



**Universidade Estadual de Campinas
Faculdade de Engenharia de Alimentos
Departamento de Engenharia de Alimentos**



Avaliação da Sustentabilidade Ampliada de Produtos Agroindustriais. Estudo de caso: Suco de Laranja e Etanol

**CONSUELO DE LIMA FERNANDEZ PEREIRA
Engenheira de Alimentos**

**Prof. Dr. Enrique Ortega Rodriguez
Orientador**

CAMPINAS – 2008

FICHA CATALOGRÁFICA ELABORADA PELA
BIBLIOTECA DA FEA – UNICAMP

P414a Pereira, Consuelo de Lima Fernandez
Avaliação de sustentabilidade ampliada de produtos agroindustriais.
Estudo de caso: suco de laranja e etanol / Consuelo de Lima Fernandez
Pereira. -- Campinas, SP: [s.n.], 2008.

Orientador: Enrique Ortega Rodriguez
Tese (doutorado) – Universidade Estadual de Campinas.Faculdade
de Engenharia de Alimentos

1. Análise emergética. 2. Avaliação de ciclo de vida. 3. Suco de
laranja. 4. Cana de açúcar. 5. Etanol. 6. Sustentabilidade. I.
Ortega Rodriguez, Enrique. II. Universidade Estadual de
Campinas.Faculdade de Engenharia de Alimentos. III. Título.

Título em inglês: Sustainability evaluation of agro industrial products. Case studies: orange juice
and ethanol

Palavras-chave em inglês (Keywords): Emergy analysis, Life cycle assessment, Orange juice,
Sugar cane, Ethanol, Sustainability

Titulação: Doutor em Engenharia de Alimentos

Banca examinadora: Maria Sílvia Romitelli

Carlos Eduardo Vaz Rossell

José Maria Gusman Ferraz

Leda Coltro

Luis Alberto Ambrósio

Programa de Pós Graduação: Programa em Engenharia de Alimentos



Universidade Estadual de Campinas
Faculdade de Engenharia de Alimentos
Departamento de Engenharia de Alimentos



Avaliação da Sustentabilidade Ampliada de Produtos Agroindustriais. Estudo de caso: Suco de Laranja e Etanol

Dissertação apresentada à banca
examinadora como parte dos
requisitos para a obtenção do
título de Doutor em Engenharia de
Alimentos.

CONSUELO DE LIMA FERNANDEZ PEREIRA
Engenheira de Alimentos

Prof. Dr. Enrique Ortega Rodriguez
Orientador

CAMPINAS – 2008

BANCA EXAMINADORA

Prof. Dr. Enrique Ortega Rodríguez
ORIENTADOR – DEA/FEA/UNICAMP

Dr. Luis Alberto Ambrósio
MEMBRO – Instituto de Zootecnia

Dra. Leda Coltro
MEMBRO – ITAL

Dr. José Maria Gusman Ferraz
MEMBRO – EMBRAPA/CNPMA

Dra. Maria Silvia Romitelli
MEMBRO – CETESB

Dr. Carlos Eduardo Vaz Rossell
MEMBRO – NIPE

Para
José e Neusa
Alvaro
Lívia, João Vicente e Isabel

AGRADECIMENTOS

"O agradecimento é a memória do coração."

Lao-Tsé

O meu trabalho só foi possível devido à colaboração e ao apoio de muitos amigos, companheiros e instituições. Em especial:

O Prof. Dr. Enrique Ortega, que me orientou e incentivou;

A Fundação de Amparo à Pesquisa do Estado de São Paulo (FAPESP), que financiou minha pesquisa através de uma bolsa de doutorado;

Os membros da banca, Dr. Carlos Rossell; Dr. José Maria Gusman Ferraz; Dra. Leda Coltro; Dr. Luis Alberto Ambrósio e Dra. Maria Silvia Romitelli, pelas sugestões e contribuições que enriqueceram o trabalho;

Os amigos de laboratório, Alexandre, Daniel, Fábio, Feni, John, Juliana, Lucas, Marlei, Otávio, Raul, Teldes e Watanabe, pelo trabalho em equipe, companheirismo e discussões acadêmicas que permitiram o desenvolvimento e aprofundamento dos conhecimentos indispensáveis para a realização deste trabalho. E, claro, pela alegria dos momentos de descontração;

Os amigos Adriana Andrade, Luís Eduardo Cipolla, Marcos Valin, Paulo D'Andrea, Paulo Biasioli, Sérgio Montanhér, Dr. Silvio Andrieta, que contribuíram com informações e conhecimento ao longo do caminho;

L&M Engenharia Ltda, que disponibilizou informações a minha pesquisa;

Alvaro, companheiro sempre presente, pelo incentivo, amor e carinho;

Meus filhos, Livia, João Vicente e Isabel, pela paciência e compreensão;

Meus pais, José e Neusa, pelo incentivo e carinho e pela logística ao longo deste período;

Os queridos Ramiro, Dy, Diego, Alda e Edward, pelo incentivo e ajuda no dia a dia;

Roseli, que segurou as pontas;

As grandes amigas Silvia e Adela, que além do apoio logístico também colaboraram com momentos de descontração, alegria e muito papo.

A todos vocês o meu mais profundo agradecimento.

*"Caminante, no hay camino,
se hace camino al andar."*
Antonio Machado

Resumo

O estudo tem o objetivo combinar as metodologias Emergética e de Ciclo de Vida para avaliar a sustentabilidade de produtos agroindustriais, considerando a cadeia produtiva completa. Combinação das duas metodologias permite avaliar os impactos ambientais associados a cada uma das etapas das cadeias e a demanda de recursos não renováveis em relação aos recursos totais empregados, ou sua viabilidade ao longo do tempo. A avaliação foi realizada para dois produtos de grande importância para o estado de São Paulo: a) cadeia produtiva de suco de laranja concentrado congelado exportado para a Europa; e b) a cadeia produtiva de álcool combustível produzido a partir da cana de açúcar e consumido no Brasil. No estudo do suco de laranja foram comparados os modelos de produção convencional e orgânica. As etapas incluídas foram: produção agrícola de laranjas, transporte da fruta e seu processamento para SLCC, transporte a granel do SLCC (rodoviário e marítimo, além das operações portuária), diluição e embalagem em fábrica na Europa. O sistema orgânico apresentou melhor desempenho ambiental do que o convencional. Entretanto, devido a sua menor produtividade por área, o sistema orgânico apresentou maior consumo de água e uso da terra por litro de suco diluído. Nos dois sistemas, a etapa agrícola é aquela com maior consumo de recursos, enquanto que a etapa industrial é a que apresenta maior consumo de combustível fóssil, direto e indireto. Nos dois casos os índices pioram ao longo da cadeia, sendo que o desempenho da etapa agrícola determina o desempenho da cadeia total. Os resultados indicam que esta cadeia, embora extremamente eficiente na utilização de energia e no aproveitamento de resíduos, não é sustentável, mesmo quando o sistema orgânico é adotado. O subsistema agrícola apresentou desempenho pobre devido à intensa utilização de materiais e serviços. O estudo da cadeia produtiva de álcool etanol combustível considerou sua produção e dois pontos de consumo: estado de São Paulo e do Mato Grosso. Seus resultados mostram que a etapa agrícola é aquela com maior impacto. As etapas industrial e de transporte, devido à utilização de grande volume de recursos da economia, diminuem a renovabilidade da cadeia, aumentam o consumo de recursos, em especial de combustíveis fósseis, piorando seus índices emergéticos. Os resultados também indicam que, por serem atividades que consomem combustíveis fósseis, a produção e distribuição do etanol emitem CO₂, não podendo ser considerada uma atividade mitigadora deste gás de efeito estufa. O aumento da distância entre a usina produtora e o centro consumidor aumenta os impactos e piora o desempenho ambiental da cadeia, podendo,

dependendo das distâncias, dissipar as vantagens do etanol frente a outros combustíveis. Resumindo, o uso do etanol de cana-de-açúcar como substituto de combustível fóssil apresenta algumas vantagens em relação a outros biocombustíveis. Entretanto, seu uso representa uma série de impactos ambientais e o modelo de produção e distribuição deve considerar estes impactos a fim de que as vantagens de seu uso não se percam devido a um modelo de produção, muito intensivo, ou devido à etapa de distribuição, muito extensa.

Palavra Chaves: Avaliação Emergética, Avaliação de ciclo de vida, suco de laranja, cana-de-açúcar, etanol, sustentabilidade.

Abstract

The objective of the present study was to combine Emergy and Life Cycle Assessment methodologies, used regularly for the evaluation of productive models, to evaluate the sustainability of raw and processed agricultural products, considering the complete productive chain. The combination of these two methodologies allows the evaluation of environmental impacts associated to each one of the chain's stages and, also, the evaluation of the renewable and non – renewable demand of resources and, therefore, its viability on the long run. The evaluation was accomplished for two products of great importance for state of São Paulo agriculture: a) productive chain of frozen concentrated orange juice (FCOJ) exported mainly to Europe; and b) productive chain of combustible ethanol produced from sugar cane and consumed in Brazil. Conventional and organic productions of FCOJ were evaluated. The following chain's steps were included: agricultural production of oranges, fruit transport and processing to FCOJ, bulk FCOJ transportation (both, road and marine, as well as port operations) dilution and packing in European processing plant. The organic system presented better environmental performance than the conventional system. However, due to the smallest productivity per area, the organic system presented larger consumption of water and land use needed to cultivation per liter of diluted juice. In the two systems, the agricultural stage presented the largest consumption of total resources, while the industrial phase presented the largest consumption of fossil fuel, both direct and indirect. For both systems, the inclusion of more steps in the chain results in worse environmental performance. Moreover, agricultural phase determines the total chain performance. The results indicate that FCOJ chain is not sustainable, although extremely efficient in the use of energy and in the use of residues, even if the organic model is adopted. The agricultural sub-system, for both organic and conventional model, presented poor environmental performance due to the intense use of materials and services. The ethanol chain study was accomplished considering the production in São Paulo and two supply chains: São Paulo and Mato Grosso States. Agricultural phase accounted for the main environmental impacts of ethanol chain. Processing and transportation, due to the consumption of great amounts of resources from economy, reduce ethanol renewability worsening the emergy indices; these phases consume material, particularly fossil fuels. The results also indicate that, since processing and distribution operations consume fossil fuels, ethanol production do emit CO₂, and can not be regarded as a CO₂ mitigator. Further, the increase in the

distance between the producing plant and the consuming center, consequently in the distribution phase, increases the impacts resulting in worse environmental performance. Summarizing, the use of sugarcane ethanol as substitute of fossil fuel presents some advantages in relation to other biofuels. However, its use causes several important environmental impacts. Therefore, production and distribution models should consider these impacts in order not to lose the advantages of using ethanol due to the production model, very intensive, or due to the distribution stage, too extensive.

Key Words: Emergy Analysis, Life Cycle Assessment, orange juice, sugar cane, ethanol, sustainability

Sumário

Resumo	xiii
Abstract.....	xv
1. Introdução	1
2. Revisão de Literatura	3
2.1 Desenvolvimento Sustentável	3
2.1.1. Agenda 21	6
2.1.2. Avaliação de Sustentabilidade	9
2.2. Avaliação de Ciclo de Vida	13
2.2.1. Metodologia da Análise de Ciclo de Vida.....	14
2.2.2. Utilização da Avaliação de Ciclo de Vida.....	20
2.3. Análise Emergética.....	27
2.3.1. Metodologia Emergética	29
2.3.2. Utilização da Análise Emergética.....	34
2.4. Uso Combinado das Metodologias	38
2.5. Hipótese de trabalho	39
3. Objetivo.....	40
3.1. Objetivo Geral	40
3.2. Objetivos Específicos	40
4. Metodologia	41
5. Avaliação da Cadeia Produtiva de Suco de Laranja.....	42
5.1. Introdução	42
5.1.1. A Citricultura no Brasil	43
5.1.2. Suco de Laranja Concentrado Congelado	45
5.1.3. Suco de Laranja Orgânico	50
5.2 Materiais e Métodos	52
5.2.1 Análise Emergética da cadeia produtiva de SLCC.....	53
5.2.2 Inventário do Ciclo de Vida de SLCC.....	55

5.3 Resultados e Discussão	56
5.3.1 – Resultados da Análise Emergética	56
5.3.1.1. Índices Emergéticos	64
5.3.2 – Resultados do Inventário do Ciclo de Vida	77
5.4. Conclusões	89
6. Avaliação da Cadeia do Etanol de Cana-de-açúcar.....	92
6.1. Introdução	92
6.1.1. Agroindústria Canavieira	93
6.1.2. Cadeia produtiva do álcool combustível.....	102
6.2. Materiais e Métodos	108
6.2.1 Análise Emergética da cadeia produtiva	110
6.2.2 Inventário do Ciclo de Vida da cadeia produtiva	111
6.3 Resultados e Discussão	112
6.3.1 – Resultados da Análise Emergética	112
6.3.1.1. Índices Emergéticos	117
6.3.2 – Resultados do Inventário de Ciclo de Vida	129
6.3.2.1. Indicadores de Consumo – Entradas do Sistema	129
6.3.2.2. Índices e Indicadores de produção da cadeia	140
6.3.2.3. Emissões e Ciclo de CO ₂	143
6.3.3 – Reserva Legal	153
6.4. Conclusões	160
7. Conclusões do Estudo	164
8. Bibliografia	166
ANEXO 1 – Símbolos Utilizados nos diagramas sistêmicos.....	180
APÊNDICE 1 - Avaliação da Cadeia Produtiva do Suco de Laranja.....	181
APÊNDICE 2- Avaliação da Cadeia Produtiva do Álcool.....	237

Índice de Figuras

Figura 1: Representação das etapas da ACV.	14
Figura 2: Fases da Avaliação do Ciclo de Vida (ISO 14.000).	15
Figura 3: Representação esquemática dos processos envolvidos na cadeia produtiva do etanol	17
Figura 4: Diagrama de fluxos de energia de um sistema agrícola	28
Figura 5: Representação simplificada de um sistema produtivo.	32
Figura 6: Principais áreas produtoras de laranja no Brasil.....	44
Figura 7: Diagrama resumido da Cadeia produtiva da Laranja.....	46
Figura 8: Cadeia Produtiva do Suco de laranja congelado concentrado	47
Figura 9: Diagrama sistêmico resumido de um pomar convencional.....	49
Figura 10: Diagrama sistêmico resumido do suco de laranja convencional.....	57
Figura 11: Diagrama sistêmico resumido do suco de laranja orgânico.....	58
Figura 12: Comparação entre os fluxos emergéticos dos dois sistemas de produção.....	59
Figura 13: Consumo de recursos por etapas da cadeia produtiva de suco de laranja.....	60
Figura 14: Fluxos emergéticos por tipo de recurso e etapa da cadeia. Suco Convencional	63
Figura 15: Fluxos emergéticos por tipo de recurso e etapa da cadeia. Suco Orgânico.	63
Figura 16: Transformidades dos produtos da cadeia de SLCC	67
Figura 17: Renovabilidade e Renovabilidade Modificada dos produtos da cadeia de SLCC	69
Figura 18: Razão de Rendimento Emergético dos produtos da cadeia de SLCC.....	71
Figura 19: Taxa de Carga Ambiental e Taxa de Carga Ambiental Modificada para os produtos da cadeia de SLCC.....	72
Figura 20: Índice de Sustentabilidade e Sustentabilidade Modificado dos produtos da cadeia do SLCC.....	74
Figura 21: Razão de Investimento Emergético dos produtos da cadeia de SLCC.....	75
Figura 22: Razão de Intercâmbio de Energia dos produtos da cadeia do SLCC.	76
Figura 23: Consumo direto e total de combustível fóssil por etapa da cadeia de SLCC	83
Figura 24: Evolução da área plantada, produção e rendimento da cana-de-açúcar.	95
Figura 25: Evolução da produção de álcool combustível no Brasil	96
Figura 26: Evolução da produtividade agrícola e industrial da cana-de-açúcar	97
Figura 27: Localização das usinas sucroalcooleiras.....	99
Figura 28: Diagrama resumido da Cadeia produtiva da Cana-de-açúcar.	101
Figura 29: Diagrama resumido da cadeia produtiva do Álcool etanol Combustível.....	103
Figura 30: Diagrama da etapa agrícola da produção da cana-de-açúcar.	104
Figura 31: Diagrama resumido das etapas agrícola e da destilaria de álcool.	105

Figura 32: Diagrama detalhado da etapa de extração do caldo.....	106
Figura 33: Diagrama detalhado da etapa de produção do álcool.....	106
Figura 34: Diagrama detalhado da etapa de geração de vapor e energia elétrica.....	107
Figura 35: Diagrama sistêmico resumido da cadeia produtiva do etanol (distribuição - SP)	112
Figura 36: Diagrama sistêmico resumido da cadeia produtiva do etanol (distribuição - MT)	113
Figura 37: Contribuições por etapa da cadeia para a distribuição de etanol em SP e MT .	114
Figura 38: Fluxos emergéticos por tipo de recurso e etapa da cadeia. Distribuição em SP	116
Figura 39: Fluxos emergéticos por tipo de recurso e etapa da cadeia. Distribuição em MT	116
Figura 40: Transformidade dos produtos da cadeia de cana-de-açúcar.....	119
Figura 41: Renovabilidade dos produtos da cadeia do álcool combustível.....	121
Figura 42: Razão de Rendimento Emergético dos produtos da cadeia do álcool.....	122
Figura 43: Taxa de carga Ambiental para os produtos da cadeia do álcool.....	125
Figura 44: Índice de Sustentabilidade para os produtos da cadeia do álcool.....	126
Figura 45: Razão de Investimento Emergético para os produtos da cadeia do álcool.....	127
Figura 46: Razão de Intercâmbio de Energia para os produtos da cadeia do álcool.....	128
Figura 47: Consumo de Combustível Fóssil por etapa da cadeia – Distribuição em SP.....	135
Figura 48: Consumo de Combustível Fóssil por etapa da cadeia – Distribuição em MT....	135
Figura 49: Impactos ambientais por etapa da cadeia produtiva do etanol	137
Figura 50: Representação simplificada dos ciclos de CO ₂ de combustíveis	145
Figura 51: Ciclo do Carbono para os combustíveis	146
Figura 52: Diagrama Sistêmico da produção de etanol considerando a Reserva Legal	154
Figura 53: Fluxos emergéticos da produção de etanol com e sem inclusão de reserva legal na unidade agrícola. Onde RL é reserva legal.....	155
Figura 54: Comparação entre as transformidades dos produtos da cadeia do etanol considerando a inclusão da reserva legal.....	157
Figura 55: Renovabilidade considerando a reserva legal (RL)	158
Figura 56: Índices emergéticos da cana-de-açúcar com e sem inclusão da Reserva Legal (RL)	159
Figura 57: Índices Emergéticos do etanol com e sem inclusão da Reserva Legal (RL).....	159

Índice de Tabelas

Tabela 1: Categorias de Impacto comumente utilizadas em Estudos de ACV.....	19
Tabela 2: Tabela de fluxos Emergéticos	30
Tabela 3: Índices Emergéticos utilizados na análise de sistemas.....	33
Tabela 4: Composição média por 100g de laranja	42
Tabela 5: Produtos derivados da Laranja	45
Tabela 6: Dados da etapa agrícola para os pomares convencional e orgânico	52
Tabela 7: Dados utilizados na análise emergética da cadeia produtiva de SLCC.	54
Tabela 8: Fluxos emergéticos da cadeia de SLCC convencional por etapa e tipo de fluxo .57	
Tabela 9: Fluxos emergéticos da cadeia de SLCC orgânico por etapa e tipo de fluxo	58
Tabela 10: Fluxos emergéticos (em seJ/ha.a) por etapa da cadeia de suco de laranja.....	61
Tabela 11: Índices emergéticos dos produtos da cadeia de SLCC convencional.	65
Tabela 12: Índices emergéticos dos produtos da cadeia de SLCC orgânico.	66
Tabela 13: Consumo de recursos e emissões da cadeia do suco de laranja.....	77
Tabela 14: Consumo de água por etapa da cadeia de SLCC.....	81
Tabela 15: Demanda de mão-de-obra por etapa da cadeia produtiva de SLCC.....	89
Tabela 16: Composição média da cana-de-açúcar	92
Tabela 17: Dados utilizados na análise emergética da cadeia produtiva de álcool.....	109
Tabela 18: Fluxos emergéticos da cadeia de álcool combustível, por etapa da cadeia e tipo de fluxo para a Distribuição no estado de São Paulo.....	113
Tabela 19: Fluxos emergéticos da cadeia de álcool combustível, por etapa da cadeia e tipo de fluxo para a distribuição no estado do Mato Grosso	114
Tabela 20: Índices emergéticos dos produtos da cadeia de álcool.	117
Tabela 21: Transformidade e renovabilidade de alguns combustíveis.....	119
Tabela 22: Valores de EYR encontrados na literatura para diferentes combustíveis.....	123
Tabela 23: Consumo de recursos da cadeia produtiva do etanol	129
Tabela 24: Consumo de água por etapa da cadeia produtiva	133
Tabela 25: Consumo de combustíveis fósseis da cadeia produtiva do etanol	134
Tabela 26: Demanda de mão-de-obra por etapa da cadeia produtiva	138
Tabela 27: Demanda energética para biocombustível encontrados na literatura.....	139
Tabela 28: Índices Indicadores de produção e emissões	140
Tabela 29: Razão Energia Fornecida/ Energia Consumida	142
Tabela 30: Balanço de emissões de CO ₂ para o etanol de cana-de-açúcar	149
Tabela 31: Emissões de Biocombustíveis	150
Tabela 32: Emissões de CO ₂ da cadeia do etanol considerando a distribuição.....	151

Tabela 33: Fluxos Emergéticos da cadeia produtiva do etanol distribuído em SP e considerando a reserva técnica.....	154
Tabela 34: Fluxos Emergéticos da cadeia produtiva do etanol distribuído em MT e considerando a reserva técnica.....	155
Tabela 35: Índices emergéticos dos produtos da cadeia de etanol considerando a reserva legal	156

1. Introdução

A Agenda 21, documento consensual elaborado e assinado por 179 países incluindo o Brasil, pretende traduzir em ações os conceitos de desenvolvimento sustentável. Seguindo suas recomendações, em julho de 2002 foi lançada a Agenda 21 Brasileira, apresentando como principal objetivo o desenvolvimento sustentável, e propondo o equilíbrio entre o crescimento econômico, a equidade social e a preservação ambiental no planejamento do desenvolvimento do país (MMA, 2004). Um dos seus objetivos principais é a agricultura sustentável. Para implementá-la de forma eficaz, há necessidade de utilização de uma ferramenta capaz de avaliar a sustentabilidade da atividade agrícola, bem como das etapas posteriores das cadeias produtivas.

A abordagem de desenvolvimento sustentável adotada pela Agenda 21 Brasileira é aquela apresentada pelo WCED - World Commission on Environment and Development - no relatório "Our Common Future" (1987), também conhecido como relatório Brundtland, que o define como o desenvolvimento capaz de "atender as necessidades presentes sem comprometer a capacidade das gerações futuras em atender suas próprias necessidades". Desta forma, a avaliação da sustentabilidade deve contemplar os três eixos básicos implícitos na definição de desenvolvimento sustentável: a) econômico, tradicionalmente o único analisado, que se refere à rentabilidade econômica ao longo do tempo; b) ecológico, que avalia a manutenção do ecossistema afetado pela atividade ao longo do tempo; c) social, que considera a compatibilidade do manejo e da organização do sistema com valores éticos e culturais do grupo e da sociedade envolvidos (Ferraz, 2003).

Esta abordagem envolve uma série de fatores que podem, algumas vezes, parecer antagônicos, tais como: a relação entre as necessidades da produção de alimentos e a preservação do meio-ambiente; o tipo de insumos utilizados e seu impacto sócio-ambiental; a produtividade e a rentabilidade em conjunto com a autonomia do agricultor, a soberania do país e a capacidade de gerar emprego e renda.

Conseqüentemente, além da abordagem econômica tradicional, a avaliação de sustentabilidade deve incluir todos os fatores que afetam a sobrevivência do projeto ao longo do tempo, incluindo a análise do ciclo completo de produção (do produtor ao consumidor final) e dos impactos sociais, a fim de garantir uma visão mais abrangente dos impactos causados pela atividade analisada.

Vários autores têm estudado e discutido a sustentabilidade da atividade agrícola, buscando uma forma adequada e exeqüível de avaliá-la. Entretanto, a definição de sustentabilidade agrícola, bem com sua avaliação, é difícil e complexa, pois, como dependem de condições locais, as práticas de manejo sustentáveis variam de região para região e, em geral, só são realmente identificadas em retrospecto. Além disso, sustentabilidade só pode ser avaliada por uma combinação de índices e medidas quantitativas e qualitativas (Andreoli et al., 1999; Riley, 2001; Rigby e Cáceres, 2001).

Diversos indicadores, incluindo análises físico-químicas, como qualidade do solo e da água, que indicam o estado geral do sistema, medidas de desempenho, como intensidade de uso de fertilizantes e de pesticidas, manejo agrícola, uso e ocupação do solo, consumo energético e de recursos naturais como a biodiversidade, intensidade e tipo de mão de obra utilizada, porcentagem de recursos renováveis utilizados, entre outros, têm sido utilizados para a avaliação do desempenho ambiental de propriedades agrícolas (Andreoli et al., 1999; Kirchmann e Thorvaldsson, 2000; Byerlee e Murgai, 2001; Reganold et al., 2001; Riley, 2001; Ortega et al., 2002; Ferraz, 2003; Panzieri et al., 2003; Skorupa et al., 2003; Rigby e Cáceres, 2001; Marques et al., 2003).

Contudo, embora fornecendo uma visão ampliada do desempenho ambiental da propriedade, os indicadores não permitem uma análise de todo o impacto causado pelo uso do produto de origem agrícola, pois não considera a cadeia produtiva completa.

A avaliação da sustentabilidade, por conseguinte, deve incluir toda a cadeia produtiva, desde a produção dos insumos agrícolas até o consumo final, ou seja, avaliar todo o ciclo de vida do produto. Da mesma forma, os indicadores adotados devem ser capazes de avaliar além da etapa agrícola, propriamente dita, todas as etapas envolvidas na produção e consumo do produto avaliado, incluindo transportes, pré-processamentos, processamentos, produção dos insumos e suas embalagens, tratamento de resíduos, etc. A utilização da Análise Emergética e da Avaliação de Ciclo de Vida de forma integrada permite esta abordagem ampliada da sustentabilidade de produtos agrícolas.

O presente trabalho propõe a Avaliação da Sustentabilidade Ampliada como uma ferramenta para a quantificação e qualificação das atividades agrícolas possibilitando assim a correta diferenciação e valoração de seus produtos. Para tal, pretende utilizar índices mensuráveis capazes de avaliar o impacto sócio-ambiental, a viabilidade e a sustentabilidade da atividade agrícola, baseados nos conceitos e indicadores de duas metodologias, Análise Emergética (AE) e Avaliação de Ciclo de Vida (ACV).

2. Revisão de Literatura

2.1 Desenvolvimento Sustentável

Durante o século XX diversos documentos e estudos levantaram a questão das consequências ambientais decorrentes da atividade humana. O livro “A Primavera Silenciosa” de Rachel Carlson, publicado em 1962, teve grande repercussão internacional, pois mostrou a relação entre os pesticidas agrícolas e a poluição do meio ambiente. Transformou-se em marco do desenvolvimento sustentável porque assumiu que o meio ambiente tem uma capacidade finita de absorção de poluentes.

A partir da década de 60, foram desenvolvidos vários trabalhos com o objetivo de estudar os impactos ambientais devido às diferentes atividades humanas e de analisar os mecanismos biológicos e ecológicos dos diferentes ecossistemas. Estes estudos foram fundamentais para o entendimento de que produção industrial, população, danos ambientais, consumo de alimentos e uso de recursos ambientais estão inter-relacionados e que o esgotamento ambiental, causado pelos padrões de produção e consumo de países desenvolvidos, causa a pobreza e o subdesenvolvimento de outras nações (Meadows, 1978). Além disto, compreendeu-se que os ecossistemas naturais são imprescindíveis à atividade humana que depende de seus produtos e serviços, como por exemplo, a absorção de poluentes e disponibilidade de água potável.

