



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

6a. aula: Biomassa - Álcool etílico carburante: produção a partir da cana de açúcar, propriedades, principais usos.

- Características básicas
- Aspectos ambientais

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



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

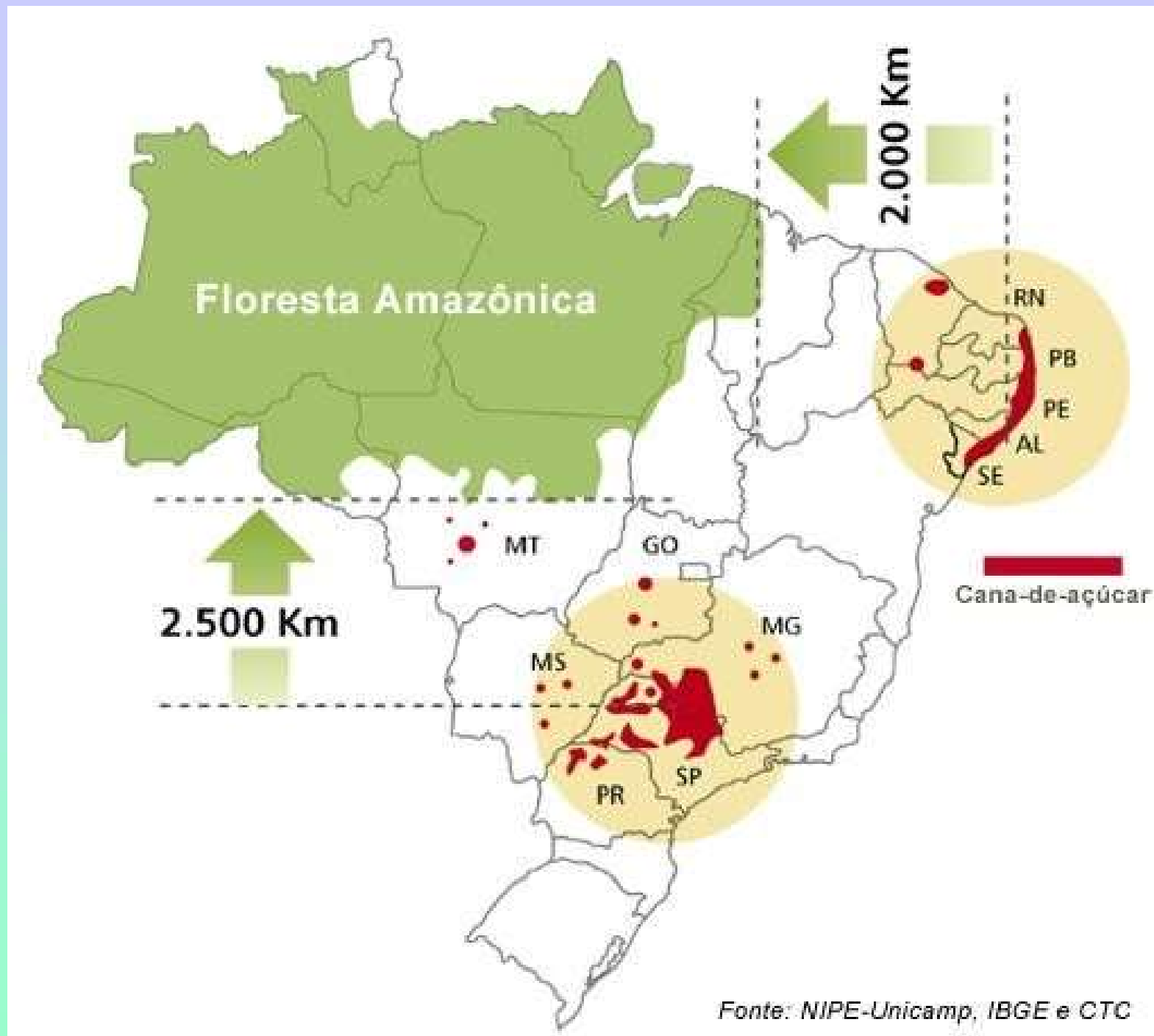




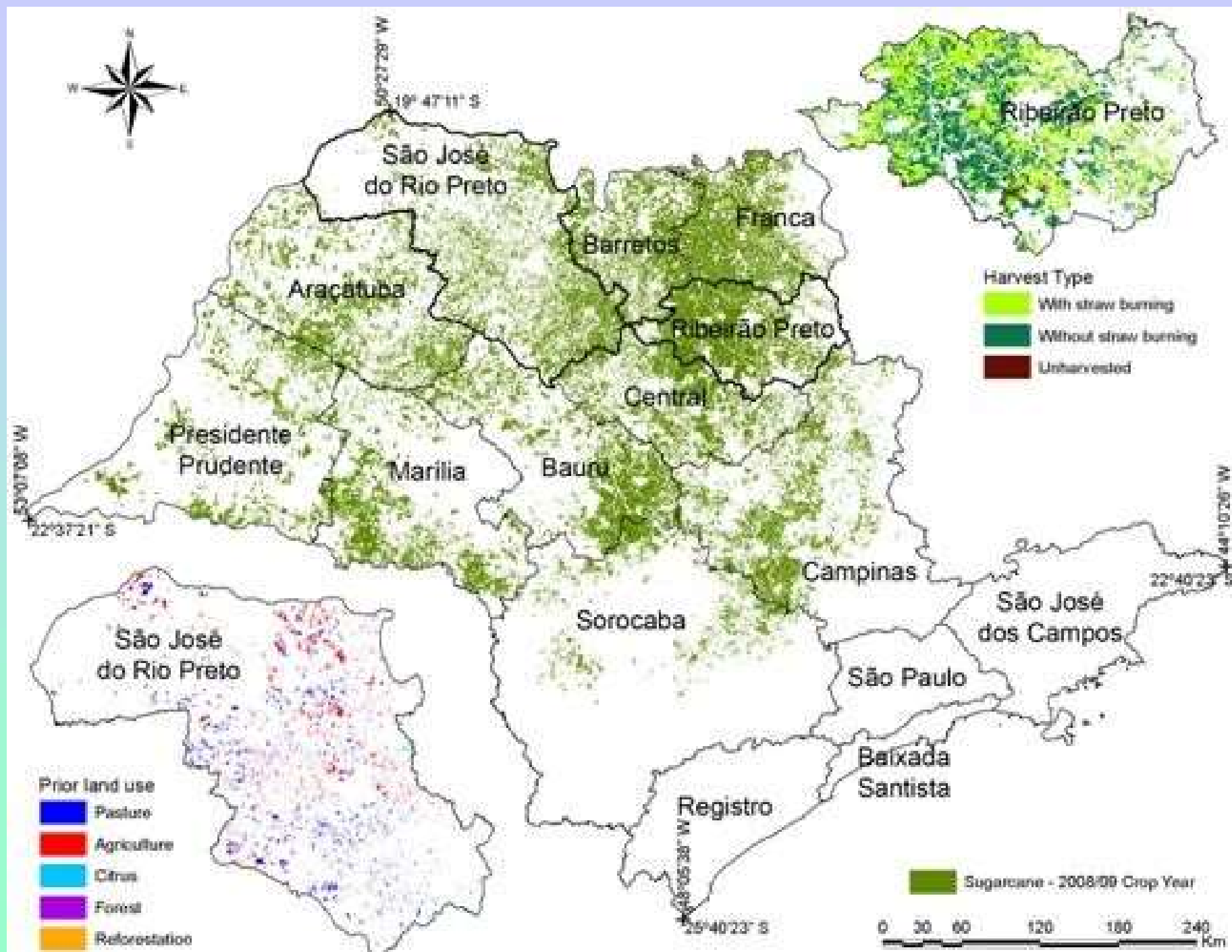


Vista panorâmica da Refinaria Costa Pinto que produz açúcar e etanol. Piracicaba, São Paulo, Brasil

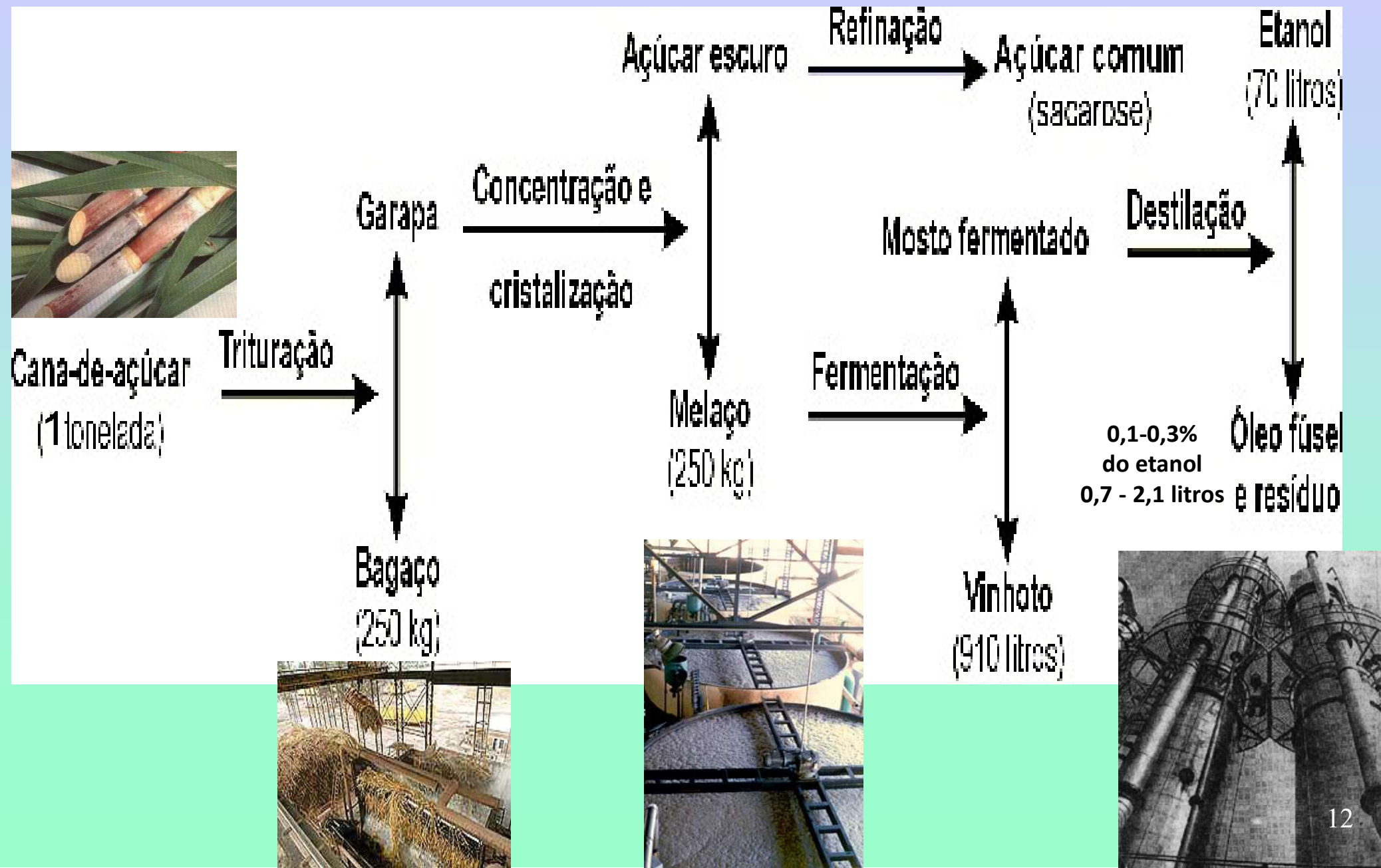
Data: 19 de Outubro de 2008.



