumo energético: 53.828 mil t

- residencial: 19.726 mil t (36,6%)

- agropecuário: 10.116 mil t (18,8%)

- industrial: 23.696 mil t (44,0%)

- alimentos e bebidas: 7.155 mil t

- papel e celulose: 6.405 mil t

- cerâmica: 6.711 mil t

Taxa de reflorestamento: 40-50%

Consumo de carvão vegetal (2017): 5.157 mil t

residencial: 546 mil t (10,6%)

industrial: 4.466 mil t (86,6%)

- cimento: 145 mil t

- ferro-gusa e aço: 3.612 mil t (80,9%)

- ferroligas: 648 mil t

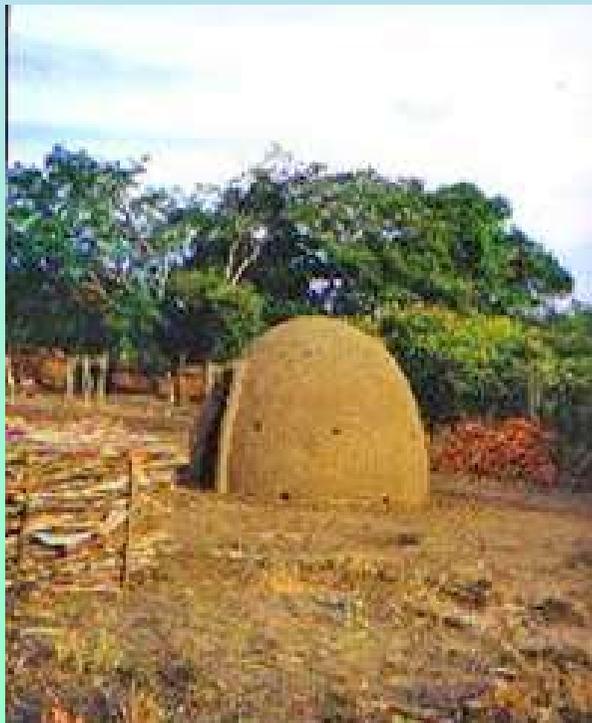
Taxa de reflorestamento: 60-65%

Fonte: BEN, 2018.

Produção do Carvão Vegetal em Fornos primitivos (“rabo quente”)

Localização: Minas Gerais e Pará

Riscos ocupacionais: ligados aos possíveis acidentes de corte da madeira, transporte e processamento. A rotina do carvoeiro o obriga a enfrentar o calor de 70 graus na boca dos fornos, por um período de 12 horas. É comum a utilização de mão-de-obra infantil.



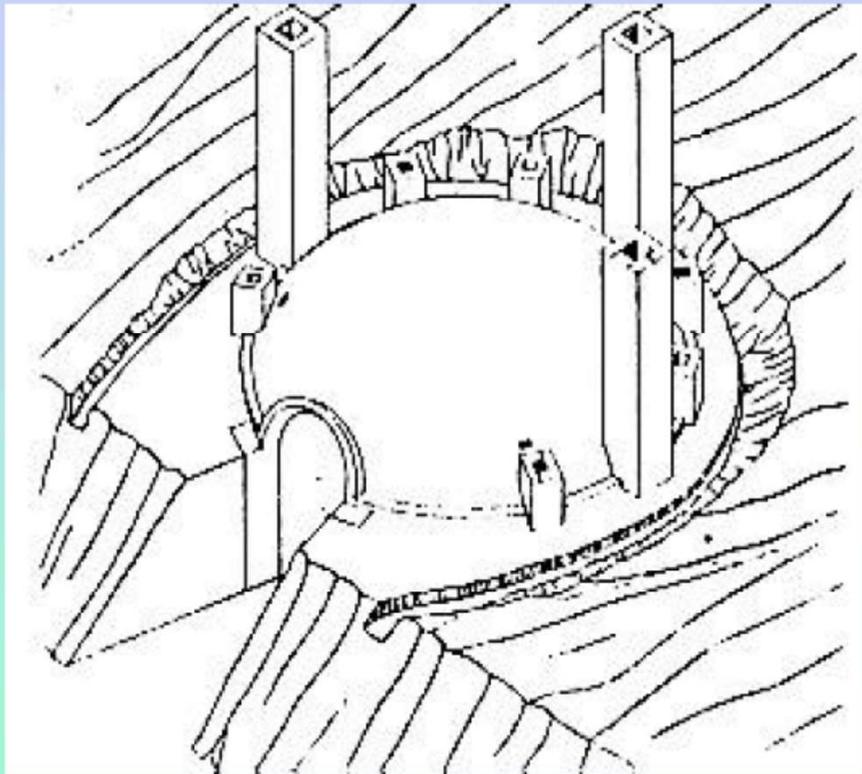
Forno tipo “Rabo quente”



Forno tipo “Rabo quente”



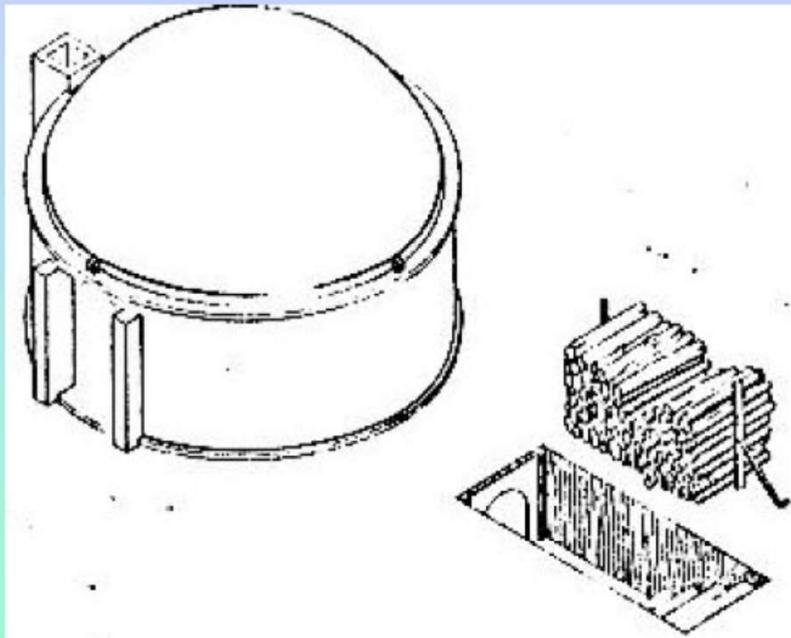
Forno tipo Colmeia ou de superfície



- Geralmente com 1 a 6 chaminés, e com 1 ou 2 portas. A sua capacidade efetiva varia entre 35 (comum no Brasil) e 150 m³ de madeira, Possui diâmetro da entre 5 e 8 m e altura total entre 3.20 e 5.00 m. Pode também aceitar madeira com até 2.00 m.

- volume de madeira = 36 m³
- ciclo total = 10 dias (240 h)
- produção = 4.0 t cv/ciclo
- relação de volume = 2.25 m³ lenha/mdc
- produtividade = 0.46 kg cv/m³ lenha/hora

Forno tipo Colmeia com fonte externa de calor



- A carbonização é conduzida mediante o controle da combustão na câmara, não havendo necessidade de orifícios no corpo do forno para a entrada de ar.
- Quando comparada à produtividade do forno colmeia convencional, é 30% mais elevada.
- Modernamente, há exemplos de retortas que, individualmente, podem chegar a produzir por ano o equivalente a 350 fornos de alvenaria do tipo colmeia, com capacidade para 35 m³ de madeira.

Forno tipo Colmeia com fonte externa de calor



EXTRAÇÃO DA MADEIRA em floresta nativa

Erosão e empobrecimento do solo

Redução da qualidade da água

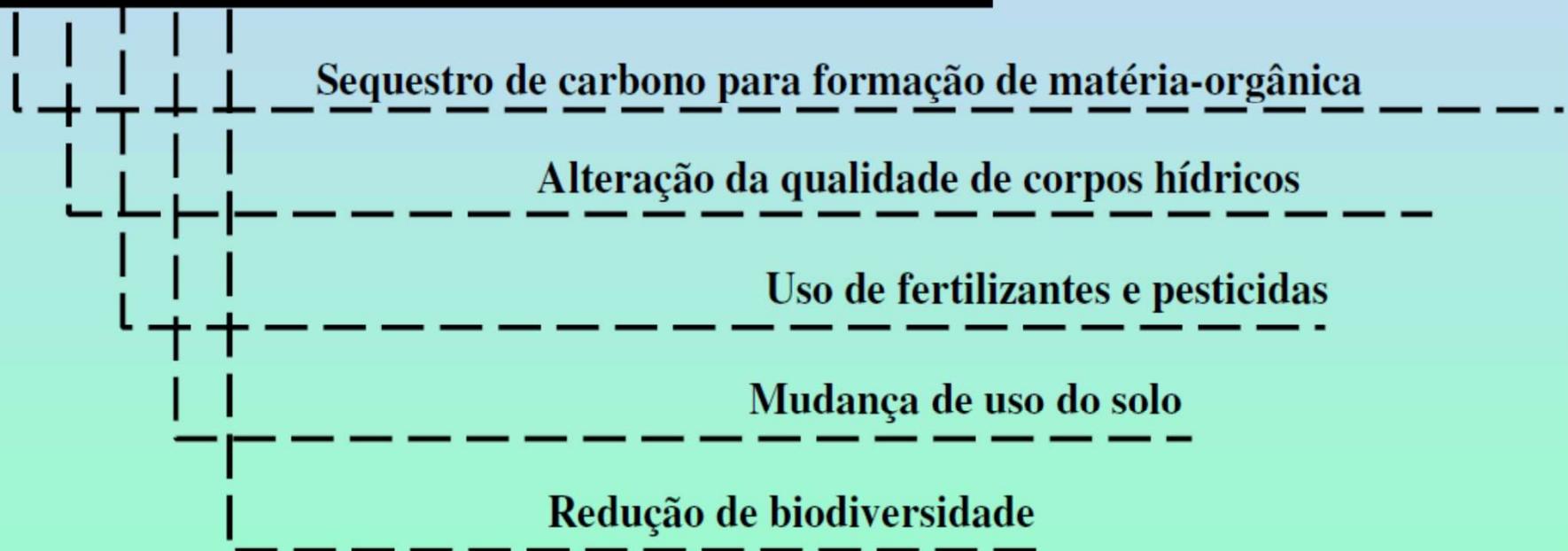
Alteração do microclima: chuva e temperatura

Proliferação de pragas e doenças

Emissão de gases efeito estufa

Perda de biodiversidade

EXTRAÇÃO DA MADEIRA em floresta plantada



PROCESSAMENTO DO CARVÃO VEGETAL

Elevada emissão de poluentes atmosféricos

mudanças climáticas, acidificação, formação de oxidantes fotoquímicos

Geração de resíduos sólidos

depleção de recursos bióticos, toxicidade humana e eco toxicidade

Geração de efluentes líquidos

eutrofização, toxicidade humana, eco toxicidade, mudanças climáticas

Curso do processo de carbonização da madeira (QUIRINO, 2002 e BRITO, 1990)

Faixa de Temperatura	Emissões
Até 200°C	Liberação de água e traços de dióxido de carbono, ácido fórmico, ácido acético e glioxal.
De 200°C a 280°C	Liberação de água, dióxido de carbono, ácido fórmico, ácido acético e traços de monóxido de carbono.
De 280°C a 500°C	Liberação de monóxido de carbono, metano, ácido acético, metanol, hidrogênio e alcatrões.
Acima de 500°C	Liberação de monóxido de carbono, hidrogênio e formaldeído.

Gaseificação:

Madeira: submetida a temperatura de 900 – 1.200 °C

produção de CO, CO₂, H₂ + Nitrogênio (gás inerte como diluente)

Gasogênio: uso em motores de combustão interna (veículos), substituindo a gasolina; no aquecimento doméstico e industrial, e na geração de eletricidade.

Poder calorífico: 1.600 kcal/Nm³

Gás de Síntese: utiliza Oxigênio puro, com ausência do N como diluente.

produção de CO, CO₂, H₂: esta mistura passa por um catalizador produzindo o metanol (CH₃OH)

Poder calorífico: 2.200 – 2.500 kcal/Nm³

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

BIOGÁS

Composição típica:

<u>Substância</u>	<u>Porcentagem (%)</u>
Metano (CH ₄)	54 a 70
Dióxido de Carbono (CO ₂)	27 a 45
Nitrogênio (N ₂)	0,5 a 3,0
Hidrogênio (H ₂)	1 a 10
Monóxido de Carbono (CO)	0,1
Oxigênio (O ₂)	0,1
Gás Sulfídrico (H ₂ S)	3,0 a 5,0

Digestão anaeróbica:

1º estágio: bactérias atuam sobre o complexo orgânico da biomassa, transformando-a em materiais simples e solúveis denominados ácidos voláteis

2º estágio: grupo diferente de bactérias que, mediante o processo de fermentação, convertem os ácidos voláteis numa mistura de gás metano e dióxido de carbono.

Cinco parâmetros ambientais devem ser controlados:

temperatura; tempo (quantidade de dias); acidez, nutrientes; toxidez.

Os dois grupos de microorganismos exigem diferentes temperaturas para alcançar-se a produção ótima.