Com o entendimento destes resultados, surgiram alguns movimentos como o Clube de Roma (1968), Greenpeace (1971), Worldwatch Institute (1975), entre outros, que tem buscado tanto respostas para os problemas globais, como soluções legais para combater atividades que agredam e destruam o meio ambiente. Ao mesmo tempo, a preservação do meio ambiente passou a fazer parte da agenda de organismos internacionais, como as Nações Unidas. O PNUMA, Programa das Nações Unidas para o Meio Ambiente, foi criado em 1972 com o objetivo de desenvolver atividades em prol do Meio Ambiente congregando cientistas de diversas áreas, autoridades governamentais, empresários, Agências e Governos, e buscando o equilíbrio entre os interesses nacionais e o Bem global (PNUMA, 2006).

Ao mesmo tempo em que estes expressivos resultados eram mais bem compreendidos, ocorreram vários acidentes ambientais, como o de Bhopal (vazamentos de uma fábrica de pesticidas em 1984) e o de Chernobyl (explosão de um reator nuclear

em 1986), e vários derramamentos de petroleiros com conseqüências ambientais graves e que tiveram grande repercussão internacional. Neste contexto surgiu o conceito de Ecodesenvolvimento, definido como “um estilo de desenvolvimento particularmente adaptado às regiões rurais do terceiro mundo, fundado em sua capacidade natural para a fotossíntese” (Sachs, 1986). A medida que os resultados de novas pesquisas e estudos eram divulgados e discutidos, este conceito foi sendo modificado e adaptado até a definição atual, apresentado em 1987 pelo Relatório Brundtland: desenvolvimento sustentável é aquele capaz de atender as necessidades presentes sem comprometer a capacidade das gerações futuras em atender suas próprias necessidades (WCED, 1987).

Este conceito é importante, pois introduz dois importantes princípios relacionados ao meio ambiente: o de necessidades e o da noção de limitação. O primeiro trata da eqüidade no atendimento das necessidades básicas de qualquer grupo populacional e o segundo se refere às limitações impostas por recursos finitos. Assim, a sustentabilidade deve ser entendida em seus três eixos básicos: a) o ecológico, que considera a manutenção dos ecossistemas, seus recursos e seus serviços, para serem utilizados pelas gerações atuais e futuras; b) o social, que trata da eqüidade entre as várias populações e da compatibilidade das tecnologias e sistemas antrópicos com os valores éticos e culturais dos diferentes grupos sociais; e c) o econômico, tradicionalmente o enfoque dominante, que se refere à rentabilidade econômica ao longo do tempo (Ferraz, 2003).

Em termos sociais o desenvolvimento sustentável propõe a repartição mais justa das riquezas produzidas (justiça social), a universalização do acesso à educação e à saúde, a equidade entre sexos, grupos étnicos, sociais e religiosos, entre outros aspectos. Do ponto de vista ambiental o desenvolvimento sustentável propõe a utilização parcimoniosa dos recursos naturais, de forma a garantir o seu uso pelas gerações futuras. Assim, a utilização de recursos renováveis deve ser feita considerando-se sua capacidade de renovação e o uso daqueles não renováveis deve ser feito de forma parcimoniosa a fim de que possam ser utilizados pelo maior tempo possível. Em termos econômicos, o desenvolvimento sustentável preconiza o aumento da eficiência no uso das energias e recursos naturais e a mudança no padrão de consumo observando-se menor desperdício e maior consciência dos impactos causados pelo uso dos recursos naturais (Ferraz, 2003; IBGE, 2004)

Resumindo, o desenvolvimento sustentável significa compatibilidade do crescimento

econômico com desenvolvimento humano, justiça e bem estar social e qualidade ambiental, ou conservação e utilização racional dos recursos naturais.

Impulsionado por diversos estudos sobre mudanças climáticas e sobre o meio ambiente, e por desastres ambientais ocorridos em diferentes setores e países, vários movimentos e ações globais passaram a ser implementados buscando a transição para o desenvolvimento sustentável.

Em 1990 foi criado o Painel Intergovernamental para Mudanças Globais, IPCC, formado por três grupos - científico, técnico e sócio-econômico - voltado para produção de melhores dados relativos às mudanças climáticas.

Em 2007 o IPCC divulgou dois importantes relatórios preparados a partir de dados e estudos realizados por cientistas de vários países. No primeiro relatório, produzido pelo Grupo de Trabalho I, são apresentadas as bases científicas para as previsões das mudanças climáticas. Neste relatório são apresentados os progressos no entendimento dos mecanismos antrópicos e naturais que impulsionam as mudanças climáticas. São descritos processos climáticos e mudanças climáticas observadas nas últimas décadas em todos os continentes. Também faz projeção para as mudanças climáticas decorrentes das atuais atividades humanas (IPCC, 2007).

O segundo relatório, do Grupo de Trabalho II, utilizando dados e estudos realizados a partir de 1970, apresenta estudo sobre a relação entre as mudanças climáticas detectadas e mudanças observadas no ambiente natural e humano nestas últimas décadas. Este painel de cientistas concluiu que há fortes evidências de que o aquecimento devido a atividades antrópicas resultou em impactos discerníveis em muitos sistemas físicos e biológicos. Ademais, identifica novos efeitos, ainda em estudo, das variações nos climas regionais que provavelmente já afetam sistemas naturais e antrópicos. O relatório também apresenta previsões dos impactos nos ecossistemas naturais, na disponibilidade de água, na produção de alimentos, nas áreas costeiras e na saúde pública considerando cada um dos continentes mostrando que, apesar da intensidade destes impactos variar de região para região, eles muito provavelmente representarão pesados gastos anuais a todos os países. Finalmente, conclui que serão necessárias adaptações importantes para enfrentar as conseqüências do aquecimento já inevitável devido às emissões passadas (IPCC, 2007).

Em 1997 foi assinado o Protocolo de Kyoto, que tem por objetivo principal estabilizar as concentrações de gases estufa na atmosfera. Pelo Protocolo de Kyoto os países

industrializados deveriam reduzir as emissões de gases de efeito estufa em 5,2% para o período de 2008-2012, tendo como referência o nível registrado de emissões em 1990. Para se alcançar esta meta seriam incentivados os Mecanismos de Desenvolvimento Limpo (MDL) e o Comércio de Emissões. Este tratado entrou em vigor em 16 de fevereiro de 2005, tendo sido ratificado por países que representam juntos 55% das emissões de gases de efeito estufa. Os Estados Unidos, responsáveis por 36,1% das emissões mundiais, não ratificaram o acordo.

2.1.1. Agenda 21

Em 1992 ocorreu a Conferência das Nações Unidas sobre o Meio Ambiente e Desenvolvimento – ECO 92 – no Rio de Janeiro quando foram firmados vários documentos e acordos, entre eles a Agenda 21, protocolo contendo uma lista de compromissos e ações objetivando o desenvolvimento sustentável e que foi assinado por 176 países, incluindo o Brasil. Entretanto, mesmo para os países signatários, sua adoção é voluntária.

Considerando que as políticas atuais perpetuam disparidades econômicas e sociais, aumentam a pobreza e contribuem para a deterioração dos ecossistemas vitais para manter a vida na Terra, o documento da Agenda 21 apresenta um plano detalhado de ações concretas a serem adotadas por governos e suas agências, da mesma forma que por entidades da sociedade civil organizada, visando a transição de uma sociedade desigual e insustentável em longo prazo, para uma organização social justa e sustentável, ou seja, para o desenvolvimento sustentável. Trata-se de uma proposta de planejamento estratégico participativo para ser utilizado em âmbito local, regional e global (MMA, 2007).

A Agenda 21 é um documento bastante amplo, dividido em quatro seções, num total de quarenta capítulos (MMA, 2007). Na primeira seção, "Dimensões Econômicas e Sociais", são discutidas as políticas de cooperação internacional para viabilizar o desenvolvimento sustentável nos países em desenvolvimento; discute as estratégias de combate à pobreza e à miséria, examina as mudanças nos padrões de consumo e as inter-relações entre sustentabilidade e dinâmica demográfica, apresenta propostas para a promoção da saúde pública e a melhoria da qualidade dos assentamentos humanos.

Na segunda seção, "Conservação e Gestão dos Recursos para o Desenvolvimento", são abordados os tópicos relacionados à conservação e uso dos diferentes recursos necessários para o desenvolvimento sustentável. Nesta seção são apresentadas

abordagens para a proteção atmosférica, para o planejamento e gerenciamento na utilização dos recursos terrestres, para o combate ao desmatamento e a desertificação, para a proteção de ecossistemas frágeis e dos recursos do mar, para o planejamento do uso de recursos hídricos, para o manejo ecológico de substâncias e resíduos químicos e tóxicos, bem como de resíduos sólidos e radiativos.

A terceira seção, “Fortalecimento do Papel dos Grupos Principais”, são examinadas medidas necessárias para a promoção e proteção de segmentos sociais importantes, buscando-se a equidade social. São apresentados instrumentos para fomentar e garantir a participação de populações mais jovens, das populações feminina e indígena, dos trabalhadores rurais, da indústria e comércio; também são apresentados mecanismos capazes de fortalecer as parcerias com organizações não governamentais, e a participação da comunidade tecno-científica e dos sindicatos na implantação da Agenda 21.

Finalmente, na última seção, “Meios de Implementação”, o documento apresenta e discute instrumentos a serem utilizados na implementação das propostas apresentadas. Esta seção discute tópicos como mecanismos financeiros e jurídicos, desenvolvimento e transferência de conhecimentos e tecnologias eco-consistentes, educação e treinamento, apresentando-os como instrumentos de construção da consciência ambiental e de capacitação o desenvolvimento sustentável. Também defende o fortalecimento das instituições e a melhoria das capacidades nacionais de coleta, processamento e análise de dados relevantes para a gestão da sustentabilidade.

A partir da Agenda 21 Global, foi construído o documento da Agenda 21 Brasileira. A Comissão de Políticas de Desenvolvimento Sustentável e da Agenda 21 Nacional – CPDS foi criada em 1997 e elegeu seis temas básicos e prioritários para a preparação da Agenda Brasileira: cidades sustentáveis; agricultura sustentável, gestão de recursos naturais; redução das desigualdades sociais; infra-estrutura e integração regional e ciência e tecnologia para o desenvolvimento sustentável. Cada um destes temas foi amplamente discutido por diferentes parcelas da sociedade, incluindo instituições governamentais, o setor empresarial, sindicatos, a comunidade acadêmica, movimentos sociais e as organizações não governamentais. A partir destas discussões foram preparados cinco documentos temáticos utilizados na preparação da Agenda 21 Brasileira lançada em 2002 e que, a partir de 2003, passou a fase de implementação passando a condição de Programa Plurianual do governo brasileiro.

Além do governo Federal, alguns governos estaduais já lançaram, ou estão em fase de preparação, de suas Agendas Regionais. Da mesma forma, várias cidades também estão elaborando suas Agendas 21 Locais. Segundo o Ministério do Meio Ambiente, existem hoje 544 processos de Agenda 21 Locais em andamento no Brasil (MMA, 2007).

O resultado esperado da implantação da Agenda 21 é a possibilidade de construção de uma sociedade com melhor padrão de vida para todos e com ecossistemas melhor gerenciados e protegidos. Sendo um processo participativo, esta transição resultará inexoravelmente em mudanças culturais significativa, em especial no que diz respeito aos padrões de consumo e de produção. Todavia, sua adoção e implementação não é simples, nem fácil. O sucesso da Agenda 21 depende da participação ativa da sociedade na tomada das decisões, ou seja, a sociedade, via suas instituições civis e governamentais, deve diagnosticar e discutir seus problemas, entender as conseqüências e os conflitos a eles associados e decidir sobre a melhor forma de resolvê-los (Novaes, 2000).

Ao lado da participação da sociedade, também é fundamental a utilização de ferramentas capazes de realizar diagnósticos e avaliações integradas das várias atividades humanas, considerando os três eixos da sustentabilidade. A escolha do tema “Ciência e Tecnologia” como uma das áreas prioritárias da Agenda 21 Brasileira, indica a importância e a urgência de se disponibilizar conhecimento profundo e informações precisas dos diversos setores da sociedade, de tal forma que seja possível entender seus processos, suas necessidades de consumos, os impactos decorrentes de suas atividades e sua relação e influência sobre outros setores. A partir deste conhecimento é possível propor modelos produtivos mais eficientes e com menor impacto ambiental e modelos de interação social mais justos e inclusivos.

Dentro deste contexto, o entendimento do setor agrícola, também escolhido como tema prioritário, torna-se fundamental para o desenvolvimento de uma sociedade sustentável, uma vez que é responsável pela produção de alimentos, bem como de biomassa para a produção de biocombustíveis, além de ter papel preponderante na economia nacional voltada para exportações. Em outras palavras, o impacto ambiental causado pela atividade agrícola, bem como pelo subsequente processamento destes produtos agrícolas, deve ser conhecido e entendido em sua totalidade antes de se definir políticas nestes dois setores, segurança alimentar e energia.

2.1.2. Avaliação de Sustentabilidade

Qualquer atividade humana, sobretudo a produção agropecuária, pode causar uma série de impactos ambientais, tanto em âmbito local, como regional e global. A avaliação destes impactos é essencial para a transição para o desenvolvimento sustentável. Assim, o desenvolvimento de metodologias adequadas e confiáveis, capazes de avaliar a sustentabilidade considerando seus vários componentes, representa um grande desafio à comunidade científica.

A definição fornecida pela Comissão Brundtland (WCED, 1987) tem sido utilizada como ponto de partida para a definição do conceito de sustentabilidade e, a partir daí, desenvolver metodologias para a avaliação da sustentabilidade das diferentes atividades da sociedade humana. As metodologias devem buscar a integração das três abordagens de sustentabilidade contidas nesta definição: a econômica, a ambiental e a social.

Sobretudo, as metodologias de análise de sustentabilidade devem considerar os sistemas a serem sustentados, ou seja, os ecossistemas, os sistemas necessários ao suporte da atividade humana, e as diversas comunidades do planeta. Da mesma forma, devem conter a análise dos sistemas a serem desenvolvidos, ou seja, os seres humanos, as sociedades e economias. Por último, devem incluir o componente inter-gerações, ou seja, deve ser considerado o horizonte de tempo para a transição para a sustentabilidade (Piorr, 2003).

O propósito da Análise de Sustentabilidade, portanto, é fornecer aos tomadores de decisão e governantes uma avaliação de ordem global e local de sistemas integrados natureza-sociedade, considerando tanto a perspectiva de longo como de curto prazo, de forma a ajudá-los na definição de ações que devem, ou que não devem, ser tomadas na busca da sociedade sustentável (Devuyst, 2000; Kates et al., 2001; Ness et al., 2007).

Ness et al. (2007) classificaram as diferentes metodologias em três grandes grupos, de acordo com a abordagem adotada. O primeiro grupo é formado por aquelas baseadas em “índices e indicadores”.

Indicadores são medidas, em geral quantitativas, que representam ou indicam o estado de desenvolvimento econômico, social e/ou ambiental de uma região, ou nação. Quando estes indicadores são combinados de alguma forma, obtém-se um índice. Estas metodologias podem abordar somente um aspecto da sustentabilidade (não integrativas) ou combinar parâmetros sócio-econômicos com parâmetros ambientais cobrindo as três

dimensões da sustentabilidade (integrativas).

Exemplos de metodologias não integrativas são os Indicadores de Pressão Ambiental (Environmental Pressure Indicators - EPIs) desenvolvidos pela União Européia para avaliação e comparação da situação ambiental de seus países membros. São baseados em dados estatísticos coletados por todos os países desde 1993 e consideram os seguintes tópicos: esgotamento dos recursos naturais, resíduos produzidos, mudança climática e poluição do ar (Eurostat, 2003).

Da mesma maneira, as Nações Unidas, seguindo as recomendações da conferência ECO 92 e buscando uma compreensão mais ampla do estado de desenvolvimento das nações, definiram um grupo de indicadores para a avaliação e o monitoramento de aspectos sociais, ambientais e institucionais que têm sido utilizados por diversos países desde 1994. Estes indicadores não são integrados, porém cobrem diversas áreas relacionadas ao desenvolvimento sustentável como, por exemplo, qualidade e disponibilidade de água, nível educacional, taxas de crescimento e produto interno bruto per capita. (UNDSD, 2001).

O Índice de Sustentabilidade Ambiental (ESI), desenvolvido com o objetivo de avaliar o “progresso global para a sustentabilidade ambiental”, também se enquadra neste grupo de metodologias. Formado por 68 indicadores, avalia a situação de sistemas ambientais, da redução do estresse sobre os sistemas naturais, da redução da vulnerabilidade humana devido às mudanças climáticas, da capacidade social e institucional para enfrentar com os desafios ambientais e a habilidade em cumprir acordos e padrões internacionais de países e regiões. O Objetivo do ESI é permitir a comparação entre países e fornecer informação para auxiliar na formulação de políticas ambientais (Ness et al., 2007).

Também foram feitas algumas tentativas para o desenvolvimento de índices que integrem as dimensões ambientais e sociais em um único número. O índice de Desenvolvimento Humano (IDH) utilizado pelo Programa das Nações Unidas para o Desenvolvimento (UNDP, 2004) desde 1975 é um exemplo. Utiliza três parâmetros gerais para a avaliação do desenvolvimento social e econômico em diferentes países: a) longevidade, medida pela expectativa de vida ao nascer; b) acesso ao conhecimento, avaliado por uma combinação da taxa de analfabetismo e de escolarização; e c) acesso a recursos necessários para uma vida digna, medido pelo Produto Interno Bruto per capita. Estes indicadores são combinados num único valor, o IDH. No Brasil o IDH também é

utilizado pelo governo federal na avaliação de município, neste caso IDH-M (PNUD, 2007).

A Pegada Ecológica, através de um índice, expressa o nível de consumo de bens e serviços de uma determinada população. Faz uma estimativa do consumo de recursos naturais e de área necessária para a absorção de resíduos e emissões causados pelas atividades desta população, sendo os resultados expressos em área per capita necessária para o consumo anual de bens e serviços (Wackernagel e Rees, 1996). Esta metodologia permite a comparação entre diferentes regiões e países de uma forma fácil e direta. Também permite a verificação da compatibilidade do padrão de consumo de uma região com sua capacidade de carga uma vez que, indica a área necessária para a manutenção da população. Assim, se a área necessária para a manutenção da população for maior do que a área ocupada por esta população, seu padrão de consumo é insustentável no longo prazo.

Também pertencentes ao grupo das metodologias baseadas em índices e indicadores encontram-se as metodologias de avaliação regional como, por exemplo, as análises emergéticas e exergéticas regionais.

Estas metodologias são importantes, pois o cálculo contínuo de indicadores e índices permite a identificação de tendências de longo prazo. O entendimento destas tendências permite, por sua vez, a realização de projeções de curto prazo para auxiliar a tomada de decisão. Assim, as avaliações regionais contínuas, por meio do uso de índices e indicadores, são de grande valia na formulação de políticas de desenvolvimento sustentável. Sua utilização também permite a comparação entre regiões e países, possibilitando, desta forma, a formulação de políticas mundiais, bem como o estabelecimento de acordos e protocolos entre países, visando o Desenvolvimento Sustentável.

O segundo grupo de metodologias segundo Ness e colaboradores são aquelas que avaliam o sistema produtivo, ou a cadeia produtiva, de um determinado bem, concentrando a análise nos fluxos de entrada e saída de materiais e de energia. Ou seja, o foco destas metodologias está na análise de diferentes fluxos em relação aos produtos e serviços, ao invés da análise regional. A Análise de Fluxo de Materiais é um exemplo deste tipo de metodologia. Desenvolvida pelo Instituto Wuppertal para Clima, Meio Ambiente e Energia baseia suas análises no índice de utilização de material por unidade de produto ou serviço (MIPS) considerando todos os fluxos de materiais relacionados a

ele (Ness et al., 2007).

Nesta mesma linha, algumas metodologias avaliam o gasto energético para produzir um determinado bem. Nesta análise são considerados tanto os fluxos energéticos diretos, como indiretos, necessários para a produção dos insumos, matérias primas, equipamentos e embalagens (Herendeen, 2004).

Dentro desta categoria de metodologias também se encontram a avaliação de ciclo de vida e a análise emergética de produtos. Ambas serão discutidas com mais detalhes ao longo do presente trabalho.

O terceiro grupo de metodologias, segundo Ness et al. (2007), são as metodologias integrativas usadas para auxiliar na definição de políticas ou projetos para uma dada região ou país. São importantes visto que, enquanto as outras categorias apresentam uma análise em retrospecto, as metodologias desta categoria apresentam um estudo baseado em cenários possíveis fazendo previsões para cada um deles. Em sua maioria, utilizam análise de sistemas integrando aspectos sociais e ambientais. Exemplos desta categoria são: a) Análise Multicritério, usada em situações em que ocorrem critérios de avaliação concorrentes ou conflitantes para se determinar a melhor política nestas condições; b) Análise de Risco, quando são avaliados os riscos potenciais associados a projetos ou políticas; e c) Análise de Vulnerabilidade.

Todas metodologias citadas acima têm por objetivo fornecer subsídios para a formulação de políticas públicas que promovam o desenvolvimento sustentável e que diminuam a degradação do meio ambiente. Segundo Piorr (2003), ferramentas destinadas a este fim devem ser capazes de reconhecer e valorar impactos que degradam o meio ambiente, identificar e avaliar recursos que possam estar em perigo no futuro e desenvolver sistemas sustentáveis de uso e ocupação do solo. Logo, os resultados das análises, expressados através de índices e indicadores, devem ser simples e fáceis de interpretar, devem ser representativos comunicando a situação de sistemas complexos além de indicar tendências e resultados de ações tomadas. Devem ser capazes de fornecer bases para comparação a nível regional, nacional e internacional bem como fundamentos para a formulação de políticas. Portanto, devem ser embasados em sólido conhecimento científico e tecnológico. Ademais, devem ser disponíveis a um custo adequado permitindo, assim, sua realização em intervalos regulares para fins de monitoramento.

2.2. Avaliação de Ciclo de Vida

Como resposta à demanda mundial por produção mais limpa e com menor impacto ambiental, foi criada em 1995, dentro de um sistema estabelecido pela SETAC¹, a série de normas ISO² 14040:1996 (ISO 14040, 14041, 14042, 14043), seguida pela atualização de 2004, com o objetivo de criar padrões internacionais de manejo sustentável de recursos naturais, reduzindo os riscos decorrentes das atividades industriais. Esta série de normas introduziu a Avaliação de Desempenho Ambiental, ou certificação ISO 14.000, definindo uma metodologia consistente para sua realização, também conhecida como Análise de Ciclo de Vida.

A certificação ISO 14.001 é concedida a uma organização quando há um sistema de gestão ambiental implantado de forma a minimizar efeitos nocivos ao ambiente causados por suas atividades. Em 2005, um total de 111.162 certificados ISO 14.001 foram concedidos para empresas de 138 países, sendo 2061 para empresas brasileiras. Este número ainda é pequeno se comparado com os certificados concedidos ao Japão (23.483) e à China (8.620) no mesmo período (ISO, 2006).

A Avaliação de Ciclo de Vida (ACV) é uma metodologia utilizada para avaliar os impactos ambientais causados por um produto ou processo durante todo o seu ciclo de vida ou cadeia de produção. Através de uma abordagem conhecida como "do berço ao túmulo", a ACV avalia todos os estágios do ciclo de vida de um produto, desde a extração das matérias primas dos sistemas naturais até seu uso final incluindo as etapas de transporte de matérias primas, insumos e do produto em si, e também de disposição dos resíduos. Esta abordagem permite a estimativa dos impactos ambientais acumulados ao longo deste ciclo, oferecendo uma visão abrangente e possibilitando melhor compreensão do sistema. A Figura 1 apresenta uma representação esquemática da ACV.

Em geral a ACV tem aplicação mais intensa na área industrial, sendo realizadas com variados objetivos. Seus resultados podem ser usados no desenvolvimento de novos produtos e serviços, na identificação de pontos críticos e na otimização dos processos produtivos. Pode também oferecer subsídios para o planejamento estratégico tanto a nível privado como de políticas públicas, além de possibilitar a melhoria contínua de processos. Seu maior benefício é que, através de seus resultados, diferentes efeitos ambientais são

¹ SETAC – Society of Environmental Toxicology and Chemistry

² ISO – International Organization of Standardization

avaliados e quantificados, facilitando o debate e a formulação de políticas públicas (Hanegraaf et al., 1998; ABNT, 2001; Coltro, 2007).

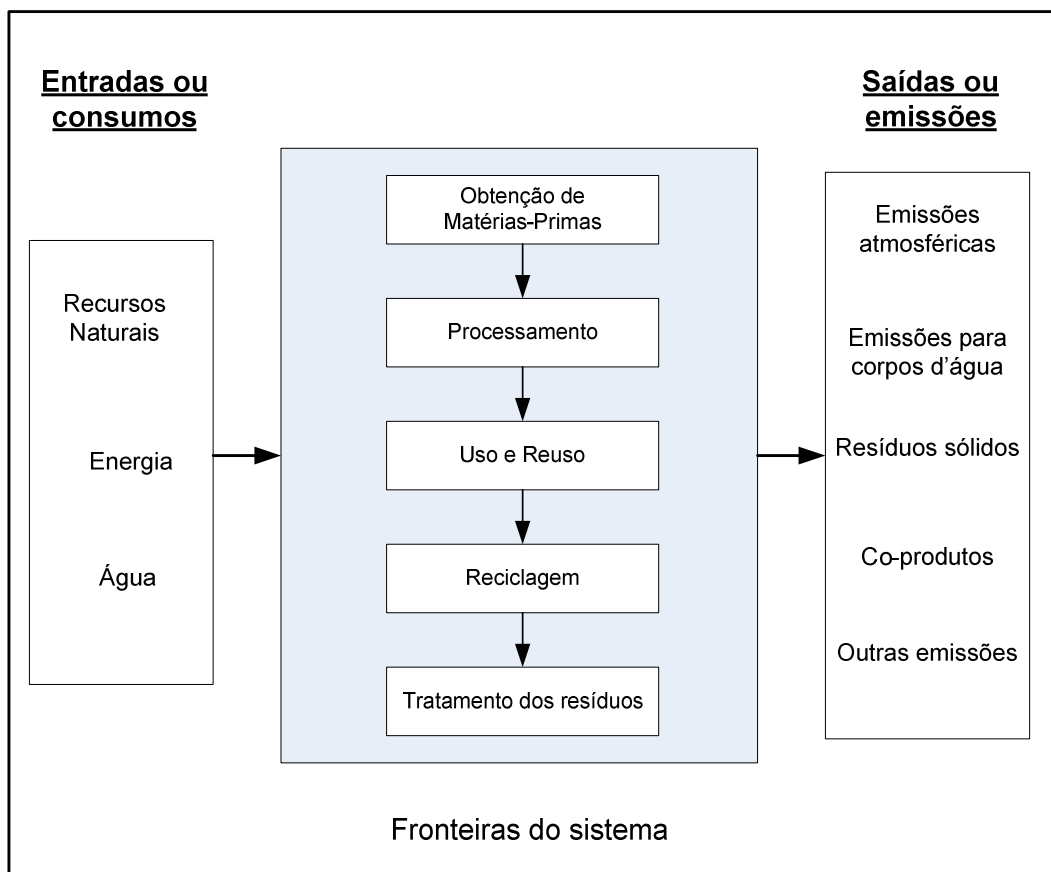


Figura 1: Representação das etapas da ACV.

Adaptado de EPA, 2001.

2.2.1. Metodologia da Análise de Ciclo de Vida

A metodologia de ACV é realizada em quatro fases principais: (a) definição dos objetivos e do escopo do estudo; (b) análise do Inventário de Ciclo de Vida; (c) avaliação dos impactos ambientais associados ao sistema; (d) interpretação dos resultados, feita com base nos objetivos expressos na primeira etapa (ABNT, 2001). A Figura 2 apresenta um diagrama das fases da AVC

Definição de escopo e objetivos, primeira fase do estudo, define sua abrangência e as condições de realização. É nesta etapa que é definida a precisão do estudo, bem como as informações necessárias para sua condução e a forma de interpretação de seus resultados.