Setor Sucroenergético - Mapa da Produção



Fermentação a partir de cana de açúcar



Fermentação a partir de cana de açúcar

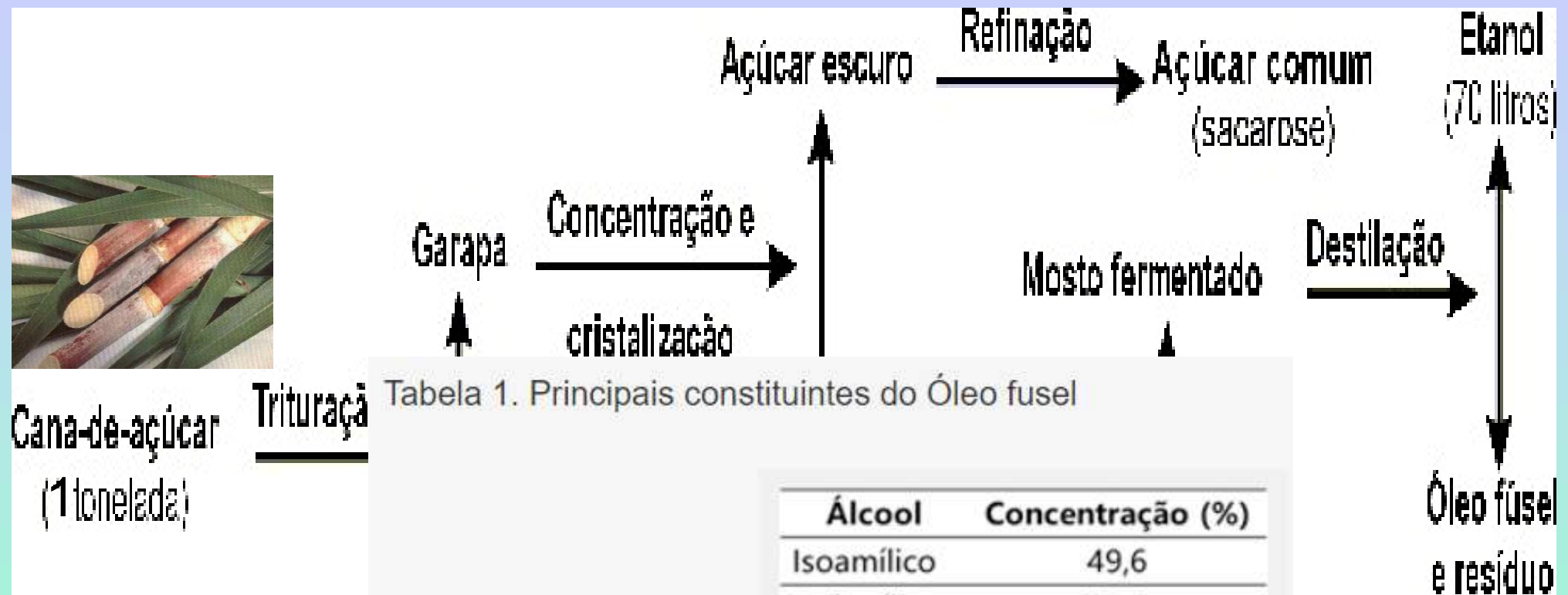


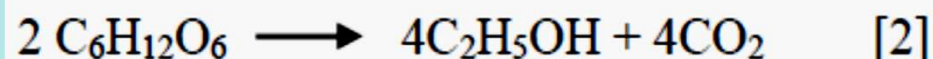
Tabela 1. Principais constituintes do Óleo fúsel

Álcool	Concentração (%)
Isoamílico	49,6
Isobutílico	20,1
Etílico	3,6
Metílico	2,11
n-Propílico	1,5



Fermentação a partir de cana de açúcar

A obtenção do álcool etílico (etanol) a partir da cana-de-açúcar se dá através do processo de fermentação. A sacarose da cana é convertida em glicose e frutose através de ações enzimáticas [1]. Esses açúcares, são transformados em etanol e dióxido de carbono conforme a equação de fermentação alcoólica [2]:



Realizando o cálculo estequiométrico das reações químicas, Silva (2012, p. 30) indica a emissão de 679,8 kg CO₂/m³ de etanol, valor utilizado neste trabalho para o cálculo das emissões das usinas de etanol no estado de São Paulo.

SILVA, A. R. A. Estudo sobre a captação do gás carbônico nas dornas de fermentação das indústrias sucroalcooleiras. 2012. 53 p.

Produção de *Etanol acoplada a de Açúcar*

**1000 kg
cana de açúcar**



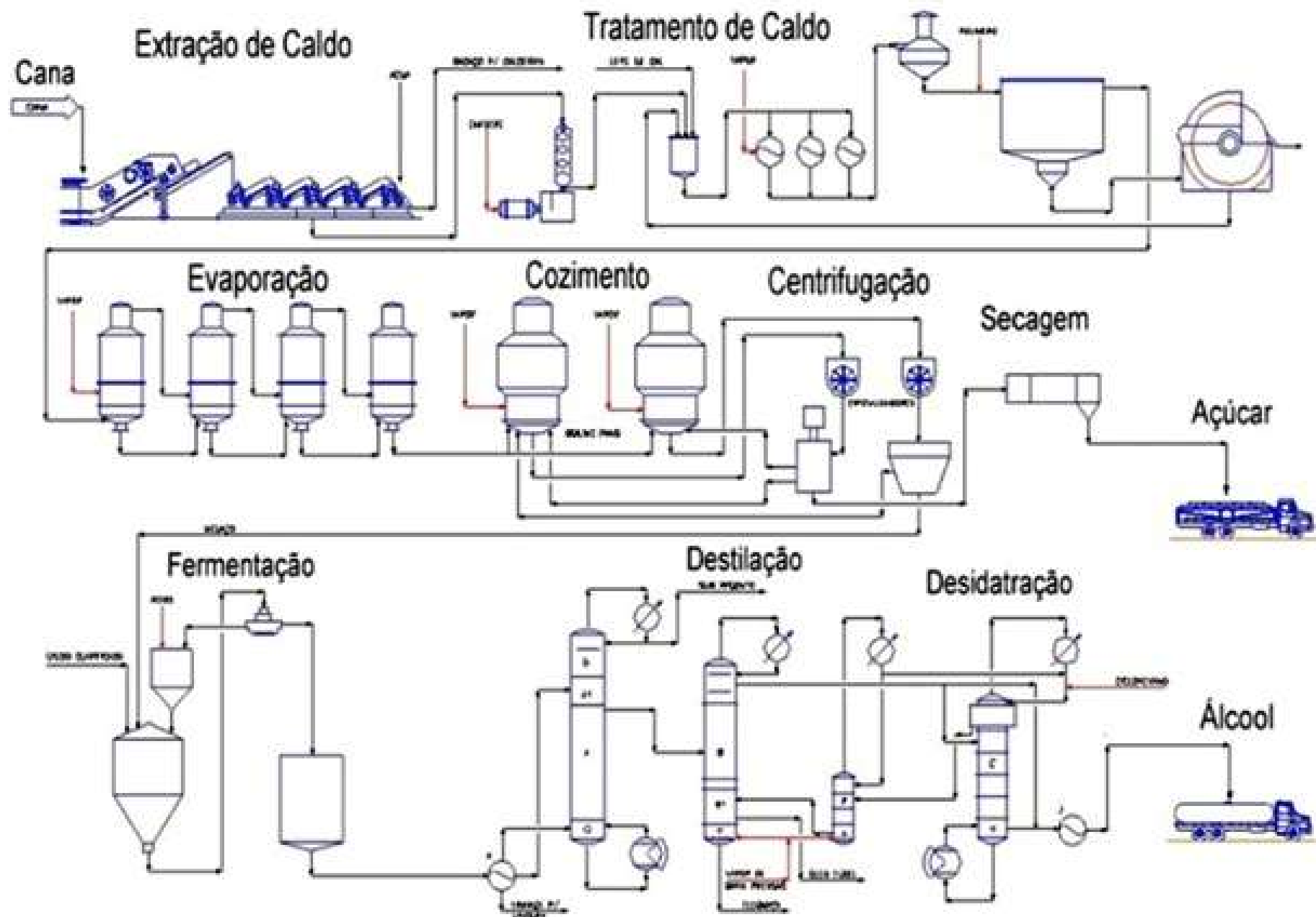
**70 L álcool
910 L vinhoto**



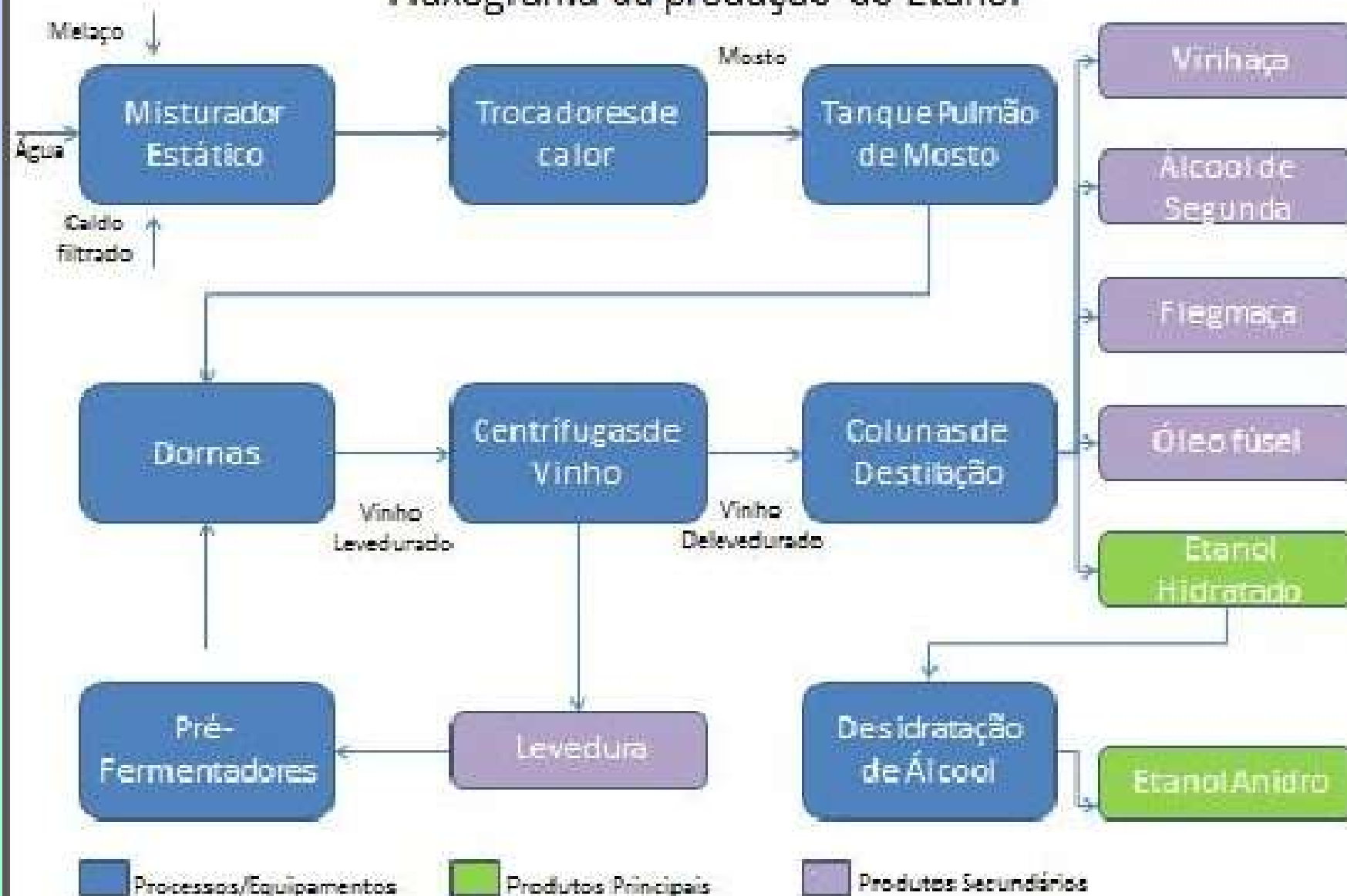
**90 kg
açúcar**



**12 L álcool
156 L vinhoto**



Fluxograma da produção do Etanol



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%. Além disso, 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 pode ser utilizada para produção de etanol celulósico (etanol de 2ª geração).

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.