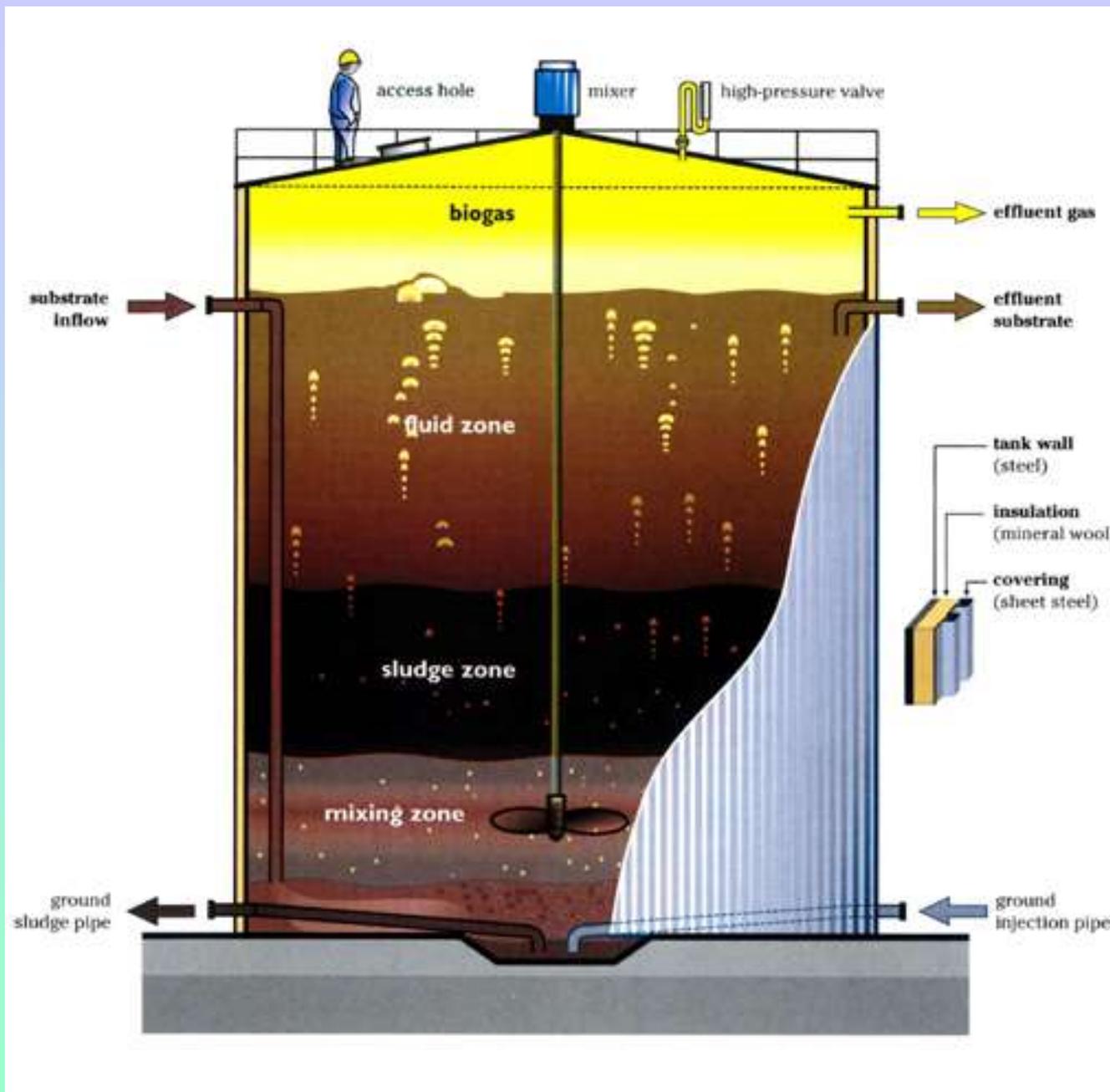
A ausência de ar (anaerobiose) é essencial pois mesmo pequenas quantidades de ar podem interromper quase totalmente a produção de metano.

Poder calorífico: 5.000 kcal/m³

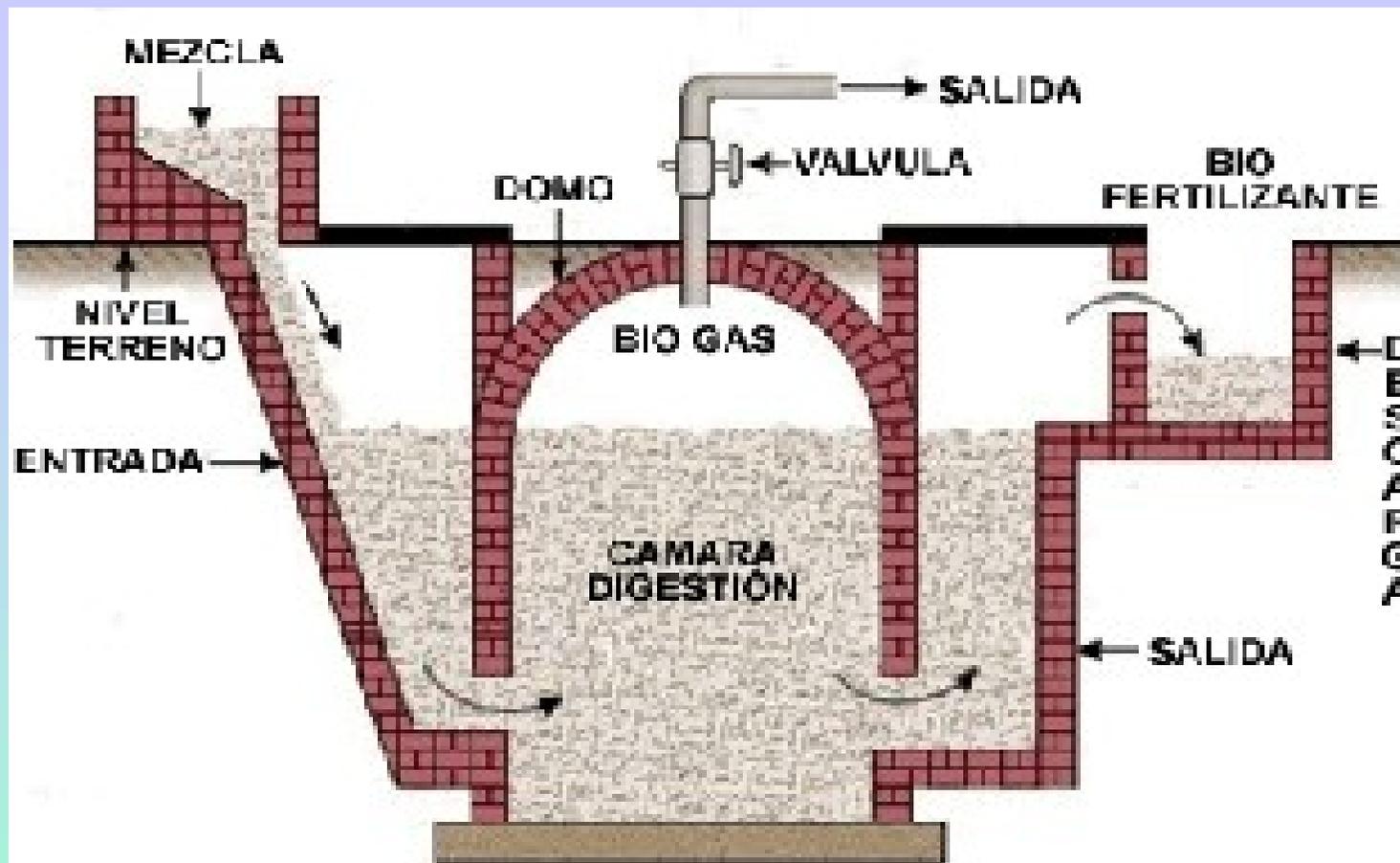
1 m³ de biogás = 0,454 kg de GLP (substituição do botijão de 13 kg de GLP por um biodigestor de 26 m³ de capacidade)

Subproduto: **biofertilizante** – mais rico que o esterco de origem

	<u>esterco</u>	<u>biofertilizante</u>
N (nitrogênio)	0,75%	1,5%
P (fósforo)	0,20%	0,35%
K (potássio)	0,4%	0,7%



Digestor Anaeróbico



Produção de 1 metro cúbico de biogás totalmente combustionado:

- 1,25 kWh de eletricidade
- 6 horas de luz equivalente a uma lâmpada de 60 watt
- funcionamento de um refrigerador de 1 m³ de capacidade durante 1 hora
- funcionamento de uma incubadora de 1 m³ de capacidade durante 30 min.
- funcionamento de um motor de 1 HP durante 2 horas

BIOGÁS

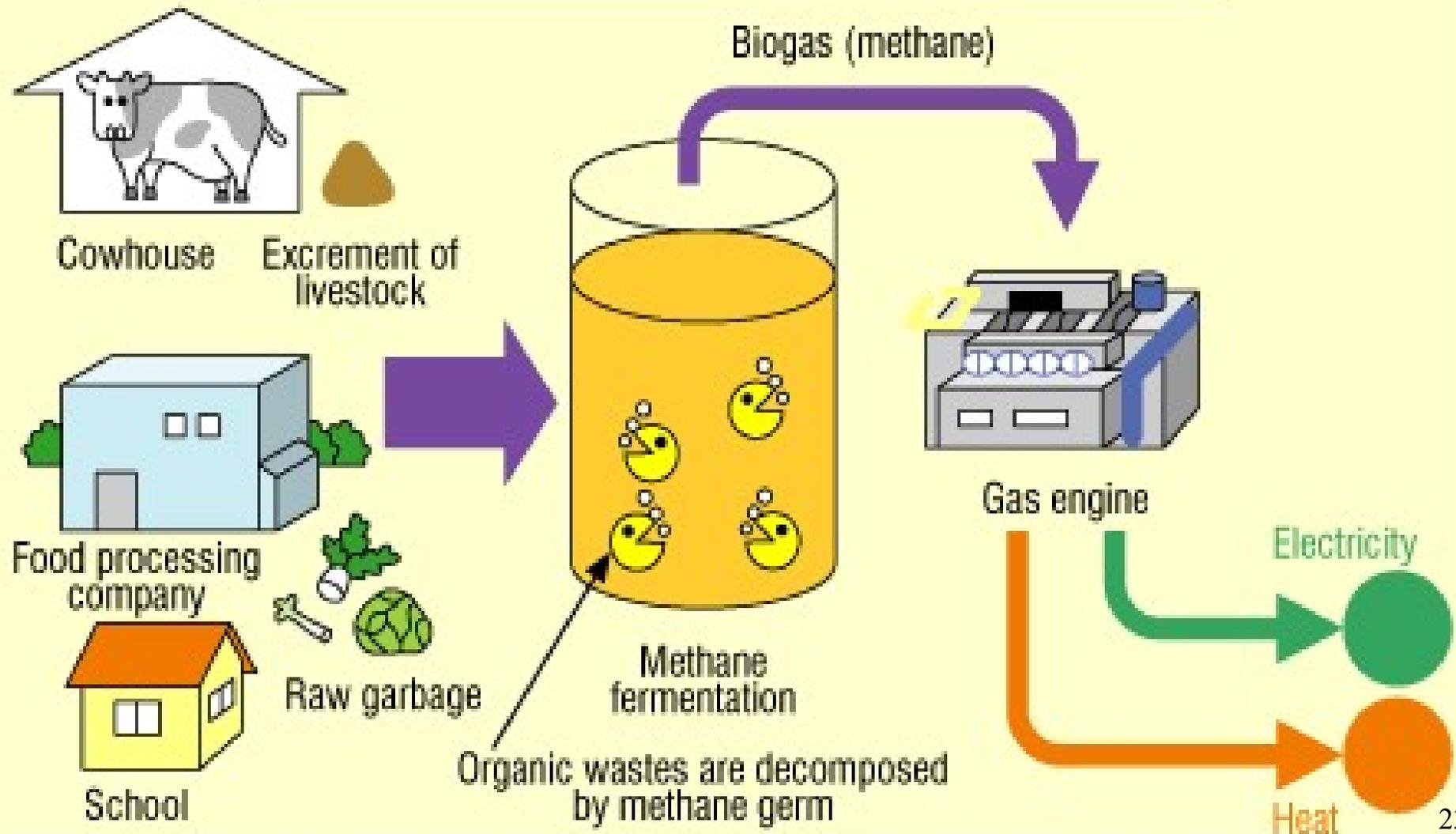
Poder calorífico: 5.000 kcal/m³

Equivalência energética do biogás

1 m ³ Biogás	0,61 L de gasolina
	0,58 L de querosene
	0,5 kg de gás liquefeito de petróleo (GLP)
	0,79 L de álcool combustível
	1,538 kg de lenha
	1,428 kWh de energia elétrica
	0,55 L de óleo diesel
	20 kg de lixo urbano
	2,5 kg de resíduos secos vegetais
	14,3 kg de resíduos sólidos de frigorífico