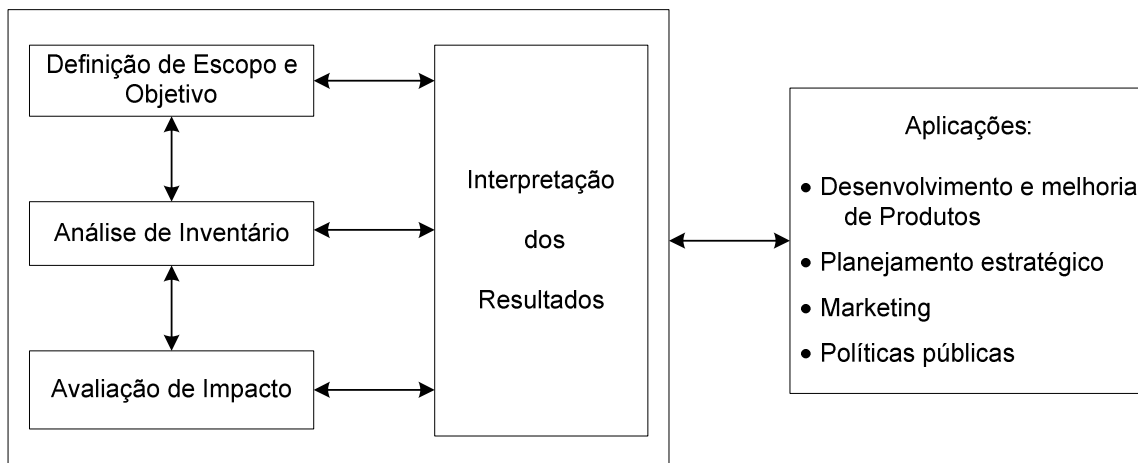


Figura 2: Fases da Avaliação do Ciclo de Vida (ISO 14.000).

Os estudos de avaliação do ciclo de vida, por sua versatilidade e possibilidade de aplicação a diferentes sistemas, podem ser utilizados com diferentes objetivos como, por exemplo, gerenciamento de recursos naturais, identificação de impactos de um determinado produto ou serviço, identificação das etapas produtivas responsáveis pelos maiores impactos dentro de um ciclo produtivo, identificação de etapas produtivas onde uma redução de impactos pode ser alcançada, avaliação de opções de produto ou processo com menor impacto e escolha de opções de menor impacto no desenvolvimento de novos produtos, entre outros (EPA, 2001; Coltro, 2007).

A partir do objetivo do estudo devem ser identificadas as informações que o estudo deverá fornecer. Por exemplo: qual é o impacto (por exemplo: aquecimento global, eutrofização, etc.) que deve ser estudado; como as mudanças no processo produtivo podem afetar os impactos ambientais ao longo do ciclo de vida; qual é o processo que causa menor dano aos cursos d'água; como o processo pode ser alterado para reduzir um determinado impacto (aquecimento, acidificação, etc), entre outros. A escolha do objetivo e dos resultados esperados do estudo, portanto, guiarão o desenvolvimento da ACV.

A organização do estudo, ou seja, a definição dos principais elementos do estudo - função do sistema estudado, unidade funcional, fronteiras do sistema e unidades de processo – também deve ser definido nesta fase do estudo.

Função do sistema é a finalidade de uso do produto, que determina também sua unidade funcional. Unidade Funcional é o conceito central na ACV. Trata-se da unidade que relaciona o consumo de recursos e os efeitos ambientais ao produto do sistema.

Desta forma a unidade funcional descreve e quantifica a função que o produto desempenha na sociedade. Por exemplo, pode ser 1kg de carne, ou 1 litro de suco de laranja. Sua escolha é extremamente importante, pois todos os dados e informações serão apresentados para uma unidade funcional. Ademais, comparações entre produtos e processos somente são possíveis considerando-se a mesma base, ou a mesma unidade funcional.

As fronteiras do sistema são definidas pelas etapas que serão incluídas no estudo. O ciclo de vida ideal inclui todas as etapas do ciclo do produto: aquisição de matéria prima, processamento, uso, reuso e reciclagem e tratamento dos resíduos. Entretanto, na maioria das vezes, devido ao escopo, a disponibilidade de dados ou aos recursos disponíveis, o estudo não inclui todas estas fases. Assim, os processos incluídos e excluídos devem ser definidos nesta etapa.

Unidade de processo é a menor parte de um sistema produtivo, o volume de controle de cada atividade do ciclo que será caracterizado através de suas entradas e saídas.

A precisão do estudo dependerá da finalidade do mesmo e dos recursos disponíveis, podendo ser utilizados dados exatos, proveniente de estudos e levantamentos *in loco*, ou estimativas baseadas em dados estatísticos (EPA, 2001). Da mesma forma, as fontes dos dados a ser utilizado podem variar bastante, podendo ser de dados primários (compilados ou medidos pelo estudo) ou secundários (provenientes de revisão bibliográfica ou outras fontes confiáveis).

Análise de Inventário é a segunda fase da ACV. Inventário de Ciclo de Vida (ICV) é relação de todas as entradas e saídas do sistema estudado. Em sua preparação os consumos de energia e matérias-primas e as emissões atmosféricas, emissões para os corpos d'água, resíduos sólidos ou qualquer outra forma de saída de todos os processos incluídos no estudo, são identificadas e quantificadas. O ICV fornece a base para a avaliação dos impactos ambientais. Seu nível de precisão e de detalhamento da coleta de dados refletirá em todo o restante do estudo.

O primeiro passo do ICV é a preparação de um fluxograma do sistema em estudo onde cada etapa do processo é identificada, conforme apresentado na Figura 3. A precisão do estudo dependerá da complexidade do fluxograma adotado sendo que para comparações entre diferentes sistemas, seus estudos consideram o mesmo nível de complexidade.

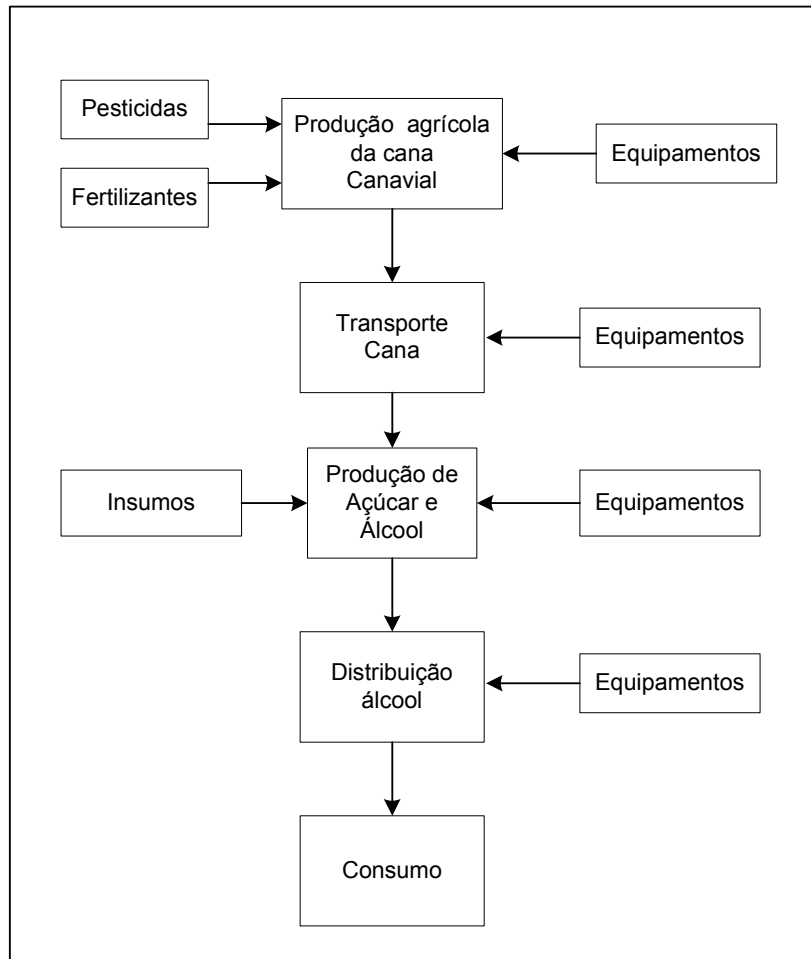


Figura 3: Representação esquemática dos processos envolvidos na cadeia produtiva do etanol

A partir do fluxograma, são realizadas coletas de dados em cada um dos processos do sistema considerando as entradas e saídas do sistema. As fontes de dados podem variar grandemente, mas devem ser identificadas corretamente.

Os dados coletados são compilados considerando-se as cargas ambientais, ou os itens a serem avaliados, e na unidade funcional definida anteriormente. O produto do ICV é uma lista contendo os volumes consumidos de energia e de materiais e as quantidades de emissões poluentes ao meio ambiente. Estas informações podem estar organizadas por etapa do ciclo de vida, por processo, por tipo de emissão ou consumo, ou uma combinação destes agrupamentos.

A Avaliação do Impacto do Ciclo de Vida (AICV) é terceira fase da ACV. Nesta etapa os dados compilados no ICV são avaliados considerando-se os impactos potenciais sobre

o meio ambiente e a saúde humana. Através da AICV, os impactos potenciais identificados são associados à cadeia produtiva do produto. Embora o ICV já forneça resultados importantes quanto aos impactos causados pelo processo, sua análise é importante, pois permite uma base de comparação mais consistente.

O primeiro passo da AICV é a seleção das categorias de impacto que serão cobertas pelo estudo. Para a AICV, impactos são as conseqüências causadas pelos fluxos de entrada e saída de um sistema sobre a saúde humana, plantas, animais e a futura disponibilidade de recursos naturais. A Tabela 1 apresenta as categorias de impacto comumente utilizadas nos estudos de ACV.

No caso da ACV para atividade agrícola, outros impactos são também importantes e podem ser significativos. O uso do solo é um deles. Trata-se de um impacto muito importante porque a disponibilidade de área agricultável é limitada. Por outro lado, o tipo de ocupação, ou atividade agrícola, e sua intensidade estão diretamente relacionados ao volume de emissões por área, aos diferentes ciclos de nutrientes (nitrogênio, fósforo) e a sua capacidade de absorção das emissões antrópicas (Hanegraaf et al., 1998; Roest, 2000). Assim, este impacto está associado tanto à ocupação de uma área como também a sua degradação, a sua transformação e à biodiversidade da região. Sua avaliação deve ser feita através de uma série de índices, como por exemplo, pela área necessária para produzir uma unidade funcional, perda de solo devido à erosão, perda de biodiversidade, variação em pH do solo, entre outros (Cowell e Lindeijer, 2000; Mattsson et al., 2000).

O segundo passo da AICV é a classificação dos dados. Nesta etapa os dados compilados pelo inventário são agrupados por categoria de impacto. Quando o item do ICV contribui apenas para um impacto, a alocação é simples. Porém, muitas vezes, a mesma emissão contribui para mais de um impacto. Por exemplo, SO₂ pode causar acidificação e também danos à saúde humana, devendo ser atribuído às duas categorias de impacto.

A seguir é feita a caracterização dos dados multiplicando-se os valores levantados pelo ICV por fatores de equivalência para cada uma das categorias de impacto, conforme apresentado na Tabela 1. Através da caracterização os impactos causados pelos vários componentes químicos emitidos podem ser avaliados e comparados numa mesma base.

Tabela 1: Categorias de Impacto comumente utilizadas em Estudos de ACV

Categoria de Impacto	Escala	Dado do IVC	Fator de caracterização	Descrição do fator de caracterização
Aquecimento global	Global	Dióxido de Carbono (CO ₂) Dióxido de nitrogênio (NO ₂) Metano (CH ₄) Clorofluorcarboneto (CFCs) Hidroclorofluorcarboneto (HCFCs) Brometo de metila (CH ₃ Br)	Potencial de aquecimento Global	Converte os dados para equivalente de dióxido de carbono (CO ₂) ¹ .
Diminuição da camada de ozônio	Global	Clorofluorcarboneto (CFCs) Hidroclorofluorcarboneto (HCFCs) Brometo de metila (CH ₃ Br)	Potencial de diminuição da camada de ozônio	Converte os dados para equivalente de triclourofluormetano (CFC-11)
Acidificação	Regional Local	Óxidos de Enxofre (SO _x) Óxidos de Nitrogênio (NO _x) Ácido hidrolórico (HCl) Ácido hidroluorídrico (HF) Amônia (NH ₄)	Potencial de Acidificação	Converte os dados para equivalente de ion hidrogênio (H ⁺).
Eutrofização	Local	Fosfato (PO ₄) Óxidos de Nitrogênio (NO _x) Dióxido de Nitrogênio (NO ₂) Nitratos Amônia (NH ₄)	Potencial de Eutrofização	Converte os dados para equivalente de fosfato (PO ₄).
Neblina fotoquímica	Local	Hidrocarbonetos sem metano (NMHC, em inglês: <i>Non-methane hydrocarbons</i>)	Potencial de criação de neblina fotoquímica	Converte os dados em equivalente de etano (C ₂ H ₆).
Toxicidade terrestre	Local	Substâncias químicas tóxicas em uma concentração letal relatada para roedores	LC ₅₀	Converte os dados de LC ₅₀ para equivalentes.
Toxicidade aquática	Local	Substâncias químicas tóxicas em uma concentração letal relatada para peixes	LC ₅₀	Converte os dados de LC ₅₀ para equivalentes.
Toxicidade humana	Global, Regional, Local	Emissões totais para o ar, os corpos d'água e para o solo	LC ₅₀	Converte os dados de LC ₅₀ para equivalentes.
Esgotamento dos recursos naturais	Global Regional Local	Volume de minerais utilizados Volume de combustível fóssil utilizado	Potencial de esgotamento de recursos naturais	Converte os dados de IVC para uma razão entre a quantidade de recurso usado e quantidade de recursos ainda em reserva
Uso da terra para depósito de lixo	Global, Regional, Local	Volume enviado para aterro sanitário	Resíduo sólido	Converte a massa de lixo sólido para volume usando uma densidade estimada.

Adaptado de EPA, 2001. ¹ – potencial de aquecimento global pode ser expresso para 50, 100 e 500. anos

A normatização dos dados permite o cálculo da magnitude do impacto. É feita dividindo-se o valor calculado do indicador por um valor de referência. O valor de referência pode ser as emissões totais ou o consumo total de uma determinada área, ou as emissões ou consumos per capita.

Após a normatização é feito o agrupamento que consiste na atribuição das categorias de impacto a um ou mais grupos, ou seja, na classificação por tipo (emissão atmosférica, consumo de recurso) ou por importância. Finalmente, é feita a ponderação quando os resultados dos diferentes impactos são convertidos a uma mesma base empregando-se fatores numéricos e convertendo os resultados em um único número. Estas três últimas etapas - normatização, agrupamento e ponderação - são opcionais e, segundo Coltro (2007) não são recomendadas no caso de estudos brasileiros devido a falta de padrões nacionais.

A Interpretação dos Resultados constitui a última etapa dos estudos de ACV. Trata-se de um resumo do estudo e deve conter a identificação dos impactos ambientais significativos, uma avaliação da qualidade do trabalho considerando sua sensibilidade e consistência dos dados, e as conclusões e recomendações do estudo.

2.2.2. Utilização da Avaliação de Ciclo de Vida

Os estudos de ACV tem sido realizados com diferentes objetivos e para os mais diversos produtos e serviços desde fornecimento de energia das mais diversas fontes, produção de bens de consumo e também, produção agrícola e posterior industrialização de alimentos e bebidas.

Freqüentemente, a ACV é composta apenas pelas duas primeiras etapas, dando-se ênfase ao inventário. Os sistemas considerados, da mesma forma, são em geral apenas parte da cadeia produtiva. Por exemplo, se a ACV é realizada para um sistema agrícola, a análise, freqüentemente, só é realizada para as etapas até o portão da fazenda, não considerando as etapas seguintes de transporte, eventuais processamentos e consumo. Alguns pesquisadores justificam que, como as etapas industriais destes sistemas, por exemplo produção de implementos agrícolas e material de construção, representam um impacto pequeno quando comparados com as outras etapas, estas poderiam ser desconsideradas na análise sem prejuízo para o resultado da análise (Ahlgren, 2004; Sonesson e Berlin (2003).

Ahlgren (2004) comparou através da ACV o consumo energético e os impactos ambientais de dois sistemas de controle de pragas, um químico e outro mecânico e concluiu que, apesar de o sistema mecânico apresentar impacto ambiental um pouco superior ao químico, devido principalmente às emissões de gases e ao consumo energético, ele tem a vantagem de não usar herbicidas.

Cedeberg e Flysjön (2004) utilizaram a ACV para avaliar os impactos ambientais causados pela produção de leite na Suécia, considerando três grupos de produtores: convencionais com grande volume de produção, convencionais com médio volume de produção e orgânicos. Foram encontradas diferenças significativas entre os produtores convencionais e orgânicos, porém insignificantes entre os produtores convencionais. As fazendas orgânicas apresentaram menor consumo energético, devido ao menor uso de combustível fóssil, juntamente com menor utilização de fertilizantes e de pesticidas, porém o uso do solo por litro de leite produzido foi maior. Este resultado indica a complexidade dos impactos ambientais e, conseqüentemente, de sua análise.

Haas et al. (2001) utilizaram a ACV para avaliar o impacto ambiental causado por fazendas leiteiras na Alemanha. O estudo adotou uma tonelada de leite como unidade funcional para comparar os sistemas intensivo, extensivo e orgânico de produção. O estudo mostrou que os sistemas extensivo e orgânico causam menor impacto do que o sistema intensivo. Em geral, o sistema orgânico apresentou desempenho ligeiramente melhor do que o sistema extensivo, porém no item relativo a biodiversidade, o sistema orgânico apresentou resultados significativamente melhores.

Boer (2003) utilizando a ACV avaliou a produção de leite na Holanda para dois casos: convencional e orgânico. No estudo foram consideradas duas unidades funcionais: uma tonelada de leite e um hectare de área de pastagem. O estudo encontrou pequenas diferenças entre os dois sistemas de produção. O autor salienta, entretanto, que em geral, devido à falta de dados, são excluídas dos estudos as etapas de produção e transporte de medicamentos e pesticidas, inclusão que poderia alterar estes resultados. Por fim, concluiu que para utilização desta metodologia na produção agrícola há necessidade de adaptações para adequá-la à realidade agrícola.

Mattsson et al. (2000) compararam a produção agrícola de três culturas usadas como matéria prima na produção de óleo vegetal - soja no Brasil, colza na Suécia e palma na Malásia - através de estudo de ACV. O objetivo do estudo era avaliar o uso do solo e a unidade funcional adotada foi uma tonelada de produto agrícola. O estudo mostrou que os

indicadores usados para avaliar o uso do solo dependem do tipo de cultura e da região em estudo devido tanto às características da cultura como às pressões econômicas, fato que dificulta a comparação. Por exemplo, no caso da soja no cerrado brasileiro, a pressão econômica leva a destruição da vegetação nativa (transformação em área agrícola), fato que não é significativo na Suécia.

Mouron et al. (2006) avaliaram o sucesso do programa de Produção Integrada de Frutas (PIF) adotado por pomares de maçã da Suíça através da aplicação de ACV a um grupo de 12 produtores. O estudo considerou três categorias de impacto (consumo de energia não renovável, potencial de toxicidade aquática e potencial de eutrofização) e duas unidades funcionais: um hectare, considerando a função produtiva do pomar; e receita total, considerando a segunda função do pomar que é gerar renda. Os resultados indicam que a adoção de um sistema produtivo mais intenso resultou em impactos ambientais também mais intensos, porém não melhorou os rendimentos do produtor. O estudo de ACV também demonstrou que o desempenho ambiental dos pomares está relacionado ao manejo adequado do pomar (por exemplo, escolha de cultivares) e não a sua produtividade.

A produção de maçã na Nova Zelândia foi avaliada utilizando-se a ACV (Canals et al., 2006). Neste estudo foram avaliados cinco pomares e a unidade funcional utilizada foi uma tonelada de produto, não permitindo a comparação com o estudo anterior. Os resultados indicaram que, apesar dos pomares apresentarem algumas diferenças quanto ao manejo e ao consumo de materiais, a origem dos impactos causados por suas operações eram similares. Em todos os casos, emissões devido à queima de combustível resultaram na maior parcela de impactos ambientais. Os autores concluíram que a ACV foi adequada para identificar oportunidades de redução de impactos e poderia ser utilizada em processos de certificação e no desenvolvimento de tecnologia agrícola de menor impacto.

A produção integrada de laranjas na Espanha foi estudada por Sanjuán et al. (2003). O objetivo do estudo era avaliar os impactos ambientais associados à produção de laranja e avaliar a utilização da ACV em produtos agrícolas. A unidade funcional utilizada foi 1kg de laranja. Os principais impactos associados a esta cultura foram a eutrofização e o consumo de fosfato de rocha. Os pesquisadores, entretanto, salientaram que a falta de dados dificulta o estudo e que, no caso dos produtos agrícolas, há necessidade de realização de ACV para a produção de diferentes fertilizantes a fim de se obter resultados

mais confiáveis. Outra ressalva dos pesquisadores foi para o fato de que os estudos de ACV devem ser realizados considerando os impactos ambientais críticos para a região onde se encontra o sistema estudado, e estes podem variar de região para região, mesmo que se trate do mesmo produto agrícola.

Coltro et al. (2006) avaliaram a produção de café no Brasil através da ACV. Utilizando uma tonelada de café grão verde destinado à exportação como unidade funcional, compararam o consumo de insumos e de resíduos de fazendas das principais áreas produtoras de café. Os resultados mostraram que, apesar das diferenças no manejo e das condições topográficas e climáticas, não existe correlação entre o consumo de fertilizantes e pesticidas e a produtividade do cafezal. Este resultado é expressivo, pois a utilização destes insumos está diretamente relacionada às emissões poluentes.

Apesar de muito utilizado para avaliar a produção agrícola, Brentrup et al. (2004), constataram que os procedimentos da ACV nem sempre são adequados às condições específicas encontradas na agricultura e, portanto, devem ser adaptados. Assim, propuseram um modelo de ACV desenhado especificamente para ser empregado na avaliação da atividade agrícola. Da mesma forma, Pires et al. (2002) consideram a ACV muito conveniente para a comparação de sistemas de produção agrícola, mas recomendam o desenvolvimento de uma metodologia específica para a agricultura.

ACV também tem sido aplicada a processos de transformação industrial e de distribuição. Sonesson e Berlin (2003) estudaram, através da ACV, a distribuição de leite na Suécia para conhecer seus impactos ambientais. Neste estudo consideraram apenas o tipo de laticínio, o tipo de embalagem e o tipo de transporte, porém concluíram que, para avaliar corretamente o impacto ambiental, toda a cadeia deveria ser considerada.

Zabaniotou e Kassidi (2003) aplicaram ACV à produção de ovos na Grécia, porém o estudo ficou restrito aos impactos causados pelo tipo de embalagem utilizada (poliestireno e papel reciclado).

Hospido et al. (2006) utilizaram a ACV para avaliar os impactos ambientais causados por processamento de atum em lata. Os impactos estudados (potencial de eutrofização, diminuição da camada de ozônio, de acidificação, esgotamento de recursos naturais e de formação de neblina foto-química) foram avaliados considerando-se as etapas do ciclo incluídas no estudo: recebimento do peixe no porto, transporte até a fábrica, processamento, distribuição, processamento e transporte das latas, e tratamento de resíduos. Os resultados indicam que as etapas industriais causam maiores impactos,

em especial a etapa de produção da lata. Os autores sugerem que o aumento da reciclagem de materiais pode diminuir significativamente os impactos desta cadeia.

Yusoff e Hansen (2007) avaliaram a produção de óleo de palma produzido na Malásia incluindo a etapa agrícola, o transporte até a fábrica e o processamento do óleo. A unidade funcional utilizada foi uma tonelada de óleo processado. Os resultados indicam que a produção de óleo de palma (agrícola e industrial) é responsável por 3,5% dos impactos ambientais do país. Os pesquisadores recomendam estudos para identificação de possíveis alternativas para a diminuição dos impactos e sugerem algumas alternativas como a adoção de manejo agrícola mais ecológico e melhor aproveitamento dos resíduos industriais.

Andersson et al. (1998) estudaram a produção de ketchup na Itália. O estudo foi feito utilizando uma tonelada de produto consumido e foram incluídas as etapas de produção agrícola do tomate, produção dos insumos e matérias primas, produção industrial, distribuição e consumo doméstico do ketchup. O estudo mostrou, considerando o consumo energético, que a etapa que resulta em maiores impactos é o consumo doméstico devido à estocagem refrigerada do produto por um período longo. Os autores, entretanto, salientam que outras etapas da cadeia são responsáveis por outros tipos de impactos. Por exemplo, a eutrofização se deve à etapa agrícola, enquanto que a toxicidade é causada tanto pela etapa agrícola como industrial. Assim, é importante avaliar as cadeias produtivas considerando os vários impactos associados às diferentes etapas da cadeia.

Schlich e Fleissner (2005) compararam através da ACV um sistema de produção e distribuição regional com um sistema globalizado, que inclui transporte entre continentes, com o objetivo de observar se a eficiência e a logística da operação, características importantes do sistema globalizado, são mais importantes do que as distâncias percorridas, muito menores no sistema regional. Neste estudo foram avaliadas duas cadeias produtivas: suco de laranja e de carne de carneiro. Entretanto, este estudo somente avaliou o consumo direto de energia, tanto combustíveis fósseis como elétrica, não levando em consideração as emissões decorrentes das várias etapas da cadeia. Assim, seus resultados, que indicam que a produção globalizada é mais indicada, ou seja, consome menos energia por litro de suco ou kg de carne, do que a regional, não podem ser considerados inteiramente corretos, haja vista que emissões, aspecto fundamental quando avaliando impactos ao meio ambiente, não foram avaliadas.

O impacto do padrão de consumo alimentar sueco foi estudado utilizando-se o inventário de ciclo de vida de 150 produtos comercializados naquele país (Carlsson-Kanyama et al., 2003). Neste estudo foram comparados os consumos de energia ao longo da cadeia produtiva dos alimentos, considerando a origem, o tipo de processamento industrial, a distribuição e o tipo de preparo doméstico. O estudo observou que a demanda per capita de energia devido ao consumo de alimentos varia bastante, dependendo da escolha dos ingredientes. Como esperado, os alimentos processados, em especial *snaks* e bebidas, são aqueles que requerem maior volume de energia.

Devido a seu posicionamento como alternativa ecológica para o fornecimento de energia, os biocombustíveis têm sido amplamente estudados pela metodologia da ACV. Lave et al. (2000) avaliaram a utilização de veículos movidos por diferentes combustíveis - gasolina, diesel, gás natural, etanol de milho, eletricidade e híbridos - através de estudo de ACV. No estudo foram incluídas as etapas de produção dos combustíveis, fabricação dos automóveis e o uso do combustível. Os resultados indicam que, com exceção dos carros elétricos, o maior volume de emissões ocorre no uso do combustível, e não nas etapas de produção. O etanol e a energia elétrica foram as fontes energéticas com menores emissões de gases de efeito estufa. Entretanto, os autores salientam que, o uso de combustíveis fósseis nas etapas agrícola e industrial da produção de etanol eleva as emissões, podendo, dependendo das práticas agrícolas adotadas, igualar-se às emissões dos combustíveis fósseis.

Kadam (2002) avaliou os benefícios do uso de etanol produzido a partir da hidrólise de bagaço de cana usada para a produção de açúcar na Índia. A condição existente, onde o bagaço excedente não era utilizado representando grande volume de resíduos, foi comparada com um cenário de utilização do bagaço como matéria prima na produção do etanol para adição à gasolina. Os resultados mostraram que o segundo cenário apresenta menores impactos devido, principalmente, à substituição da gasolina.

Yoshida et al. (2003) compararam a eficiência e as emissões de CO₂ de diferentes métodos de conversão de biomassa em energia, considerando geração de energia elétrica, uso como combustível em veículos e para aquecimento. Em especial, avaliaram a relação entre as emissões e custo total de cada uma das tecnologias. Concluíram que a forma mais eficiente de utilização de biomassa é na geração de energia elétrica, mesmo no caso de combustíveis de automóvel (caso do carro elétrico).

Malça e Freire (2006) utilizaram a abordagem de ACV para avaliar a renovabilidade

e a eficiência de etanol produzido a partir de beterraba e de trigo na França. A renovabilidade foi calculada baseada na quantidade de energia fóssil usada para converter a energia da biomassa em combustível de transporte. Assim, um combustível poderia variar de “completamente renovável” (i.e., nenhuma utilização de combustível fóssil) até “não-renovável” quando o volume de combustível fóssil utilizado é equivalente ou superior à energia fornecida pelo biocombustível. Concluíram que, independente do tipo de biocombustíveis (puro ou adicionado à gasolina), sua utilização representa economia no consumo de recursos fósseis. Porém, sua eficiência depende da utilização dos sub-produtos da cadeia. Além disso, salientam que outros impactos devem ser estudados para o completo entendimento das cadeias produtivas.