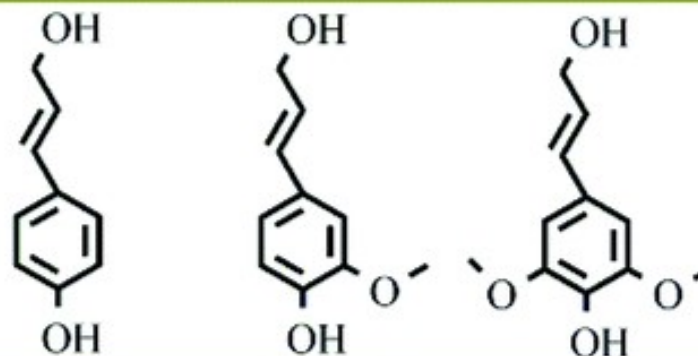
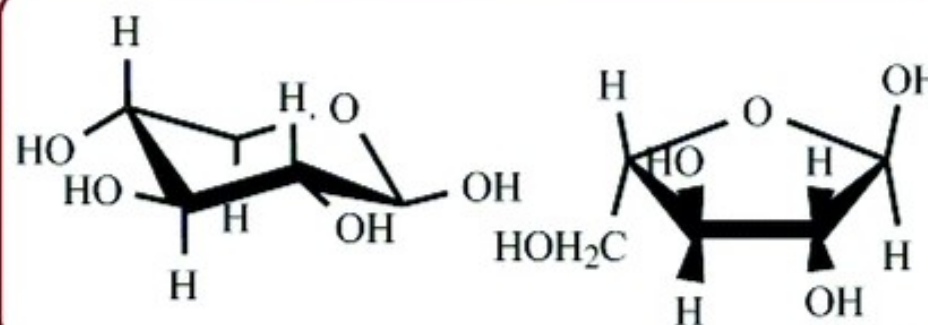
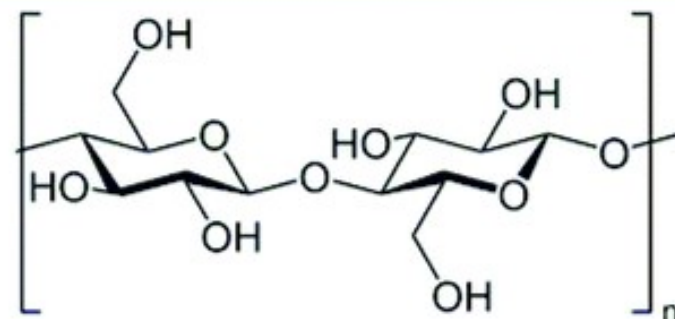
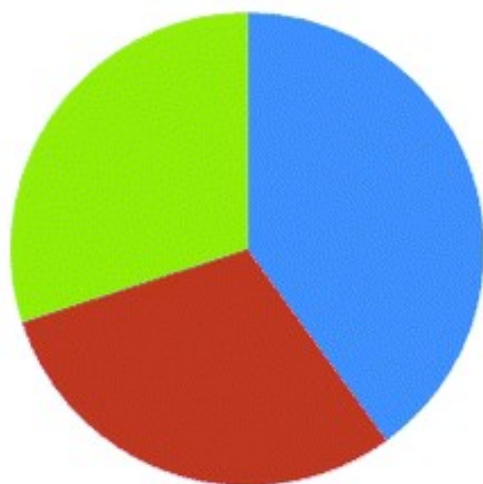
O processo básico de hidrólise ácida consiste em utilizar um ácido forte para atacar as ligações glicosídicas entre os monossacarídeos de um polissacarídeo.

Biomassa

■ Celulose

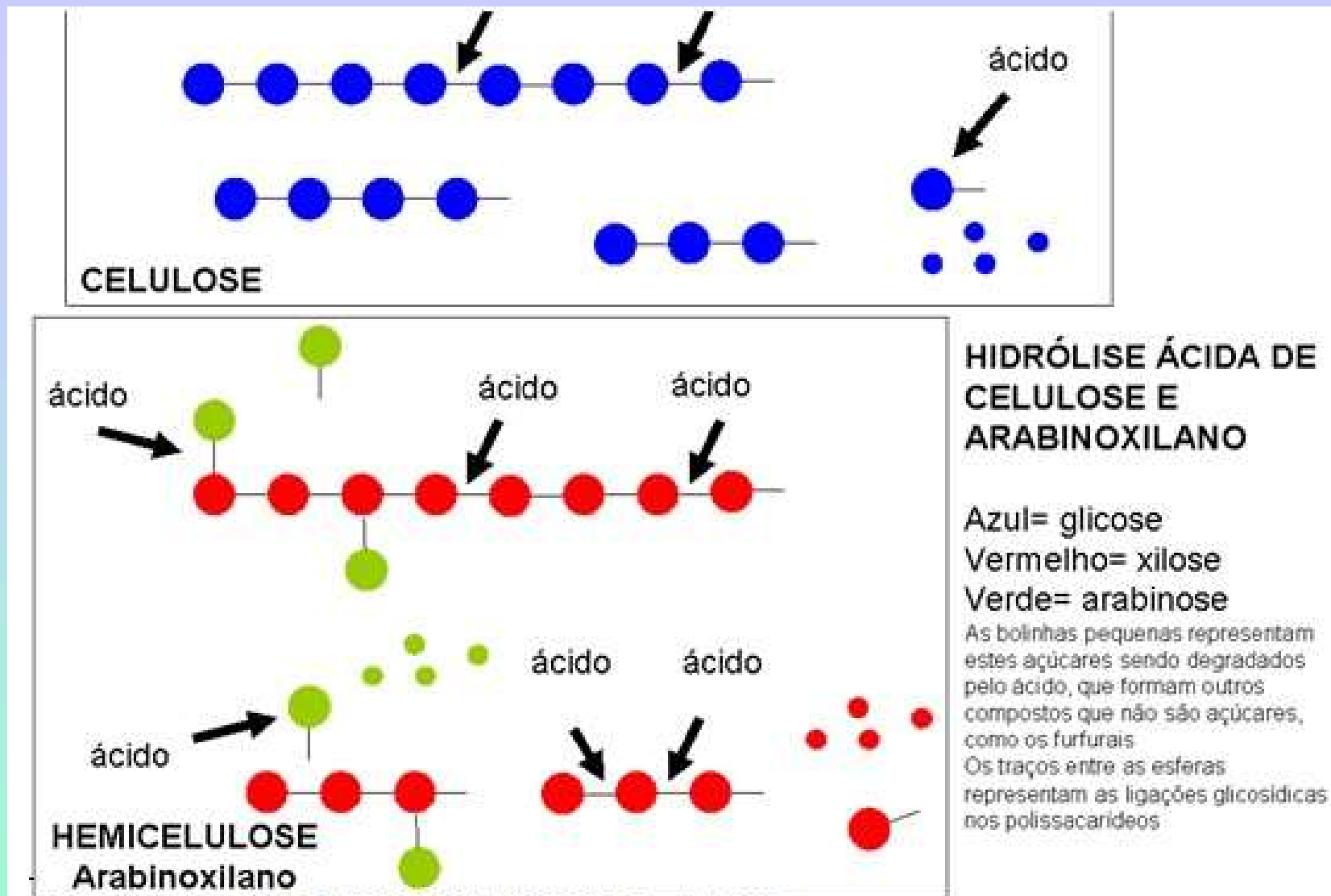
■ Hemicelulose

■ Lignino

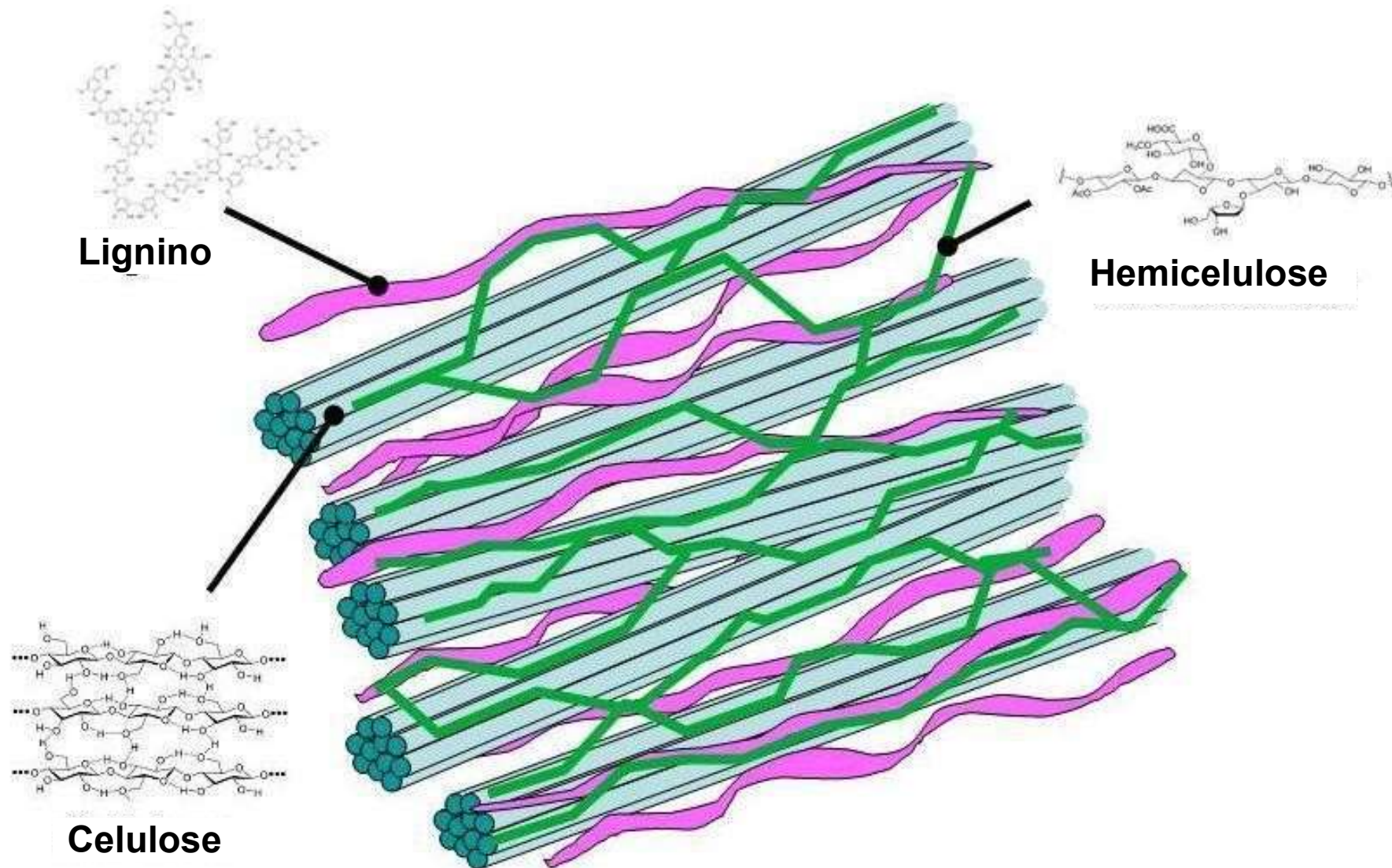


Disponível em:

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

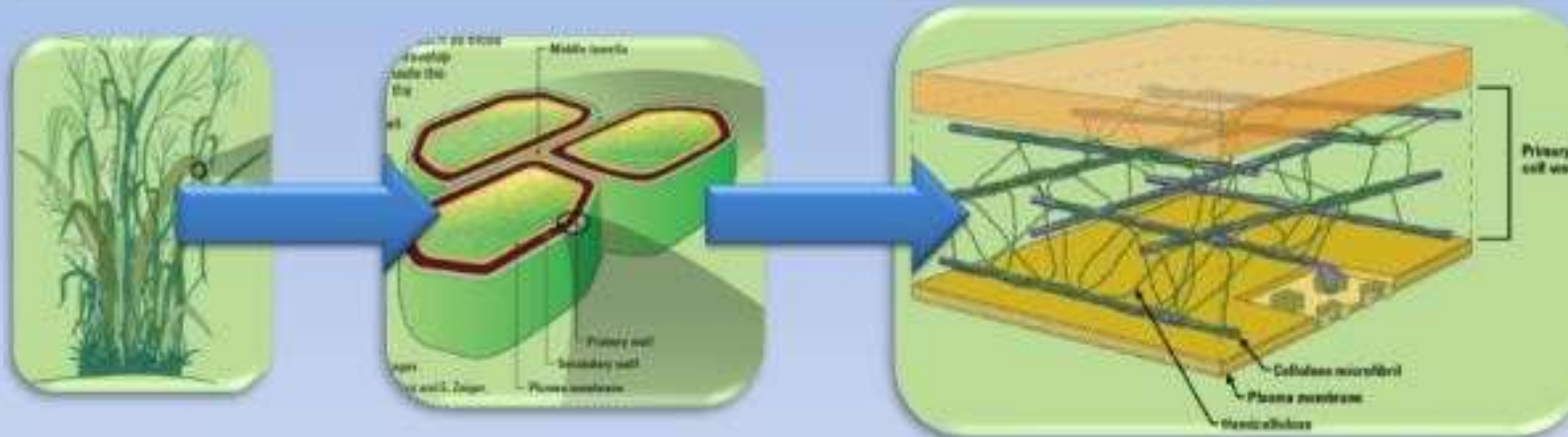


Os ácidos, normalmente utilizados para a obtenção de hidrólise em laboratório, são ácido sulfúrico, ácido clorídrico e o ácido trifluoroacético. Há vantagens e desvantagens em relação a cada um. Enquanto os ácidos sulfúrico e clorídrico discriminam pouco as ligações glicosídicas de diferentes tipos, 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.