PRODUÇÃO DE BIOGÁS

Outline of Biogas Power Generation and Heat Supply System



ATERROS SANITÁRIOS

1 tonelada

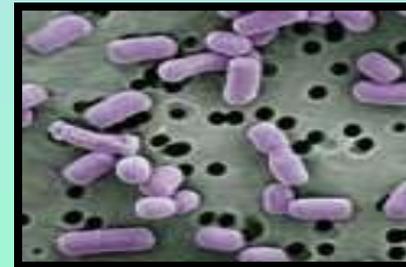
Resíduos sólidos urbanos



Matéria orgânica
biodegradável

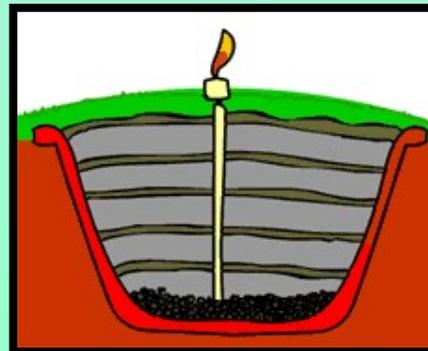


Digestão anaeróbica



BIOGÁS

200 m³



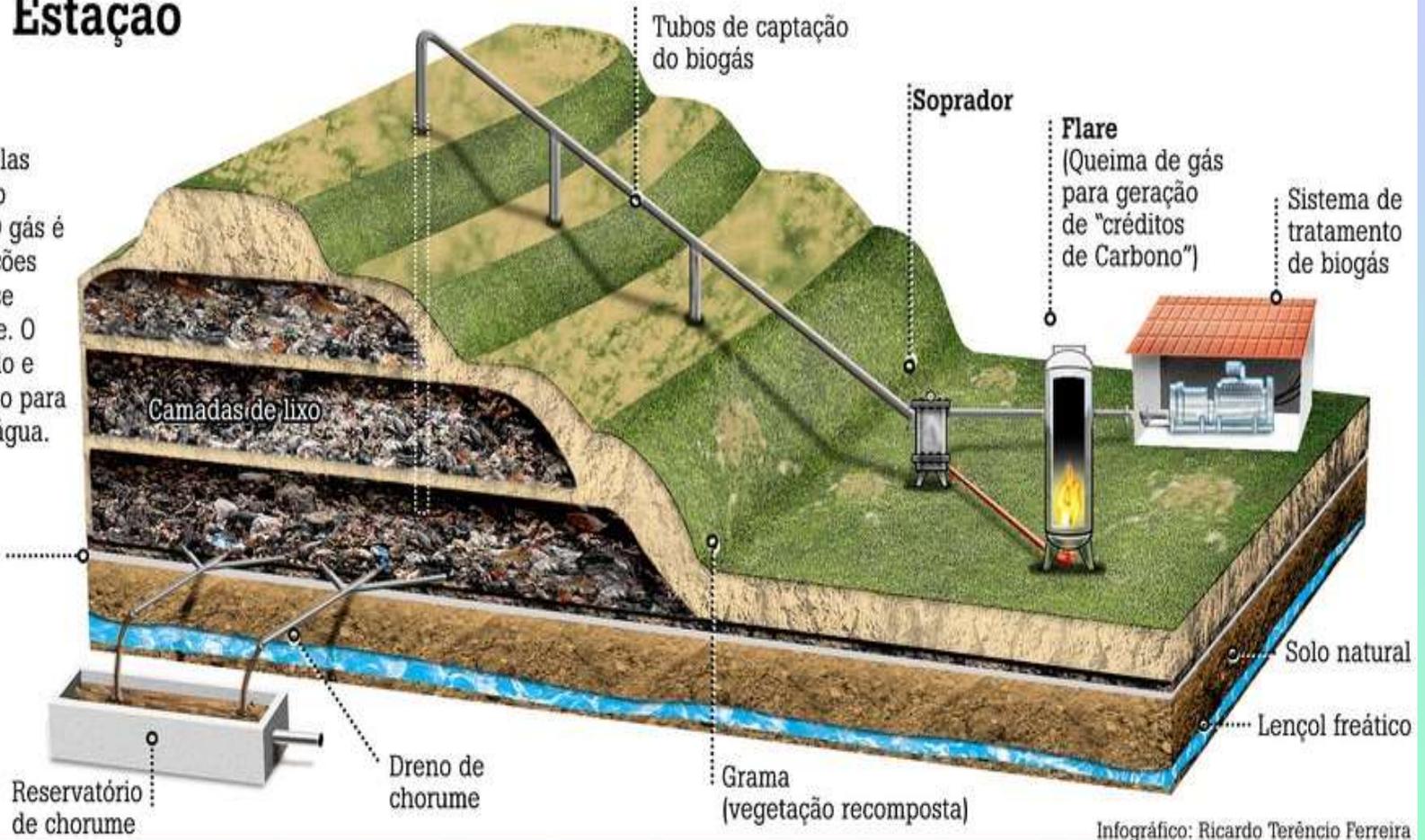
RECUPERAÇÃO ENERGÉTICA

- **Aterro sanitário:**
 - Sistema de impermeabilização superior
 - Poços de drenagem de biogás
 - Rede de coleta e bombas de vácuo
 - Grupos geradores

Conheça a Estação de Biogás

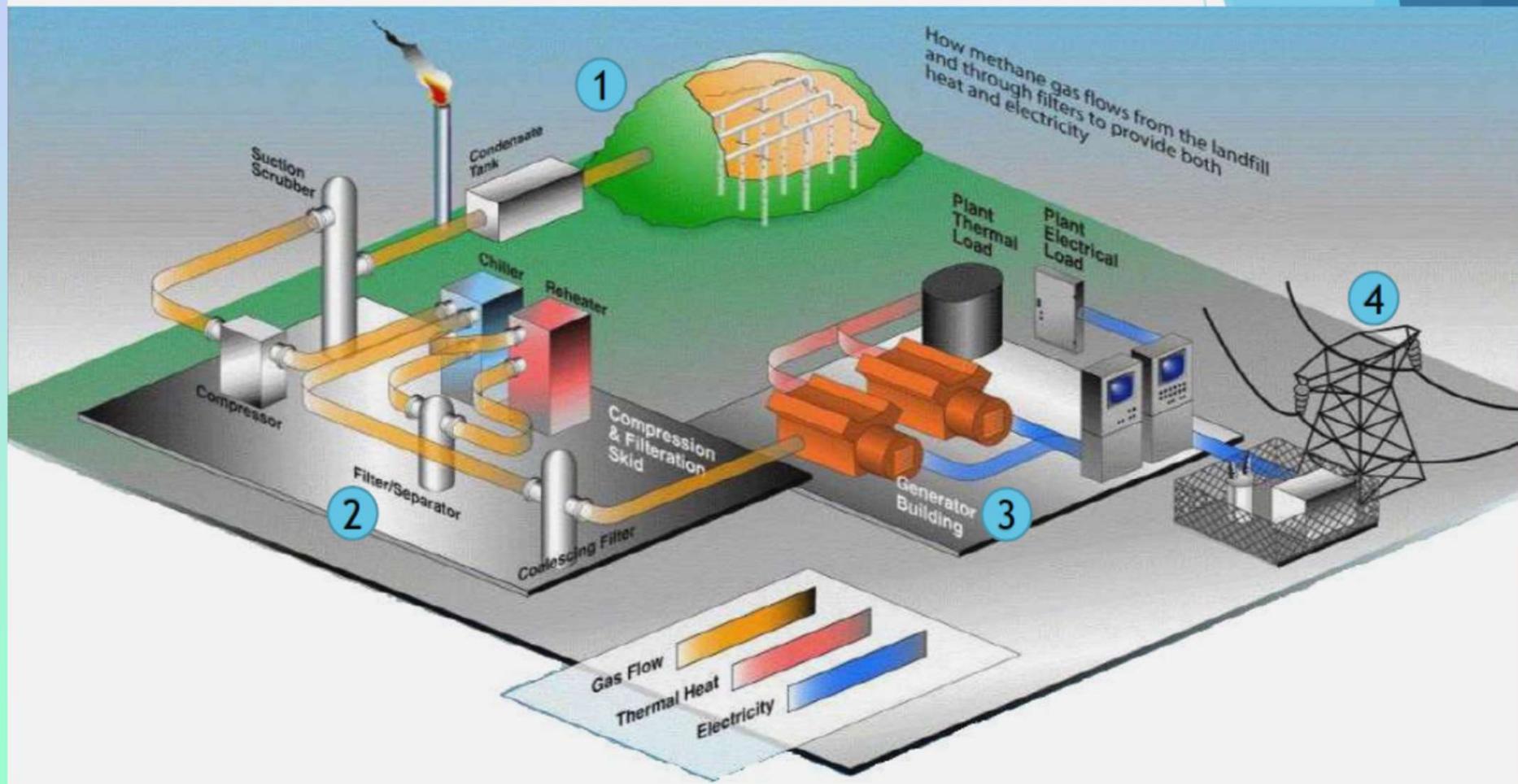
Ao ser decomposto pelas bactérias, o lixo gera o biogás e o chorume. O gás é conduzido por tubulações para ser queimado e se tornar menos poluente. O chorume é armazenado e destinado a tratamento para ser transformado em água.

Manta plástica PEAD (Polietileno Alta Densidade) para impermeabilização, que protege o solo e o lençol freático



GERAÇÃO DE ENERGIA ELÉTRICA COM O BIOGÁS DE ATERROS - ETAPAS

1-Captação 2-Tratamento 3-Geração de energia 4-Conexão à rede elétrica



Fonte: Grupo Solvi - Avanços da Geração de Energia Termelétrica por Biomassa e outras Fontes Alternativas como Biogás, Biometano. 30° FIEE SMART FUTURE – GTCD, São Paulo, 25/7/2019.

TERMELÉTRICA A BIOGÁS EM OPERAÇÃO - TERMOVERDE CAIEIRAS

- Potencia Instalada de 30MW – em breve será ampliada.
- Aterro recebe 10.000 t/dia de resíduos urbanos
- Em operação desde 2016



Fonte: Grupo Solvi - Avanços da Geração de Energia Termelétrica por Biomassa e outras Fontes Alternativas como Biogás, Biometano. 30° FIEE SMART FUTURE – GTCD, São Paulo, 25/7/2019.



Fonte: Marcelo Lima Camargo / Solvi

A termelétrica é composta de unidade geradora de energia com 21 motores geradores de 1.407 KW cada; central de tratamento do biogás; subestação seccionadora elevadora para conexão na linha de transmissão de 138kV, que liga a termelétrica ao SIN (Sistema Interligado Nacional) chegando aos consumidores finais de energia.

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



Canavial: Plantação de cana-de-açúcar. Usina Santa Adélia.
Crédito: Cortesia UNICA/ Foto: Niels Andreas



Disponível em: http://www.bioenergywiki.net/images/2/29/Cut_sugarcane.jpg



Disponível em: <http://www.thebodyshop.com/image/values-campaigns/cft/alcohol/Alcohol9.jpg>



Disponível em: <http://static.guim.co.uk/sys-images/Guardian/Pix/pictures/2008/03/24/sugar10c.jpg>



Caminhão carregando cana-de-açúcar numa estrada próxima a Campos dos Goytacazes no Estado do Rio de Janeiro, 10 de Novembro de 2010.