Kim e Dale (2005) utilizaram a ACV para avaliar a produção de biocombustível produzido a partir de milho e soja. Utilizaram como unidade funcional um hectare de área plantada e os impactos considerados foram consumo de recursos energéticos não renováveis, aquecimento global, acidificação e eutrofização. Concluíram que, os biocombustíveis, independente da matéria prima, quando comparados com combustíveis fósseis, consomem menores volumes de fontes não renováveis e menores emissões de gases de efeito estufa. Entretanto, as culturas destinadas à produção de biocombustíveis são responsáveis por externalidades locais importantes, acidificação do solo e eutrofização. Assim, recomendam que as práticas agrícolas sejam avaliadas e melhoradas de tal forma a diminuir tais efeitos negativos.

Observa-se que a metodologia de ACV permite variadas abordagens, dependendo do objetivo do estudo e das categorias de impacto avaliadas. Especialmente quando são incluídas várias categorias de impacto, por exemplo, uso do solo e consumo energético, os resultados da ACV são contraditórios ou de difícil interpretação. As comparações entre estudos de um mesmo produto também não são fáceis nem simples porque em geral os estudos utilizam unidades funcionais e fronteiras diferentes, ou seja, os processos incluídos na análise podem variar. Desta forma, os resultados da ACV devem ser avaliados considerando-se seu objetivo. Entretanto, o conceito fundamental da ACV que é a inclusão de todo o ciclo de vida de um produto do “berço ao túmulo”, é fundamental para o entendimento dos efeitos causados pelos produtos e processos que a sociedade faz uso.

2.3. Análise Emergética

A análise emergética (AE), proposta por Odum (1996), é uma metodologia científica que tem sido utilizada por pesquisadores no estudo e avaliação de ecossistemas, de sistemas produtivos e, também, de estados e países. Integra conhecimentos da Biologia, da Termodinâmica dos sistemas abertos, da Teoria Geral de Sistemas, da Modelagem e Simulação computacional para avaliar o funcionamento e a dinâmica dos ecossistemas naturais e antrópicos. A metodologia emergética introduz o conceito de emergia: Emergia é definida como toda a energia incorporada na produção de um recurso, seja ela na forma de energia ou matéria, trabalho humano ou da Natureza (Odum, 1996), em outras palavras, é toda a energia necessária para um sistema produzir um recurso.

Considerando que há energia disponível em tudo aquilo que é reconhecido como um ente na Terra (e no Universo), inclusive a informação, a energia pode ser usada para avaliar a riqueza real em uma base comum. A emergia pode ser usada para resolver o problema de agregar os Joules de tipos diferentes de energia, uma vez que reconhece e quantifica a posição do recurso na hierarquia universal de energia. Para reconhecer a qualidade de cada tipo diferente de energia, que depende do trabalho prévio de geração desse recurso, utiliza-se um fator de conversão de energia denominado transformidade. A Transformidade Solar é definida como a quantidade total de emergia solar (expressa em Joules de energia solar, seJ) fornecida ao sistema para produzir uma unidade de energia do produto (expressa em Joules, J). Uma vez que os joules de energia de tipos diferentes não são equivalentes em sua contribuição de trabalho útil, a transformidade é também uma medida da qualidade da energia do produto e de sua posição na hierarquia de energia universal.

Em um processo produtivo, diferentes fluxos energéticos são combinados e transformados em um ou mais fluxos energéticos. A energia disponível (energia potencial ou exergia) é transformada, em um processo iterativo, em energia em quantidade menor, porém de melhor qualidade, a qual será aproveitada em uma etapa seguinte do sistema. Os processos podem ser representados por diagramas como o apresentado pela Figura 4 onde são mostrados apenas os elementos importantes para o funcionamento de um sistema, desde os fluxos simples ou de menor intensidade, à esquerda, aos maiores e mais complexos, à direita.

Quando os fluxos energéticos são serviços humanos da economia Odum (1996) recomenda o uso do equivalente econômico da emergia denominado emdólar, obtido

através da razão energia/dinheiro da economia local. Os emdólares indicam o dinheiro circulante cujo poder de compra está estabelecido pelo uso de uma quantidade de energia.

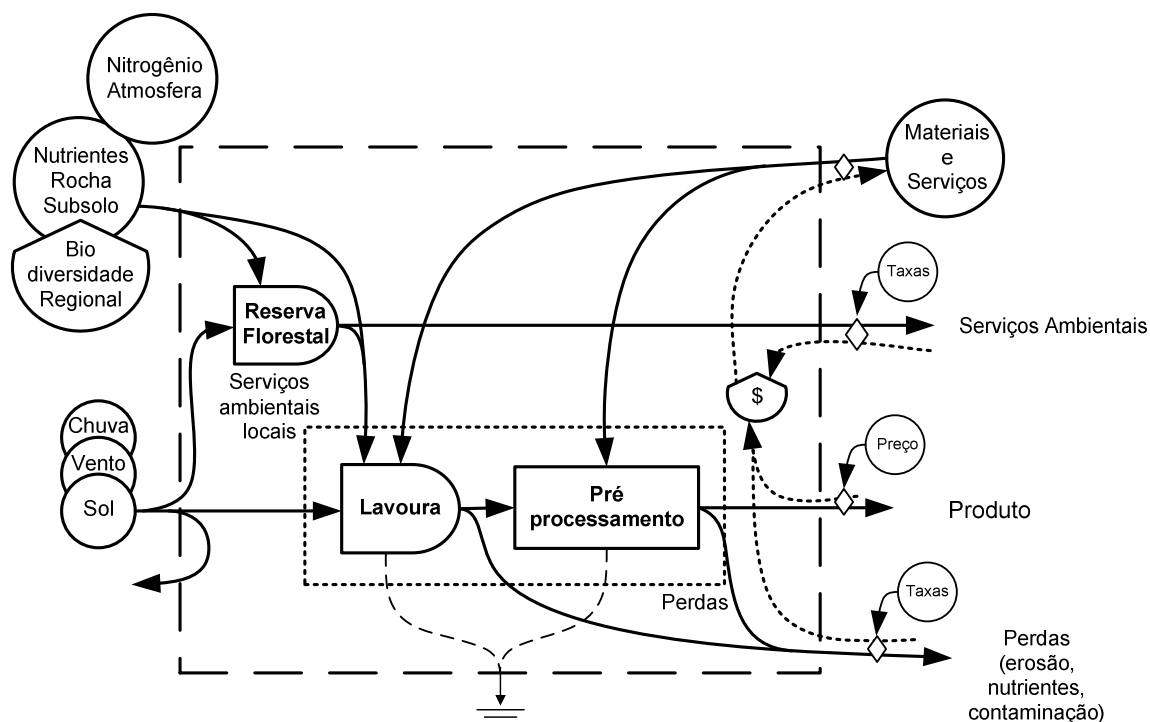


Figura 4: Diagrama de fluxos de energia de um sistema agrícola

Adaptado de Ortega et al., 2002.

Odum propõe a energia como medida da riqueza real ou qualidade de um bem, que pode ser expressa em termos de energia por unidade (massa, energia, dinheiro, informação, área ou região, pessoa, país, biosfera). Assim, a energia por pessoa mede o nível de vida e a energia por unidade monetária mede a capacidade de compra de riqueza, sendo esta uma taxa usada para converter os fluxos de energia em fluxos de emdólares. As razões energia/dinheiro em circulação variam muito entre as nações e esse fato ajuda a aumentar a falta de equidade no comércio internacional de recursos e investimentos (Odum e Odum, 2001).

Considerando que, quanto maior é o trabalho da natureza na produção de recursos, menor é seu preço devido a sua abundância, de maneira geral, a riqueza real dos recursos ambientais é inversamente proporcional aos custos monetários. Conseqüentemente o preço em dinheiro não representa o valor do trabalho incorporado

ao recurso. Por outro lado, a emerggia expressa em emdólares consegue indicar a verdadeira contribuição da natureza e da economia humana no recurso. Quando os recursos do ecossistema passam a ser escassos, os preços aumentam e, nesse caso, a pressão da demanda poderá por em risco a sustentabilidade do recurso. O trabalho da natureza, portanto, deve ser corretamente reconhecido e valorizado no mercado (Odum e Odum, 2001).

2.3.1. Metodologia Emergética

A contabilidade emergética (Odum, 1996) considera todos os insumos de um processo, incluindo as contribuições da natureza (chuva, água de poços, nascentes, solo, sedimentos, biodiversidade) e os fornecidos pela economia (materiais, maquinaria, combustível, serviços, pagamentos em moeda, etc.) em termos de energia solar agregada (emerggia). Alguns destes valores, aqueles que representam as energias naturais, não são contabilizados na economia tradicional.

A Análise Emergética (AE) é realizada em quatro etapas: (a) Preparação de um diagrama do sistema estudado com identificação dos fluxos de entrada, de saída e internos ao sistema, conforme apresentado na Figura 4; (b) Análise dos fluxos identificados; (c) Obtenção dos índices emergéticos; (d) Interpretação dos índices emergéticos, indicando os esforços que devem ser feitos para aprimorar o sistema.

Nos diagramas, os fluxos e as etapas produtivas são organizados da esquerda para a direita, de acordo com a seqüência do processo e de sua transformidade. Assim, os elementos da esquerda apresentam menor energia incorporada (ou Emerggia) que os da direita. Os limites do sistema devem ser claramente identificados para identificar todos os fluxos importantes que cruzam as fronteiras do sistema escolhido. Se um recurso armazenado (reserva de emerggia) dentro dos limites do sistema pode ser utilizado como um recurso, esse estoque deve ser visto como uma fonte de emerggia, com a seguinte ressalva: se essa fonte é usada e repostada na mesma taxa, não precisa ser considerada na análise, pois os fluxos estão em equilíbrio (fonte renovável). Porém, se ela é utilizada a uma taxa maior que a taxa de reposição, então estará atuando como uma fonte não renovável, é colocada no diagrama e incluída como uma linha de entrada dentro da tabela de AE. Cada um dos fluxos de energia se converte em uma linha curva que vai desde a fonte de emerggia até o componente ou os componentes que a utilizam.

A seguir, monta-se uma tabela de fluxos de emerggia, onde cada fluxo converte-se

em uma linha de cálculo na tabela de avaliação de energia, apresentada na Tabela 2, que possibilita o cálculo dos Índices Emergéticos (Odum, 1996).

Tabela 2: Tabela de fluxos Emergéticos

Nota	Nome das contribuições	Valor	Unidade	Transformidade	Fluxo de energia
	R: Recursos da natureza renováveis				
	N: Recursos da natureza não-renováveis				
	M: Materiais da economia				
	S: Serviços da economia				
	TOTAL				
Saídas					
Produtos		Volume		Energia	

A primeira coluna fornece a nota de pé-de-página onde são apresentados os detalhes do cálculo. Na segunda coluna são listadas todas as entradas do sistema classificadas, conforme mostra a tabela acima, em recursos renováveis, não renováveis, materiais da economia, e serviços da economia. Na terceira coluna são apresentados os valores numéricos para cada uma das entradas em suas unidades usuais (gramas, quilogramas, Joules, valor monetário) especificadas na quarta coluna. Estes valores correspondem aos fluxos anuais médios. Na quinta coluna são apresentados os valores de transformidade por unidade. Os fluxos de energia, calculados pela multiplicação dos fluxos de entrada pela transformidade correspondente, são apresentados na sexta coluna. Os valores obtidos correspondem ao fluxo de energia e são expressos em seJ/ ano.

No caso de serviços da economia os valores da terceira coluna são apresentados em termos da moeda do país/ano. Estes valores são convertidos em dólares segundo a taxa de câmbio do país e multiplicados pela proporção de energia/dinheiro (seJ/\$) característico da economia do país para o ano. As razões energia/dinheiro de cada país são obtidas através de estudos emergéticos da sua economia (Odum, 2000; Odum et al.,

2001; Coelho et al., 2003).

As transformidades, apresentadas na quarta coluna, em seJ/unidade, indicam a qualidade de energia solar incorporada a cada recurso ao longo de seu processo de formação/obtenção/produção. Seus valores são específicos e obtidos a partir da avaliação emergética de cada recurso, seja ele produto ou serviço, proveniente da natureza ou da atividade econômica. Muitos valores de transformidade já foram calculados por vários pesquisadores e estão compilados em tabelas (Odum, 1996; Odum, 2000; Odum et al., 2001).

Os índices emergéticos são calculados a partir dos resultados da tabela de avaliação dos fluxos de energia com o intuito de avaliar seu desempenho termodinâmico. A Figura 5 apresenta de forma resumida as informações utilizadas no cálculo dos índices emergéticos. A Tabela 3 apresenta os índices emergéticos. São eles:

a) Transformidade - O índice denominado transformidade ($Tr=Y/E$) avalia a qualidade do fluxo de energia e permite fazer comparações com outras formas de energia e com outros sistemas. A transformidade solar do recurso gerado por um sistema é obtida dividindo a energia incorporada pelo sistema (Y) pela energia dos recursos produzidos (E).

b) Renovabilidade emergética ou sustentabilidade – A renovabilidade, definida como a razão entre a energia dos recursos renováveis e a energia total usada, é uma forma de medir a sustentabilidade, ou autonomia, de um sistema. Considerando-se o longo prazo, sistemas com maiores índices de renovabilidade têm maiores chances de sobrevivência. Tradicionalmente é calculada considerando-se somente os recursos renováveis da natureza ($\%R = R/Y$). Ortega e colaboradores (2002), propõem uma modificação no cálculo deste índice, incluindo as porções renováveis dos materiais e dos serviços (F_R) na porção renovável ($\%R^* = (R + M_R + S_R) / Y$).

c) Razão de rendimento emergético, EYR, obtida dividindo-se a energia incorporada no produto pela energia dos insumos que provém da economia ($EYR=Y/F$). Indica o rendimento energético do sistema, ou o ganho em energia primária disponibilizada para a economia que consumirá o produto. Se o valor de EYR for próximo a um, o sistema consome tanta energia quanto a que disponibiliza à economia.

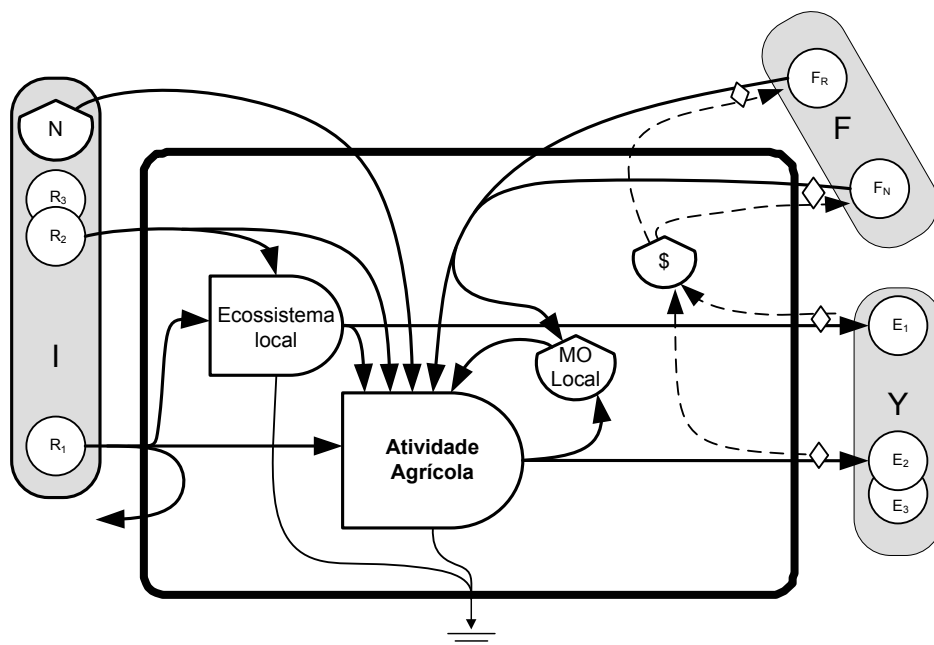


Figura 5: Representação simplificada de um sistema produtivo.

Adaptado de Ortega, 1998. Onde I são os recursos da Natureza, F os insumos e serviços da economia e Y energia dos produtos do sistema e os sub índices R e N se referem a renováveis e não renováveis, respectivamente.

d) Taxa de carga ambiental, ELR, é a razão entre os recursos não renováveis e aqueles renováveis ($ELR = (N+F)/R$). Trata-se de um índice importante, pois avalia a pressão causada ao ecossistema pelo sistema produtivo em estudo. Índices mais altos de ELR indicam maior pressão do sistema econômico no meio ambiente natural (Panzieri et al., 2003). Ortega e colaboradores (2002) propõem a alteração deste índice separando as porções renováveis e não renováveis dos recursos da economia (F) e sua respectiva incorporação no cálculo do presente índice ($ELR^* = (N+F_N)/(R+F_R)$).

e) Razão de investimento de emergia, EIR, é calculada para avaliar se o uso de recursos da economia (investimento monetário) em um projeto tem uma boa contrapartida de recursos naturais, que são até hoje gratuitos, ($EIR = F/I$). Ela mede a proporção de emergia retro-alimentada do setor econômico em relação às entradas de emergia do ambiente. Esta razão indica quão econômico é o processo ao usar os investimentos da economia em comparação com outras alternativas. Para ser econômico, o processo deve ter um valor de (F/I) similar ao valor médio de (F/I) das atividades da região. Se ele exige mais da economia que as outras alternativas, terá menores chances de subsistir. Quando se

demanda pouco da economia, a razão (F/I) será menor e, portanto, seus custos serão menores, o que oferece condições de competir.

Tabela 3: Índices Emergéticos utilizados na análise de sistemas

Índices Tradicionais	Formula	Conceito
Transformidade	$Tr = Y/E$	Energia total/ energia total
Renovabilidade	$\%R = R / Y$	Renovável/Total
Razão de rendimento emergético	$EYR = Y/F$	Total / Feedback
Taxa de carga ambiental	$ELR = (N+F)/R$	Não renovável/renovável
Razão de investimento de energia	$EIR = F/I$	Recursos da economia/recursos da natureza
Índice de Sustentabilidade Emergética	$SI = EYR/ELR$	Contribuição do sistema / carga ambiental
Razão de intercâmbio de energia	$EER = Y/[P \cdot Pr \cdot EmU\$]$	Energia fornecida / energia recebida
Novos índices emergéticos	Formula	Conceito
Renovabilidade modificada	$\%R^* = (R + F_R) / Y$	Renovável/Total
Taxa de carga ambiental modificada	$ELR^* = (N + F_N) / (R + F_R)$	Não renovável/renovável considerando a renovabilidade dos recursos de economia
Índice de Sustentabilidade Emergética modificado	$SI^* = ELR / ELR^*$	Contribuição do sistema / carga ambiental considerando a renovabilidade dos recursos de economia

Adaptado de Ortega et al., 2002, onde: Y= Energia total no sistema; E= Energia total produzida; R= Recursos renováveis da Natureza; N= Recursos não renováveis da Natureza; I = Recursos da Natureza; F = Feedback; P = Volume produzido correspondendo a Y; Pr = preço de venda do produto; e EmU\$ = Emdollar do país (razão energia/U\$). Os sub índices R e N correspondem às frações renováveis e não renováveis, respectivamente.

f) Índice de Sustentabilidade Emergética, SI, a razão entre a razão de rendimento emergético e a taxa de carga ambiental indica a contribuição potencial do sistema para a economia por unidade de carga ambiental ($SI = EYR/ELR$). Em outras palavras, indica se

o sistema contribuindo com energia primária para a economia, o faz em detrimento do equilíbrio ambiental ou se seus impactos podem ser absorvidos pelo sistema (Brown e Ulgiati, 2004).

g) Razão de intercâmbio de energia ($EER = Y / [\text{produção unitária} * \text{preço} * (\text{energia/dólar})]$) - é a razão de energia recebida em relação a energia fornecida em uma troca. As matérias-primas, tais como minerais e produtos rurais provenientes da agricultura, pesca e silvicultura, tendem a ter um valor alto de EER, quando são comprados a preço de mercado, pois, geralmente, o valor monetário somente remunera os serviços humanos e não o extenso trabalho realizado pela Natureza. Este índice é significativo na análise dos intercâmbios internacionais. As nações desenvolvidas ao comprar matérias-primas de países menos desenvolvidos conseguem um saldo de energia a seu favor, pois a energia dos dólares usados no intercâmbio é muito menor que a contida nas matérias-primas adquiridas.

2.3.2. Utilização da Análise Emergética

A Análise Emergética tem sido utilizada em diferentes países, considerando diferentes cadeias e produtos, para avaliar e comparar diferentes modelos de produção agrícola, em especial para avaliar a sustentabilidade destes sistemas. Comar (2000) avaliou a produção de hortaliças em Botucatu e, utilizando os índices de metodologia emergética, comparou os impactos de dois métodos de cultivo, tradicional e orgânico.

Lefroy e Rydberg (2003) utilizaram a Análise Emergética para comparar três métodos de cultivo agrícola: cultura anual de grãos, cultura perene de forrageiras e um sistema consorciado de grãos e forrageiras. O estudo mostrou que o cultivo de forrageiras apresenta maior renovabilidade e a menor taxa de carga ambiental, devido à menor perda de solo (recurso não renovável), o sistema consorciado apresentou resultados intermediários e o sistema de cultivo de grãos é aquele com maiores impactos ambientais.

Lagerberg (2000) utilizando a análise emergética comparou dois métodos de cultivo de tomates em estufa, convencional e orgânico, e avaliou o impacto do tipo de fertilizantes e do combustível utilizado para o aquecimento da estufa na sustentabilidade do sistema. O sistema convencional apresentou maior consumo de recursos, tanto naturais como provenientes da economia, apresentando renovabilidade inferior a 1%.

Martin et al. (2006) utilizaram a AE para avaliar três culturas agrícolas: milho

produzido no Kansas (USA), Blackberry produzido em Ohio (USA) e um sistema de policultura praticado por grupos indígenas em Chiapas (México). O objetivo do trabalho era comparar o uso de recursos naturais, os impactos ambientais e a sustentabilidade geral dos sistemas. Os autores salientam que, apesar das diferenças significativas entre os sistemas estudados, a AE permitiu sua comparação nas mesmas bases. O sistema mexicano apresentou melhores índices energéticos do que os sistemas americanos, dependentes da utilização de grandes volumes de fertilizantes, combustível e água para irrigação, portanto mais dependentes de recursos da economia.

Cavalett et al. (2006) estudaram a produção integrada de grãos, suínos e peixes em pequenas propriedades familiares no sul do Brasil e demonstraram, através da comparação dos índices energéticos de diferentes sistemas estudados, que o sistema integrado é mais eficiente em termos energéticos, devido a reciclagem de materiais internamente ao sistema. Os autores propõem o uso dos índices energéticos para auxiliar na formulação de políticas públicas.

Castellini et al. (2006) compararam, através da Análise Emergética, a produção orgânica e convencional de frangos na Itália. Os resultados mostraram que o sistema orgânico tem desempenho melhor em termos ambientais, porém os autores salientam que há necessidade de mais pesquisa nesta área, especialmente considerando-se a produção orgânica, e que devem ser desenvolvidos protocolos específicos para a atividade agropecuária.

Além de ser utilizada para a avaliação de produção agrícola, a AE também tem sido empregada para avaliar processos industriais. Em especial, quando se trata de um produto de origem agrícola, como os alimentos e os biocombustíveis, esta metodologia permite uma visão integrada do sistema produtivo, avaliando a relação entre a utilização de recursos naturais, sem custo monetário, com aqueles provenientes da economia.

Lanzotti et al. (2000) realizaram a análise emergética de uma usina de álcool de cana-de-açúcar do estado de São Paulo. Os resultados do estudo mostraram que a cana-de-açúcar pode ser considerada como uma cultura energética porque o sistema apresentou razão de rendimento emergético (EYR) superior a um. Entretanto, a renovabilidade obtida foi baixa, somente 11%. Os autores portanto reconhecem a necessidade de novas avaliações para melhor entendimento do sistema.

A produção de etanol de cana-de-açúcar também foi avaliada através de AE por Ortega et al. (2001). O estudo comparou a produção comercial em larga escala,

caracterizada por extensivas e intensivas áreas agrícolas fornecendo grandes volumes de cana para usinas com grandes capacidades de esmagamento, e uma usina integrada e diversificada de tamanho médio, ou seja com capacidade para produção de álcool e também de alimentos, como cereais, legumes, carne e leite. A usina integrada de médio porte apresentou melhores índices emergéticos do que a usina de grande porte, porém ainda considerados baixos. A renovabilidade, por exemplo, foi de apenas 18%.

Bastianoni e Marchettini (1996) combinaram AE, análise energética e análise de emissão de carbono para comparar a produção de biocombustível produzido a partir de cana-de-açúcar, nos Estados Unidos e no Brasil, e a partir de uvas, na Itália. Os resultados indicaram que estes sistemas, apesar de apresentar resultados considerados positivos, como por exemplo as reduções em emissões de CO₂, não são sustentáveis no longo prazo. Os autores salientam que a sustentabilidade depende de vários fatores e que o impacto ambiental local, como perda de solo, não podem ser desconsiderado. Assim, o uso da AE complementa outras avaliações, permitindo uma visão mais completa do sistema e de seus impactos.

A Análise Emergética, além de utilizada para avaliação de unidades e sistemas produtivos, permitindo assim um entendimento mais apurado do equilíbrio, ou desequilíbrio, entre o sistema avaliado e os ecossistemas associados (Ulgiati et al., 1995; Bastianoni e Marchettini, 1996; Brown e Ulgiati, 2004; Cuadra e Rydberg, 2006), pode também ser utilizado para outros fins, pois seus índices podem ser utilizados por processos de certificação de produtos e na avaliação de custo de externalidades.

Bastianoni et al (2001) estudaram sistemas agrícolas da região de Chianti, Itália utilizando a análise emergética com o objetivo de obter indicadores de sustentabilidade no caso de sistemas produtivos complexos. Neste estudo foram avaliadas diferentes propriedades e seus resultados foram comparados com a média nacional.

Ortega et al. (2002) utilizaram a metodologia emergética para comparar e analisar a produção de soja no Brasil realizada por quatro métodos diferentes de cultivo: familiar ecológico, orgânico, agro-químico (intensivo no uso de maquinaria agrícola e de insumos industriais) e plantio direto com uso de herbicida. Neste estudo utilizaram a renovabilidade parcial dos recursos da economia e introduziram novos índices emergéticos (baseados no tipo e fluxo de mão de obra) para avaliar o desempenho social das unidades em estudo. A partir de seus resultados sugerem que Análise Emergética seja adotada na certificação de produtos, uma vez que seus índices podem ser utilizados tanto na avaliação dos impactos

ambientais causados pelo sistema, como seu desempenho em termos sociais.

Panzieri e colaboradores (Panzieri et al., 2002; Panzieri et al., 2003) propuseram o uso de índices energéticos, entre outros, nas certificações ambientais do tipo EMAS³ e EPE⁴ da União Européia e justificaram sua escolha pelo fato de a análise energética identificar todos os fluxos energéticos e de materiais que circulam pelo sistema e classificá-los em termos de origem e renovabilidade. Os autores salientam também que se trata de uma metodologia relativamente fácil de executar e entender, apesar de estar baseada em sólidos conceitos teóricos.

A AE foi utilizada para estimar o custo da perda de solo devido à erosão (Cohen et al., 2006). Neste estudo os fluxos correspondentes ao solo erodido devido à atividade agrícola expressos em joules de energia solar, seJ, foram divididos pela razão energia/dinheiro, Em\$, do país expressa em seJ/\$, para a obtenção do custo real do recurso. Assim, recursos sem um valor monetário definido, podem ser comparados em bases monetárias coerentes com outros recursos da economia.

Adotando o mesmo procedimento, Cuadra e Rydberg (2006) utilizaram a AE como uma forma de avaliar o comércio justo (Fair Trade) de café produzido pela Nicarágua e exportado para a Holanda. O preço justo do café e seus produtos, considerando que a transação fosse feita em bases energéticas, foi estimado em até três vezes o preço realmente pago. Os pesquisadores sugerem que a AE seja utilizada para detectar desequilíbrios no comércio internacional e que a Razão de Intercâmbio de Energia (EER) e os preços expressos em emvalues sejam utilizados para se alcançar o comércio justo e o desenvolvimento sustentável.