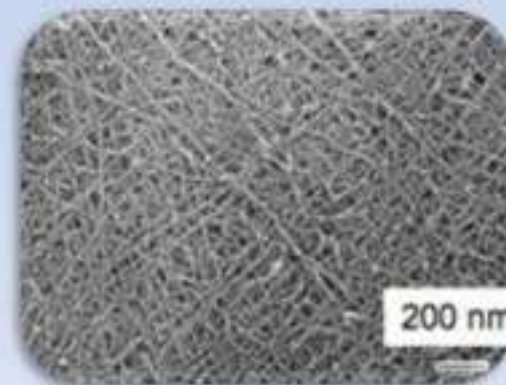
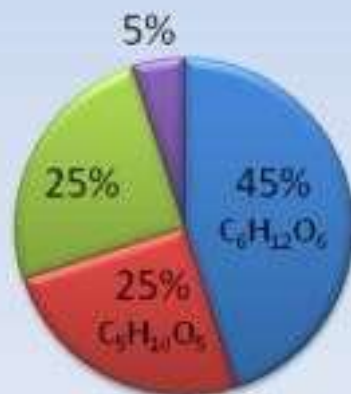
Cellulose

Where is it?

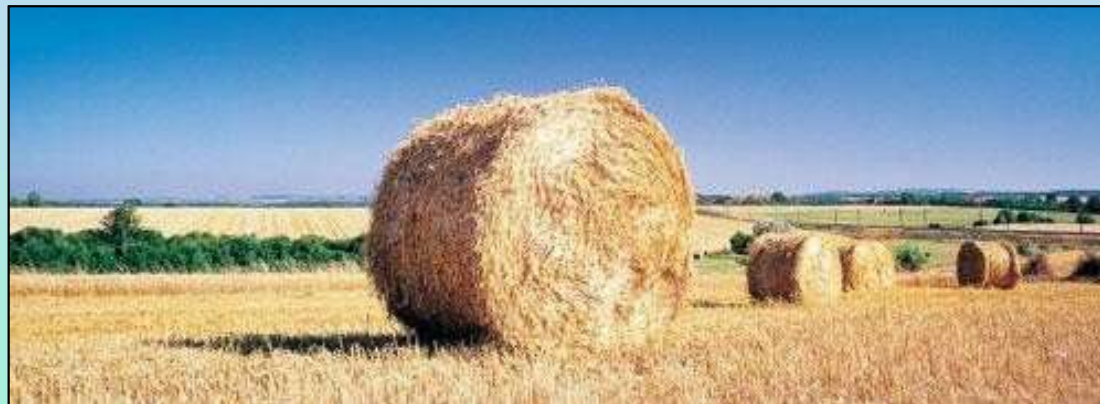


Sugar producers in plant walls

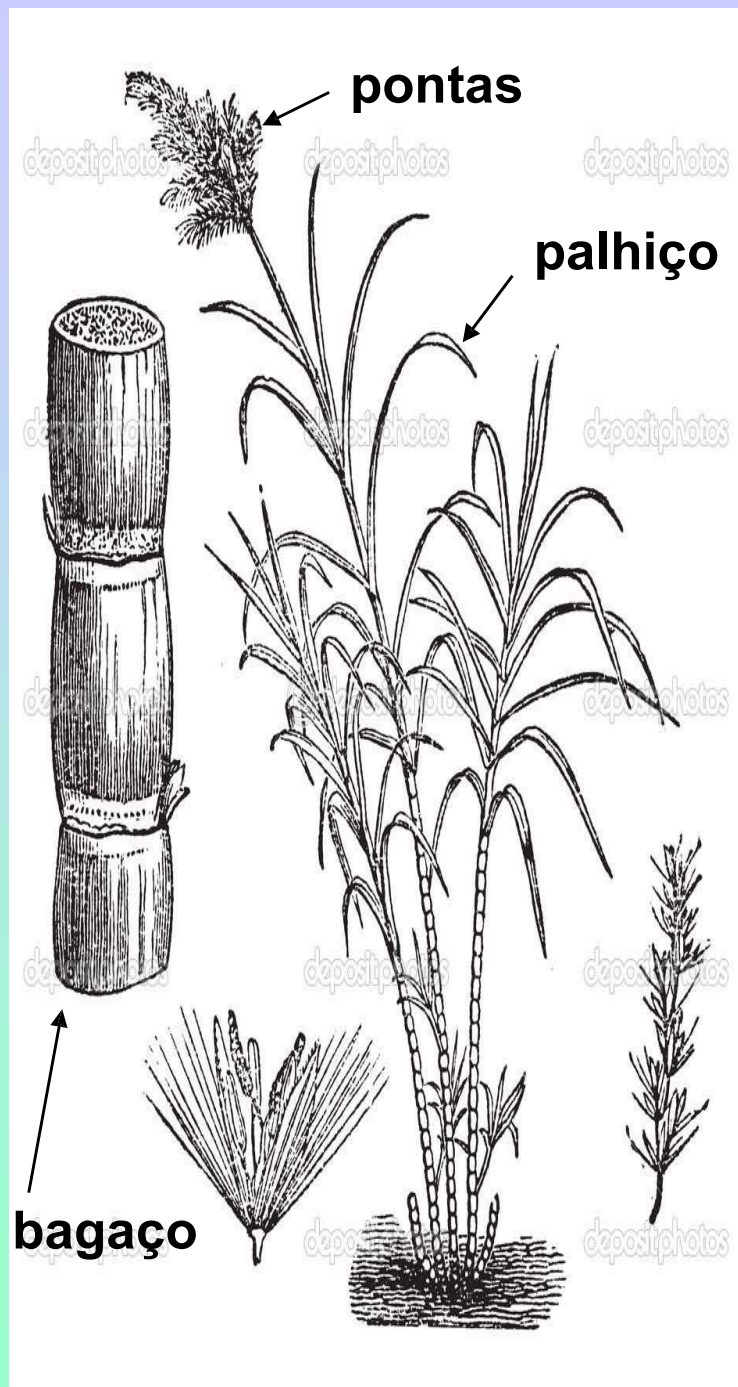
■ Cellulose ■ Hemicellulose ■ Lignin ■ Other



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



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



Comentário 1:

Nos processos industriais, a hidrólise ácida tem sido realizada com ácido sulfúrico (H_2SO_4). O fato da comercialização de etanol produzido a partir da hidrólise ácida do bagaço da cana encontrar dificuldades está relacionado a dificuldades técnicas e operacionais que resultam 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. (Obs: dados para 2007). 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.

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.

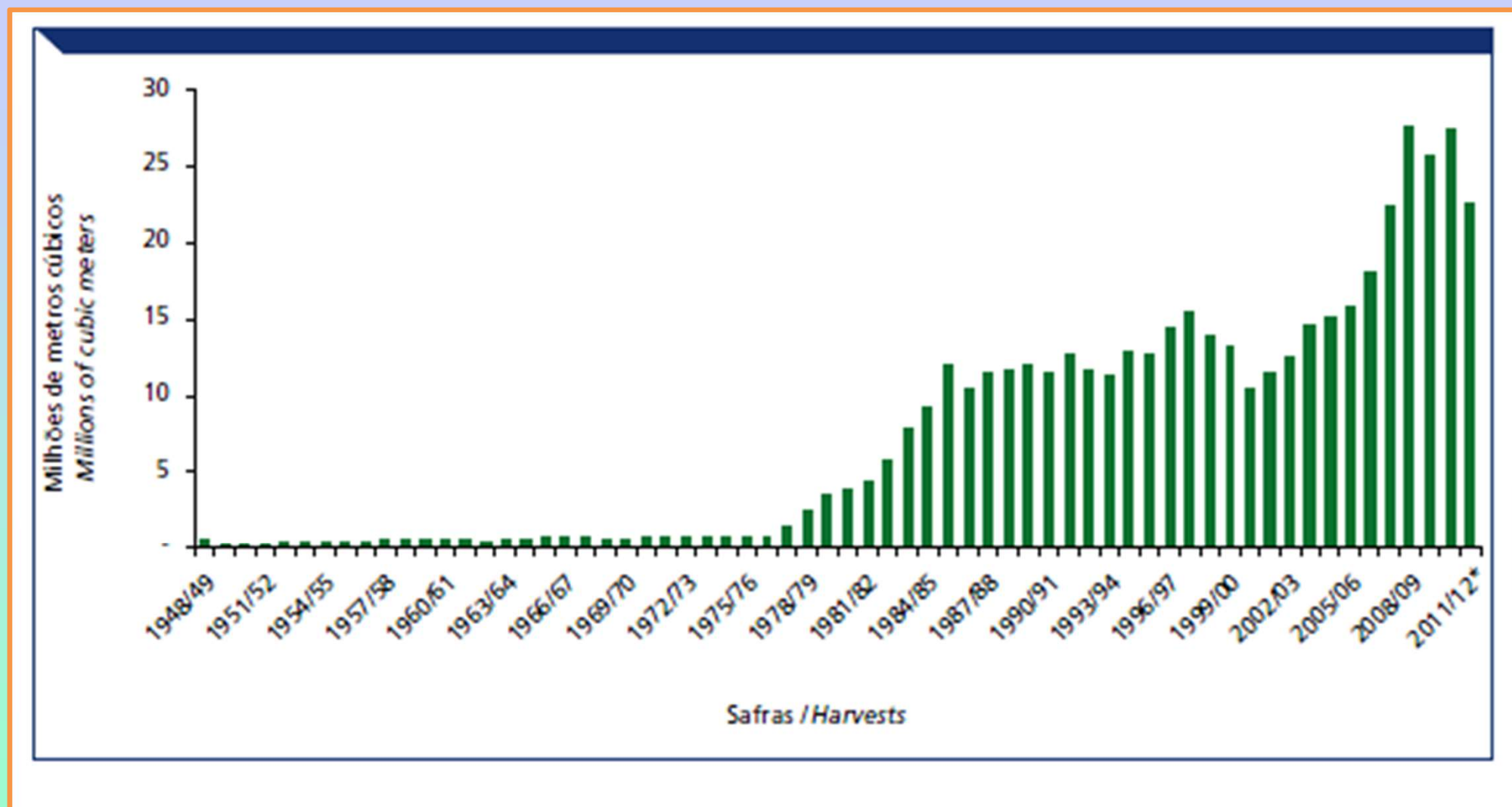
KAYLEN, M. VAN DYNE, D.L., CHOI, M., BLASÉ, M. (2000). **Economic feasibility of producing ethanol from lignocellulosic feedstocks.** Bioresource Technology 14: 19-32.