Fonte: REUTERS/SERGIO MORAES

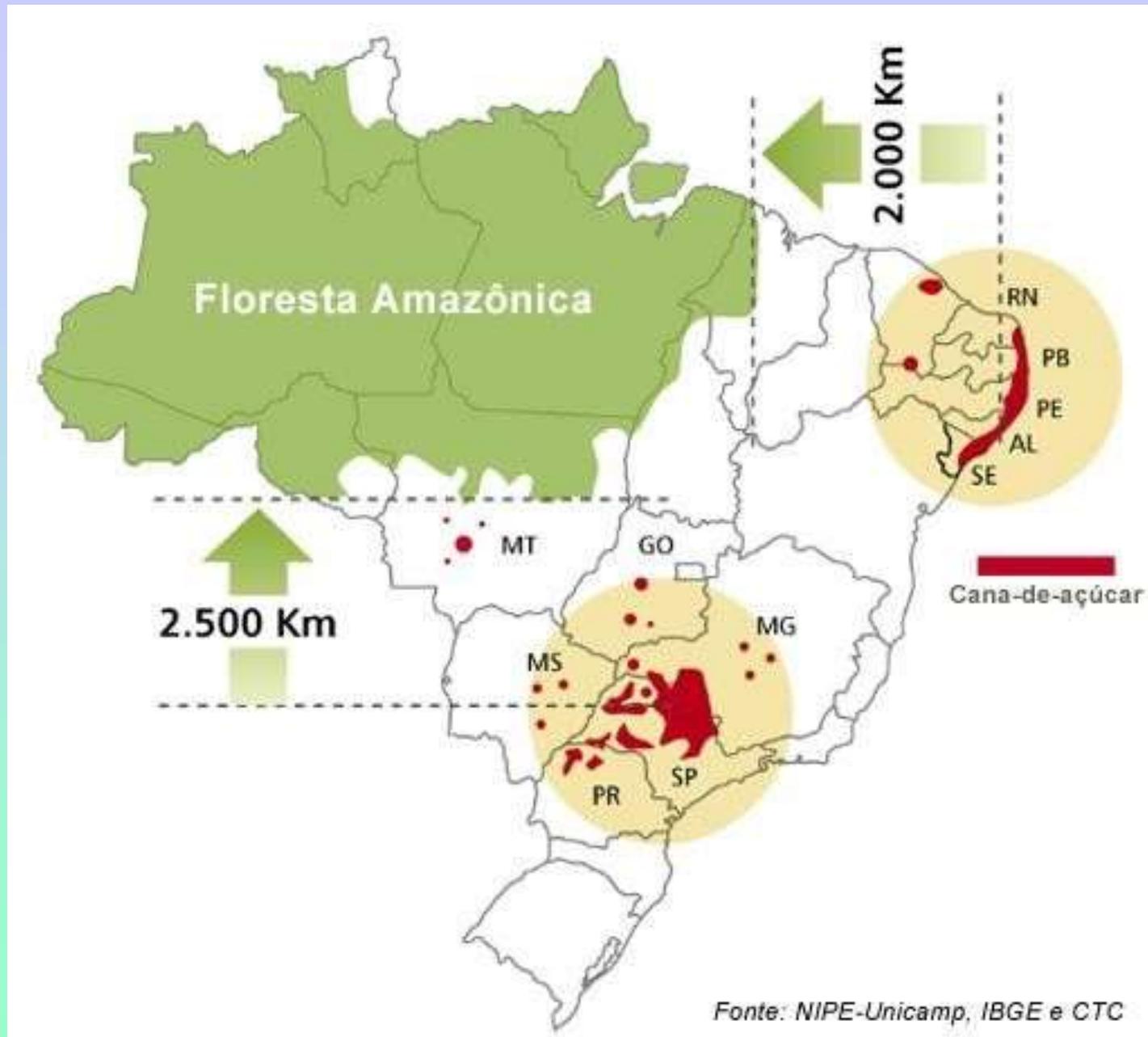




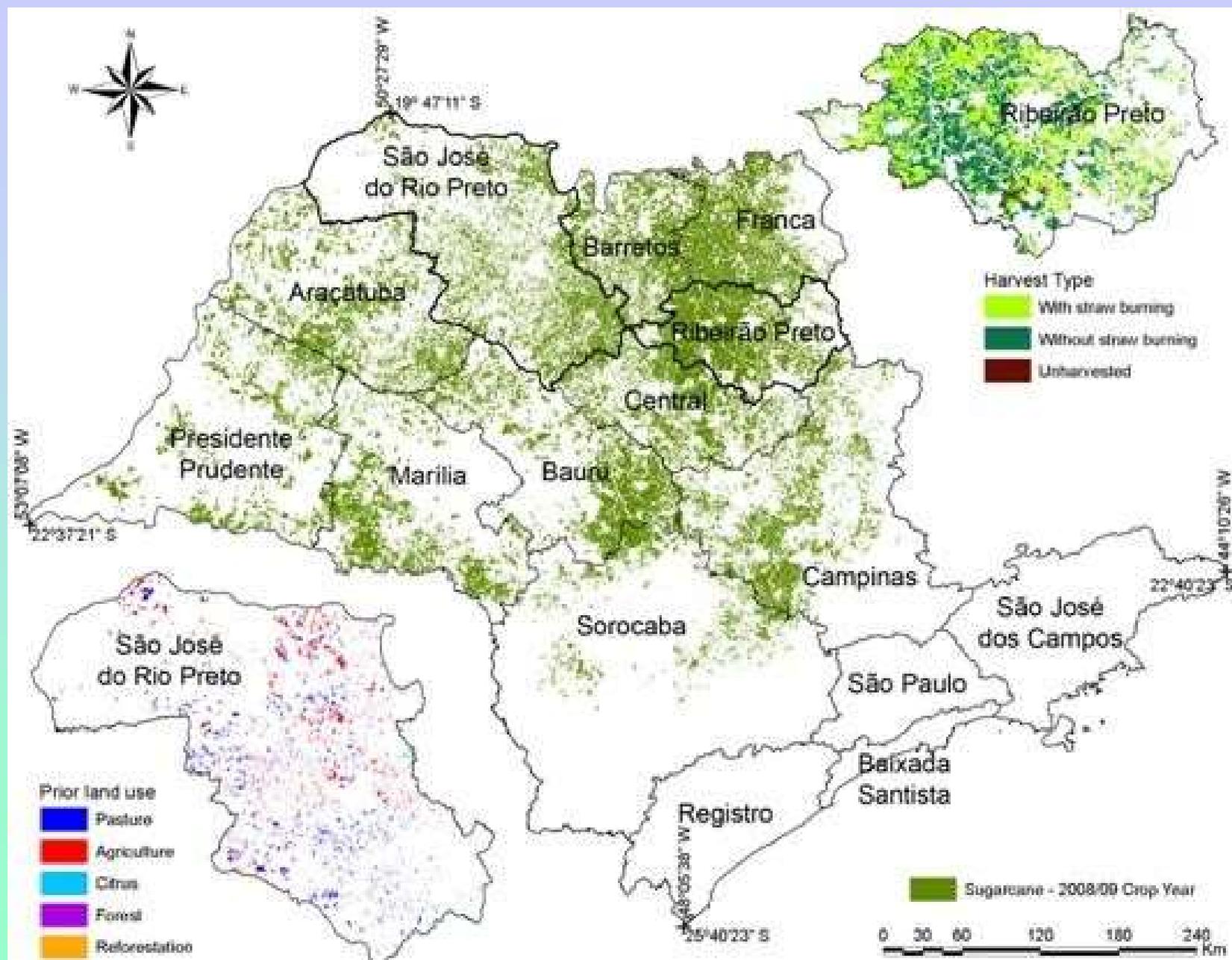


Vista panorâmica da Refinaria Costa Pinto que produz açúcar e etanol. Piracicaba, São Paulo, Brasil

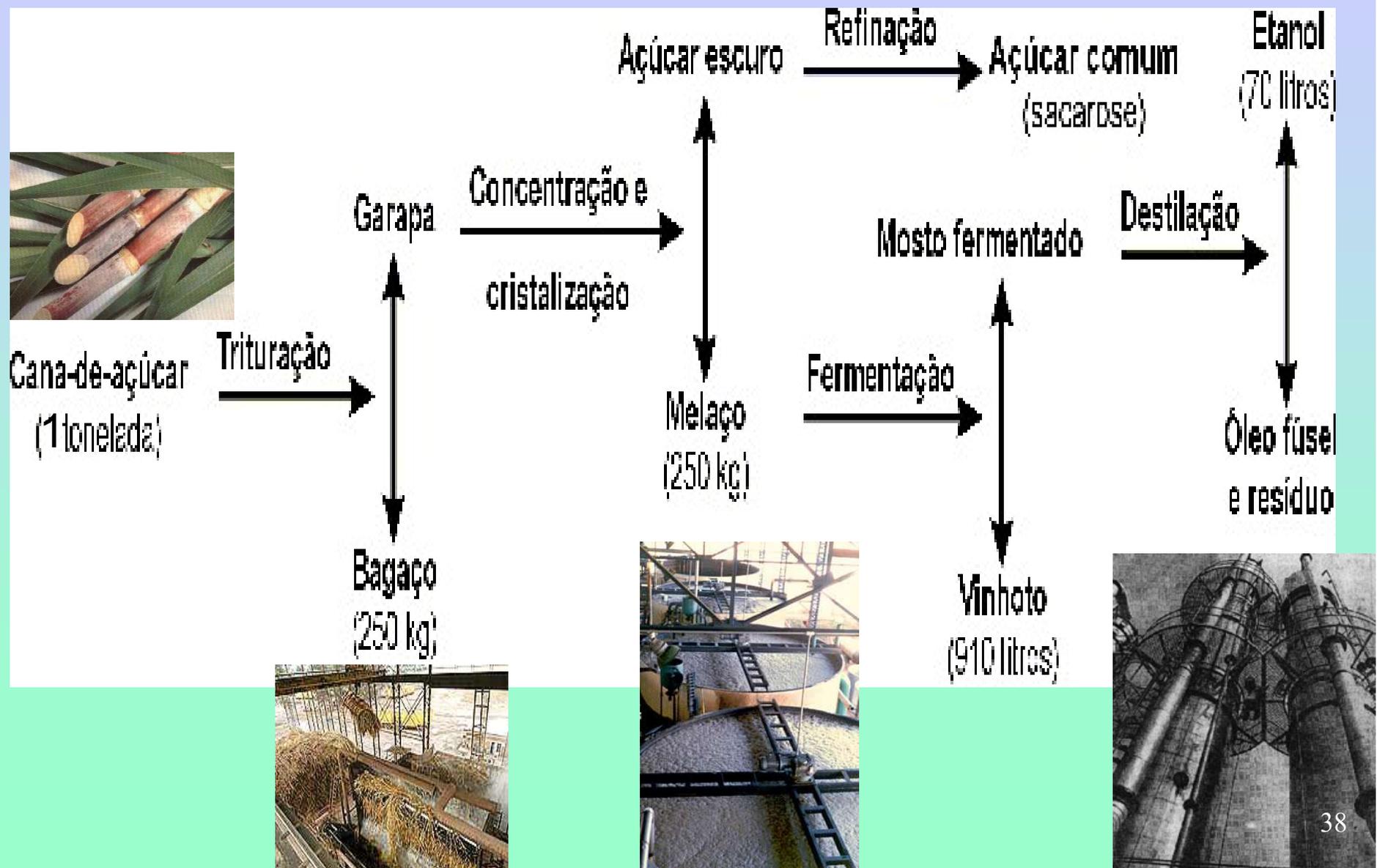
Data: 19 de Outubro de 2008.



Setor Sucroenergético - Mapa da Produção



Fermentação a partir de cana de açúcar



Produção de *Etanol acoplada a de Açúcar*

1000 kg
cana de açúcar



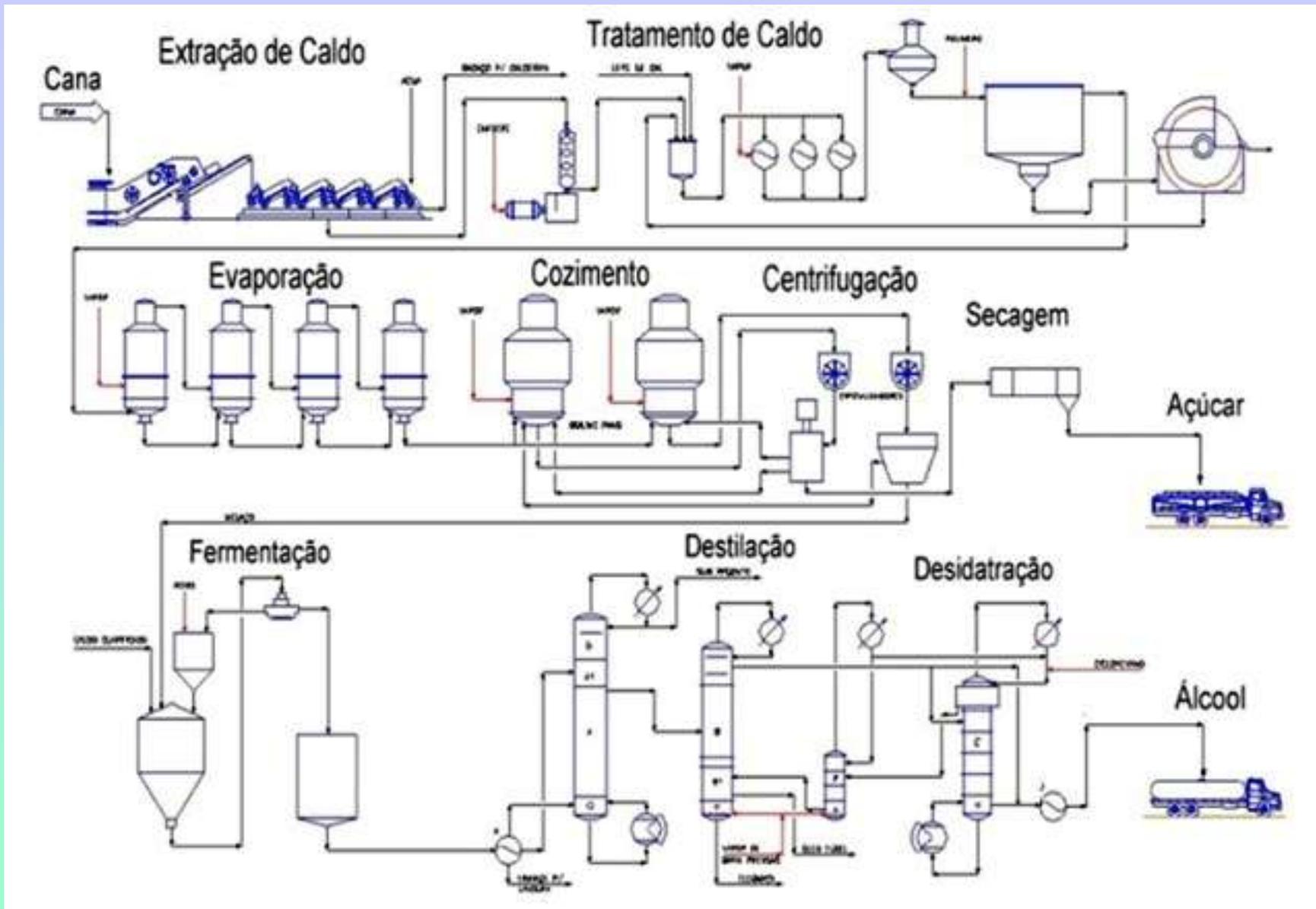
70 L álcool
910 L vinhoto



90 kg
açúcar



12 L álcool
156 L vinhoto

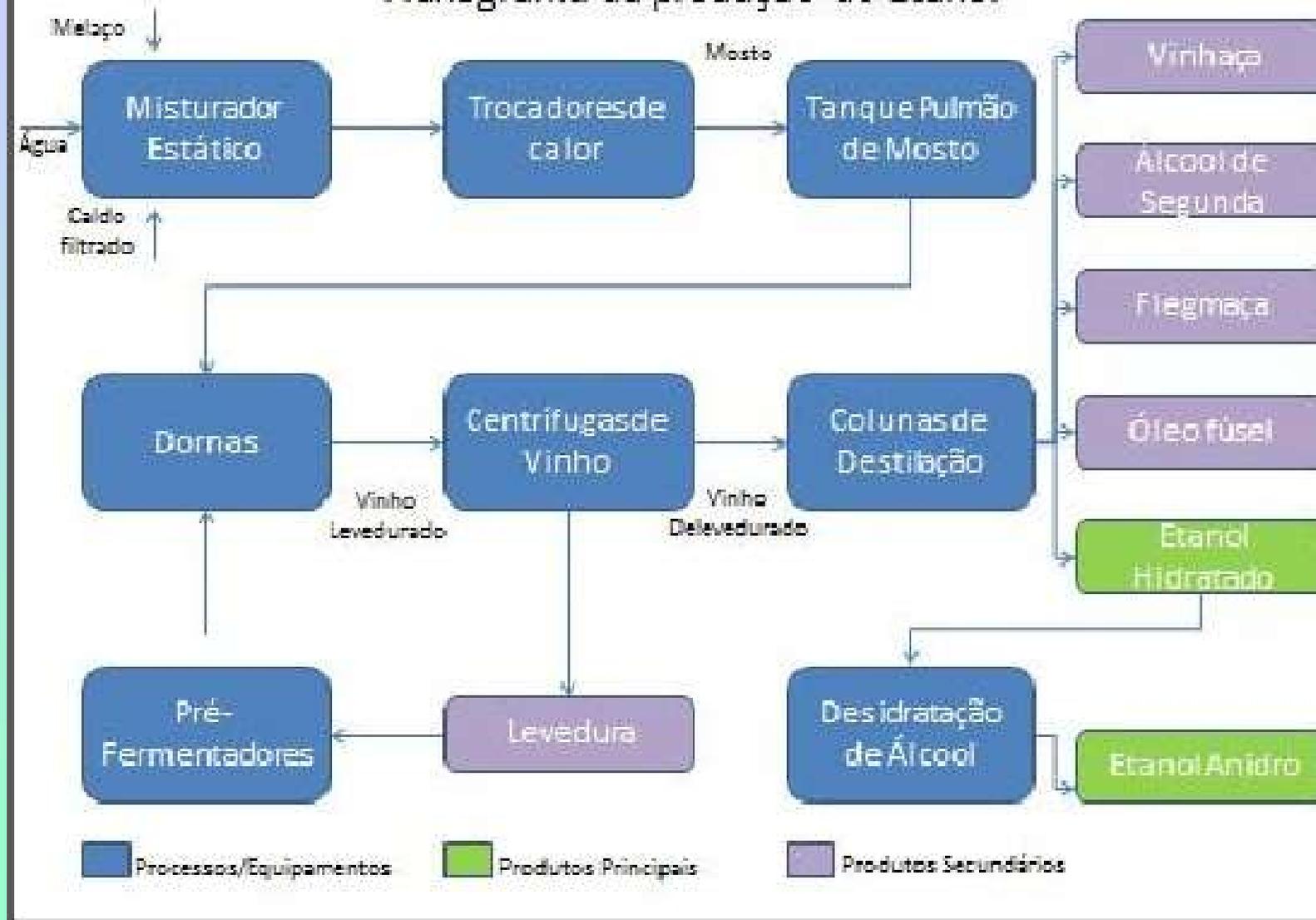


Etanol de Primeira Geração: a fermentação da sacarose

O processo atual de produção de etanol a partir da cana é realizado pela extração e fermentação do caldo, que possui aproximadamente 15% de sacarose e 15% de fibras (Macedo, 2008). Antes do processo de fermentação, que ocorre por meio de linhagens selecionadas de leveduras *Saccharomyces cerevisiae*, o caldo é esterilizado e purificado. O álcool produzido é então separado da água por destilação. Uma parte destes processos é impulsionada pela energia obtida com a queima do bagaço da cana que alimenta as caldeiras e gera eletricidade. Mesmo utilizando o bagaço para a geração de energia, a usina possui um excesso de cerca de 10% da biomassa que pode ser queimada e vendida na forma de energia elétrica (Macedo e Nogueira, 2005).