Em todos os trabalhos mencionados, a metodologia energética foi capaz de avaliar o uso de recursos naturais e de estimar seu consumo, além de permitir a avaliação das chances de sobrevivência do sistema ao longo do tempo. Entretanto, durante muito tempo esta metodologia não considerou as externalidades produzidas pelo sistema em análise. Ou seja, ela contabilizava o trabalho incorporado, tanto da economia formal como da Natureza, porém não considerava a necessidade de trabalhos posteriores decorrentes do processo de produção. Para que a análise seja completa, e represente o real custo de produção, é necessário incorporar à metodologia energética mecanismos que

³ Eco-Management and Audit Scheme

⁴ Environmental Performance Evaluation

contabilizem os custos da etapa posterior de produção. Somente recentemente os estudos de AE passaram a incluir as externalidades geradas pela operação do sistema (Ortega et al., 2002; Brandt-Williams e Pillet, 2003).

2.4. Uso Combinado das Metodologias

A ACV, tendo seu foco no impacto que a atividade produtiva causa no meio ambiente, não considera, entretanto, os trabalhos da natureza necessários para a produção deste bem. Já a metodologia emergética foca sua análise nos trabalhos da natureza sendo, no momento, deficiente na avaliação do impacto da atividade avaliada.

As duas metodologias, análise emergética e análise de ciclo de vida, portanto, são complementares e sua fusão pode resultar em uma metodologia bastante poderosa na avaliação de processos produtivos agrícolas ou industriais. Este tipo de abordagem já vem sendo proposta por alguns pesquisadores. Bastianoni e Marchettini (1996) estudaram a produção de bioetanol de cana de açúcar e de uva usando uma combinação das duas metodologias. Concluíram que a AE complementa os resultados da análise de inventário da ACV, permitindo melhor compreensão dos sistemas produtivos.

Ometto (2005) estudou a produção de álcool etílico hidratado utilizando o conceito de ciclo de vida aplicado a três metodologias de análise: EDIP (Environmental Development of Industrial Products), Exergia e Emergia e concluiu que os resultados baseados no EDIP apresentam as atividades de maiores potenciais de impacto ambiental sendo que as avaliações emergética e exergética são complementares pois indicam, respectivamente, a eficiência ecossistêmica e a eficiência termodinâmica do ciclo de vida de um produto. Desta forma permitem a incorporação da valoração dos serviços ambientais aos conceitos e avaliações da economia clássica.

Hau e Bakshi (2004) reconhecem que a ACV, apesar de reconhecer os fluxos de recursos provenientes da Natureza, não é capaz de avaliar corretamente a importância que os ecossistemas, seus produtos e serviços têm para a sustentabilidade da atividade industrial. Propõem o uso da AE para complementar a ACV, conforme o proposto por Bakshi (2000) a fim de se obter os benefícios das duas metodologias na análise de processos industriais, pois estes sempre dependem de processos ecológicos para o fornecimento de recursos e absorção de emissões.

Bargigli e Ulgiati (2003) utilizaram as duas metodologias, emergética e ACV, para

avaliar a produção de aço e concluíram que o uso integrado das duas metodologias é vantajoso, pois permite avaliar o impacto do processo no sistema e seu custo energético real, possibilita o estudo mais completo dos sub-processos e, finalmente, avalia a eficiência emergética do sistema.

Brandt-Williams e Fogelberg, 2005), comparando a produção orgânica e convencional de leite, complementaram o estudo de ACV com a incorporação da análise emergética e concluíram que a associação destas metodologias permite análises mais completas e detalhadas, pois, além das categorias de impacto avaliadas pela ACV, também são incorporados os serviços da Natureza necessários para o suporte do sistema. Os autores também salientam que a Análise Emergética permite comparações entre sistema, porque todos os fluxos são avaliados em uma mesma base (Joules de energia solar). Já o estudo de ACV, por si só, pode ser de difícil comparação visto que nem todas as etapas produtivas necessárias ao suporte da atividade do sistema avaliação são incluídas e, conseqüentemente, a ACV pode subestimar alguns impactos.

2.5. Hipótese de trabalho

Produtos de origem agrícola como alimentos e biocombustíveis são, em geral, considerados renováveis. Entretanto, seus sistemas produtivos utilizam grandes volumes de recursos energéticos não renováveis, além de gerarem externalidades negativas, em cada uma das etapas da cadeia. Considerando que, para ser competitivo, produtos ou processos devem obrigatoriamente ser sustentáveis, a competitividade de produtos agrícolas depende de sua sustentabilidade. Assim, a sustentabilidade de produtos agrícolas deve ser avaliada de forma ampla, considerando-se todas as etapas da cadeia produtiva, para determinar sua competitividade e os reais benefícios que tais produtos trazem à sociedade.

O uso combinado da Análise Emergética e da Avaliação de Ciclo de Vida permite a avaliação do desempenho ambiental de produtos e processos. Sua utilização permite a avaliação da cadeia produtiva toda de tal forma a identificar as etapas e processos críticos que mais agredem o ambiente e com maior consumo de recursos. A partir deste conhecimento é possível sugerir novos modelos de produção, industrialização e consumo mais sustentáveis.

3. Objetivo

3.1. Objetivo Geral

Propor método para avaliar a sustentabilidade ampliada de produtos agrícolas utilizando os parâmetros e índices empregados na análise emergética e avaliação do ciclo de vida.

3.2. Objetivos Específicos

- Avaliar a sustentabilidade da cadeia produtiva de produtos agrícolas, desde sua produção até a sua comercialização para o consumidor final;
- Aplicar a Análise Emergética associada à Análise de Ciclo de Vida a produtos agrícolas do Estado de São Paulo: a) laranja, via a cadeia de suco de laranja; b) cana de açúcar, via cadeia do álcool combustível.
- Avaliar e quantificar os principais recursos naturais e econômicos utilizados em cada etapa do ciclo de vida do suco de laranja congelado concentrado produzido no Brasil e consumido na Europa;
- Avaliar as externalidades negativas e positivas e os fatores de influência relacionados ao ciclo de vida do suco de laranja concentrado congelado;
- Avaliar e quantificar os principais recursos naturais e econômicos utilizados em cada etapa do ciclo de vida do álcool etanol utilizado como combustível no Brasil.
- Avaliar as externalidades negativas e positivas e os fatores de influência relacionados ao ciclo de vida do álcool etanol combustível
- Gerar informações científicas para propor alternativas de modelos de produção e consumo e para estabelecer políticas públicas, planos e programas de proteção sócio-ambiental de tal forma a melhorar a sustentabilidade da cadeia produtiva do suco de laranja e do álcool combustível em âmbito regional, nacional e internacional baseadas nas diretrizes do desenvolvimento sustentável.

4. Metodologia

O trabalho foi desenvolvido em duas etapas:

- Avaliação da Cadeia Produtiva do Suco de Laranja Concentrado Congelado

Nesta etapa estudou-se a cadeia do suco de laranja desde a produção agrícola, até o processamento do suco diluído na Europa, passando pelo processamento industrial de concentração e pelas etapas de transporte. Esta cadeia foi escolhida devida a sua importância para a economia do estado de São Paulo e do Brasil, bem como devido a seu desenvolvimento tecnológico. Foram estudadas as produções de suco de laranja concentrado congelado convencional e orgânico, permitindo assim a comparação do impacto agrícola e industrial na cadeia.

- Avaliação da Cadeia Produtiva do Álcool de Cana-de-çúcar

Nesta etapa estudou-se a cadeia produtiva de álcool de cana de açúcar desde a etapa agrícola até o consumo do álcool combustível no Brasil. Esta cadeia foi estudada devido a grande importância que o álcool combustível tem na matriz energética brasileira, além do fato de ser considerado um combustível renovável. Foram estudados dois casos: distribuição no estado de São Paulo e no estado do Mato Grosso.

Os dois estudos são descritos detalhadamente a seguir.

5. Avaliação da Cadeia Produtiva de Suco de Laranja

5.1. Introdução

A laranja pertence ao grupo dos cítricos, que também inclui o limão, a tangerina, a lima, o pomelo, a cidra, entre outros. São originários da Ásia, na região onde hoje estão China, Índia e Malásia. Cientificamente, é classificada em duas espécies: *Citrus sinensis* (laranja-doce) e *Citrus aurantium* (laranja-azeda). No grupo da laranja-doce destacam-se as variedades Pêra (maturação semi-tardia), Natal (tardia), Valencia (tardia), Bahia (semi-precoce), Baianinha (semi-precoce), Lima, Piralima, Hamlim (semi-precoce), a laranja-azeda é representada pelas laranjas-da-terra. Sua composição varia de acordo com a variedade. A Tabela 4 apresenta a composição média de três variedades encontradas comercialmente.

Tabela 4: Composição média por 100g de laranja

Composição	Baía	Pêra	Valência
Água (g)	87.1	89.6	86.9
Proteína (g)	1.0	1.0	0.8
Carboidratos (g)	11.5	8.9	11.7
Lipídios (g)	0.1	0.1	0.1
Fibras (g)	1.1	0.8	1.7
Valor calórico (kcal)	45	37	33

Fonte: NEPA, 2006

A laranja foi trazida ao Brasil pelos portugueses logo no início da colonização, no século XVI, provavelmente na Bahia. Porém, os primeiros registros escritos de plantação de laranja são da capitania de São Vicente. Tendo se adaptado muito bem ao clima e ao solo brasileiro, foi levada pelos colonizadores a outros estados da região Nordeste e às regiões Centro-Sul e Sul do país. Tratava-se de uma cultura importante, pois era usada para combater o escorbuto causado por deficiência em vitamina C o qual dizimava as tripulações dos navios que cruzavam o Atlântico (Hasse, 1984; Neves e Lopes, 2005).

A citricultura brasileira se desenvolveu para suprir a demanda doméstica de centros urbanos, como a cidade do Rio de Janeiro. Era considerada uma cultura acessória, doméstica, em comparação com o café e o açúcar, produtos de exportação. Somente a

partir do início do século XX é que a citricultura passou a ser vista como uma opção agrícola com valor comercial. Ao final da década de 1920 a citricultura tinha se firmado nos estados de São Paulo e do Rio de Janeiro. As primeiras exportações foram de excedentes e ocorreram para a Inglaterra (1880), Argentina (1916) e para a Europa (1926), (Neves e Lopes, 2005). Já na década de 1930 algumas empresas exportadoras atuavam na região de Limeira expandindo-se para as regiões de Araraquara e Bebedouro.

As primeiras indústrias processadoras de laranja foram instaladas na década de 40 no Rio de Janeiro e em São Paulo e utilizavam o sistema *hot pack*. Neste período o Brasil exportava suco para o exército britânico. O ano de 1962 é um marco para a citricultura brasileira, pois ocorre importante quebra na produção citrícola da Flórida devido a forte geada que devastou seus pomares. As primeiras indústrias de Suco de Laranja Concentrado Congelado (SLCC) se instalam no estado de São Paulo, em geral associando produtores nacionais com grupos estrangeiros, tanto processadores como importadores. Esse tipo de associação facilitou o processo de importação de tecnologia e de equipamentos, bem com a introdução do produto brasileiro no mercado internacional (Neves e Lopes, 2005). Na década de 1980 o Brasil se tornou o maior produtor mundial de laranjas, passando os Estados Unidos em volume produzido.

5.1.1. A Citricultura no Brasil

Hoje, a citricultura brasileira é um setor voltado à exportação. A citricultura é um dos setores do agronegócio brasileiro mais competitivo. O Brasil produz ao redor de 53% da produção mundial de suco de laranja sendo responsável por 80% do comércio internacional desse produto. A laranja representa aproximadamente 49% da produção brasileira de frutas.

A produção de laranja ocorre desde o Rio Grande do Sul até o Sergipe, porém está concentrada no estado de São Paulo, conforme apresentado pela Figura 6. Neste estado aproximadamente 200 milhões de pés ocupam uma área aproximada de 580 mil hectares, de um total de 800 mil hectares no Brasil, produzindo 72% da laranja brasileira (ABECITRUS, 2007; IBGE, 2007).

O cinturão citrícola paulista é composto por aproximadamente 20 mil propriedades agrícolas, sendo a metade com área entre 10 a 50 hectares, emprega 2% da mão de obra agrícola do Brasil e 11% do estado de São Paulo, o que corresponde a cerca de 140.000

famílias (Neves e Lopes, 2005; ABECITRUS, 2007; IBGE, 2007).



Figura 6: Principais áreas produtoras de laranja no Brasil

Fonte: ABECITRUS, 2007

As principais áreas produtoras do Estado de São Paulo são Barretos, Araraquara e Jaboticabal. Nos últimos cinco anos, entretanto, as áreas tradicionalmente destinadas à citricultura vêm sendo substituídas por cana-de-açúcar, deslocando a laranja para outras regiões, em especial para o norte e o sul do estado, resultando em incremento nos custos de transporte da laranja do pomar até a fábrica (ABECITRUS, 2007).

A laranja produzida no estado é destinada ao mercado de fruta fresca, tanto para o mercado interno como externo, ou para processamento industrial. Segundo Neves e Lopes (2004) aproximadamente 82% da produção de laranja é destinada ao processamento de suco, 17% ao mercado interno e 0,6% para exportação de fruta fresca.

O SLCC é o principal produto do processamento da laranja. Os subprodutos da indústria citrícola, entretanto, também possuem valor comercial expressivo. Destacam-se os óleos essenciais da casca utilizados como insumos na indústria de alimentos, bebidas, cosméticos e perfumes; essências aromáticas obtidas na concentração do suco;

d'limoneno empregado na fabricação de tintas e solventes, farelo de polpa cítrica destinado à produção de ração e polpa de laranja utilizada pelas indústrias de alimentos e bebidas. Todos eles são também exportados. A Tabela 5 apresenta o rendimento aproximado destes produtos.

Tabela 5: Produtos derivados da Laranja

Produto	Rendimento da Laranja
Suco	44,81%
Células congeladas	2,67%
Óleos Essenciais	1,79%
D'limoneno	0,92%
Líquidos Aromáticos	0,57%
Farelo	49,24

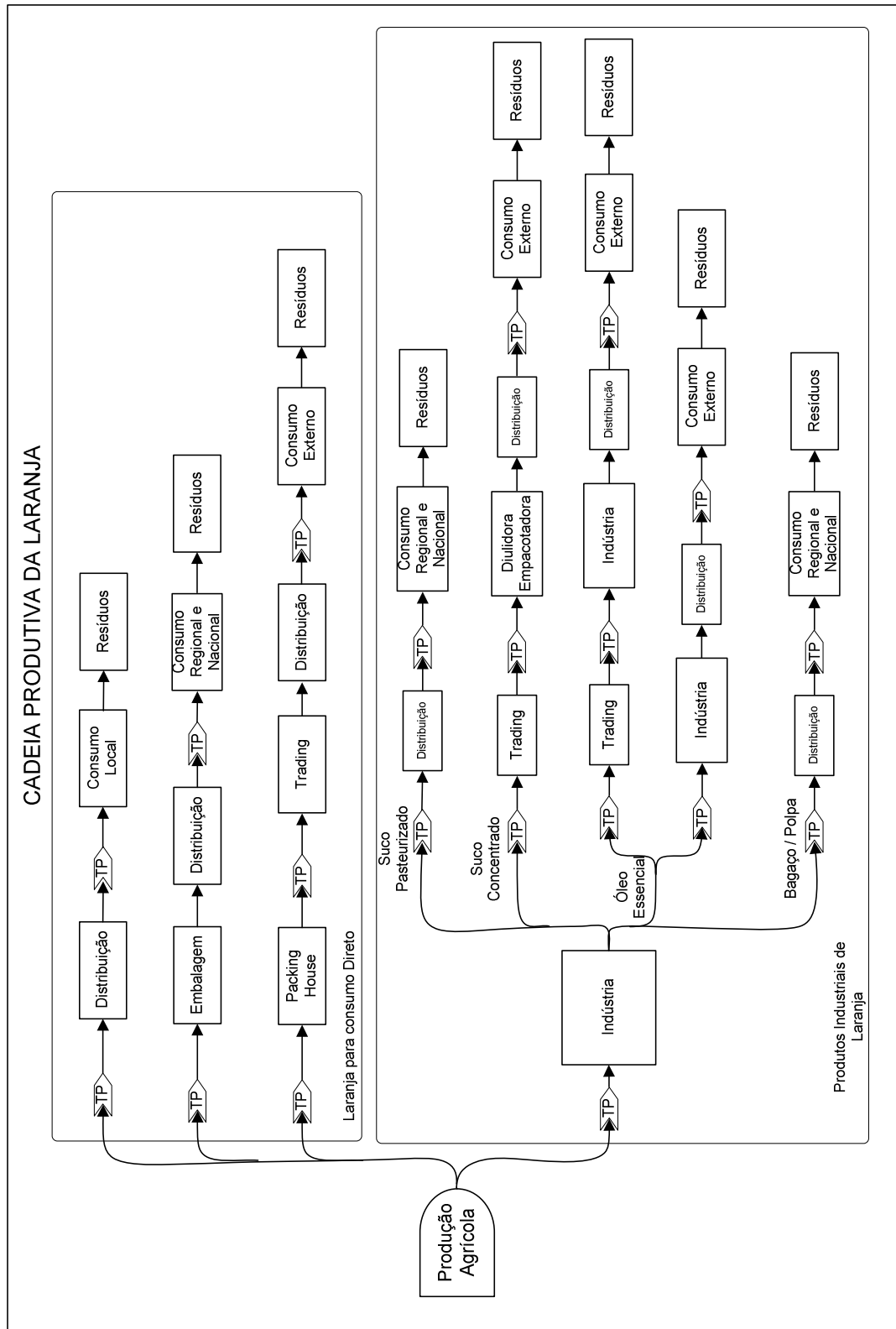
Fonte: ABECITRUS, 2007

O Estado de São Paulo é responsável por 95% das exportações brasileiras de suco de laranja. Na safra 2006/2007(de julho a junho) o volume exportado de suco de laranja concentrado congelado (SLCC) foi de 1394 mil toneladas, representando valor superior a US\$ 1.4 bilhões. O principal mercado do suco de laranja brasileiro é a União Européia, para onde foi exportado aproximadamente 64% deste volume, seguido pela ALCA (Acordo de Livre Comércio da América do Norte) com 18% (ABECITRUS, 2007; Neves e Lopes, 2005).

A Figura 7 apresenta um diagrama resumido da cadeia produtiva da cultura da laranja adaptado de Neves et al. (2004) e de Boteon (2004).

5.1.2. Suco de Laranja Concentrado Congelado

O maior volume de laranja produzido no estado se destina ao processamento de suco de laranja concentrado congelado (SLCC, ou FCOJ em inglês). A Figura 8 apresenta a cadeia do SLCC que inclui as seguintes etapas: produção agrícola, transporte da fruta do pomar até a fábrica, processamento do suco de laranja, transporte até o porto de Santos, transporte marítimo até a Europa, transporte do porto europeu à fábrica, re-processamento (dilução e embalagem), transporte até o consumidor e consumo final.



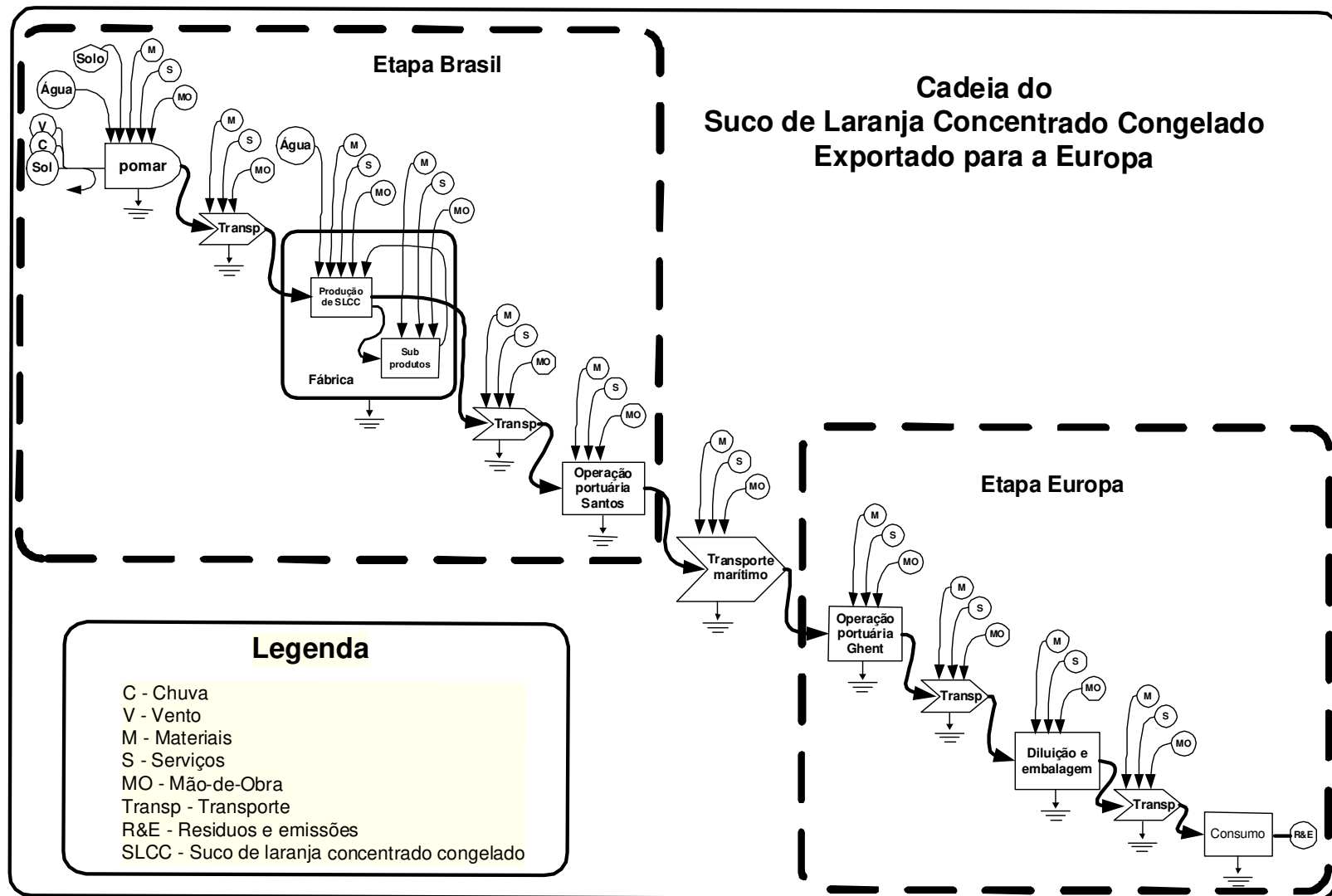


Figura 8: Cadeia produtiva do suco de laranja congelado concentrado

A indústria de processamento de SLCC é bastante específica, pouco flexível, pois demanda grandes investimentos. É projetada para processar exclusivamente laranjas (em alguns casos também limão).

Citrosuco, Cutrale, Citrovita (grupo Votorantim) e Louis Dreyfuss (multinacional) dominam a produção e exportação brasileira. É interessante notar que estas empresas não investem em marca própria, nem na distribuição de seu produto até o consumidor final. Sua estratégia de operação consiste na redução de custo de produção e melhoria de logística, ou seja, estratégia adotada para *commodities*. Dentro desta estratégia, estas empresas adquiriram terminais privados no Brasil, na Europa, nos Estados Unidos e no Japão. Também devido a este posicionamento, estas empresas adquiriram unidades fabris na Flórida, segundo centro mundial de produção de laranja, expandindo sua atuação de produção.

As etapas de produção de SLCC são basicamente as mesmas em todas as indústrias: recebimento, lavagem, extração, *finishing* do suco, concentração, resfriamento e estocagem. Trata-se de uma indústria muito intensiva na utilização de energia principalmente para a concentração do produto, que perde aproximadamente 60% de seu conteúdo de água, e para a estocagem do produto congelado. Entretanto, é muito eficiente no uso da energia e no aproveitamento dos resíduos da laranja que se transformam em produtos com grande valor agregado como óleos essenciais, d'limoneno e ração animal (Neves e Lopes, 2005).

O fluxograma do processamento de SLCC e seus subprodutos é apresentado no Apêndice 1, onde são detalhadas as etapas de processo, os equipamentos utilizados e os consumos de materiais e serviços de cada uma das etapas da cadeia. A Figura 9 apresenta o diagrama da etapa agrícola mais detalhadamente.

O transporte do SLCC é feito até o porto de Santos por via rodoviária, utilizando caminhões tanque isolados, mas não refrigerados. A distância entre as unidades processadoras e o porto varia de 400 a 500 Km.

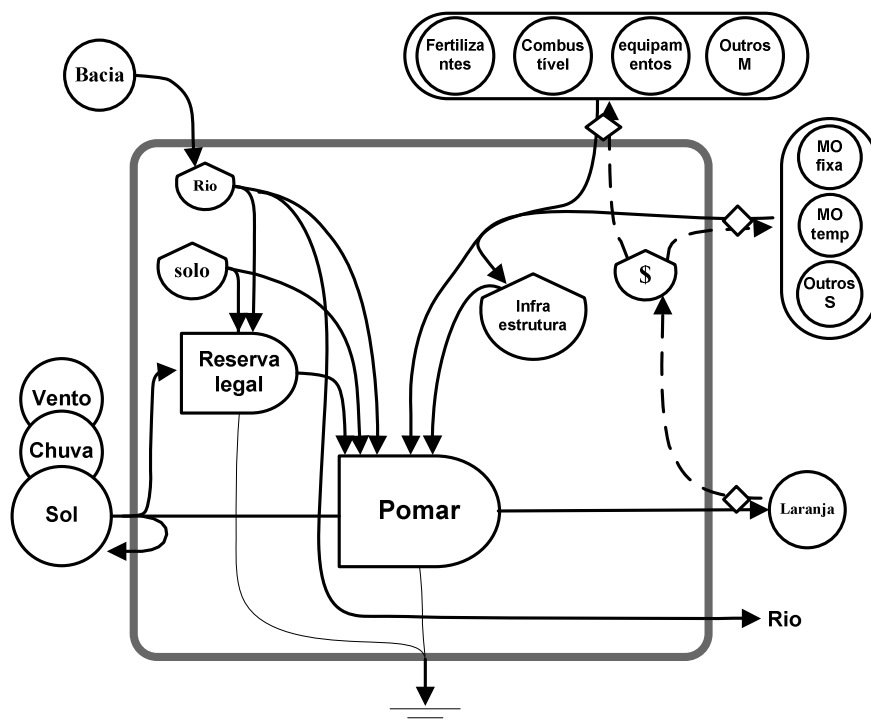


Figura 9: Diagrama sistêmico resumido de um pomar convencional

Onde: M – materiais; S – serviços; MO – Mão de obra; temp. – temporária.

Em Santos os processadores possuem terminais próprios especiais para operação a granel de SLCC e com instalações para a estocagem de suco congelado, porém também ocorre a transferência do suco direto do caminhão tanque para o navio cargueiro que é feito via um “sucoduto”. Todas as operações portuárias são assépticas exigindo equipamentos específicos para realizá-las.

O transporte marítimo é feito por navios cargueiros tipo “tank farm” com capacidades variáveis. O maior volume de suco é exportado a granel em navios próprios com capacidades que variam desde 9000 t, navio “Sol do Brasil”, até 40.000 t, navio “Carl Fisher”, ambos da Citrosuco. Parte da produção, entretanto, é comercializada em containers (Boteon, 2004; Neves e Lopes, 2005; ABECITRUS, 2007).

Nos portos de destino, tanto na Europa como nos Estados Unidos, as empresas possuem terminais próprios similares aquele de Santos onde o suco é estocado antes de ser distribuído.

O transporte do suco congelado na Europa é feito por caminhos tanques similares aos utilizados na etapa brasileira. As distâncias variam, pois as unidades fabris são

distribuídas por todo o continente.

O SLCC é utilizado para preparação de bases de bebidas, como refrigerantes, ou é diluído, passando de 66° Brix é para 11,5° Brix, e embalado para consumo direto, também conhecido por *ready-to-drink*, sendo este último a principal utilização do SLCC. Nesta etapa também pode ocorrer a mistura com sucos de diferentes características (acidez e *ratio*). Após a reconstituição e mistura o suco é pasteurizado e embalado (Neves e Lopes, 2005).

5.1.3. Suco de Laranja Orgânico

A agricultura orgânica tem sido apresentada como uma alternativa viável para a produção agrícola e discutida no contexto de agricultura sustentável. Não há, entretanto, consenso sobre sua real sustentabilidade (Rigby e Cáceres, 2001, Pacini et al., 2003).