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

PRODUÇÃO DE ETANOL NO BRASIL



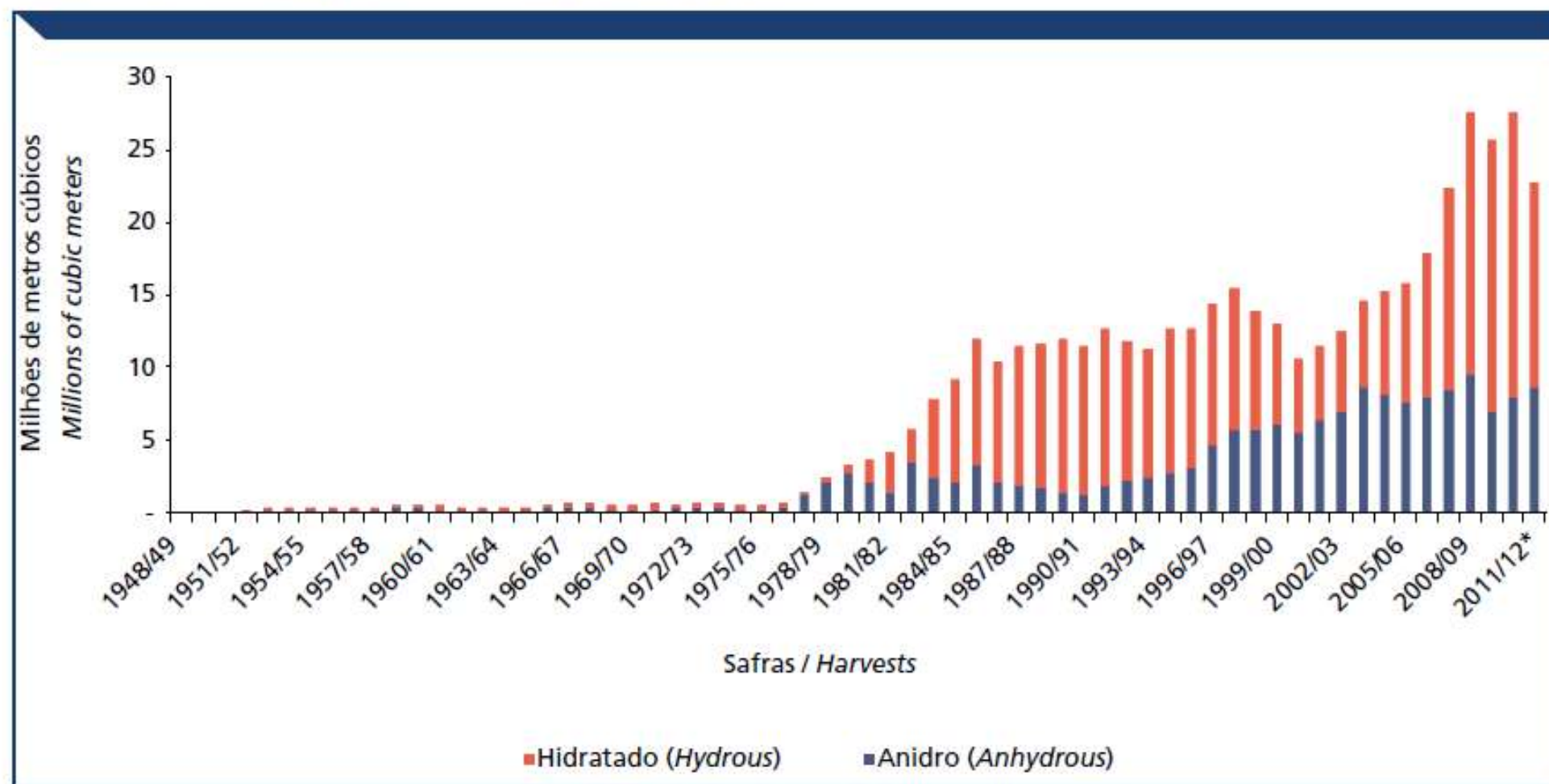
Evolução da Produção brasileira de Etanol, 1948-2012



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

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.

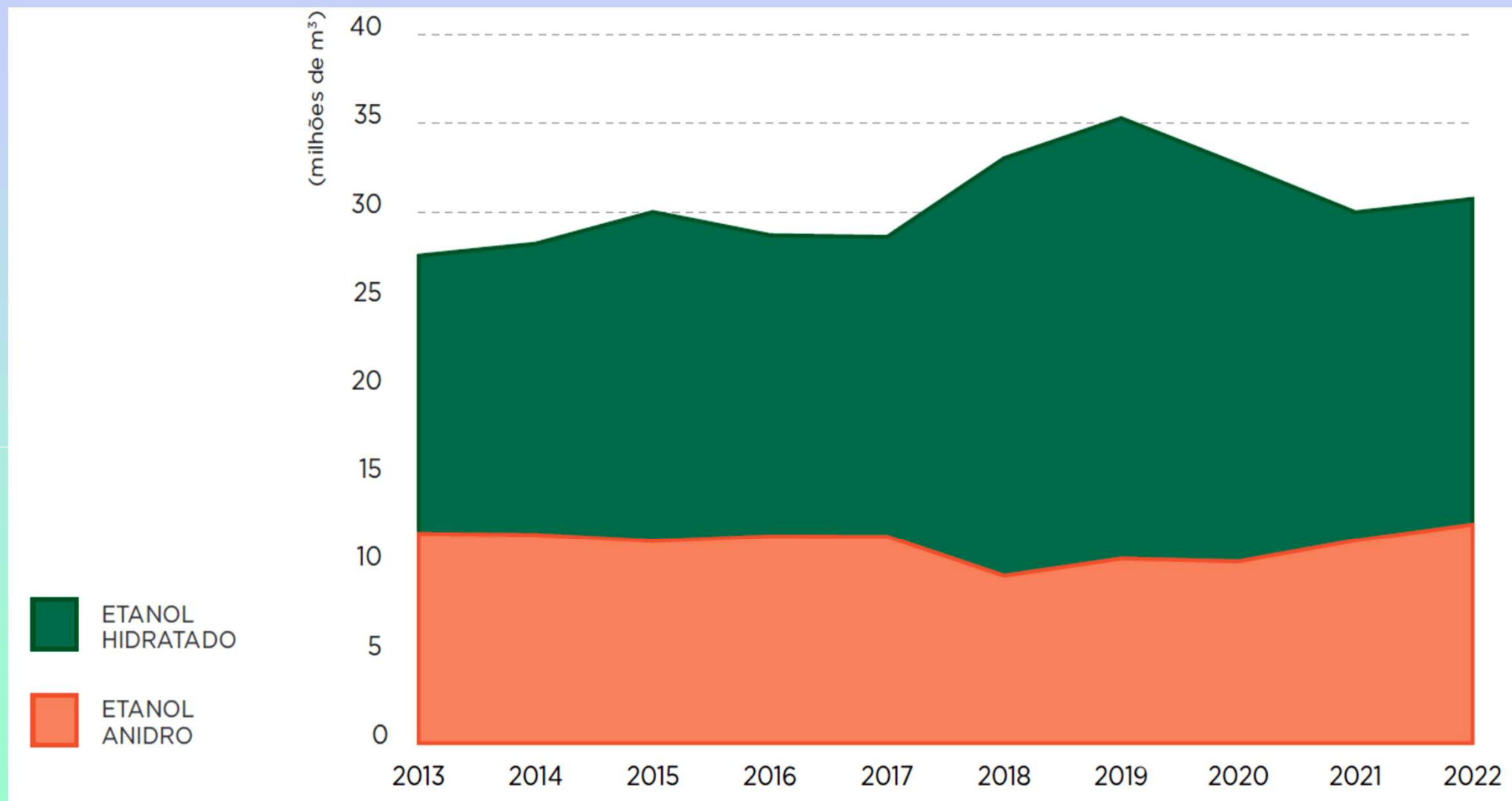
Gráfico 13 – Evolução da produção brasileira de etanol, por tipo

Chart 13 – Ethanol production in Brazil, by type



Source: MAPA/SPA-Ministério da Agricultura, Pecuária e Abastecimento/Secretaria de Produção e Agroenergia. Anuário Estatístico da Agroenergia: 2014. Brasília (DF), 2015.

EVOLUÇÃO DA PRODUÇÃO NACIONAL DE ETANOL ANIDRO E HIDRATADO – 2013-2022



Fonte: ANP-Anuário Estatístico Brasileiro de Petróleo, Gás Natural e Biocombustíveis 2023.

Produção brasileira de Álcool Etílico: 2013-2022

10³ m³

FLUXO	2013	2014	2015	2016	2017	2018	2019	2020	2021	2022	FLOW
PRODUÇÃO	27.608	28.526	30.249	28.276	27.694	33.198	35.156	32.599	29.898	32.485	PRODUCTION
IMPORTAÇÃO	132	984	828	835	1.826	1.775	1.437	958	432	99	IMPORT
EXPORTAÇÃO	-2.940	-1.469	-2.121	-1.789	-1.380	-1.682	-1.933	-2.026	-1.868	-2.358	EXPORT
VARIAÇÃO DE ESTOQUES, PERDAS E AJUSTES	-629	-1.898	1.750	249	-581	-1.857	255	-470	1.502	204	STOCK VARIATIONS, LOSSES AND ADJUSTMENTS
CONSUMO TOTAL	24.171	26.142	30.705	27.572	27.559	31.434	34.915	31.061	29.964	30.430	TOTAL CONSUMPTION
CONSUMO FINAL	24.171	26.142	30.705	27.572	27.559	31.434	34.915	31.061	29.964	30.430	FINAL CONSUMPTION
CONSUMO FINAL NÃO-ENERGÉTICO	1.294	1.132	952	860	956	1.079	1.097	1.430	1.368	1.268	FINAL NON-ENERGY CONSUMPTION
CONSUMO FINAL ENERGÉTICO	22.877	25.010	29.754	26.711	26.603	30.355	33.817	29.630	28.595	29.161	FINAL ENERGY CONSUMPTION
AGROPECUÁRIO ²	21	22	25	17	17	17	17	18	17	19	AGRICULTURE AND LIVESTOCK ²
TRANSPORTES	22.856	24.988	29.729	26.694	26.586	30.338	33.800	29.613	28.578	29.142	TRANSPORTATION
RODOVIÁRIO	22.856	24.988	29.729	26.694	26.586	30.338	33.800	29.613	28.578	29.142	HIGHWAYS

¹ Inclui metanol/ methanol included.

2 Utilizado como combustível em pequenas aeronaves agrícolas, para a atividade de fertilização./ ¹ Used as fuel in small agricultural aircraft, for the activity of fertilization.

Fonte: MME – Balanço Energético Nacional, 2023.

Produção brasileira de Álcool Etílico (Etanol) Anidro: 2013-2022

											10 ³ m ³
FLUXO	2013	2014	2015	2016	2017	2018	2019	2020	2021	2022	FLOW
PRODUÇÃO	12.005	12.230	11.565	11.727	11.695	9.505	10.608	10.412	11.553	13.233	PRODUCTION
IMPORTAÇÃO	35	400	408	357	1.825	1.737	1.437	958	432	99	IMPORT
EXPORTAÇÃO	-1.826	-717	-1.074	-952	-1.024	-1.067	-1.316	-1.224	-605	-1.361	EXPORT
VARIAÇÃO DE ESTOQUES, PERDAS E AJUSTES	-264	-667	224	131	-280	285	10	-163	-199	334	STOCK VARIATION, LOSSES AND ADJUSTMENTS
CONSUMO TOTAL	9.951	11.245	11.122	11.264	12.217	10.461	10.739	9.983	11.181	12.305	TOTAL CONSUMPTION
CONSUMO FINAL	9.951	11.245	11.122	11.264	12.217	10.461	10.739	9.983	11.181	12.305	FINAL CONSUMPTION
CONSUMO FINAL NÃO-ENERGÉTICO	265	229	182	164	145	247	186	204	145	107	FINAL NON-ENERGY CONSUMPTION
CONSUMO FINAL ENERGÉTICO	9.686	11.016	10.940	11.100	12.072	10.214	10.554	9.778	11.037	12.198	FINAL ENERGY CONSUMPTION
TRANSPORTES	9.686	11.016	10.940	11.100	12.072	10.214	10.554	9.778	11.037	12.198	TRANSPORTATION
RODOVIÁRIO	9.686	11.016	10.940	11.100	12.072	10.214	10.554	9.778	11.037	12.198	HIGHWAYS

Fonte: MME – Balanço Energético Nacional, 2022.