Com técnicas mais eficientes de conservação da energia produzida pela queima do bagaço esse excesso pode chegar a 45%.

Fluxograma da produção do Etanol



Etanol de Primeira Geração: a fermentação da sacarose

Cerca de 40-50% da palha da cana que hoje é mantida no campo pode ser recuperada e incorporada à biomassa (Macedo e Nogueira, 2005). Esse excesso de biomassa juntamente com os 15% de fibras poderá ser utilizada para produção de etanol celulósico.

A produção de etanol a partir da cana-de-açúcar ocorre, atualmente, pela fermentação alcoólica da sacarose.

Diante das perspectivas de se obter o etanol celulósico, o etanol obtido da sacarose, assim como o obtido a partir do amido de milho, nos EUA, tem sido chamado de etanol de primeira geração. Dessa forma, o etanol celulósico produzido a partir dos polissacarídeos da parede celular vegetal é denominado **etanol de segunda geração**. No entanto, para a produção do etanol celulósico, preve-se diversas etapas que podem ser claramente distinguidas: 1) hidrólise química; 2) enzimática; e 3) auto-hidrólise.

Fonte: **As rotas para o etanol celulósico no Brasil**

Marcos S. Buckeridge, Wanderley D. dos Santos; Amanda P. de Souza

Departamento de Botânica - IBUSP

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

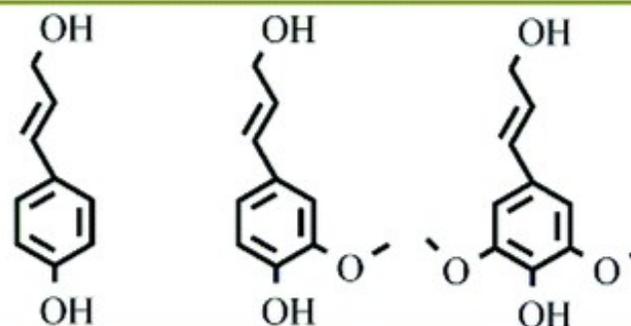
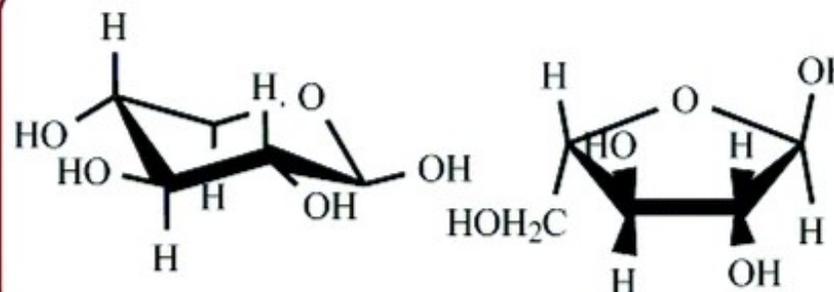
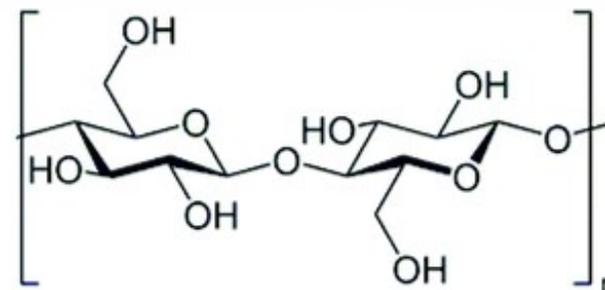
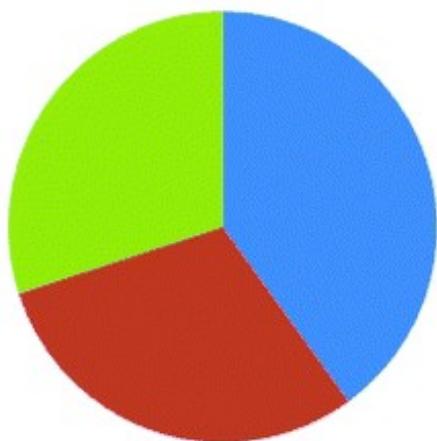
Etanol de Segunda Geração: obtenção do etanol celulósico por hidrólise ácida

No processo de obtenção de etanol celulósico, o objetivo é “desmontar” a parede celular para utilizar os polissacarídeos como fonte de açúcares fermentáveis. No entanto, já foi salientado o quão complexa é a estrutura da parede e o quão “delicado” deve ser este processo de desmonte para preservar intactos os monossacarídeos que serão usados para fermentação. Atualmente se utiliza um processo denominado hidrólise ácida para desmontar a parede celular. Embora o processo seja funcional, ainda não é eficiente para permitir a produção comercial de etanol.

O processo básico de hidrólise ácida consiste em utilizar um ácido forte para atacar as ligações glicosídicas entre os monossacarídeos de um polissacarídeo.

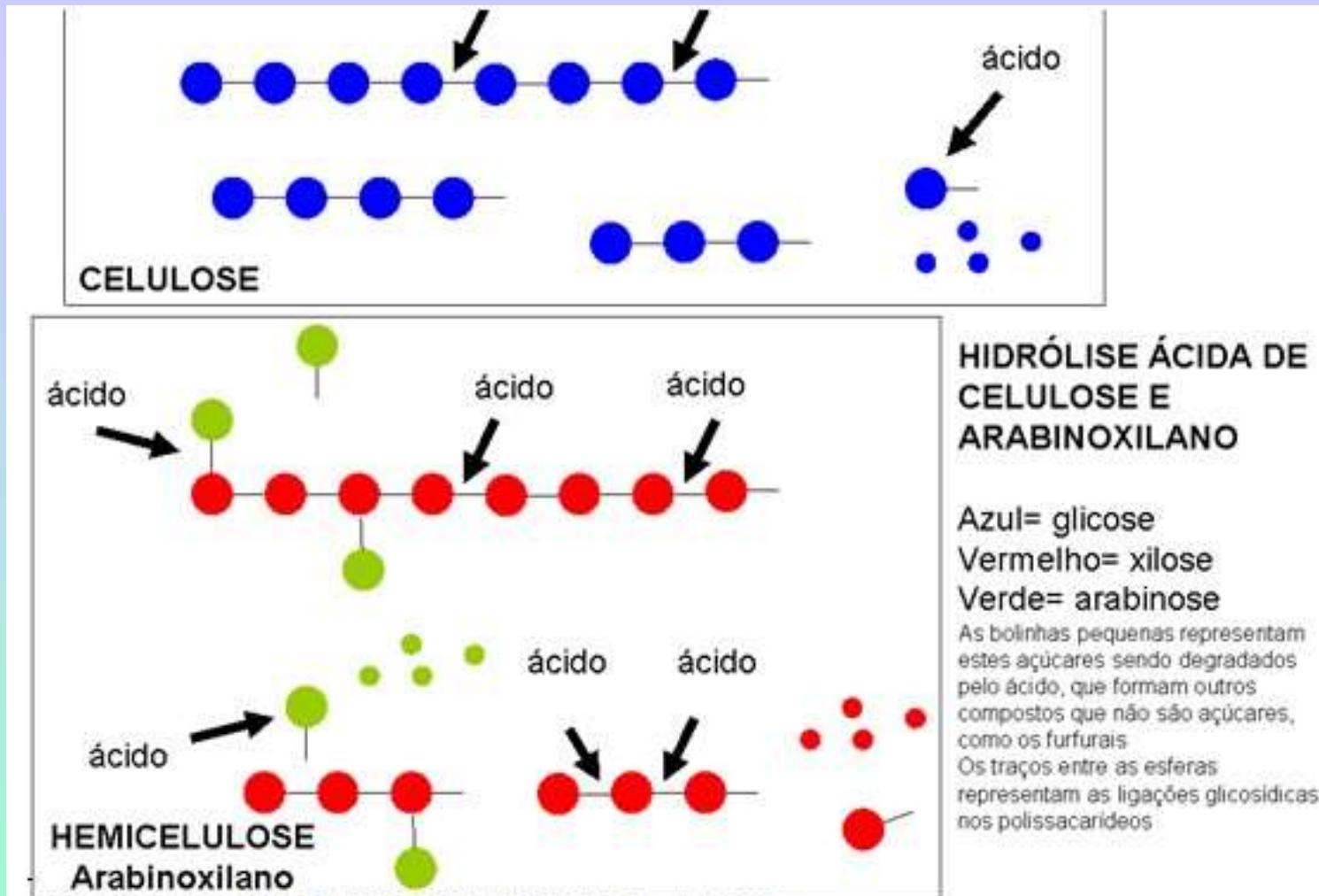
Biomassa

- Celulose:
- Hemicelulose:
- Lignino

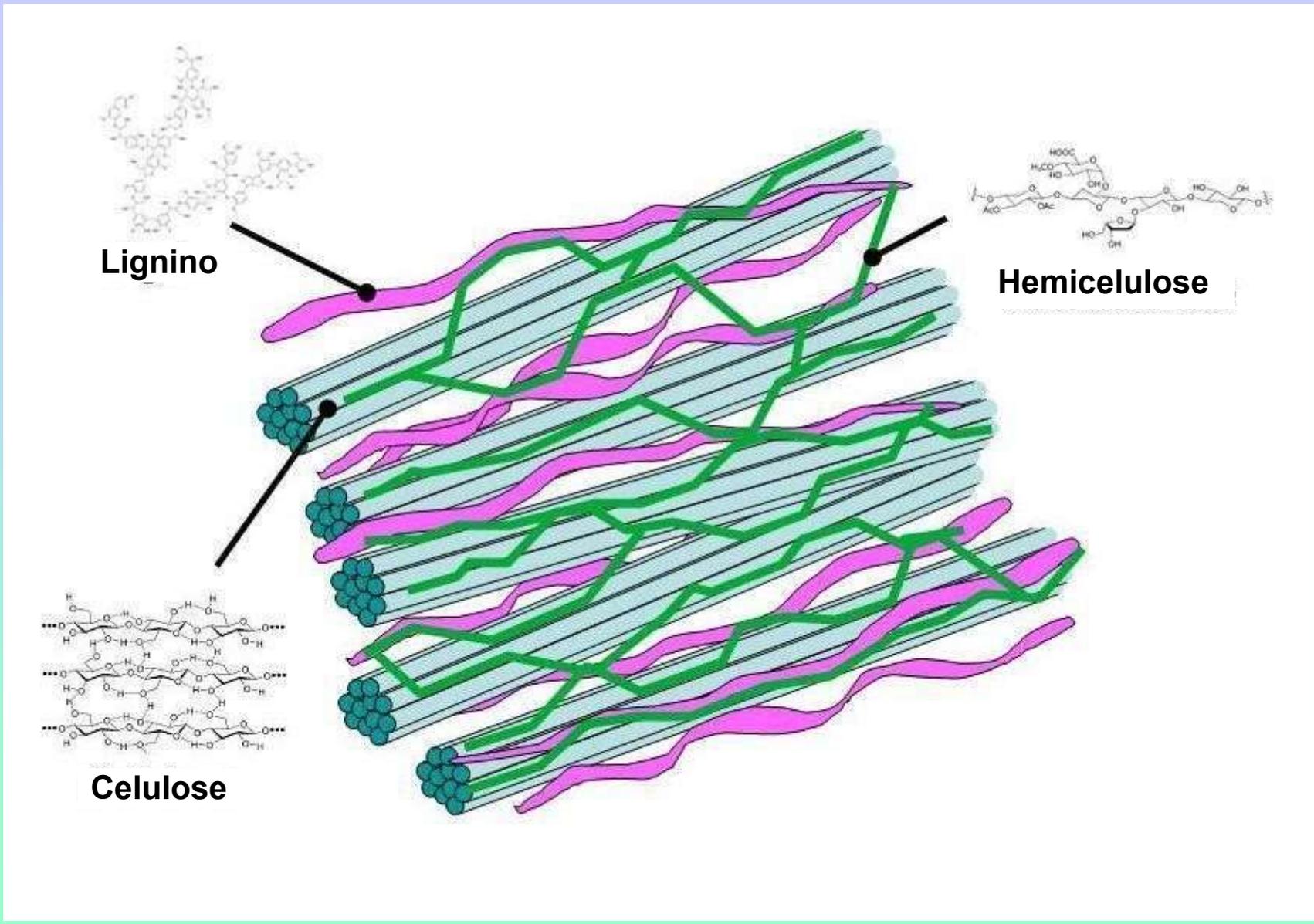


Disponível em:

http://pubs.rsc.org/services/images/RSCpubs.ePlatform.Service.FreeContent.ImageService.svc/ImageService/Articleimage/2014/GC/c3gc41365a/c3gc41365a-f1_hi-res.gif



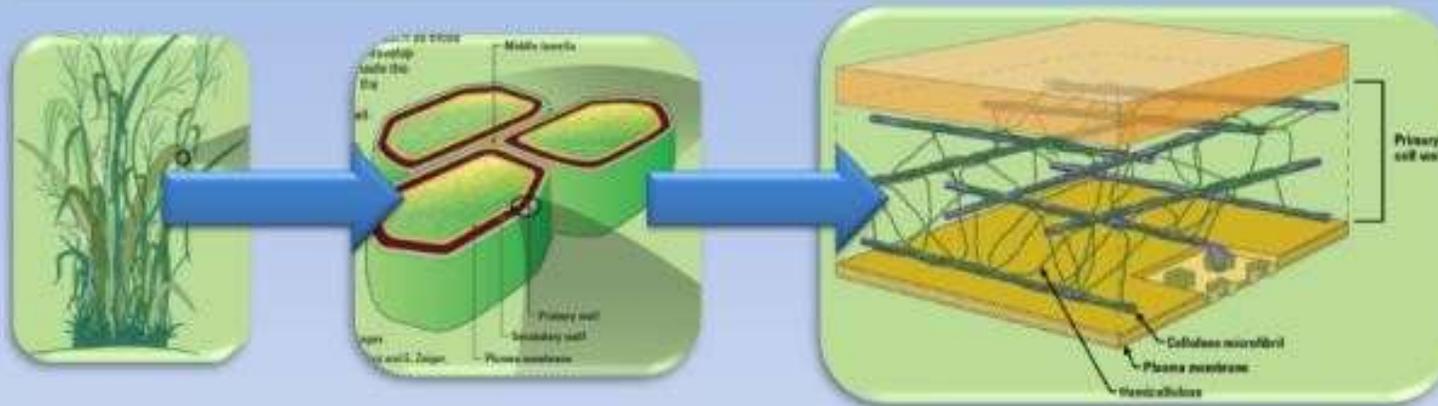
Os ácidos, normalmente utilizados para a obtenção de hidrólise em laboratório, são ácido sulfúrico, ácido clorídrico e o ácido trifluoroacético. Há vantagens e desvantagens em relação a cada um. Enquanto os ácidos sulfúrico e clorídrico discriminam pouco as ligações glicosídicas de diferentes tipos, atacando celulose e hemiceluloses de forma similar, o ácido trifluoroacético quebra preferencialmente as ligações mais fracas, que são as ligações do tipo alfa (α) presente nas ramificações das hemiceluloses.