O conceito de produção orgânica tem raízes híbridas sendo resultado de movimentos que surgiram ao longo dos anos sob vários nomes e que foram padronizadas pelo *International Federation of Organic Agriculture Movements*, IFOAM (Reynolds, 2004). Para serem comercializados, os produtos orgânicos devem passar por certificação, processo de verificação independente que confirma, ou não, que produtos são produzidos dentro de regras ou com características específicas. A certificação inclui todas as etapas da cadeia produtiva, desde a etapa agrícola até a comercialização final.

O IFOAM congrega organismos que atuam na área de Agricultura Orgânica para estabelecer recomendações consensuais e acreditar instituições e empresas de certificação. Alguns países possuem também legislação específica sobre a produção orgânica. No Brasil a produção orgânica é regulamentada pela Lei 10.831, de 23 de dezembro de 2003 (Brasil, 2003), que dispõe sobre a agricultura orgânica no país, e pela Instrução Normativa Nº 007, de 17 de maio de 1999 do MAA (Brasil, 1999) que define as regras da produção orgânica. A União Européia (UE, 1991; UE, 1999) possui os regulamentos CEE Nº 2092/91, de 24 de junho de 1991 e Regulamento (CEE) nº 1804/1999, de 19 de julho de 1999 regulamentando as produções orgânicas de alimentos vegetais e animais, respectivamente. Nos Estados Unidos (USA, 2002) as normas de produção orgânicas estão estabelecidas no documento 7 CFR Part 205.

O comprometimento histórico da agricultura orgânica com a preservação do meio ambiente e justiça social está expresso em seus princípios básicos (IFOAM, 2005) e

diversos estudos mostram que sua adoção resulta em diminuição dos impactos ambientais e dos gastos energéticos de produção (Lagerberg, 2000; Lanzotti et al., 2000, 2000; Bastianoni et al., 2001; Haas et al., 2001; Ortega et al., 2002; Panzieri et al., 2003; FAO, 2003; Basset-Mens, 2006). Entretanto, alguns pesquisadores têm salientado que a certificação formal não garante a sustentabilidade do produto agrícola (Verhoog et al., 2003; Reynolds, 2004; Seppänen e Helenius, 2004), pois as normas para a certificação tradicional de produtos agrícola se limitam apenas a identificar insumos e práticas de produção proibidas. Apesar da preocupação com o meio ambiente e com as condições de trabalho estar implícita nas normas, esta preocupação não é traduzida em termos de indicadores de sustentabilidade nas certificações.

Verhoog et al. (2003) classificam os produtores orgânicos em três grupos, de acordo com o tipo de abordagem adotada: a) abordagem “sem substâncias químicas”, ou “respeito pelo meio ambiente” que corresponde aos produtores que apenas buscam a certificação orgânica e somente seguem os padrões formais das certificadoras; b) abordagem agroecológica, ou “respeito à ecologia” que corresponde aos agricultores que aprendem e trabalham com a natureza, diversificando sua produção e seu manejo; c) abordagem integrada, ou “respeito pela vida” seguida por agricultores que também incluem a espiritualidade em suas ações. O primeiro tipo de abordagem, “sem substâncias químicas”, apesar de suficiente para a certificação formal dentro das normas atuais baseadas em padrões de permissão/proibição universal de práticas e de insumos, não é, todavia, suficiente para garantir a sustentabilidade da produção nem é garantia de que os princípios básicos, como justiça social, estão sendo alcançados.

A produção orgânica na etapa agrícola se diferencia da produção convencional pela total exclusão do uso de fertilizantes, pesticidas e herbicidas químicos. Em substituição são utilizados fertilizantes orgânicos, tanto líquidos (biofertilizantes) como sólidos (compostos orgânicos), e o controle de pragas é feito com caldas (bordalesa e sulfocálcica) e monitoramento de pragas através de armadilhas. Também são plantadas leguminosas, ou adubos verdes, nas entrelinhas do pomar para melhorar o fornecimento de nitrogênio. A adição de alguns minerais, como pó de rocha, também é permitido (Penteado, 2004).

As etapas seguintes da cadeia (transporte e processamento industrial), apesar de serem iguais tanto no sistema convencional quanto no orgânico, devem garantir que não ocorra mistura ou contaminação entre eles. O transporte da laranja do pomar até o

processador deve ser feito em caminhões próprios, na fábrica processadora o processo de extração e de concentração deve ser totalmente isolado da produção com matéria-prima convencional. As etapas de transporte e de diluição do SLCC, devem, da mesma forma, garantir a separação entre os produtos convencionais e orgânicos.

O Brasil é um dos cinco maiores produtores de alimentos orgânicos, sendo que aproximadamente 70% do faturamento do setor se deve às exportações. Os principais destinos dos produtos orgânicos brasileiros são os Estados Unidos, a Europa e o Japão. O SLCC orgânico é um dos principais produtos exportados, juntamente com a soja, o açúcar, mel, arroz, e frutas in natura (APEX, 2007). A empresa Citrovita, do grupo Votorantim, além do SLCC convencional, também processa suco de laranja orgânico, sendo certificado pelo IDB, Instituto Biodinâmico.

5.2 Materiais e Métodos

Os dados necessários para a realização da análise emergética e de ciclo de vida, incluindo equipamentos, mão de obra e taxas e impostos, foram obtidos através de entrevistas com profissionais da área, fabricantes de equipamentos, insumos e embalagens e da literatura. A Tabela 6 apresenta as características dos pomares convencional e orgânico.

Tabela 6: Dados da etapa agrícola para os pomares convencional e orgânico

Pomar	Convencional	Orgânico
Área Total (ha)	163	175
Pomar (ha)	131	140
Produção total (cx)	130 000	110 000
Adensamento (pés/ha)	330	325
Produção por ha (cx/ha)	995	786
Produção por pé (cx/pé)	3	2,4
Uso de irrigação	Sim	Sim
Funcionários fixos	14	10

Os pomares convencional e orgânico ocupam área similar, somente produzem laranja e destinam sua produção para o processamento de suco de laranja concentrado congelado (SLCC). O pomar convencional apresenta maior adensamento, maior produção por pé de laranja e, portanto, maior produção por hectare, do que o pomar orgânico. Nos dois casos foi considerada área de reserva legal correspondente a 20% da propriedade, conforme determina o Código Florestal Brasileiro (Brasil, 1965). Os dados utilizados foram da safra 2005/2006.

Os cálculos da etapa de produção de SLCC foram realizados tendo por base o projeto de uma fábrica “módulo”. O projeto foi feito pela empresa Lofredo & Moretti Engenharia Ltda que gentilmente o disponibilizou para o presente estudo. Trata-se de um módulo padrão de 15 extratoras uma vez que os outros equipamentos da linha, com centrífugas, evaporadores, etc., são dimensionados com capacidade correspondente a vazão de suco proveniente deste número de extratoras e, assim, as fábricas instaladas possuem múltiplos deste módulo.

As etapas de transporte e de processamento industrial são idênticas para os dois tipos de suco, convencional e orgânico. Assim sendo, os dados são os mesmos. A Tabela 7 apresenta os dados das etapas industriais e de transporte do SLCC e respectivas fontes de informação utilizadas nos cálculos.

5.2.1 Análise Emergética da cadeia produtiva de SLCC

A análise emergética da cadeia produtiva foi realizada, conforme descrito por Odum (1996), em quatro etapas: (a) Preparação de um diagrama do sistema estudado com identificação dos fluxos de entrada, de saída e internos ao sistema, ou inventário do sistema; (b) Análise dos fluxos identificados; (c) Obtenção dos índices emergéticos; (d) Interpretação dos índices emergéticos.

A contribuição dos compostos nitrogênio, fósforo e potássio absorvidos da natureza pelo sistema orgânico foi calculada considerando-se a diferença entre a massa que sai da lavoura via laranja e a massa adicionada via fertilização orgânica (esterco, melaço e pó de rocha), conforme descrito por Agostinho (2005). No caso do sistema convencional, toda a fertilização foi realizada pela aplicação de fertilizantes químicos e, portanto, incluído como recursos da economia e calculado segundo Brown e Ulgiati (2004).

Tabela 7: Dados utilizados na análise emergética da cadeia produtiva de SLCC.

Etapa	Dados	Fonte de informações utilizadas
Transporte laranjas	Distância: 100 km Capacidade: 25 t (65%) e 14 t (35%)	Entrevista -produtores de laranja Fabricante de caminhões/ pneus
Produção de SLCC	<u>Capacidade</u> • 1.500 caixas de laranja/hora • 33.000 caixas de laranja/dia <u>Produção</u> • SLCC a 66° Brix - 5.652 kg/h • Pellet - 6.732 kg/h • Óleo centrifugado - 153 kg/h • Aroma - 92 kg/h • Óleo de essência - 4,6 kg/h • D'limoneno - 122 kg/h <u>Operação:</u> 22 h/dia; 200 dias/ano (safra)	Projeto de fábrica – L&M Eng. Fornecedores de equipamentos: ALBORG; Alfa Laval; APV; Calibras; FMC; Mecat; L&M engenharia; Tetra Pak Entrevistas - Técnicos Literatura
Transporte até porto de Santos	Distância: 400 km Caminhão: tanque de aço inox isolado, porém não refrigerado. Capacidade: 26 toneladas	Entrevista: transportadoras e técnicos da área Fabricante de caminhão e pneus
Operações portuárias	Terminal privado Embarcações: tipo Panamax TPB 70.000t <u>Terminal de Santos:</u> Capacidade: 1.500.000 t/ano Instalações: estocagem para 60 000 t <u>Terminal de Ghent:</u> Capacidade: 600.000 t/ano Instalações: estocagem para 20 000 t	Agência Nacional de Transportes Aquaviários Porto de Ghent Entrevista com técnicos Literatura
Transporte marítimo	Embarcação: tipo Panamax TPB 70.000t Capacidade: 10000 toneladas a granel Tripulação: 8 oficiais e 17 marinheiros Distância: 10 000 km Duração: 12 dias de ida e 11 de volta OBS.: navio volta vazio	Entrevistas: técnicos Literatura
Transporte rodoviário até fábrica	Distância: 400 km Caminhão: tanque de aço inox isolado. Capacidade: 26 toneladas	Literatura
Operação industrial Europa	Capacidade: 5,2 t /h de FCOJ Produção: 30 000 l de suco/h Embalagem: asséptica cartonada de 1l	Entrevista – Tetra Pak Literatura

A renovabilidade parcial dos recursos provenientes da economia foram considerados, conforme descrito por Ulgiati et al. (1995) e Ortega et al. (2002). Os cálculos foram realizados considerando como base 1 hectare de área plantada.

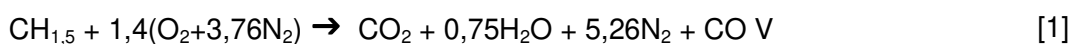
5.2.2 Inventário do Ciclo de Vida de SLCC

Foi realizado estudo dos consumos de recursos naturais, demanda energética e das emissões associadas à cadeia produtiva, que corresponde à etapa de inventário da metodologia de Avaliação do ciclo de vida. Este estudo é importante para a avaliação dos impactos ambientais associados ao produto, uma vez que não restringe a análise aos processos produtivos da cadeia em si, mas inclui também todos os processos necessários para suportar a produção e transporte das matérias-primas e insumos utilizados nas várias etapas da cadeia produtiva.

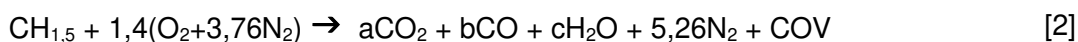
No presente estudo foram calculados os consumos dos seguintes recursos naturais: água (uso direto), solo (perda de solo por atividade agrícola), uso da terra (área necessária para o plantio da matéria-prima principal), consumo direto de combustível fóssil, óleo equivalente que considera o consumo total – direto e indireto – de combustível fóssil. Também foram calculadas as demandas energéticas e de mão-de-obra para a cadeia. Como saídas do sistema foram consideradas as emissões de CO₂ decorrentes da perda de solo (oxidação do solo), do uso direto de combustível fóssil e da queima de combustível durante os processos que suportam a cadeia (uso indireto).

Os cálculos da oxidação do solo perdido por erosão foram realizadas conforme descrito por Ulgiati (2001).

Os cálculos de emissões de gases devido à queima direta de combustíveis foram baseados na equação de combustão completa de hidrocarboneto.



E na equação de combustão considerando os outros compostos formados durante este processo:



Os valores de “b”, “c” e COV (compostos orgânicos voláteis) foram determinados utilizando-se os dados do “CORINAIR Emission Inventory Guidebook” (Manual de

Inventário de emissões CORINAR) (CORINAR, 2002). Os valores de “a” foram determinados pela relação estequiométrica da equação 2.

No caso da queima de combustível fóssil pelos sistemas que suportam a cadeia, o cálculo de emissões foi realizado somente para CO₂. Neste caso foi utilizado o inventário de entradas e saídas do sistema preparado para a Análise Emergética. Para cada fluxo entrando no sistema foi computado o equivalente de óleo, ou seja, a quantidade necessária de combustível para a produção do bem (Boustead e Hancock, 1979). Para o total de combustível requerido pelo sistema foram calculadas as emissões de CO₂, considerando-se a combustão completa do combustível (Ulgiati, 2001).

A demanda energética do sistema foi calculada convertendo-se o total de combustível requerido para Joules.

Os cálculos foram feitos considerando 1 litro de suco de laranja pronto para beber como unidade funcional.

5.3 Resultados e Discussão

5.3.1 – Resultados da Análise Emergética

Os cálculos completos, assim como a tabela emergética completa, são apresentados no Apêndice 1. A Figura 10 apresenta o diagrama sistêmico resumido da cadeia produtiva de suco de laranja convencional, enquanto a Figura 11 apresenta o diagrama para o suco orgânico. A Tabela 8 apresenta o resumo destes cálculos para o suco convencional classificando os fluxos por etapa da cadeia, enquanto que a Tabela 9 apresenta o resumo do produto orgânico.

O total de fluxos emergéticos necessários para o funcionamento do sistema orgânico são menores do que aqueles necessários para o sistema convencional, conforme apresentado na Figura 12. Os recursos renováveis da natureza são ligeiramente superiores no sistema orgânico, pois além das contribuições da chuva e da água para irrigação, que também são utilizados pelo sistema convencional, este absorve nitrogênio, fósforo e potássio absorvidos naturalmente.

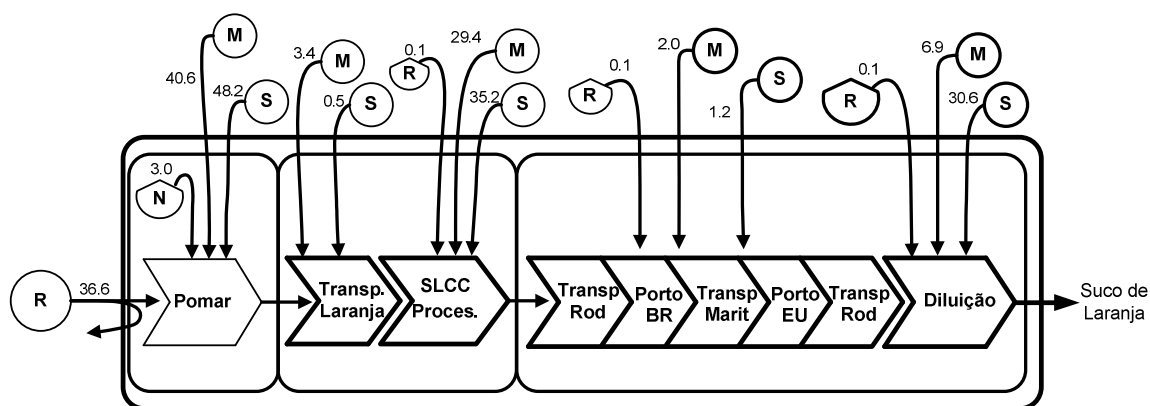


Figura 10: Diagrama sistêmico resumido do suco de laranja convencional.

Fluxos emergéticos em 1×10^{14} seJ/ha.ano. Onde: R - recursos renováveis; N - recursos não renováveis da natureza; M – materiais; S - serviços; Transp. – transporte; Rod – rodoviário; Marit - marítimo; Proces-processamento; BR - Brasil; e EU - Europa.

Tabela 8: Fluxos emergéticos da cadeia de SLCC convencional por etapa e tipo de fluxo

	Pomar		Indústria		Transporte		Total	
	1×10^{14} seJ/ha.a	% etapa	1×10^{14} seJ/ha.a	% etapa	1×10^{14} seJ/ha.a	% etapa	1×10^{14} seJ/ha.a	%
Renovável	36,56	28,6	0,23	0,2	0,08	1,2	36,87	15,5
Não Renovável	3,01	2,3	---	0,0	---	---	3,01	1,3
Material	40,59	31,6	36,25	35,4	5,48	76,1	82,33	34,6
Serviço	48,23	37,6	65,82	64,3	1,64	22,7	115,69	48,6
Total								
SeJ/l	128,40		102,30		7,20		237,90	
% do total	54,0%		43,0%		3,0%			

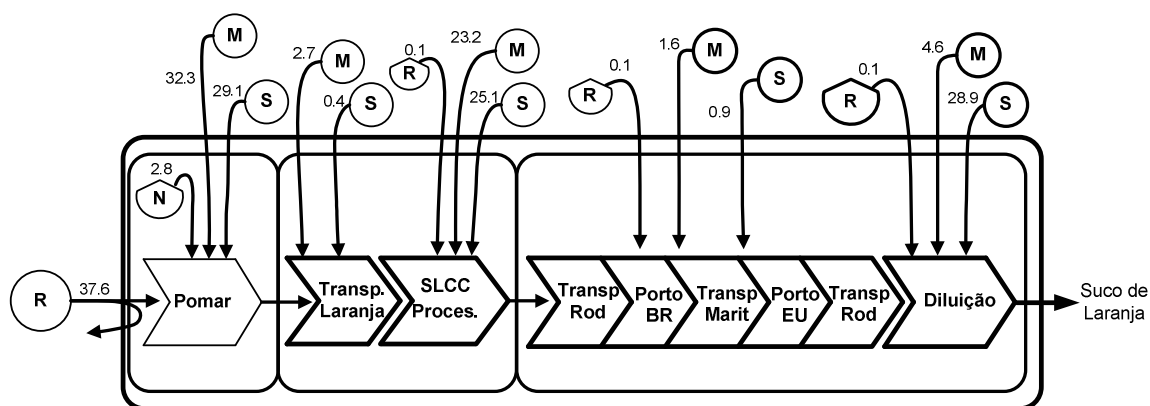


Figura 11: Diagrama sistêmico resumido do suco de laranja orgânico

Fluxos emergéticos em 1×10^{14} seJ/ha.ano. Onde: R - recursos renováveis; N- recursos não renováveis da natureza; M – materiais; S - serviços; Transp. – transporte; Rod – rodoviário; Marit - marítimo; Proces-processamento; BR - Brasil; e EU - Europa.

Tabela 9: Fluxos emergéticos da cadeia de SLCC orgânico por etapa e tipo de fluxo

	Pomar		Indústria		Transporte		Total	
	1×10^{14}	%	1×10^{14}	%	1×10^{14}	%	1×10^{14}	%
	seJ/ha.a	etapa	seJ/ha.a	etapa	seJ/ha.a	etapa	seJ/ha.a	%
Renovável	37,60	36,9	0,17	0,2	0,07	1,2	37,84	20,0
Não Renovável	2,83	2,8	0,00	0,0	0,00	0,0	2,83	1,5
Material	32,30	31,7	27,82	33,9	4,33	76,1	64,45	34,0
Serviço	29,13	28,6	53,97	65,9	1,29	22,7	84,39	44,5
Total								
SeJ/l	101,86		81,95		5,69		189,50	
% do total	53,8%		43,2%		3,0%			

O sistema orgânico, por apresentar menor perda de solo por erosão (10,5 toneladas por hectare por ano) em relação ao sistema convencional (11,2 t por hectare por ano), consome ligeiramente menos recursos não renováveis da natureza.

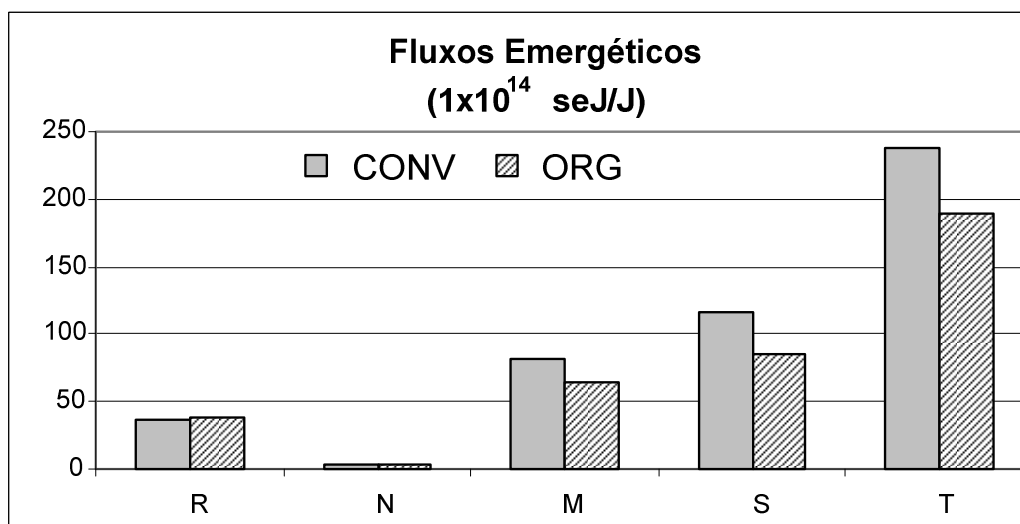


Figura 12: Comparação entre os fluxos emergéticos dos dois sistemas de produção. Onde: R – Recursos renováveis; N – recursos não renováveis da Natureza; M – materiais da economia; S – serviços; T – total; COM – convencional; ORG – orgânico.

Nos outros dois tipos de recursos, materiais e serviços, o sistema convencional consome significativamente mais recursos do que o orgânico, 22% e 27% a mais, respectivamente. Para os materiais, esta diferença se deve ao consumo superior de recursos na etapa agrícola, notadamente o uso de fertilizantes químicos, herbicidas e pesticidas, além de apresentar consumo superior de combustível fóssil do que o sistema orgânico.

Os fluxos de serviços demandados pelo sistema convencional são maiores devido à maior produtividade deste sistema, que resulta em maiores fluxos de mão de obra e, também, das taxas e impostos relacionados ao custo de mão de obra e à produção da unidade agrícola.

Nos dois casos, convencional e orgânico, etapa agrícola é aquela que representa a maior contribuição, 54% no suco convencional e 53,8% no suco orgânico, seguida pela etapa industrial de produção de SLCC, 43% para o suco convencional e 43,2% para o suco orgânico. As etapas de transporte, da laranja e do SLCC, totalizam, nos dois casos, 3% dos recursos utilizados, conforme apresentado na Fig 13.

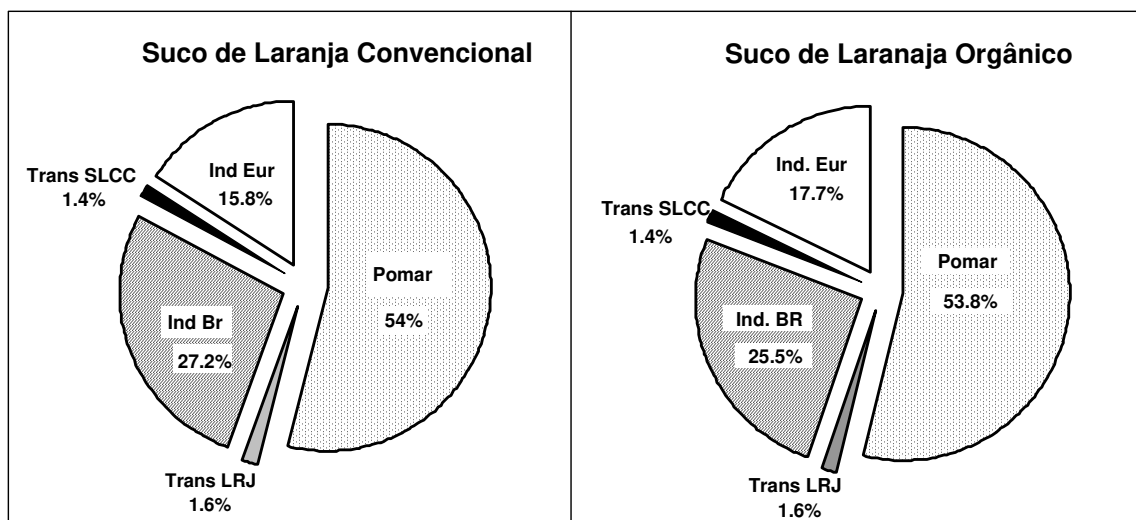


Figura 13: Consumo de recursos por etapas da cadeia produtiva de suco de laranja
Onde: Trans. LRJ é transporte de laranjas; Trans. SLCC é transporte de SLCC; Ind. BR é Indústria no Brasil; Ind. Eur é a indústria na Europa.

Este resultado evidencia a importância da etapa agrícola no desempenho de toda a cadeia produtiva. Melhorias de eficiência nesta etapa repercutirão de forma significativa em toda a cadeia. O grande volume de recursos provenientes da economia que são utilizados por esta etapa, mesmo no caso do sistema orgânico, indica sua grande dependência da economia e, portanto, sua vulnerabilidade aos preços de mercado e à disponibilidade de combustíveis fósseis.

Em termos percentuais, a etapa agrícola consome maiores volumes de recursos no sistema convencional do que o faz no orgânico, enquanto o oposto ocorre nas etapas industriais. Em termos absolutos, entretanto, o sistema orgânico consome volume menor de recursos, em média 20% a menos, do que o convencional conforme apresentado na Tabela 10.

A etapa agrícola é aquela que apresenta maior diferença entre os sistemas convencional e orgânico. Este resultado era esperado uma vez que o sistema orgânico, por sua natureza, utiliza menores volumes de recursos da economia. Além disso, os insumos utilizados neste sistema, como o melaço e o esterco, têm uma transformidade menor que os fertilizantes químicos e herbicidas utilizados no sistema convencional. Ou seja, estes últimos são grandes consumidores de materiais e energia durante seu processamento.

Tabela 10: Fluxos emergéticos (em seJ/ha.a) por etapa da cadeia de suco de laranja

Etapa	Convencional	Orgânico	Diferença	
Pomar	128,40x 10 ¹⁴	101,86x10 ¹⁴	26,54x10 ¹⁴	21%
Transporte laranja	3,93x10 ¹⁴	3,10x10 ¹⁴	0,83x10 ¹⁴	21%
Indústria Brasil	64,66x10 ¹⁴	48,37x10 ¹⁴	16,29x10 ¹⁴	25%
Transporte SLCC	3,28x10 ¹⁴	2,59x10 ¹⁴	0,69x10 ¹⁴	21%
Indústria Europa	37,64x10 ¹⁴	33,58x10 ¹⁴	4,06x10 ¹⁴	10%
Total	237,9x10 ¹⁴	189,50x10 ¹⁴	48,40x10 ¹⁴	20%

As etapas de transporte e industrial têm consumo de recursos idênticos tanto para o produto convencional como orgânico, considerando-se os volumes de laranja ou de SLCC processados ou transportados. Entretanto, a análise emergética é feita considerando-se os recursos expressos em fluxos por hectare por ano. Portanto, os fluxos expressos em tonelada de laranja ou de SLCC são convertidos para esta base. Assim, a diferença de produtividade entre os dois sistemas, de 21%, explica a diferença entre os valores apresentados na Tabela 10. A etapa industrial européia apresentou uma diferença de somente 10% explicada pelo preço final de venda do produto orgânico.

A adoção de um sistema produtivo menos intenso no uso de recursos, como é o caso do sistema orgânico, resulta em diminuição dos fluxos emergéticos da etapa agrícola. Entretanto, como as outras etapas mantêm seus consumos, a contribuição relativa da etapa agrícola diminui, enquanto que a contribuição das etapas de transporte e industriais aumenta.

Na comparação entre a etapa industrial brasileira e européia a primeira utiliza maiores volumes de fluxos emergéticos do que a etapa européia. A diferença entre estas duas etapas é decorrente da intensidade de uso energético. Na etapa industrial brasileira ocorre a concentração do suco, que é intensiva no uso de energia, tanto fóssil (7.5%) como elétrica (4%), além de utilizar grande volume de materiais, principalmente aço inox. Já na etapa européia, ocorre apenas a diluição do suco.