Produção brasileira de Álcool Etílico (Etanol) Hidratado: 2013-2022

10³ m³

FLUXO	2013	2014	2015	2016	2017	2018	2019	2020	2021	2022	FLOW
PRODUÇÃO	15.603	16.296	18.685	16.549	15.999	23.693	24.548	22.187	18.345	19.252	PRODUCTION
IMPORTAÇÃO	97	584	420	478	0	38	0	0	0	0	IMPORT
EXPORTAÇÃO	-1.114	-752	-1.047	-837	-356	-615	-617	-802	-1.262	-996	EXPORT
VARIAÇÃO DE ESTOQUES, PERDAS E AJUSTES	-366	-1.231	1.526	118	-301	-2.142	244	-308	1.700	-131	STOCK VARIATIONS, LOSSES AND ADJUSTMENTS
CONSUMO TOTAL	14.220	14.897	19.584	16.308	15.342	20.973	24.175	21.078	18.782	18.125	TOTAL CONSUMPTION
CONSUMO FINAL	14.220	14.897	19.584	16.308	15.342	20.973	24.175	21.078	18.782	18.125	FINAL CONSUMPTION
CONSUMO FINAL NÃO-ENERGÉTICO	1.029	903	770	697	810	833	911	1.226	1.224	1.161	FINAL NON-ENERGY CONSUMPTION
CONSUMO FINAL ENERGÉTICO	13.191	13.994	18.814	15.611	14.531	20.141	23.264	19.852	17.559	16.964	FINAL ENERGY CONSUMPTION
AGROPECUÁRIO ¹	21	22	25	17	17	17	17	18	17	19	AGRICULTURE AND LIVESTOCK ¹
TRANSPORTES	13.170	13.972	18.789	15.594	14.514	20.124	23.247	19.834	17.541	16.945	TRANSPORTATION
RODOVIÁRIO	13.170	13.972	18.789	15.594	14.514	20.124	23.247	19.834	17.541	16.945	HIGHWAYS

¹ Utilizado como combustível em pequenas aeronaves agrícolas, para a atividade de fertilização. / ¹ Used as fuel in small agricultural aircraft, for the activity of fertilization.

Fonte: MME – Balanço Energético Nacional, 2023.

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

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

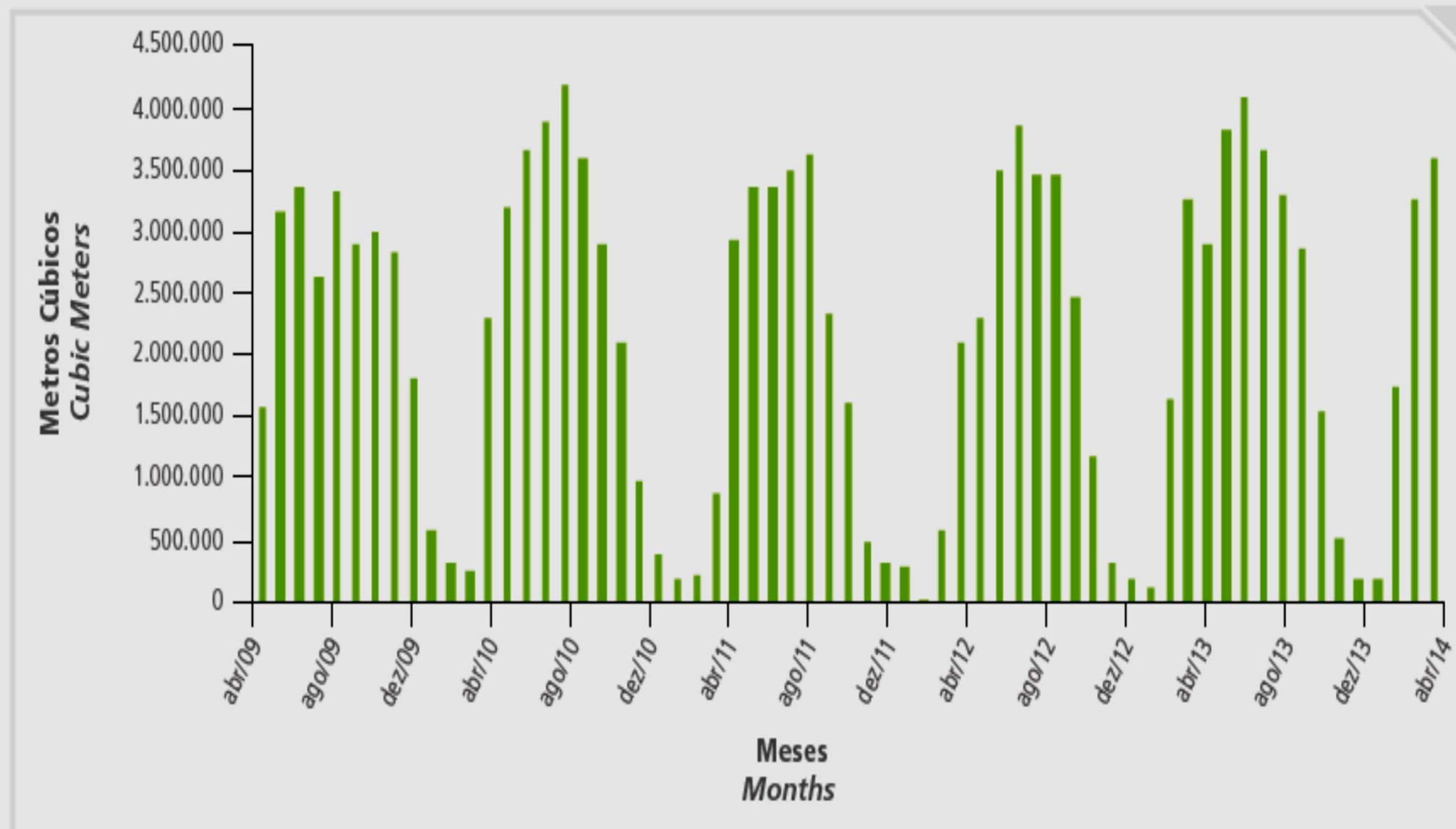
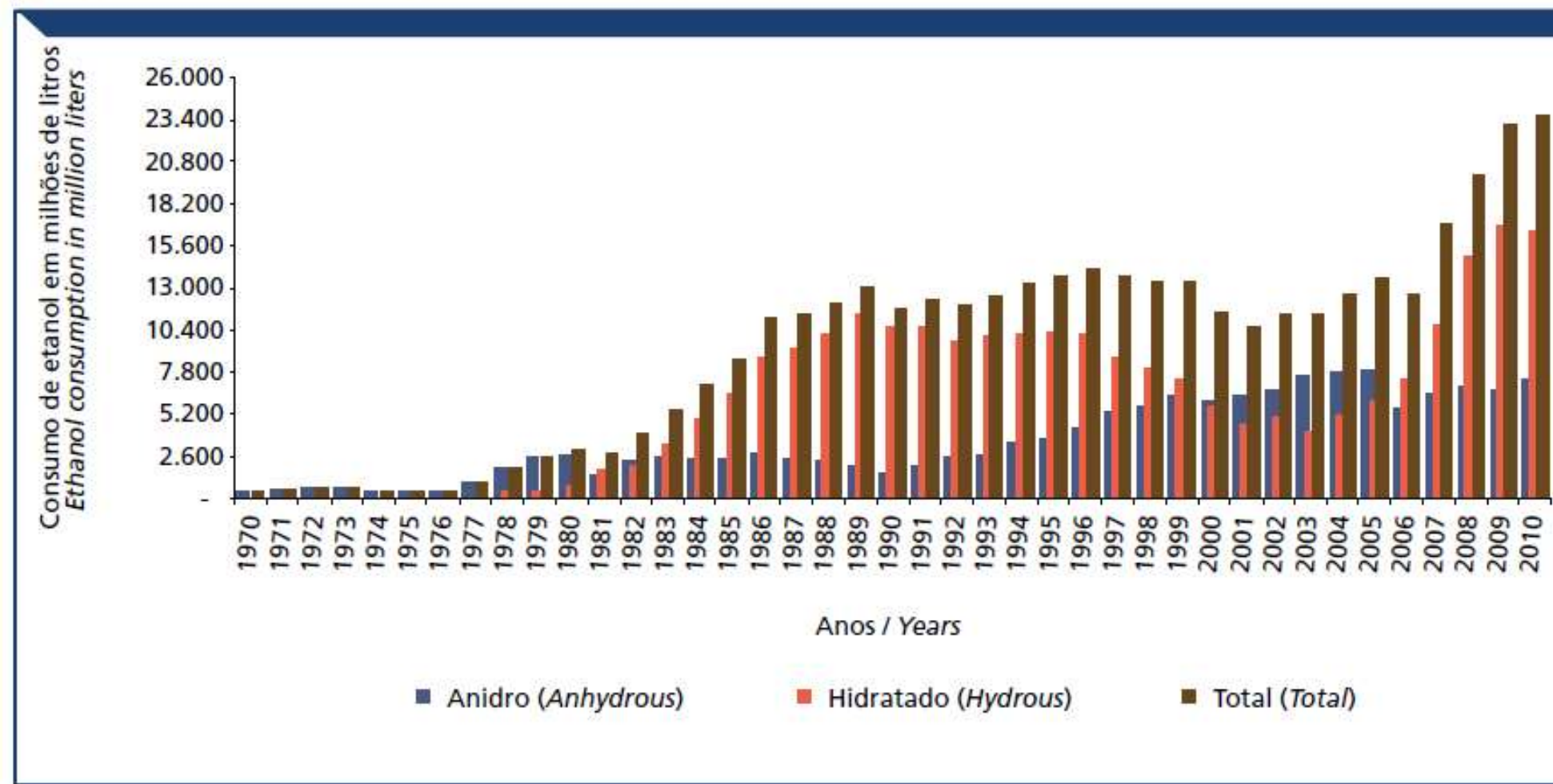


Gráfico 32 – Consumo de etanol combustível no Brasil

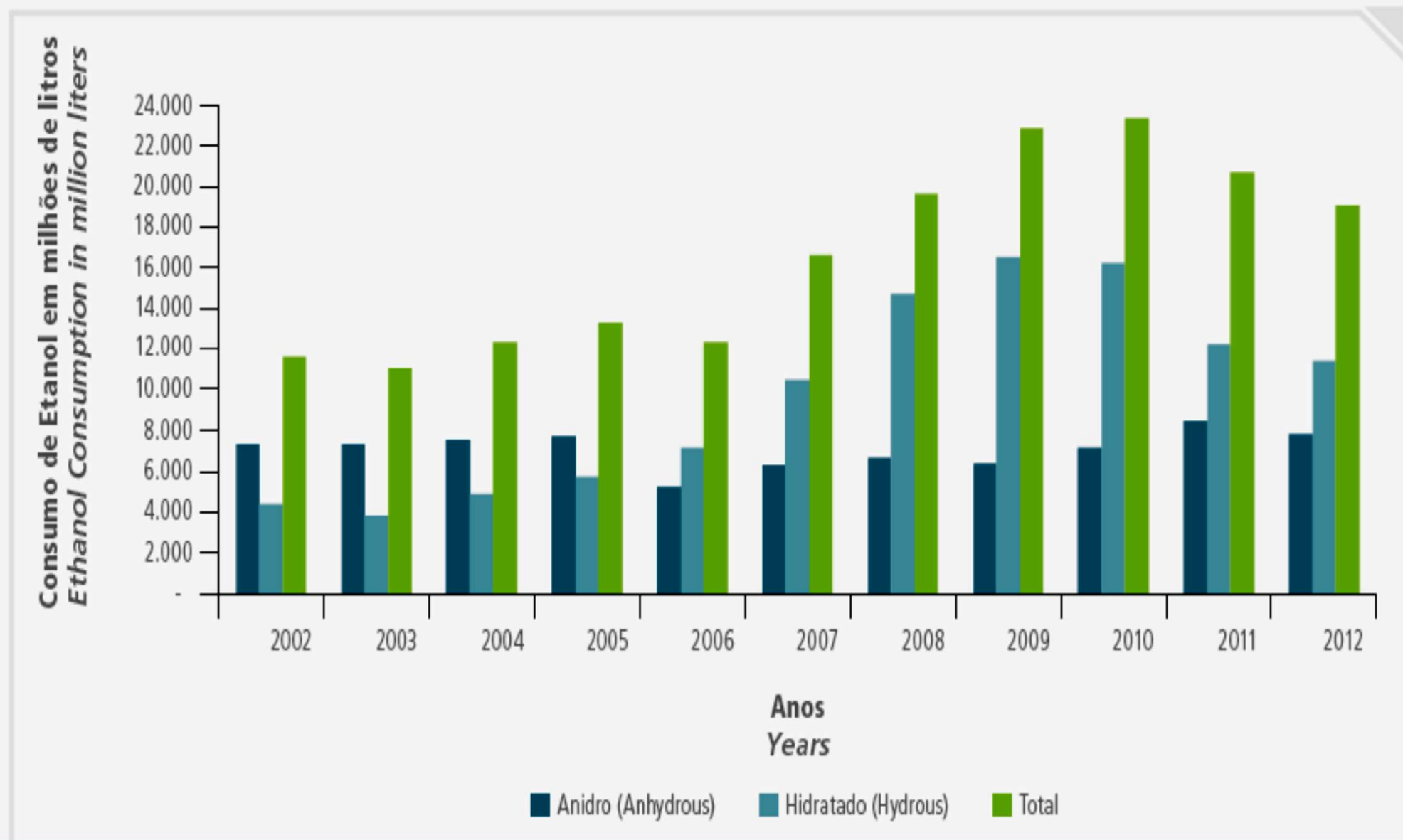
Chart 32 – Consumption of fuel ethanol in Brazil