Disponível em: <http://www.mpg.de/6780507/zoom.jpg>

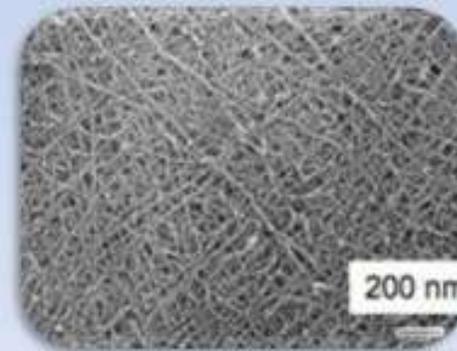
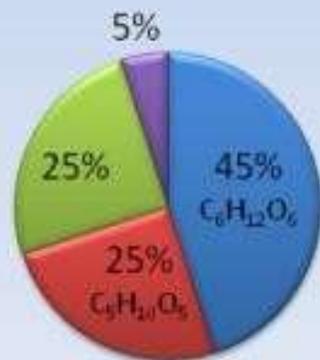
Cellulose

Where is it?



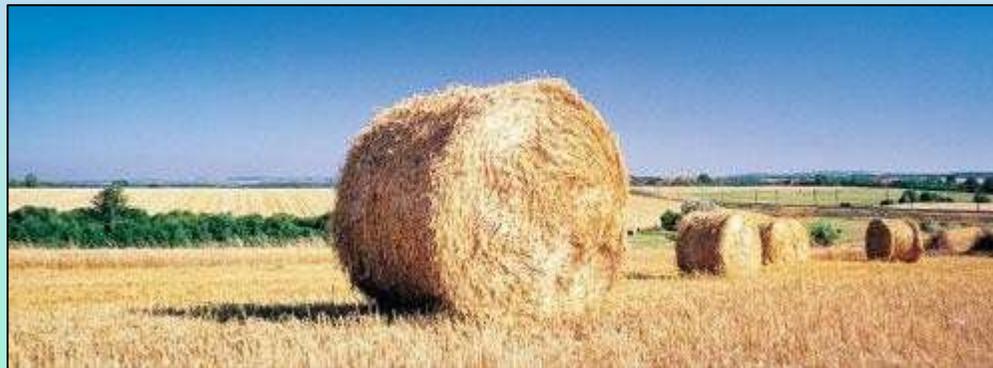
Sugar producers in plant walls

■ Cellulose ■ Hemicellulose ■ Lignin ■ Other

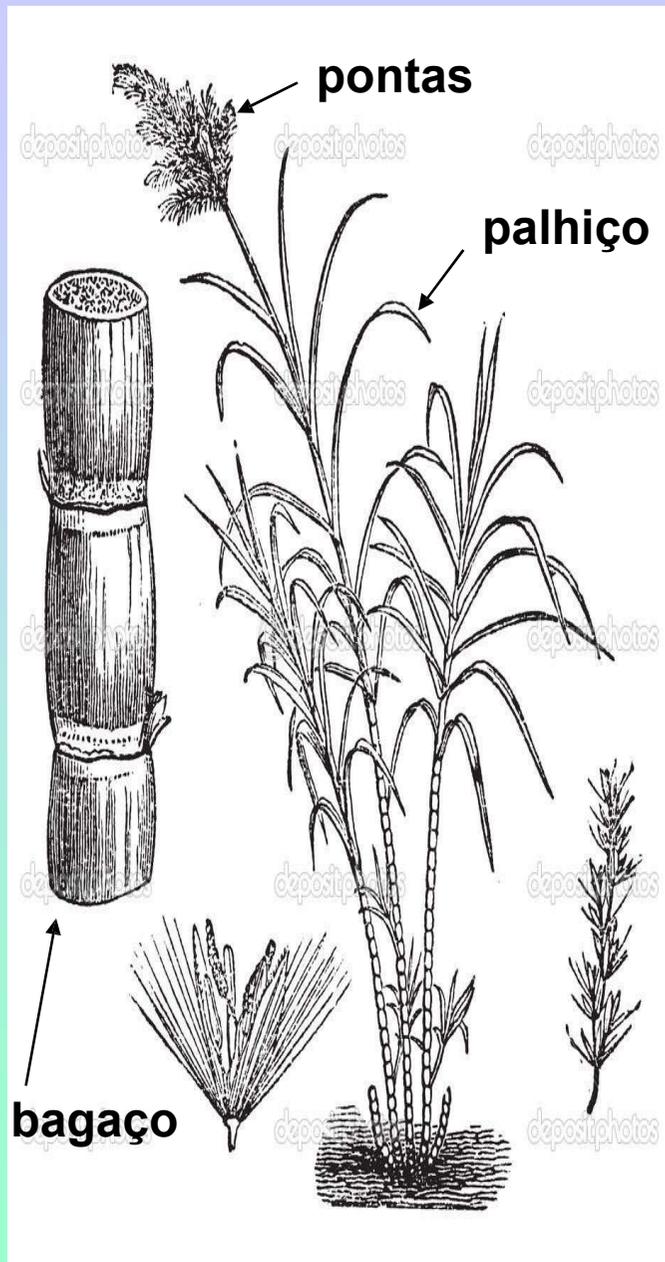


Source: Somerville et al., Science 306:2206 (2004); Breaking the Biological Barriers to Cellulosic Ethanol, DOE/SC-0095 (2006)

Disponível em: <http://www.timaras.com/research/biofuels/Slide20.PNG>



Disponível em: http://www.abengoa.com/export/sites/abengoa_corps/resources/images/biocombustibles2g.jpg



Disponível em: http://static6.depositphotos.com/1041725/670/v/950/depositphotos_6708282-Sugar-Cane-vintage-engraving..jpg

Comentário 1:

Nos processos industriais, a hidrólise ácida tem sido realizada com ácido sulfúrico (H_2SO_4). O fato de haver inicialmente (1990) dificuldades para a comercialização de etanol produzido a partir da hidrólise ácida do bagaço da cana estava relacionado a dificuldades técnicas e operacionais que resultavam em um custo elevado do produto final (cerca de US\$ 0,80 contra US\$ 0,35 e US\$ 0,27 por kg de etanol obtido a partir do amido e da sacarose, respectivamente). Parte deste custo se deve ao fato de que para que a hidrólise ocorra de forma eficiente é necessário aquecer o polissacarídeo na solução ácida. A temperatura ideal para a quebra de hemiceluloses está entre 100 a 120° C e a concentração ideal de ácido sulfúrico é ao redor de 3% (Buckeridge & Dietrich, 1990). No caso específico da cana de açúcar, este custo é minimizado devido ao fato de parte do bagaço ser queimado para alimentar as caldeiras e produzir a energia elétrica consumida no processo.

Fonte: BUCKERIDGE, M.S. & DIETRICH, S.M.C. (1990) **Galactomannan from Brazilian legume seeds**. Revista Brasileira de Botanica 13: 109-112.

Comentário 2:

Outra dificuldade advém da necessidade de neutralização da solução contendo os açúcares para que se possa proceder à fermentação. Em geral, para a neutralização, utiliza-se hidróxido de cálcio (calcário). No entanto, ao se proceder desse modo, o ácido sulfúrico é convertido em sulfato de cálcio e não pode ser reaproveitado (Ali, Mark & Daniel, 2006). Esse é o principal fator que contribui para o alto custo da técnica. Para se obterem níveis aceitáveis de comercialização (< US\$ 0,36/kg) será necessária a redução dos custos associados principalmente ao consumo e reutilização do ácido e ainda a melhora na produtividade e eficiência na conversão da biomassa (Kaylen *et al.*, 2000; Goldenberg, 2007).

Fontes:

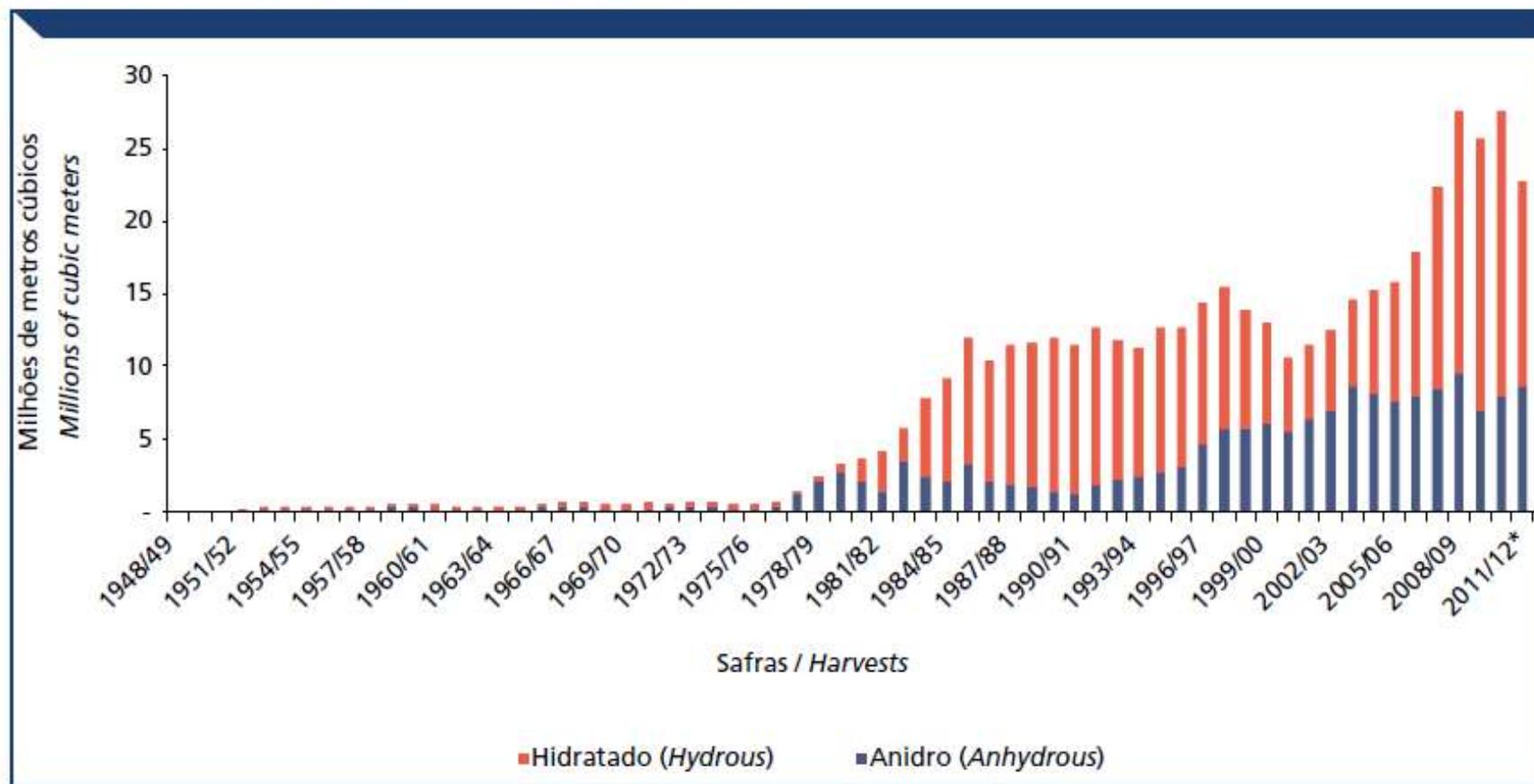
ALI, M. MARK, R. & DANIEL, J.S. (2006). **Conditioning hemicelluloses hydrolysates for fermentation: effects of overliming pH on sugar and ethanol yields.** Process Biochemistry 41: 1806 – 1811.

KAYLEN, M. VAN DYNE, D.L., CHOI, M., BLASÉ, M. (2000). **Economic feasibility of producing ethanol from lignocellulosic feedstocks.** Bioresource Technology 14: 19-32.

GOLDEMBERG, J. (2007). **Ethanol for a sustainable energy future.** Science 315: 818.

Gráfico 13 – Evolução da produção brasileira de etanol, por tipo

Chart 13 – Ethanol production in Brazil, by type



Fonte: MAPA - Anuário Estatístico da Agroenergia: 2012, 2013.