Os sub-sistemas brasileiros, etapas agrícola e industrial, são aqueles que mais consomem recursos na cadeia de SLCC, totalizando 82.8% do total de fluxos para o suco convencional e 80.9% para o suco orgânico. O transporte do SLCC é composto por transporte até o porto brasileiro, operações portuárias no Brasil, transporte marítimo, operações portuárias na Europa e transporte até indústria diluidora, totalizam somente

1.4% dos recursos utilizados. Parte desta etapa ocorre ainda no Brasil, aumentando a participação das etapas brasileiras, porém minimamente.

Quando as etapas são consideradas individualmente observa-se que: a etapa agrícola utiliza principalmente recursos renováveis da natureza (39% e 40% desta etapa no sistema convencional e orgânico, respectivamente), a etapa industrial utiliza majoritariamente serviços (66% desta etapa) e materiais (36% e 34% desta etapa no caso convencional e orgânico, respectivamente). As etapas de transporte utilizam majoritariamente materiais, 76%. A Figura 14 apresenta estes resultados graficamente para o caso convencional e a Figura 15 para o caso orgânico.

Nos dois sistemas, os maiores consumos individuais da etapa agrícola são de mão-de-obra (15% e 10% para o caso convencional e orgânico, respectivamente), em especial para a colheita, seguido por energia da chuva (9% nos dois casos). Também no uso de combustíveis fósseis o sistema convencional utiliza maior volume do que o sistema orgânico, tanto absoluto como percentual (5% e 3,5% nos casos convencional e orgânico, respectivamente).

A fertilização no sistema convencional utiliza fertilizantes químicos, que representam 9% dos fluxos totais. O sistema orgânico utiliza fertilização com produtos orgânicos (esterco e melaço) que representam apenas 0,6% dos fluxos, e complementa-a absorvendo nutrientes da natureza (nitrogênio, fósforo e potássio) que representam outros 1,9% dos fluxos totais.

A água utilizada na irrigação é a mesma nos dois casos, porém, sua contribuição em relação aos fluxos totais é maior no sistema orgânico (8%) do que no convencional (6%), pois este último utiliza fluxos totais maiores.

Nas etapas de transporte e industriais os fluxos são os mesmos, mudando a participação relativa devido à diferença no rendimento agrícola dos sistemas.

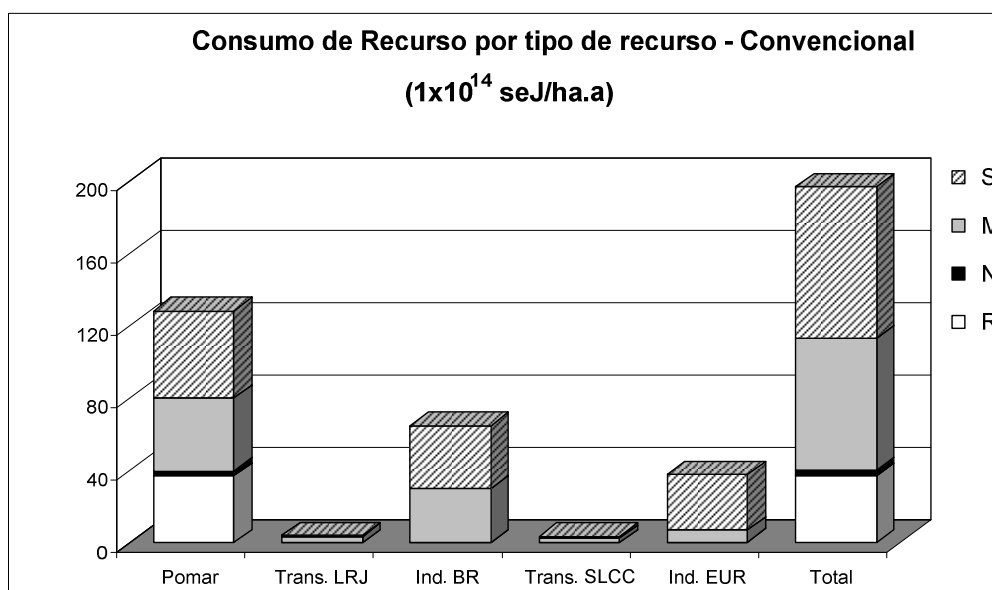


Figura 14: Fluxos emergéticos por tipo de recurso e etapa da cadeia. Suco Convencional
Onde: R – Recursos renováveis; N – recursos não renováveis da Natureza; M – materiais da economia; S – serviços; Trans LRJ – transporte da laranja; Ind. BR- indústria no Brasil; Trans SLCC- transporte de SLCC; Ind. Eur – indústria na Europa.

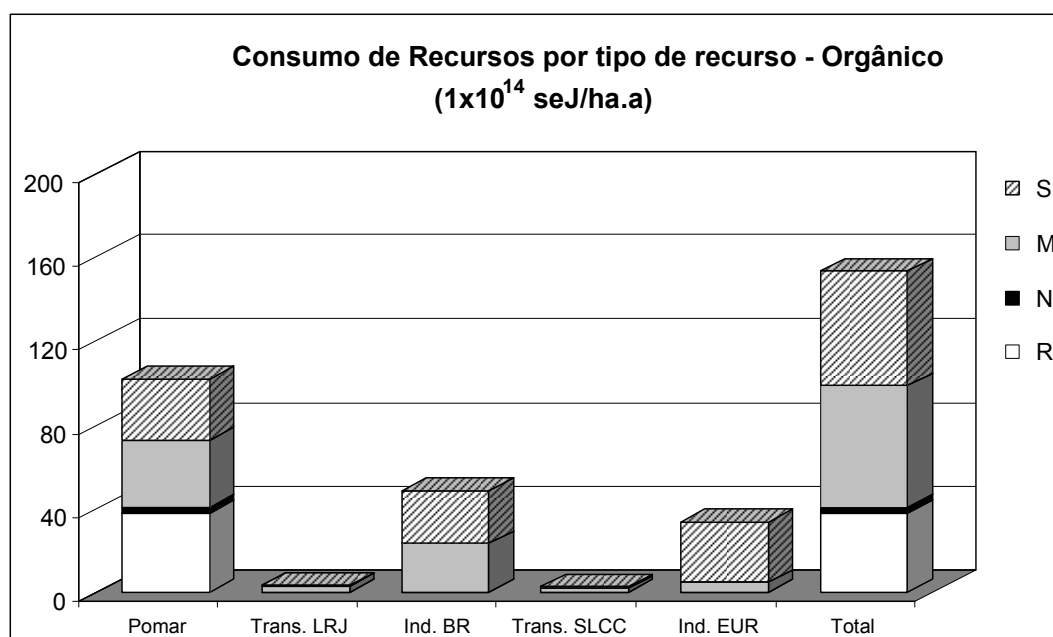


Figura 15: Fluxos emergéticos por tipo de recurso e etapa da cadeia. Suco Orgânico.
Onde: R – Recursos renováveis; N – recursos não renováveis da Natureza; M – materiais da economia; S – serviços; Trans LRJ – transporte da laranja; Ind. BR- indústria no Brasil; Trans SLCC- transporte de SLCC; Ind. Eur – indústria na Europa.

Quando toda a cadeia é considerada, os maiores consumos de recursos são os Serviços e Materiais da economia, 47% e 37% respectivamente, no caso do suco convencional, e 45% e 34% no caso do suco orgânico. Estes recursos têm custo monetário, pois são provenientes da economia.

Surpreendentemente, a maior contribuição individual foram os impostos e taxas pagos ao longo da cadeia toda, incluindo os impostos brasileiros e europeus e as taxas portuárias e de transporte, que nos dois sistemas totalizam 30% dos fluxos emergéticos totais utilizados. Mão-de-obra, fixa e a temporária, é a segunda maior contribuição individual (17%) seguido por combustível fóssil (14,2% e 12,6% para os casos convencional e orgânico, respectivamente), energia da chuva (9%) e água utilizada na irrigação (8%).

5.3.1.1. Índices Emergéticos

A Tabela 11 apresenta os índices emergéticos para os produtos da cadeia do sistema convencional: laranja no portão do pomar; suco de laranja concentrado (SLCC) na saída do fábrica brasileira e suco de laranja diluído (SLD) consumido na Europa. A Tabela 12 apresenta os resultados para os produtos do sistema orgânico.

Transformidade é uma medida da eficiência do sistema estudado: comparando-se dois ou mais sistemas produtivos, quanto maior seu valor, menor a eficiência do sistema. Observa-se pequena variação entre as transformidades dos produtos dos dois sistemas, sendo os valores de transformidade da mesma ordem de grandeza, conforme apresentado na Figura 16.

A transformidade da laranja orgânica é aproximadamente 0,5% maior do que a da convencional. Valores de transformidades próximos para a laranja orgânica e convencional indicam que, embora não utilize insumos químicos, o sistema orgânico utiliza a mesma grandeza de energia que o sistema convencional para produzir um Joule de laranja.

Tabela 11: Índices emergéticos dos produtos da cadeia de SLCC convencional.

	Laranja	SLCC	SLD	
Tr	seJ/ J seJ/kg	$2,44 \times 10^5$ $3,16 \times 10^{11}$	$5,94 \times 10^5$ $6,57 \times 10^{12}$	$7,00 \times 10^5$ $1,41 \times 10^{12}$
% R		28,5%	18,6%	15,5%
% R*		41,6%	30,7%	25,5%
EYR		1,45	1,25	1,20
ELR		2,51	4,37	5,45
ELR*		1,40	2,26	2,92
EIR		2,24	3,97	4,96
SI		0,58	0,29	0,22
SI*		1,03	0,55	0,41
EER		1,00	1,37	1,20

Onde: Laranja no pomar, SLCC no processador; SLD Suco de laranja diluído na Europa; Tr – Transformidade, %R – renovabilidade considerando somente os recursos da natureza; %R* – renovabilidade considerando as parcelas renováveis dos materiais e serviços; EYR – Razão de Rendimento Emergético; ELR – Taxa de Carga Ambiental; ELR* – Taxa de Carga Ambiental considerando as parcelas renováveis dos materiais e serviços; EIR – Razão de Investimento de Emergia; SI – Índice de sustentabilidade; SI* – Índice de sustentabilidade considerando as parcelas renováveis dos materiais e serviços.

Por se tratar de um sistema que preconiza a utilização de insumos naturais e, de preferência, provenientes da região, a expectativa do trabalho era de que os produtos orgânicos tivessem transformidades menores do que os convencionais. Esta previsão foi confirmada por alguns pesquisadores comparando produção orgânica com convencional, que obtiveram transformidade do produto orgânico menor do que a do convencional (Ortega et al., 2002; Agostinho, 2005; Castellini et al., 2006). Entretanto, outros pesquisadores obtiveram resultados semelhantes aos do presente trabalho (Lagerberg, 2000; Panzieri et al., 2002; Cavalett et al., 2005). Nestes estudos, assim como no presente estudo, o fluxo total de emergia foi menor para o sistema orgânico. Mas, como a produtividade por hectare também cai, além do sistema orgânico também utilizar insumos

e combustível fóssil, a transformidade da laranja orgânica é superior à do sistema convencional. Assim, mesmo com a diminuição no uso de insumos por hectare, o fluxo emergético por volume produzido é maior.

Tabela 12: Índices emergéticos dos produtos da cadeia de SLCC orgânico.

	Laranja	SLCC	SLD	
Tr	seJ/ J seJ/kg	2,45x10 ⁵ 3,18 x10 ¹¹	5,72x10 ⁵ 6,32 x10 ¹²	7,06x10 ⁵ 1,42 x10 ¹²
% R		36,9%	22,8%	20,0%
% R*		47,9%	33,8%	28,7%
EYR		1,66	1,33	1,27
ELR		2,71	3,39	4,01
ELR*		1,09	1,96	2,48
EIR		1,52	3,05	3,66
SI		0,97	0,39	0,32
SI*		1,52	0,68	0,51
EER		1,00	1,31	1,01

Onde: Laranja no pomar, SLCC no processador; SLD Suco de laranja diluído na Europa; Tr – Transformidade, %R – renovabilidade considerando somente os recursos da natureza; %R* – renovabilidade considerando as parcelas renováveis dos materiais e serviços; EYR – Razão de Rendimento Emergético; ELR – Taxa de Carga Ambiental; ELR* – Taxa de Carga Ambiental considerando as parcelas renováveis dos materiais e serviços; EIR – Razão de Investimento de Energia; SI – Índice de sustentabilidade; SI* – Índice de sustentabilidade considerando as parcelas renováveis dos materiais e serviços.

Os valores de transformidade da laranja calculados no presente estudo são de mesma grandeza daquele calculado para a produção de laranjas na Flórida por Brandt-Williams, 2002), 100.000 seJ/J. Também é de mesma grandeza da transformidade calculada para outros produtos vegetais encontrados em literatura, como por exemplo, para uvas na Itália (Bastianoni et al., 2001), soja no Brasil (Ortega et al., 2002), rotação de grãos na Austrália (Lefroy e Rydberg, 2003), vegetais produzidos em sítios no Brasil (Agostinho, 2005) e para café na Nicarágua (Cuadra e Rydberg, 2006). Alguns estudos, entretanto, obtiveram valores para produtos agrícolas mais altos, como por exemplo para o tomate na Suécia (Lagerberg, 2000), na casa de 1.000.000 seJ/J de produto e de café

produzido no Brasil (Sarcinelli e Ortega, 2004), na casa de 1.000.000.000 seJ/J. Nestes dois estudos, os fluxos de materiais e de serviços eram bastante superiores, aproximadamente 100 vezes, aos calculados pelo presente estudo.

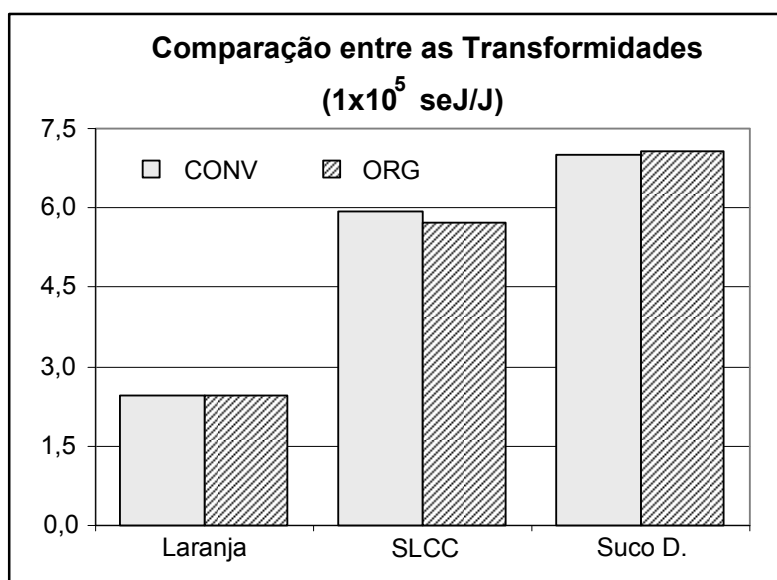


Figura 16: Transformidades dos produtos da cadeia de SLCC

Onde Suco D. é suco de laranja diluído

A transformidade aumenta ao longo da cadeia produtiva. No sistema convencional ela passa de $2,44 \times 10^5$ seJ/J para a laranja, para $5,94 \times 10^5$ seJ/J para SLCC, e para $7,00 \times 10^5$ seJ/J para SLD. Apesar da transformidade dos três produtos serem da mesma ordem de grandeza, 1×10^5 seJ/J, ocorre um aumento de 186% no seu valor. No caso do sistema orgânico a transformidade passa de $2,45 \times 10^5$ seJ/J para a laranja, para $5,72 \times 10^5$ seJ/J para SLCC, e para $7,06 \times 10^5$ seJ/J para SLD, correspondendo a um aumento de 188% no seu valor.

Este resultado era esperado. Na etapa agrícola ocorre a produção de biomassa através da utilização de fluxos renováveis da natureza (luz solar, chuva e biodiversidade) e da economia (fertilizantes, pesticidas e combustíveis). A transformidade da laranja, portanto, reflete a eficiência do sistema agrícola. Nas etapas de transporte não ocorre transformação do produto, apenas incorporação de recursos para sua distribuição. Em outras palavras, a cada etapa de transporte são consumidos recursos, em sua maioria

não renováveis, sem que se ganhe em energia disponibilizada. As etapas industriais constituem processos de transformação da biomassa, estando fundadas na utilização de materiais e energias não renováveis. Desta forma, a transformidade dos produtos destas etapas, SLCC e o suco diluído, deve ser maior do que a da biomassa inicial, a laranja. Assim, com o aumento do consumo de recursos nas etapas industriais e de transporte, aumenta a transformidade do suco, diminuindo a eficiência do sistema como um todo.

Renovabilidade (%R*), ou a porção de recursos renováveis utilizados pelo sistema, é uma medida direta de sua sustentabilidade. Quanto mais alto seu valor, maiores as chances do sistema se manter no longo prazo. O sistema orgânico apresenta maior renovabilidade, aproximadamente 30% superior, do que o sistema convencional. Se for considerada a renovabilidade modificada (%R*), que considera a porção renovável dos recursos da economia, importante no caso da energia elétrica (68% renovável) e da mão de obra nas etapas brasileiras (38% renovável), o resultado se mantém, porém a diferença cai para 13%.

Este resultado era esperado devido à natureza da agricultura orgânica, que privilegia o uso de insumos naturais e locais. O mesmo resultado também foi obtido por outros estudos comparando sistemas de produção de diferentes produtos agropecuários, como por exemplo café no Brasil (Sarcinelli e Ortega, 2004), soja no Brasil (Ortega et al., 2002; Cavalett et al., 2005), tomates na Suécia (Lagerberg e Brown, 1999), sítios com diferentes manejos no Brasil (Agostinho, 2005), produção de frangos na Itália (Castellini et al., 2006), entre outros.

A renovabilidade dos dois sistemas é baixa, quando se considera que se trata de um produto agrícola. Mesmo o sub-sistema agrícola apresenta baixa renovabilidade, apesar de superior à renovabilidade calculada por Brandt-Williams para laranjas na Flórida (18%), (Brandt-Williams, 2002). Esta renovabilidade significa que, no caso do sistema convencional, aproximadamente 60% dos recursos utilizados não são renováveis. No caso do sistema orgânico, este valor é de aproximadamente 52%. Nos dois casos a baixa renovabilidade se deve ao modelo de produção agrícola baseado em uso intensivo de materiais e, em especial, de combustível fóssil. Tal consumo é ainda intensivo, mesmo no modelo orgânico.

Apesar de baixa, a renovabilidade calculada para o sub-sistema agrícola está em concordância com valores calculados por outros estudos de sistemas agrícolas. Para produtos convencionais são encontrados diferentes valores de renovabilidade: desde 5-

10% para produtos como café, soja, milho e frutas (Ortega et al., 2002; Panzieri et al., 2002; Cuadra e Rydberg, 2006) até 20-30% (Ortega et al., 2002; Sarcinelli e Ortega, 2004; Cavalett et al., 2006). Por outro lado, as renovabilidades apresentadas por sistemas de produção orgânico são ligeiramente superiores, na casa de 40-45% (Comar, 2000; Panzieri et al., 2002; Cavalett et al., 2005), também em concordância com os resultados do presente estudo.

A renovabilidade dos produtos da cadeia cai com a inclusão de suas etapas, conforme apresentado na Figura 17. No sistema convencional a renovabilidade cai de 28% (laranja no pomar) para 19% (SLCC) e para 15% para o suco diluído. No sistema orgânico ela cai de 37% (laranja no pomar) para 23% (SLCC) e para 20% para o suco diluído. Nos dois sistemas o processamento e a distribuição correspondem a uma queda de 46% na renovabilidade do produto.

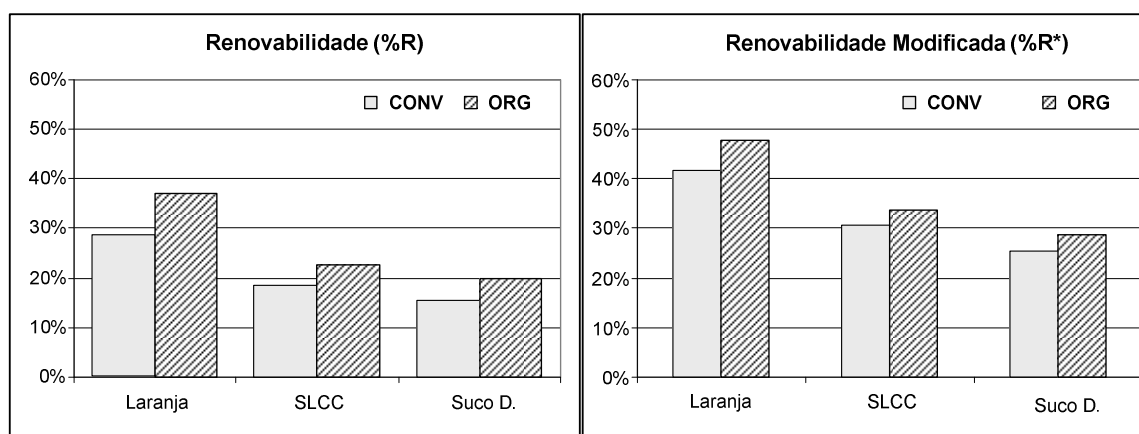


Figura 17: Renovabilidade e Renovabilidade Modificada dos produtos da cadeia de SLCC Onde Suco D. é suco diluído pronto para beber.

A renovabilidade modificada também cai nos dois casos, conforme apresentada na Figura 17. No sistema convencional ela cai de 42% (laranja) para 31% (SLCC) e para 26 para o suco diluído. No sistema orgânico ela passa de 48% (laranja) para 34% (SLCC) e para 29% (SLD). Neste caso, a diminuição é de 40% nos dois sistemas.

A queda na renovabilidade ao longo da cadeia se deve ao fato de que a utilização de recursos renováveis ocorre principalmente na etapa agrícola via energia solar e, sobretudo, água da chuva. As etapas subseqüentes consomem intensamente recursos da economia, que não são renováveis ou com pequena parcela renovável.

Este resultado evidencia a importância da etapa agrícola no desempenho do sistema como um todo. Visto que a renovabilidade cai com a inclusão de etapas da cadeia, transporte e processamento industrial, é fundamental que a laranja utilizada para o processamento apresente alta renovabilidade. Portanto, a adoção de práticas agrícolas mais sustentáveis repercutirá na cadeia e na renovabilidade do produto final, o suco de laranja diluído.

Razão de Rendimento Emergético (EYR), definida como energia total utilizada pelo sistema (Y) dividida pela energia dos insumos da economia (F), é uma medida do ganho em energia primária disponibilizada para ser utilizada pela sociedade. Os sistemas utilizam em seus processos recursos naturais e recursos provenientes da economia, sendo estes últimos, recursos naturais que foram previamente obtidos da natureza, processados por outros sistemas e disponibilizados para o uso pela sociedade. Em teoria, a energia liberada por um sistema é, no mínimo, igual àquela investida com recursos da economia. Neste caso EYR é igual à unidade. Valores de EYR superiores a um indicam que o sistema foi capaz de disponibilizar energia primária para a sociedade e quanto maior este valor, maior é a eficiência do sistema na utilização dos recursos investidos da economia (Ulgianti et al., 1995).

O EYR do sistema orgânico (1,66) é maior do que o do sistema convencional (1,45) indicando que este sistema disponibiliza maior volume de energia primária para a sociedade. Esta tendência também foi observada nos outros estudos que comparam produção orgânica com convencional (Lagerberg, 2000; Ortega et al., 2002; Panzieri et al., 2002). Os EYR calculados para os pomares brasileiros são superiores ao valor calculado para pomares na Flórida (1,20) (Brandt-Williams, 2002), indicando que o sistema brasileiro é mais eficiente no ganho de energia primária.

Nos dois sistemas a Razão de Rendimento Emergético (EYR) decresceu ao longo da cadeia. No sistema convencional passou de 1,45 (laranja) para 1,25 (SLCC) e para 1,20 (suco diluído). Já no sistema orgânico passou de 1,66 (laranja) para 1,33 (SLCC) e para 1,27 (suco diluído), conforme apresentado na Figura 18.

Comparando-se os dois sistemas percebe-se que o sistema agrícola orgânico é capaz de disponibilizar 15% a mais energias primárias do que o sistema agrícola convencional. Entretanto, quando a cadeia toda é considerada, esta diferença cai para somente 6%. A diminuição na habilidade do sistema em capturar e disponibilizar energias primárias por unidade investida ocorre porque nas etapas de processamento e transporte

somente são utilizados recursos da economia sem incorporação de recursos da natureza, com exceção da água utilizada por estas etapas. Novamente, o desempenho da etapa agrícola é fundamental para o desempenho da cadeia como um todo e a melhora deste índice está ligado à diminuição da utilização de recursos da economia.

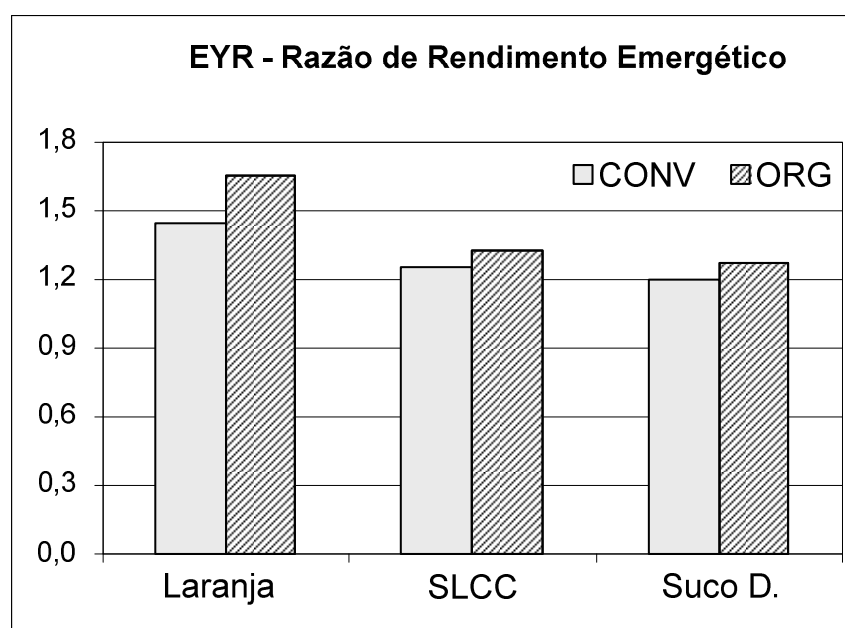


Figura 18: Razão de Rendimento Emergético dos produtos da cadeia de SLCC
Onde Suco D. é suco diluído pronto para beber

É interessante observar que os valores calculados para o suco de laranja diluído consumido na Europa são equivalentes ao valor obtido por Brandt-Williams (2002) para pomares na Flórida, 1,20.

Taxa de Carga Ambiental (ELR), razão entre a soma dos recursos não renováveis tanto da economia (F) quanto da natureza (N) e os recursos renováveis locais (R), é uma medida do impacto ambiental decorrente do sistema produtivo. Em teoria, se não ocorrem investimentos da economia, os fluxos emergéticos renováveis disponíveis localmente deveriam sustentar um ecossistema maduro sujeito às restrições impostas pelo meio ambiente, e neste caso ELR seria igual a zero. Quando ocorrem investimentos de fluxos emergéticos externos ao ecossistema, o padrão de desenvolvimento é diferente do ecossistema original. Desta forma, o ELR mede a distância entre o sistema em estudo e o ecossistema original e pode ser interpretado como o stress causado ao meio ambiente

pelo sistema produtivo. Quanto mais alto for seu valor, maior a distância do sistema original, e maior será o impacto, ou o stress no ecossistema associado. Segundo Brown e Ulgiati (2004) valores de ELR até 2 indicam sistemas de baixo impacto, valores de 2 a 10 indicam sistemas de impacto moderado. Já valores superiores à 10 estão associados a sistemas que causa grandes impactos ambientais,

A ELR do sistema orgânico é menor do que do sistema convencional (Figura 19), indicando que este sistema causa impacto menor ao meio ambiente. O sistema agrícola orgânico apresenta ELR igual a 1,7, enquanto que o sub-sistema agrícola convencional apresenta ELR igual a 2,5, valor inferior ao calculado para pomares da Flórida (4,17), (Brandt-Williams, 2002). Esta tendência foi observada por outros pesquisadores quando comparando sistemas orgânicos e convencionais (Ortega et al., 2002; Sarcinelli e Ortega, 2004).