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

Gráfico 32 – Consumo de etanol combustível no Brasil

Chart 32 – Consumption of Ethanol for Fuel in Brazil



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

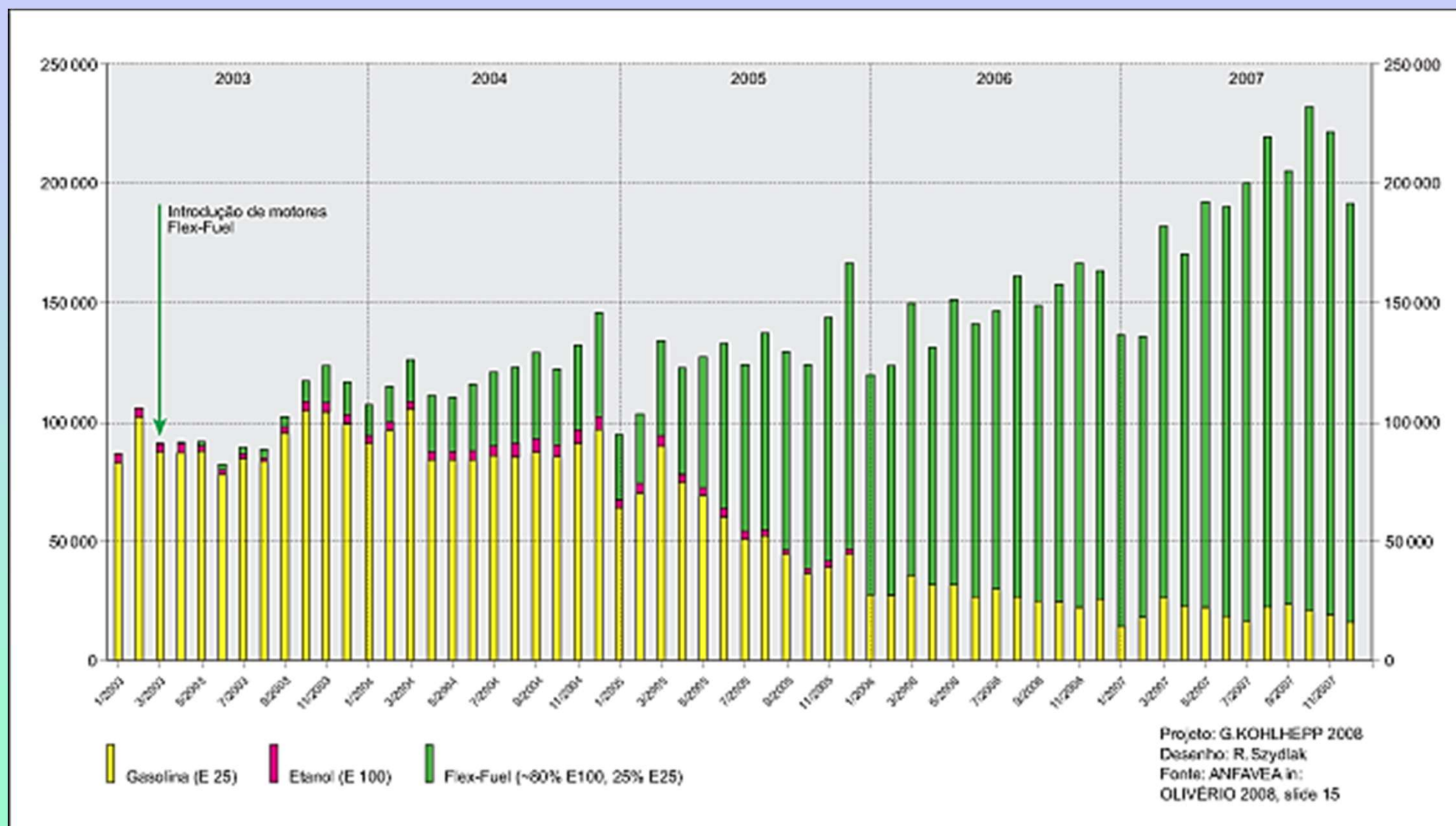
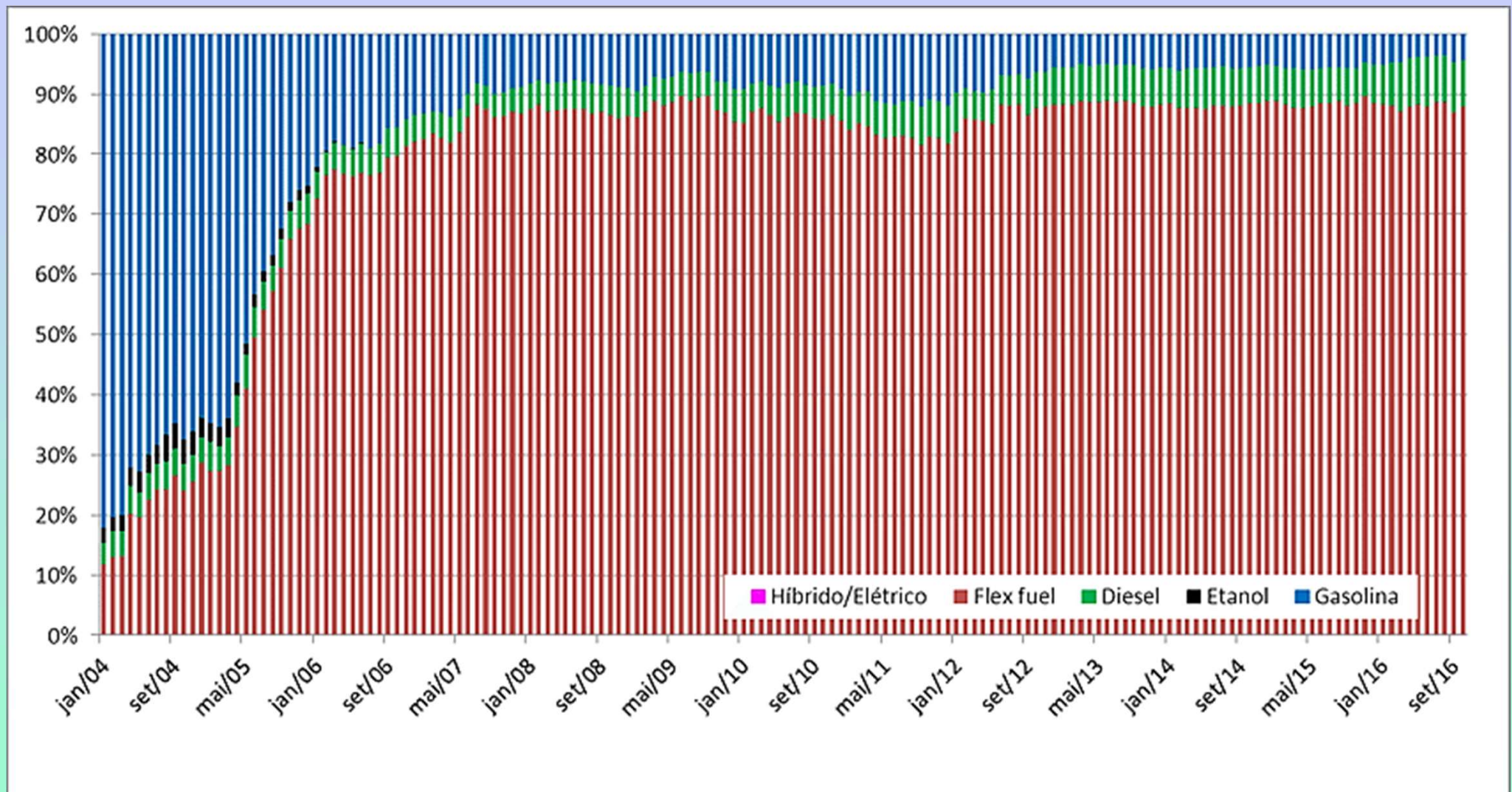


Figura 6 – Uso de combustível nos carros 0 km no Brasil, 2003-2007.

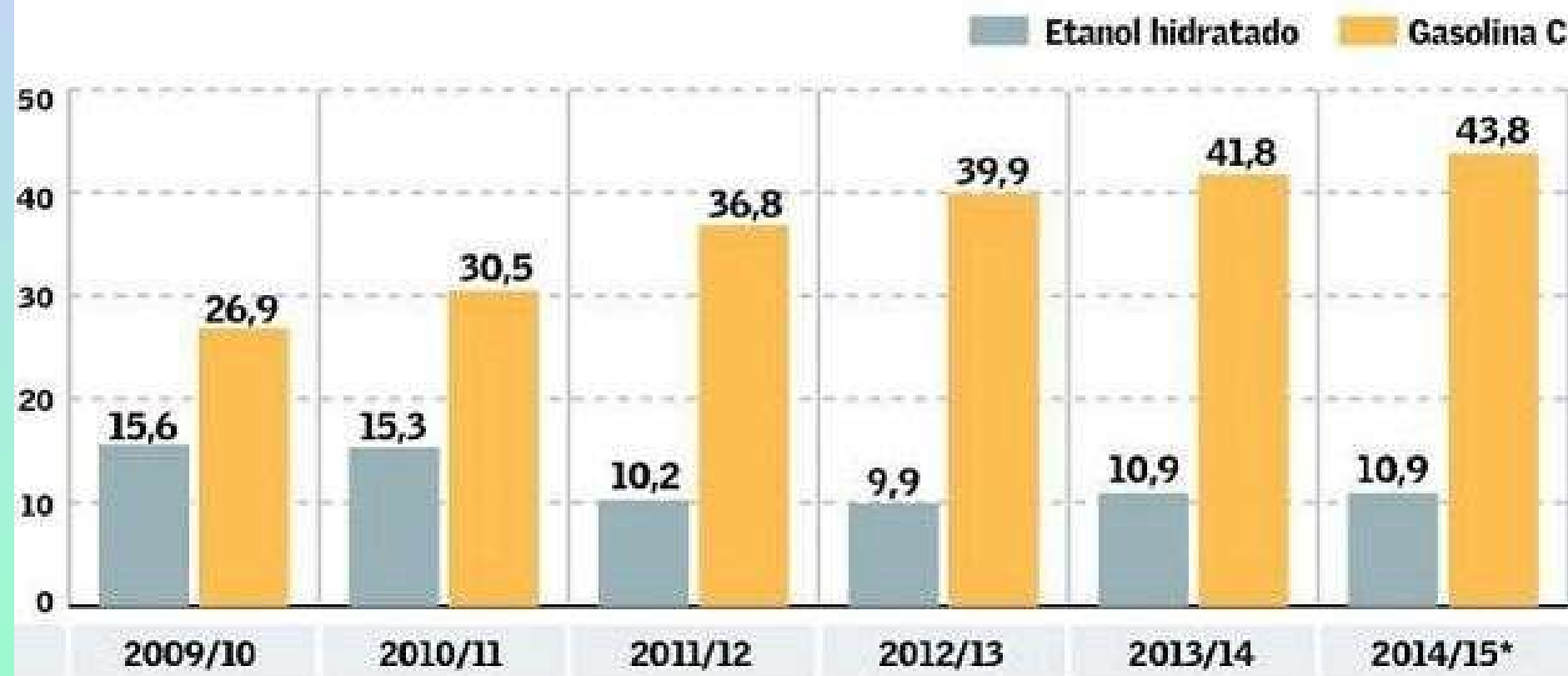
Evolução da produção de veículos flex-fuel no Brasil: 2004 - 2016



Fonte: Carta da Anfavea. 24-32.