Evolução da produção de veículos flex-fuel no Brasil: 2003 - 2007

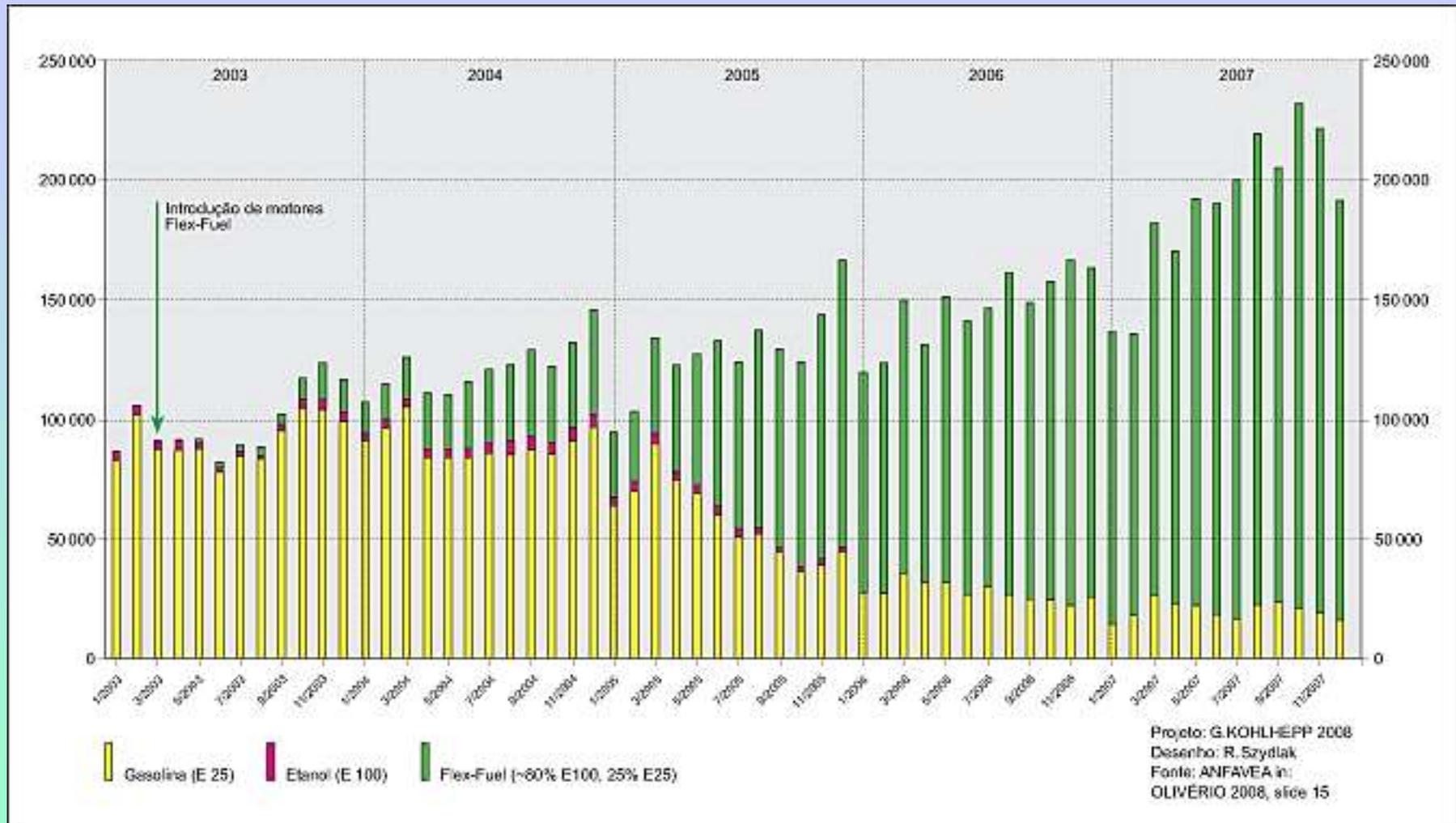
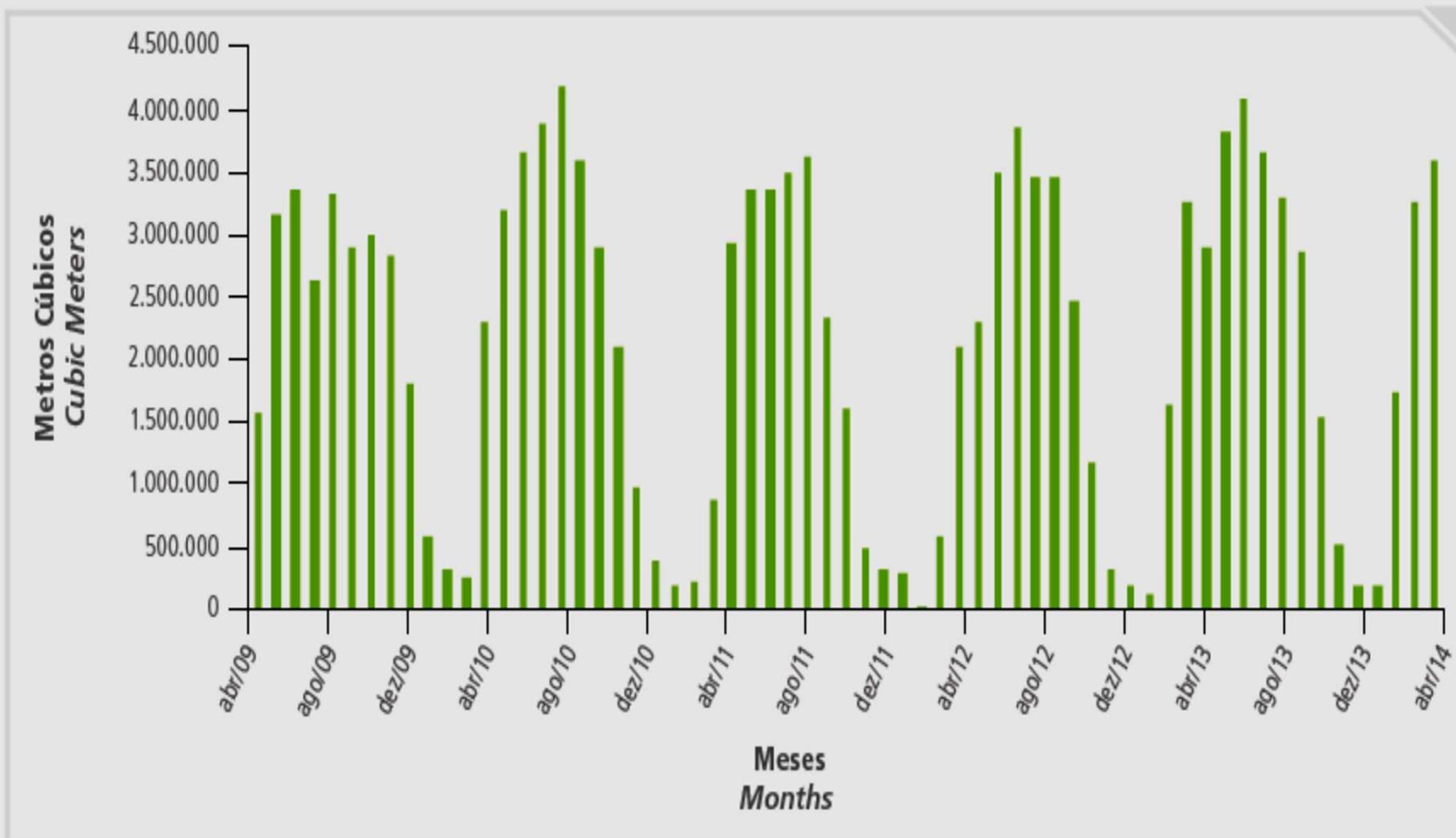


Figura 6 – Uso de combustível nos carros 0 km no Brasil, 2003-2007.

Gráfico 18 – Produção mensal de etanol total no Brasil, em m³

Chart 18 – Brazilian monthly production of total ethanol, in m³



Source: MAPA/SPA-Ministério da Agricultura, Pecuária e Abastecimento/Secretaria de Produção e Agroenergia. Anuário Estatístico da Agroenergia: 2012. Brasília (DF), 2013.

Aspectos ambientais da produção de etanol a partir da cana-de-açúcar

Aspectos ambientais da produção de etanol a partir da cana-de-açúcar

a) Água de lavagem da cana

A cana-de-açúcar, geralmente, é lavada antes de ser processada. Esta operação destina-se a retirar os resíduos sólidos que são carreados durante a operação de corte, transporte e recepção na usina. Para a lavagem da cana-de-açúcar, utiliza-se uma quantidade significativa de água. Os fabricantes de equipamentos de usinas de açúcar e álcool recomendam, para o caso de carregamento mecanizado, a utilização de 6000 litros de água por tonelada de cana. Entretanto, a utilização é bastante variável nas usinas, indo de 2000 até 7000 litros de água por tonelada de cana, de acordo com a quantidade de água disponível. A água utilizada para a lavagem, tanto pode ser proveniente de um manancial qualquer ou ser da própria água utilizada nas colunas barométricas (BRAILE *et al.*, 1993).

Aspectos ambientais da produção de etanol a partir da cana-de-açúcar

b) Vinhaça

As destilarias de álcool ou aguardente produzem, como principal efluente, a vinhaça. Este material recebe diversas denominações regionais (restilo, vinhoto, caldos, vinhote, tiborna, coxixi ou garapão), tem sido a longo tempo, uma constante preocupação dos órgãos responsáveis pelo controle da poluição.

A vinhaça disposta na cultura cumpre duas finalidades: irrigação e fertilização.

Tem por objetivo melhorar as propriedades físicas e químicas do solo, elevar o seu pH concorrendo para sua neutralização ou alcalinização, aumentar o poder de retenção de água e sais minerais, restaurar, conservar ou aumentar a fertilidade, aumentar a microflora e produzir condições ideais para o cultivo de cana (CETESB, 1985).

A taxa aceitável tem sido até 300m³/ha. Taxas elevadas conduzem a efeitos indesejáveis, citando-se: comprometimento da qualidade da cana para produção de açúcar, poluição do lençol freático, salinização do solo, etc.

Aspectos ambientais da produção de etanol a partir da cana-de-açúcar

c) queima da cana antes da colheita

Prática polêmica, porém comum para facilitar o corte e a limpeza do terreno, além de aumentar o teor percentual de sacarose (devido à evaporação de água causada pelo calor da queima). Esta atividade contribui também para uma redução da mão-de-obra e conseqüentemente dos custos de produção.

Adotada na década de 1960, em meio ao processo de elevação da capacidade produtiva das usinas, proporcionou um aumento na produtividade do trabalho de 2,5 toneladas/dia para 4 toneladas/dia. Entretanto, se por um lado as queimadas facilitam o corte manual e aumentam a produtividade, por outro, podem trazer sérios problemas à saúde da população.

A queima de biomassa gera material particulado, constituído por cerca de 94% de partículas finas e ultrafinas, e é o poluente que apresenta maior toxicidade, com o agravante de que essas partículas são capazes de atingir o sistema respiratório do ser humano.

Aspectos ambientais da produção de etanol a partir da cana-de-açúcar

c) queima da cana antes da colheita

Os particulados liberados pelas queimadas contêm compostos químicos conhecidos como hidrocarbonetos policíclicos aromáticos (HPAs). A presença desses compostos químicos no ar, mesmo em concentrações reduzidas, pode agravar os problemas respiratórios, sendo que alguns deles são potencialmente cancerígenos.

No estado de São Paulo, a Lei Estadual nº 11.241, de 19 de setembro de 2002, estabeleceu a redução gradativa da queima prévia da cana nas áreas mecanizáveis, com eliminação total deste procedimento até o ano de 2021. Nas áreas não mecanizáveis, com extensão superior a 150 hectares, a queima deve ser eliminada até o ano de 2031. O governo de São Paulo e a UNICA assinaram, em junho de 2007, um protocolo de cooperação, reduzindo estes prazos: as queimadas nas áreas mecanizáveis devem ser extintas até 2014 e no caso das áreas em que não é possível a mecanização, o prazo se estenderá até 2017.



Queimada em canavial na região de Araraquara, SP
Foto: Andrew Allen in 'Unesp Ciência', fevereiro de 2010.

Aspectos ambientais da produção de etanol a partir da cana-de-açúcar

d) O uso de fertilizantes e defensivos agrícolas

A utilização de fertilizantes na agricultura brasileira, apesar de ser relativamente baixa, pode apresentar riscos aos recursos naturais. Na cultura da cana, a proporção é inferior comparativamente às culturas como algodão, café ou laranja. Quanto ao uso de defensivos agrícolas para o combate às pragas, às doenças da cana-de-açúcar e às ervas daninhas, este envolve a utilização de altas quantidades de herbicidas, superior às utilizadas em culturas como café ou milho.

Consumo de herbicidas	Ano	Café	Cana-de-açúcar	Citros	Milho ¹	Soja ¹
Produto Comercial (kg/ha)	1999	3,38	2,78	3,23	2,51	4,44
	2001	3,99	5,24	5,80	2,84	4,57
	2003	2,42	4,14	6,69	3,31	4,92

¹ Foi considerado o uso de agrotóxicos para o tratamento de sementes.

Fonte: Extraído de Macedo (2007). Elaborada a partir de dados do SINDAG e IBGE/CONAB.

A transição da colheita manual para a colheita mecanizada



Figura 1 Colheita de cana-de-açúcar crua
Fonte: Caderno Copersucar, 1981







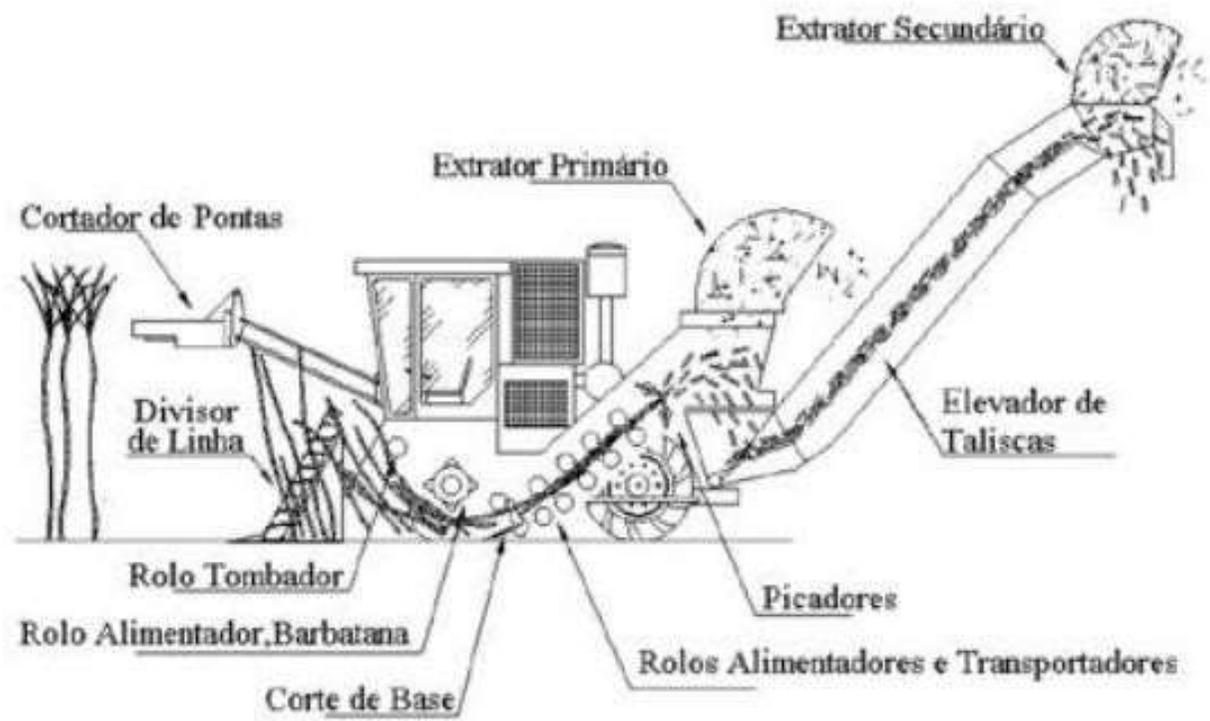


Figura 5 Esquema de uma colhedora
Fonte: Neves (2003)



Figura 18 Sistema do extrator de uma colhedora
Fonte: Elaboração do autor setembro de 2010



Figura 10 Colhedora e caminhão de transbordo
Fonte: Acervo Usina Santa Cruz, São Paulo - SP

A mecanização aumentou num primeiro momento o número de demissões e agora por estar usando menos mão-de-obra temporária é responsável por reduzir o número de desligamentos no cultivo da cana. Deve se lembrar que a mecanização abre 10 novos postos de trabalho na atividade de colheita de cana e tira entre 80 a 100 homens do corte que deixam de ser contratados,

Fonte: MORENO, Luis Marcelo. Transição da colheita manual para mecanização total da colheita da cana-de-açúcar no estado de São Paulo: cenários e perspectivas. Dissertação de Mestrado. PPGE/USP, 2011.

Balanço energético do etanol a partir da cana-de-açúcar

Tabela 10

Balço de energia na produo de álcool, com diversas matérias-primas

Matérias-primas	Energia renovável / energia fóssil usada	Produtividade (litros/ha)
Álcool de milho (EUA)	1,3-1,6	4.700
Álcool de cana-de-açúcar (Brasil)	8,9	7.000
Álcool de beterraba (Alemanha)	2,0	1.600
Álcool de sorgo sacarino (África)	4,0	1.100
Álcool de trigo (Europa)	2,0	1.100
Álcool de mandioca	1,0	4.900

Fonte: Macedo (2007); Machado (2007).

Fontes:

MACEDO, I.C. (org.). A energia da cana-de-açúcar – doze estudos sobre a agricultura da cana-de-açúcar no Brasil e a sua sustentabilidade. 2ª ed. São Paulo: Ed. ÚNICA, 2007.

MACHADO, C.C.M. Produção de combustíveis líquidos a partir do amido. In: Etanol, sl; s. ed., 2007.

Tabela 11

Fluxos de energia na produção de cana-de-açúcar e etanol (em MJ/t cana, 2005)

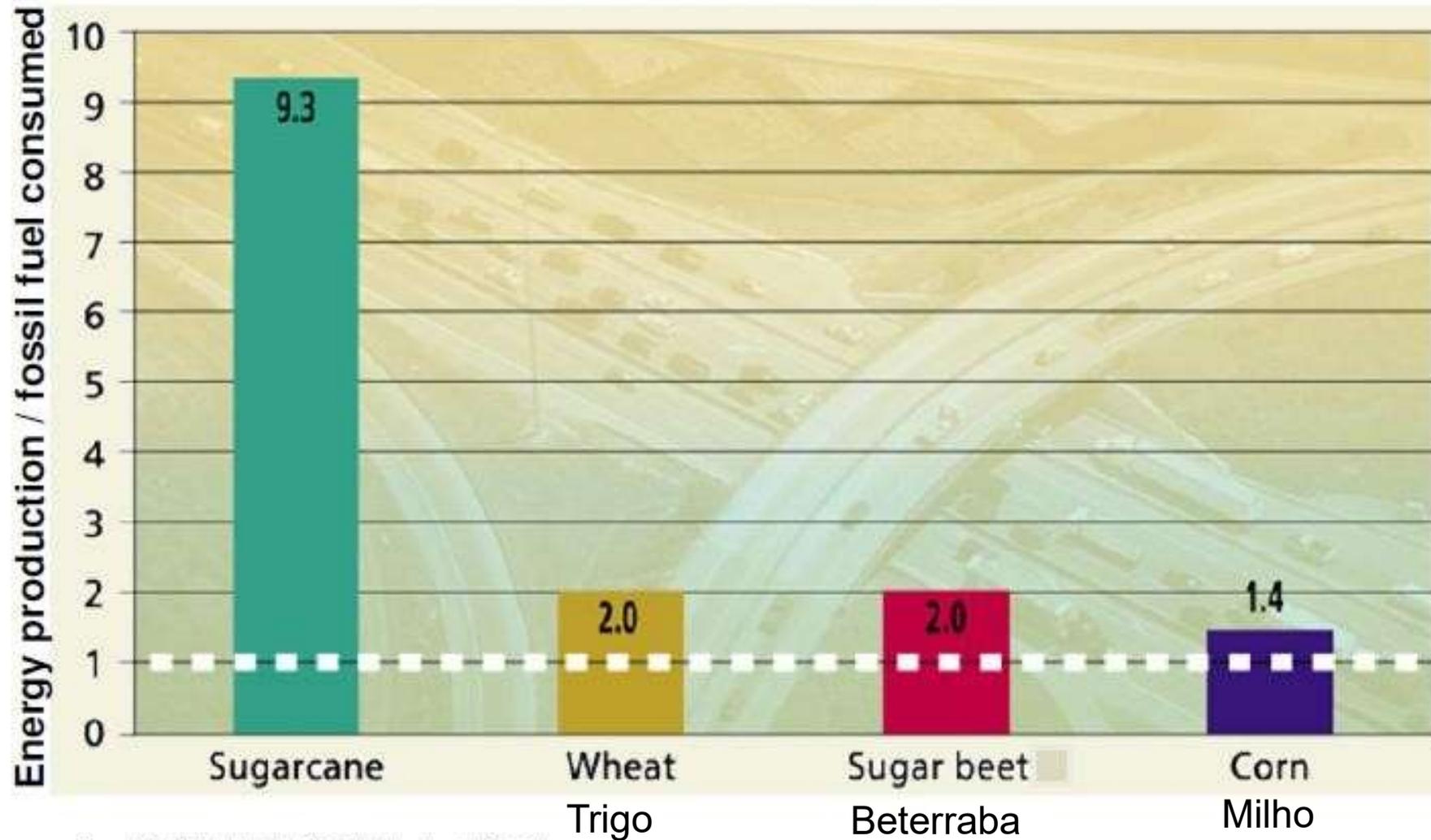
Produção/transporte de cana	182,3
Processamento para etanol	43,2
Energia fóssil usada (total)	225,4
Energia no etanol produzido	1.897,4
Energia no bagaço excedente	95,3
Eletricidade excedente	10,8
Energia renovável produzida (total)	2.012,4
Energia renovável produzida/Energia fóssil usada	
Etanol + bagaço	8,8
Etanol + bagaço + eletricidade	8,9

Nota: O valor para a eletricidade excedente é 2,1 kWh/t de cana.

Para esse cálculo foi considerado o combustível necessário para uma termelétrica com ciclo combinado a gás natural, com eficiência de 40%.

Fonte: Extraído de Macedo (2007).

Energy Balance of Ethanol Production from Different Feedstocks



Source: World Watch Institute (2006) e Macedo et al. (2008).
Produced by UNICA

CHARACTERISTICS OF DIFFERENT CROPS FOR ETHANOL PRODUCTION

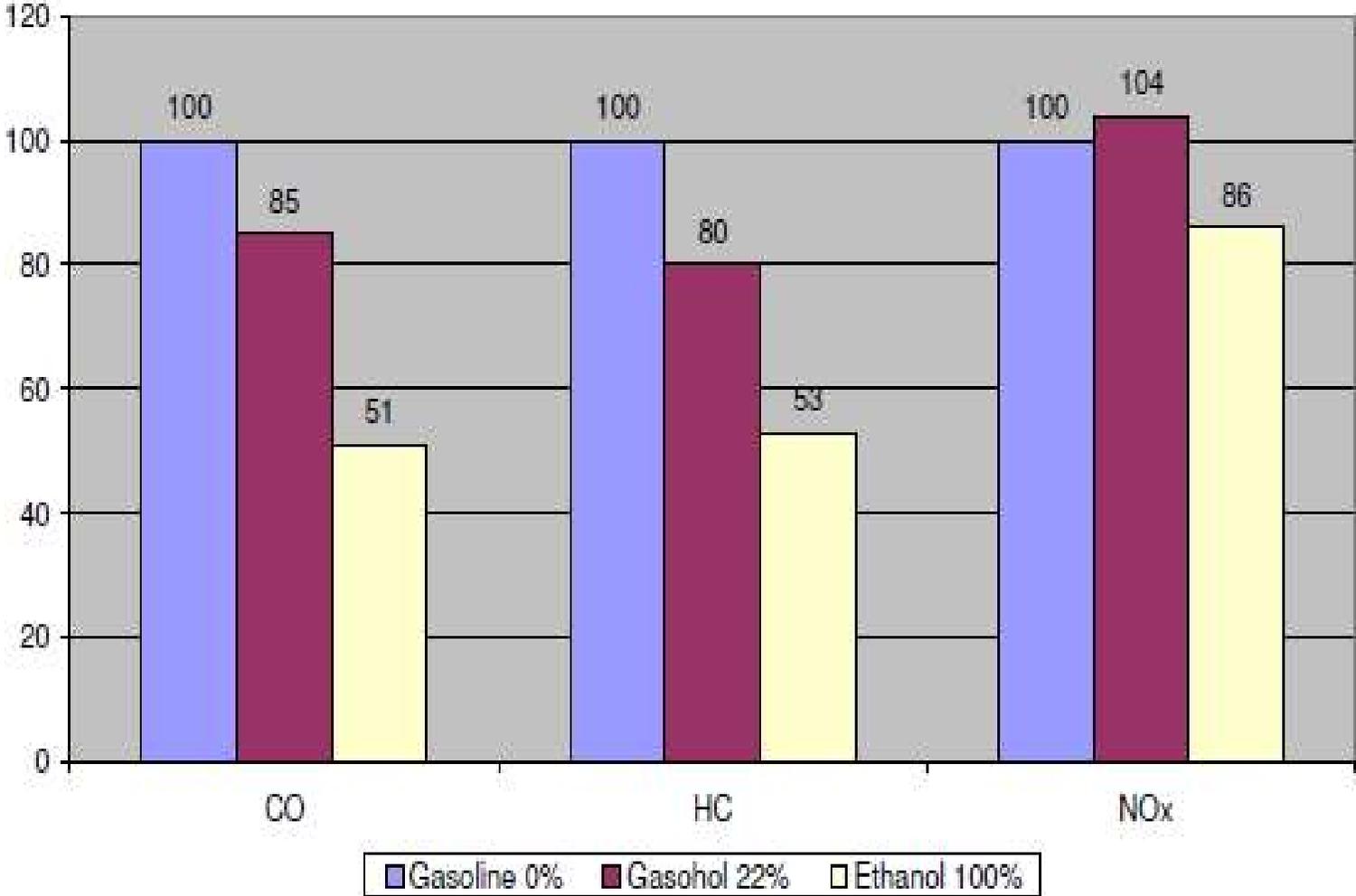
	Sugar cane (in Brazil)	Corn (in the USA)	Sugar beet (in Europe)
Energy balance (a)	8.1 - 10	1.4	2.0
Production cost (€/100 liters) (b)	14.48	24.83	52.37
CO ₂ reduction compared to gasoline (c)	84%	30%	40%
Total production (billion liters) (D)	22.5	34	733.6
Area cultivated (million hectare) (E)	3.4	8.13	133.4
Yield (liter/hectare) (D/E)	6,471	4,182	5,500*

(a) Defined as energy output in a liter of ethanol over fossil fuel energy needed to produce. Sources: Macedo et al, 2008; World Watch Institute, 2006.

(b) Henniges, O., and Zeddies, J., Competitiveness of Brazilian ethanol in the EU. 2004

(c) Doornbosh and Steenblik, 2007. * theoretical yield, as presented by Word Watch Institute, 2006.

Etanol (*Ethanol*)/Gasolina (*Gasoline*)



Fonte: ANFAVEA, 2005.

Fuel	CO ₂ Emission (g) per megajoule of energy produced		Total
	Direct	Indirect (deforestation and other effects)	
Gasoline	95.8	0	95.86
Ethanol (corn)	69.4	30	99.40
Ethanol (sugarcane)	26.6	46	72.60



Steps	Emissions
Sugarcane plantation and harvest	9.9
Production and Use of fertilizers	8.7
Sugarcane transportation	2.0
Ethanol production	1.9
Ethanol transport and distribution	4.1
Total	26.6