Combustíveis no Brasil

Consumo de etanol e gasolina C (bilhões de litros)



Fonte: Bioagência, a partir de dados da ANP. * Estimativa.

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 carregados 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







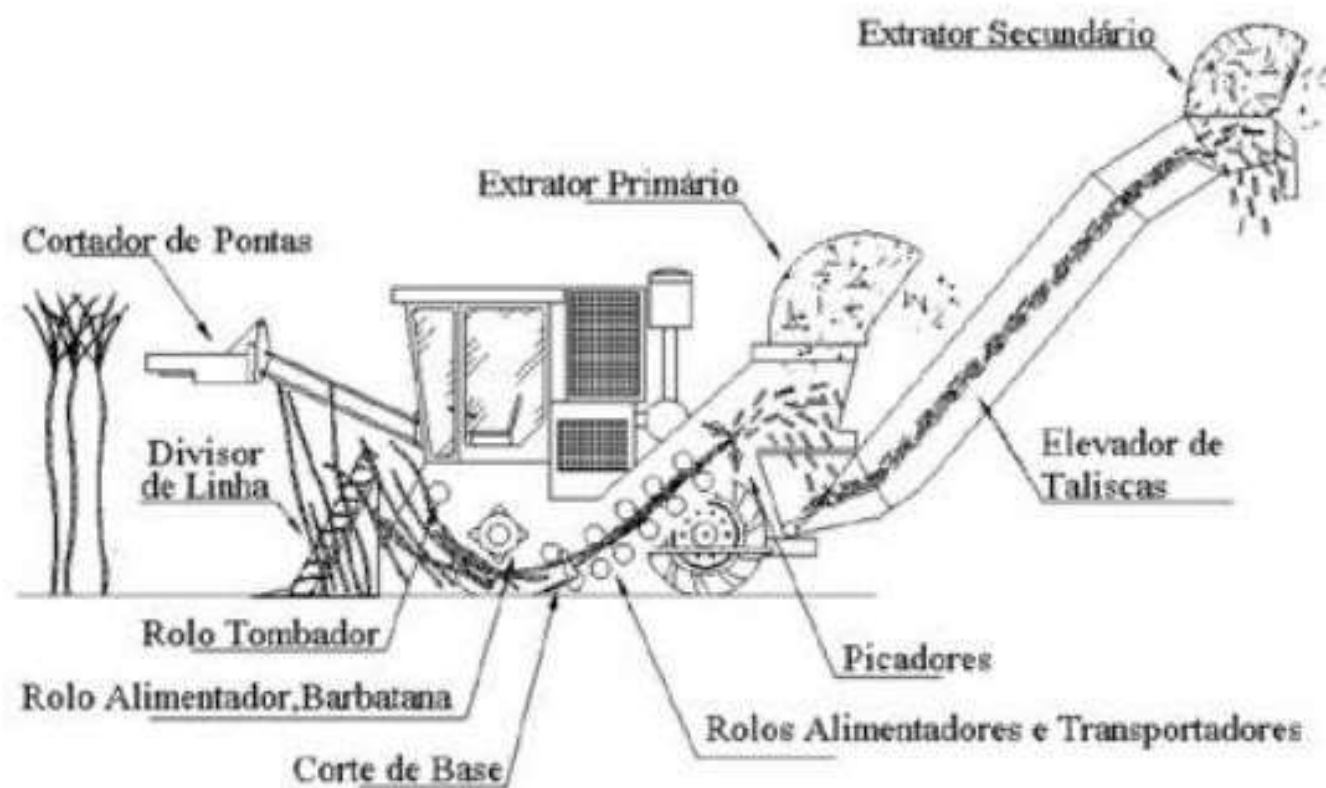


Figura 5 Esquema de uma colhedora
Fonte: Neves (2003)



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

Balanço de energia na produção 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)**

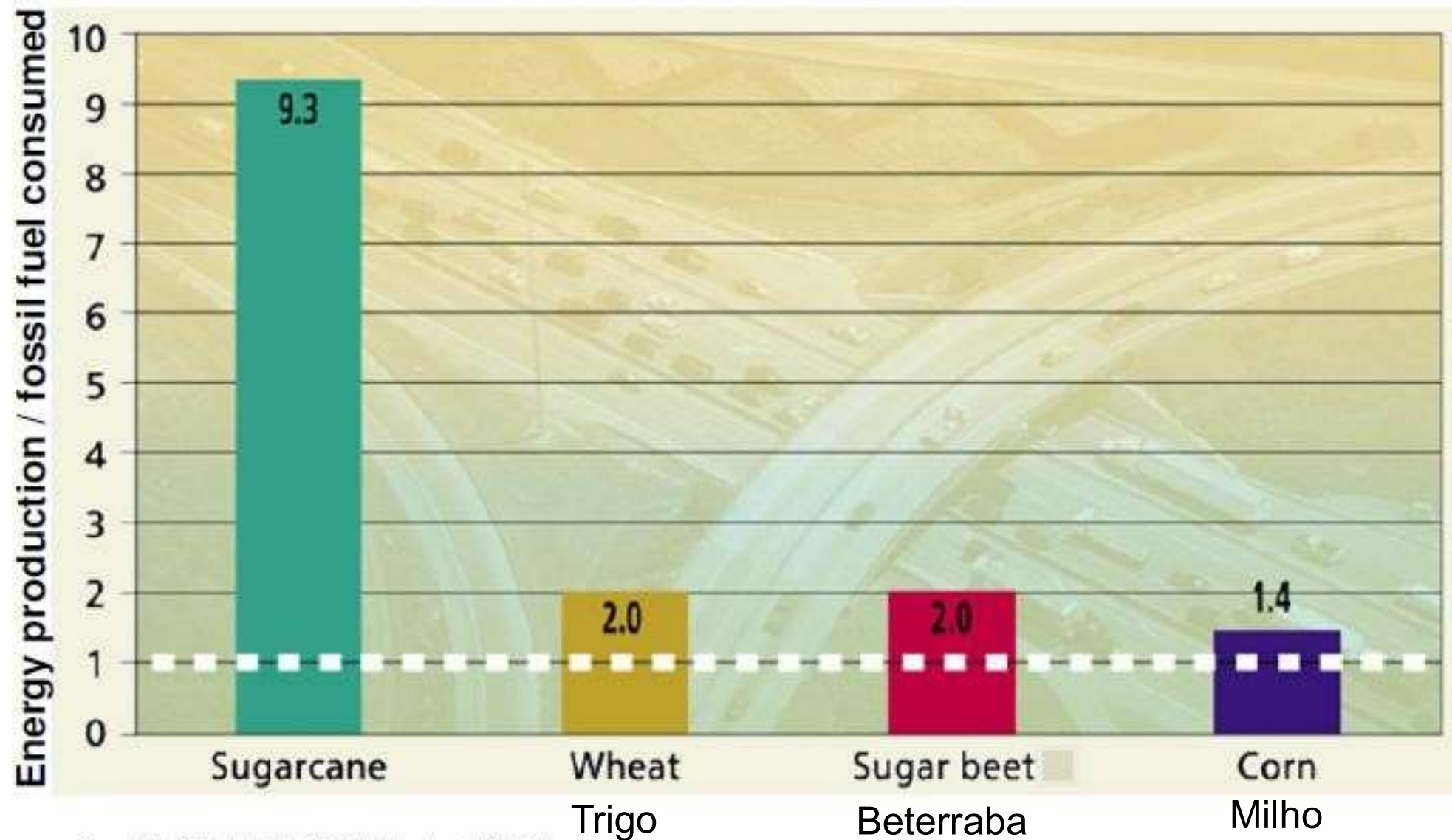
Produção/transporte de cana	182,3
Processamento para etanol	43,2
Energia fóssil usada (total)	225,4
Energia no etanol produzido	1.897,4
Energia no bagaço excedente	95,3
Eletricidade excedente	10,8
Energia renovável produzida (total)	2.012,4
Energia renovável produzida/Energia fóssil usada	
Etanol + bagaço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

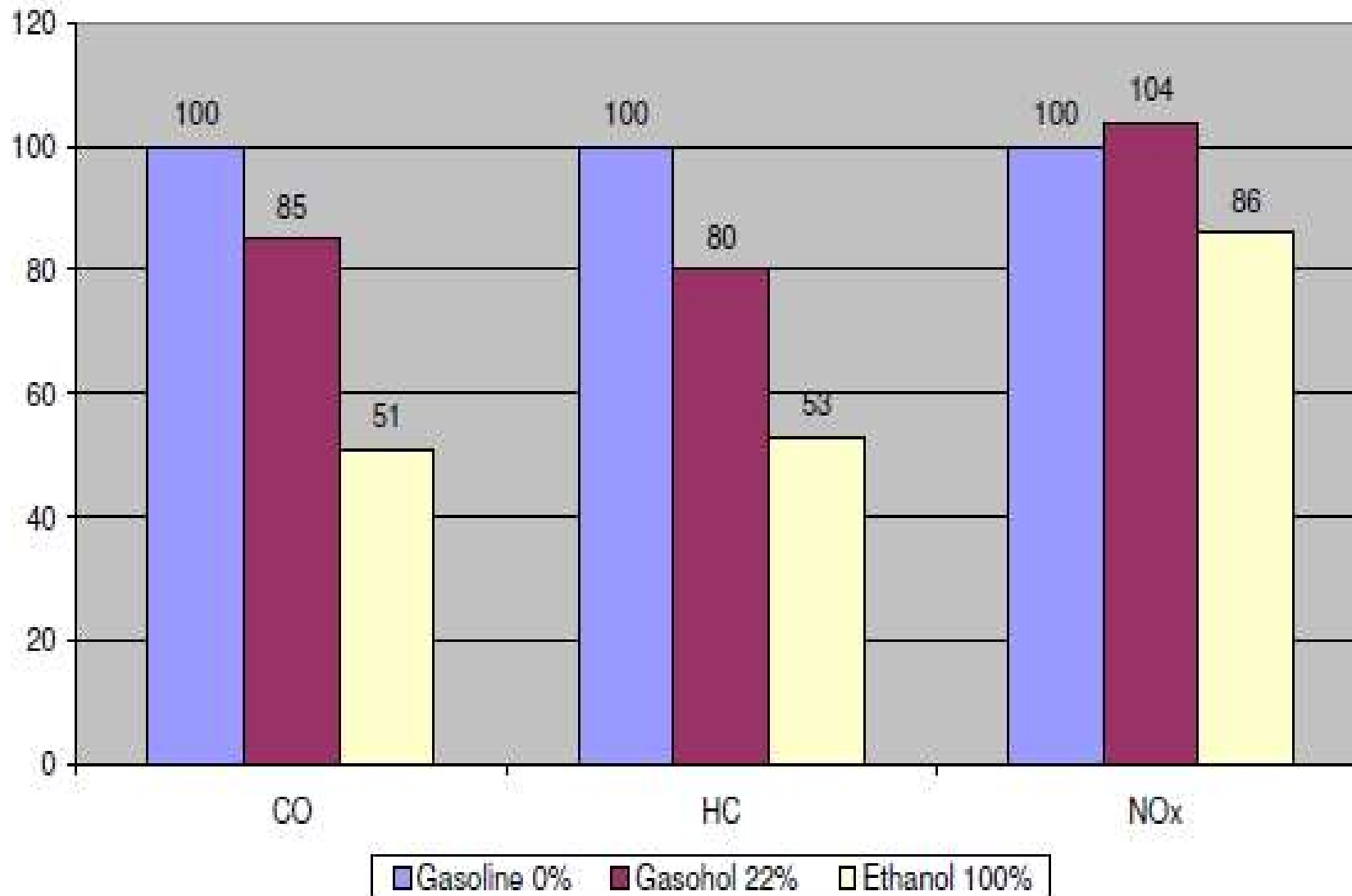
(a) Defined as energy output in a liter of ethanol over fossil fuel energy needed to produce. Sources: Macedo et al, 2008; World Watch Institute, 2006.

(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.

Emissões

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