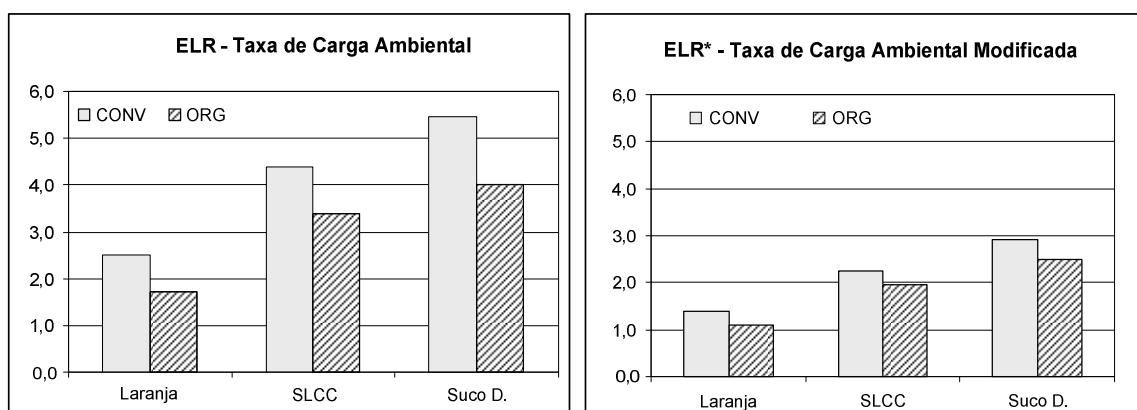


Figura 19: Taxa de Carga Ambiental e Taxa de Carga Ambiental Modificada para os produtos da cadeia de SLCC.

Onde Suco D. é suco diluído pronto para beber.

Os valores de ELR encontrados na literatura para sistemas agrícolas variam grandemente. Em geral sistemas convencionais apresentam valores entre 2 e 10, como por exemplo para soja convencional (Ortega et al., 2002); café (Sarcinelli e Ortega, 2004; Cuadra e Rydberg, 2006), grãos (Lefroy e Rydberg, 2003; Cavalett et al., 2006) e frutas (Bastianoni et al., 2001; Brandt-Williams, 2002). Sistemas orgânicos também apresentam variação de ELR, pois este tipo de manejo permite variadas técnicas e procedimentos. Por exemplo, Ortega et al. (2002) calcularam o ELR de produção orgânica de soja em 3,61. Já Sarcinelli e Ortega (2004) calcularam em 0,1 o ELR de produção orgânica de café.

Quando a cadeia toda é considerada, observa-se aumento de ELR com a inclusão das etapas da mesma. No caso do sistema convencional o ELR aumenta 117%, passando de 2,5 (laranja) para 5,5 (suco diluído), enquanto que no sistema orgânico aumenta 135% passando 1,7 (laranja) para 4 (suco diluído). Estes resultados indicam que os impactos causados pelas etapas industriais e de transporte são importantes, inclusive quando a etapa agrícola produza impactos considerados baixos. O trabalho indica que mesmo no caso do sistema orgânico que apresentou ELR inferior a 2, ou baixos impactos, o posterior processamento da laranja e transporte do suco resulta em um produto que causa impactos considerados moderados. Cuadra e Rydberg (2006) encontraram variação ainda maior entre o café em grão (7,7) e o produto processado para café solúvel (34,6).

Este resultado é importante uma vez que os produtores orgânicos têm utilizado o argumento de que em sua produção não agride o meio ambiente. A análise dos valores de ELR mostra que sistemas agrícolas orgânicos causam impactos menores do que os sistemas convencionais, porém as etapas de processamento industrial e de transporte são responsáveis por impactos superiores aos da etapa agrícola. Mesmo quando as parcelas renováveis dos recursos da economia são consideradas, a Taxa de Carga Ambiental Modificada é superior ao valor sugerido por Brown e Ulgiati como valor aceitável.

O Índice de Sustentabilidade (SI), definido como a razão entre EYR e ELR, é uma medida da contribuição potencial de um sistema (EYR) por unidade de carga ambiental, ou impacto ambiental (ELR), imposto à área ocupada pelo sistema. Em teoria o menor valor possível de SI é zero, quando ELR é infinito. Já o maior valor de SI, infinito, ocorre quando EYR tende ao infinito, situação que somente ocorre para ecossistemas maduros não explorados (F igual a zero). Portanto, quanto mais alto for o SI, menor o impacto por unidade de energia primária disponibilizada para a sociedade. Segundo Brown e Ulgiati (2004) valores de SI inferiores a 1 indicam sistemas que consomem recursos, enquanto que valores superiores a 1 indicam sistemas que contribuem com liberação de recursos para uso pela economia sem afetar o equilíbrio do meio ambiente. Assim, valores inferiores a 1 estão associados às economias altamente desenvolvidas e orientadas para o consumo, valores de SI entre 1 e 10 estão associados às economias em desenvolvimento, enquanto valores superiores a 10 indicam economias pouco desenvolvidas industrialmente.

Os valores calculados de SI para todos os produtos da cadeia de SLCC, tanto proveniente de sistema convencional como orgânico, foram inferiores à unidade, conforme apresentado na Figura 20. No sistema convencional o SI caiu de 0,58 (laranja), para 0,29 (SLCC), e para 0,20 (suco diluído). No sistema de produção orgânica o SI passa de 0,97 (laranja), para 0,39 (SLCC) e, finalmente, para 0,32 (suco diluído). Estes valores de SI indicam que, mesmo no caso do sistema orgânico, a contribuição do sistema produtivo para a sociedade é bastante pequeno. Ou seja, o impacto ambiental, ou as alterações causadas ao meio ambiente, é intenso, se comparado com a energia primária disponibilizada para uso pela sociedade.

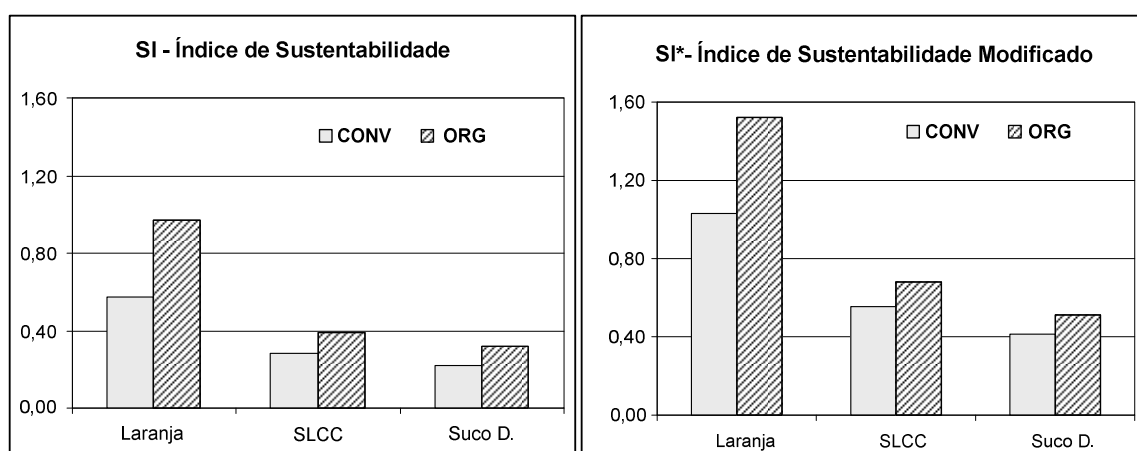


Figura 20: Índice de Sustentabilidade e Sustentabilidade Modificado dos produtos da cadeia do SLCC.

Onde Suco D. é suco diluído pronto para beber

Quando SI é calculado utilizando o ELR*, ou seja, considerando as porções renováveis dos recursos da economia, obtém-se o índice de sustentabilidade modificado (SI*). Apesar do SI modificado ser superior ao SI – 90% superior no sistema convencional e 70% no orgânico –, somente o SI* da etapa agrícola do sistema orgânico apresenta valor superior a 1.

Novamente, os resultados indicam que os impactos causados pela cadeia produtiva do suco de laranja orgânico consumido na Europa são significativos, não justificando a imagem que estes produtos têm de produtos que não agredem o meio ambiente.

A Razão de Investimento Emergético (EIR) é a razão entre recursos da economia e da natureza e indica o investimento da sociedade para produzir um bem, em relação à

contribuição da natureza. Pode ser utilizado para avaliar a eficiência, ou competitividade, de um sistema produtivo na utilização dos recursos investidos da economia. Comparando-se dois ou mais sistemas produtivos, aquele com menor EIR será o mais competitivo, uma vez que para cada unidade de recursos naturais utilizado, portanto sem custo financeiro, necessita investir um volume menor de recursos da economia.

Os produtos do sistema convencional apresentaram EIR superior aos produtos do sistema orgânico, indicando que os produtos orgânicos são mais competitivos do que os convencionais.

O EIR dos produtos da cadeia aumenta com a inclusão das etapas da cadeia, conforme apresentado na Figura 21. Considerando o sistema convencional o EIR passa de 2,24 (laranja) para 4,96 (suco diluído) que corresponde a um aumento de 120%. Para o sistema orgânico o aumento é de 140%, passando de 1,56 para 3,66.

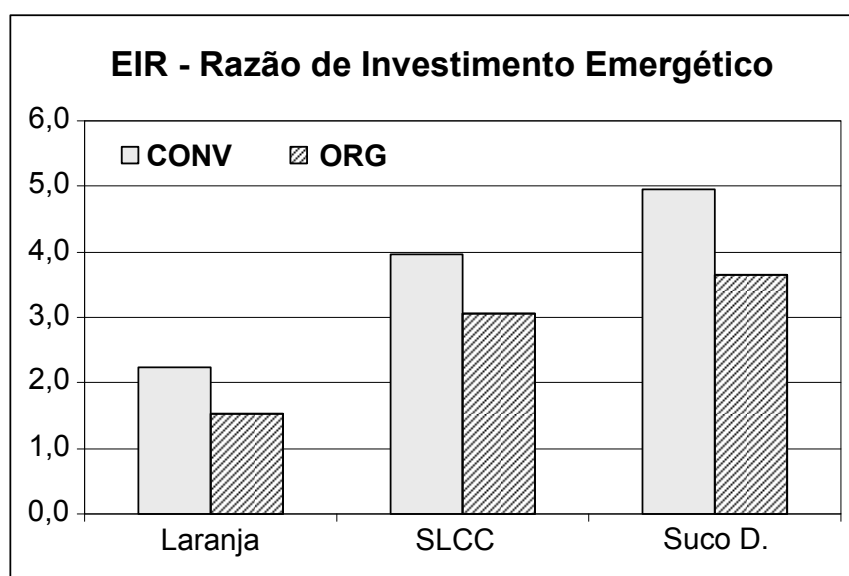


Figura 21: Razão de Investimento Emergético dos produtos da cadeia de SLCC
Onde Suco D. é suco diluído pronto para beber.

O aumento do valor de EIR ao longo da cadeia se dá pelo mesmo motivo que a modificação dos outros índices: nas etapas de processamento e distribuição ocorre incorporação de recursos da economia, sem utilização de recursos da natureza. Portanto o índice piora ao longo da cadeia. É interessante notar que parte da vantagem do sistema orgânico agrícola é perdida no processamento e no transporte do suco já que a diferença entre os índices é maior para a laranja do que para o suco diluído.

Razão de Intercâmbio de Energia (EER), definida como a razão de energia recebida em relação a energia fornecida em uma troca, indica a vantagem que um operador (vendedor ou comprador) leva em relação ao outro. Pode ser utilizada como uma medida de comércio justo já que uma troca equilibrada deveria resultar em EER próximo a 1, ou seja, o valor entregue pelo vendedor é igual ao valor pago pelo comprador. Em geral as matérias-primas, tais como minerais e produtos rurais tendem a ter um valor alto de EER, quando são comprados a preço de mercado, pois, geralmente, o valor monetário somente remunera os serviços humanos e não o extenso trabalho realizado pela Natureza (Brown e Ulgiati, 2004).

A Figura 22 apresenta graficamente os EER dos produtos da cadeia de SLCC para os dois sistemas, convencional e orgânico.

No caso da laranja, o EER é igual a 1 para os dois sistemas, indicando uma troca justa, ou seja, o produtor de laranja recebe como pagamento a mesma energia que entrega via venda das laranjas. Já os valores de EER do SLCC e do suco diluído são superiores à unidade para os dois sistemas. Nos dois casos os EER do sistema convencional são superiores aos do orgânico indicando que este último sistema tem uma troca mais justa. Este resultado se deve ao fato dos produtos orgânicos ter preço de venda superior aos convencionais.

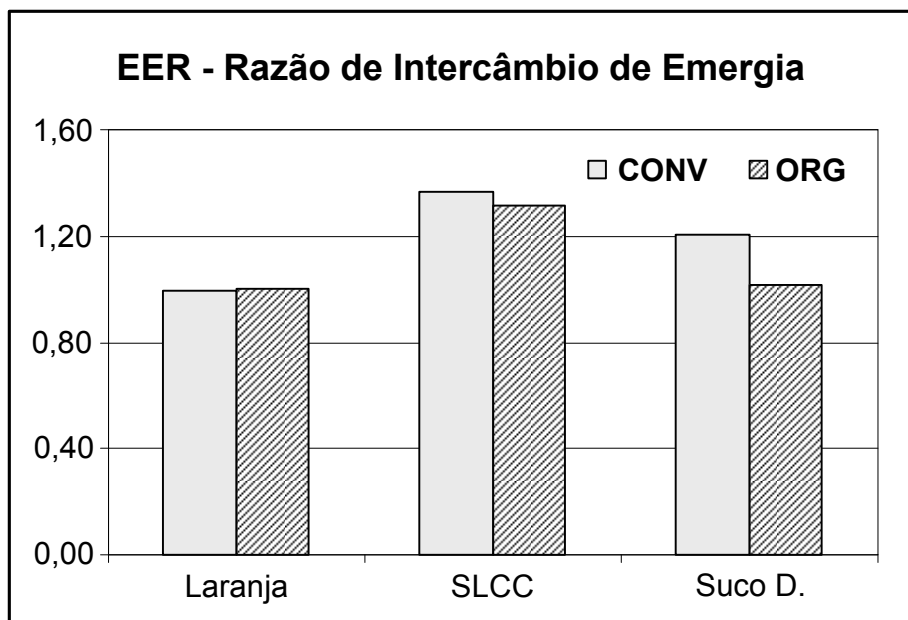


Figura 22: Razão de Intercâmbio de Energia dos produtos da cadeia do SLCC. Onde Suco D. é suco diluído pronto para beber.

O EER indica que o preço da laranja pode ser considerado justo. A etapa de processamento do SLCC, somada ao transporte da laranja, adiciona fluxos emergéticos ao sistema através do uso de equipamentos, insumos e energia que não é compensado pelo preço de venda do SLCC. O mesmo ocorre com a incorporação das etapas finais do sistema, transporte do SLCC e diluição do suco. E outras palavras, o preço do SLCC brasileiro não reflete o gasto emergético para produzi-lo e transportá-lo. Por outro lado, o suco de laranja brasileiro tem o mercado na Europa devido ao seu baixo preço.

O preço justo do SLCC, ou aquele que resultaria em EER igual a 1, é ao redor de seis vezes o preço praticado pelo mercado: U\$ 8900,00 por tonelada de SLCC, enquanto o preço atual é de U\$ 1300,00 por tonelada. Portanto, apesar de economicamente, o suco de laranja brasileiro ser um “grande negócio”, em termos emergéticos, os produtores brasileiros estão fornecendo muito mais recursos do que estão recebendo em troca através do pagamento monetário. O mesmo se dá no caso do suco diluído, quando o preço justo é três vezes o preço praticado.

5.3.2 – Resultados do Inventário do Ciclo de Vida

Os cálculos foram realizados considerando 1 litro de suco de laranja diluído embalado em embalagem cartonada como unidade funcional. No Apêndice 1 são apresentados os cálculos completos.

A Tabela 13 apresenta os consumos de recursos naturais e as emissões associadas à cadeia de produção e distribuição do suco de laranja diluído embalado em embalagem cartonada de 1 litro consumido na Europa a partir de SLCC brasileiro.

Tabela 13: Consumo de recursos e emissões da cadeia do suco de laranja

Indicadores de consumos	Convencional	Orgânico	Unidade ^b
Perda de solo por erosão	0,66	0,63	kg/UF
Uso da terra	0,60	0,75	M ² /UF
Consumo de água	96,72	112,9	l/UF
Consumo direto de combustível	0,08	0,07	l/UF
Equivalente de óleo combustível	0,18	0,15	kg óleo/UF
Demanda Energética	11,50	10,18	MJ/UF
Emissão de CO ₂	0,73	0,64	Kg CO ₂ /UF
Mão de Obra	0,005	0,005	h/UF

Unidade Funcional (UF) - 1 litro de suco de laranja diluído consumido na Europa.

Perda de solo que ocorre devido à erosão - Trata-se de um indicador importante, pois a perda de solo fértil leva à diminuição da capacidade produtiva das terras agriculturáveis, além de resultar em diminuição de taxas de infiltração de água, da capacidade de retenção de umidade, da diminuição do material orgânico, da biodiversidade do solo e da profundidade do solo (Lal, 2001). A erosão hídrica é um processo natural que ocorre mesmo em áreas naturais. Entretanto, sua intensidade pode variar grandemente dependendo do regime hídrico, topografia do terreno, natureza do solo e das práticas agrícolas (Lombardi Neto e Drugowich, 1994).

Em geral, a perda de fertilidade do solo é compensada com a incorporação de fertilizantes químicos, em especial fontes de nitrogênio. São muitas as consequências da crescente utilização de fertilizantes químicos. Em primeiro lugar a renovabilidade e, portanto, a sustentabilidade do sistema produtivo diminui, uma vez que os recursos não renováveis, em especial combustíveis fósseis, são utilizados em volumes maiores, tanto durante sua produção, como para seu transporte. Como consequência da utilização de maior volume de combustível fóssil ocorre aumento nas emissões de CO₂.

Em segundo lugar, o nitrogênio em excesso não é absorvido pelas plantas passando a contaminar tanto os ecossistemas terrestres como os corpos d'água. A poluição por nitrogênio resulta em eutrofização, ou o crescimento excessivo da biota aquática, que restringe o uso da água em várias atividades, e também em toxicidade humana, especialmente devido a contaminação do lençol freático por NO₂ (Cassol et al., 2002; Bertol et al., 2005)

Outra consequência importante do aumento do uso de fertilizantes é a diminuição do rendimento do agricultor devido à baixa produtividade e ao aumento do custo de produção associado à utilização dos fertilizantes. A pressão econômica pode ser suficiente para que o produtor procure outra cultura, ou até mesmo mude para uma atividade não agrícola, resultando em êxodo rural (Assis e Romeiro, 2005).

Os sistemas orgânicos apresentam perda de solo menor do que os convencionais devido à adoção de práticas mais adequadas. No caso dos pomares orgânicos a utilização de adubos verdes nas entre linhas, a manutenção da cobertura pioneira e a cobertura da coroa das plantas com palha, além de auxiliar no controle de pragas e na fertilização do sistema, diminui a perda de solo (Penteado, 2004)

A perda de solo considerada para os pomares convencionais foi de 11,2 toneladas de solo por hectare por ano (ECOAGRI, 2007) que resulta em uma perda de 0,66 kg de

solo por litro de suco de laranja pronto para beber. Para pomares orgânicos foi considerada 10,5 toneladas de solo por hectare por ano (Bertoni et al., 1972) que resulta em perda de 0,63 kg de solo por litro de suco pronto para beber. A diferença entre os dois sistemas é de 5%.

Este resultado deve ser avaliado considerando-se a área total destinada à citricultura no estado de São Paulo, ao redor de 600 mil hectares: somente na citricultura perde-se 6,5 milhões de toneladas de solo por ano.

Uso do solo indica a área necessária para a produção de uma unidade funcional expresso em metro quadrado por unidade funcional. Trata-se, também, de um indicador importante na avaliação da sustentabilidade da produção agrícola, pois a área terrestre, em especial a agriculturável, é um bem finito.

Segundo o relatório Planeta Vivo (WWF, 2006), num cenário sustentável a área necessária para produção de alimentos e bens, a geração de energia e serviços da natureza como infiltração de água, absorção e diluição das emissões e resíduos da atividade antrópica é de 1,8 hectares por habitante. O mesmo estudo estimou que já em 2003 havia em média um déficit de 0,45 hectares por habitante.

Ademais, este indicador é importante, não apenas por medir a superfície terrestre usada, mas também por indicar a área diretamente afetada pelos impactos e externalidades associados à cultura em questão. Por exemplo, a área ocupada por uma determinada cultura agrícola perde sua biodiversidade natural, tem sua capacidade de infiltração de água diminuída, tem maior perda de solo do que o sistema natural, entre outras consequências.

No presente estudo os valores calculados foram 0,6 m² por litro de suco de laranja convencional pronto para beber e de 0,75 m² por litro de suco orgânico. A área maior necessária para produzir o suco de laranja orgânico se deve à menor produtividade deste sistema. É importante salientar que este indicador traduz somente a área agrícola, não tendo sido incluídas as áreas necessárias para a fabricação dos insumos utilizados, nem para o processamento dos serviços da natureza. Wood et al. (2006) obtiveram o mesmo resultado comparando produtos orgânicos e convencionais na Austrália. Neste estudo também estimaram a área necessária para a produção dos insumos e mostraram que quando estas são acrescidas à área usada pela cultura agrícola, a área necessária para manter o sistema convencional é maior do que para manter o sistema orgânico.

Mattsson et al. (2000) estudaram o uso da terra por diferentes culturas e concluíram que se trata de um indicador importante no estudo da sustentabilidade agrícola. Por esse motivo, sugerem que sua avaliação não deve se restringir à superfície ocupada pela cultura, mas deve incluir também indicadores de qualidade do solo, como erosão, perda de biodiversidade, mudança da paisagem agrícola e, em especial, fertilidade do solo. Ou seja, sugerem que seja avaliada a transformação da área.

Os pomares de laranja do estado de São Paulo ocupam áreas que já eram cultivadas anteriormente por outras culturas, portanto não ocorreu perda de mata nativa direta. Entretanto, a prática agrícola é muito intensiva no uso de fertilizantes químicos e pesticidas que resultam em contaminação do solo e dos corpos d'água. Mais, o uso de fertilizantes vem aumentando nos pomares paulista, somente na última safra aumentou em 7,5% (Ferreira e Vegro, 2007), indicando queda na fertilidade dos pomares além de potencial maior de contaminação. Outro fator importante é a concentração da produção de laranja em grandes pomares pertencentes às empresas produtoras de SLCC que, verticalizando seus negócios, garante o suprimento de frutas (Neves e Lopes, 2004). Tal concentração resulta em pomares ocupando grandes áreas afetando a biodiversidade, favorecendo o aparecimento de pragas e consequente aumento de herbicidas.

Portanto, a qualidade do uso da terra pode ser considerada baixa, pois traz consigo externalidades importantes. Esta conclusão é bastante significativa, pois, no caso do suco de laranja, por se tratar de um produto de exportação brasileiro, a área usada pode ser considerada como um bem sendo exportado. Ou seja, através do suco de laranja, o Brasil exporta recursos sem custo financeiro, o solo agrícola, mantendo as externalidades negativas de sua exploração, de ordem regional, para ser absorvida por sua população.

Consumo de água – Tanto a produção agrícola como a indústria citrícola são grandes consumidores de água. Para a produção de 1 litro suco de laranja convencional são necessários 96,72 litros de água, enquanto que para a produção de suco orgânico este volume sobe para 112,9 litros. A diferença encontrada entre os dois sistemas se deve ao menor rendimento dos pomares orgânicos. Na verdade, o sistema orgânico utiliza volume 10% menor de água por hectare ($1800 \text{ m}^3/\text{ha.a}$) do que o sistema convencional ($2000 \text{ m}^3/\text{ha.a}$), utilizando-a em parte para a preparação de biofertilizantes.

Este resultado é expressivo, especialmente considerando que o maior consumo ocorre na etapa agrícola devido ao uso de irrigação, conforme apresentado na Tabela 14.

A utilização da irrigação se faz necessária para suprir a demanda hídrica do pomar. Parte desta deficiência é decorrente de alterações climáticas que causaram diminuição da pluviosidade, bem como aumento do período de estiagem e mudança da época das chuvas, prejudicando a floração e o desenvolvimento dos frutos. Uma medida para diminuir a necessidade de irrigação é a adoção de práticas que melhorem a qualidade do solo, mantendo sua umidade, como, por exemplo, manutenção da cobertura do solo. A fauna do solo também é importante, pois mantém o solo “vivo”, mantendo sua umidade. Assim, o uso de herbicidas, que elimina a vida do solo e que utilizado em grande escala na citricultura convencional, contribui para o aumento da necessidade de irrigação.

Tabela 14: Consumo de água por etapa da cadeia de SLCC

Etapa	Água ^a (l/ l suco)	
	Convencional	Orgânico
Agrícola	94,62	110,81
Industrial Brasil	0,56	0,56
Transporte SLCC	0,54	0,54
Indústria Europa	1,00	1,00
Total	96,72	112,9

^a – uso direto

Aqui é importante considerar que, além de ser um volume grande que deve ser captado ou de rio ou de poço, a água carrega em seu escoamento as substâncias químicas provenientes dos fertilizantes, pesticidas e herbicidas, contaminando os corpos d'água. O sistema orgânico de produção, apesar de consumir volume grande de água para sua produção, tem o risco de contaminação diminuído, pois nem a fertilização nem o controle de pragas é químico.

Consumo de combustível fóssil - foi estimado o consumo direto de combustível fóssil, medido em litros de combustível por unidade funcional, e o equivalente de petróleo, expresso em kg de óleo equivalente por unidade funcional. No primeiro caso foram considerados os volumes de combustível utilizados nas operações agrícolas, transporte da laranja até a indústria processadora, as etapas de transporte do SLCC e na etapa industrial de diluição do suco. No segundo caso, foram considerados os equivalentes de óleo para produzir os equipamentos (agrícolas e industriais), insumos, matérias-primas e

coadjuvantes de produção, além do uso direto de combustível.

Os dois índices são importantes. O primeiro permite avaliar a dependência direta do sistema na disponibilidade de combustíveis fósseis, considerando seu uso direto nas etapas da cadeia, principalmente produção agrícola e transporte do suco. Enquanto que o segundo aponta o volume total, direto e indireto, de combustíveis utilizados na produção, e distribuição do bem, considerando os processos que suportam a cadeia principal, permitindo, assim, uma avaliação da dependência do sistema a nível global.

O consumo direto de combustível fóssil é menor para o sistema orgânico (0,07 l de combustível/l de suco) do que o sistema convencional (0,08 l de combustível/ l de suco). Este resultado se mantém quando são incluídos os consumos indiretos de combustível. Novamente o sistema orgânico (0,15 kg de óleo equivalente/l de suco) consome volume menor de óleo equivalente do que o sistema convencional (0,18 kg de óleo equivalente/l de suco).

Esta diferença se dá na etapa agrícola, uma vez que as etapas subsequentes são iguais para os dois modelos. Nesta etapa o consumo direto de combustível no sistema convencional é de 610 l/ha.ano, aproximadamente 78% a mais do que o sistema orgânico que utiliza 340 l/ha.ano. Se os consumos indiretos são incluídos, o consumo do sistema convencional passa a 1900 kg de óleo equivalente/ha.ano, aproximadamente 86% superior ao consumo do sistema orgânico (1000 kg de óleo equivalente/ha.ano).

As diferenças encontradas no uso de combustível, direta e indiretamente, são decorrentes do uso mais intenso de equipamentos (aplicação de fertilizantes e herbicidas) que consomem combustível em sua operação, e devido ao uso mais intenso de materiais e serviços da economia, que consomem combustível para sua produção e transporte.

Quando a cadeia total é considerada e o resultado expresso em litros de suco, a diferença de consumo entre os dois sistemas cai porque a produtividade do sistema orgânico é menor.

Comparando a contribuição por etapa da cadeia no consumo direto de combustível, observa-se que, nos dois sistemas, as etapas industriais são aquelas com maior consumo direto de combustível fóssil, conforme apresentado na Figura 23. No sistema orgânico, a contribuição das etapas industriais e de transporte é igual em valores absoluto, entretanto, suas contribuições relativas são maiores, pois o consumo de combustível na etapa agrícola do sistema orgânico é menor do que no convencional. Este padrão se repete

para o consumo total de combustível.

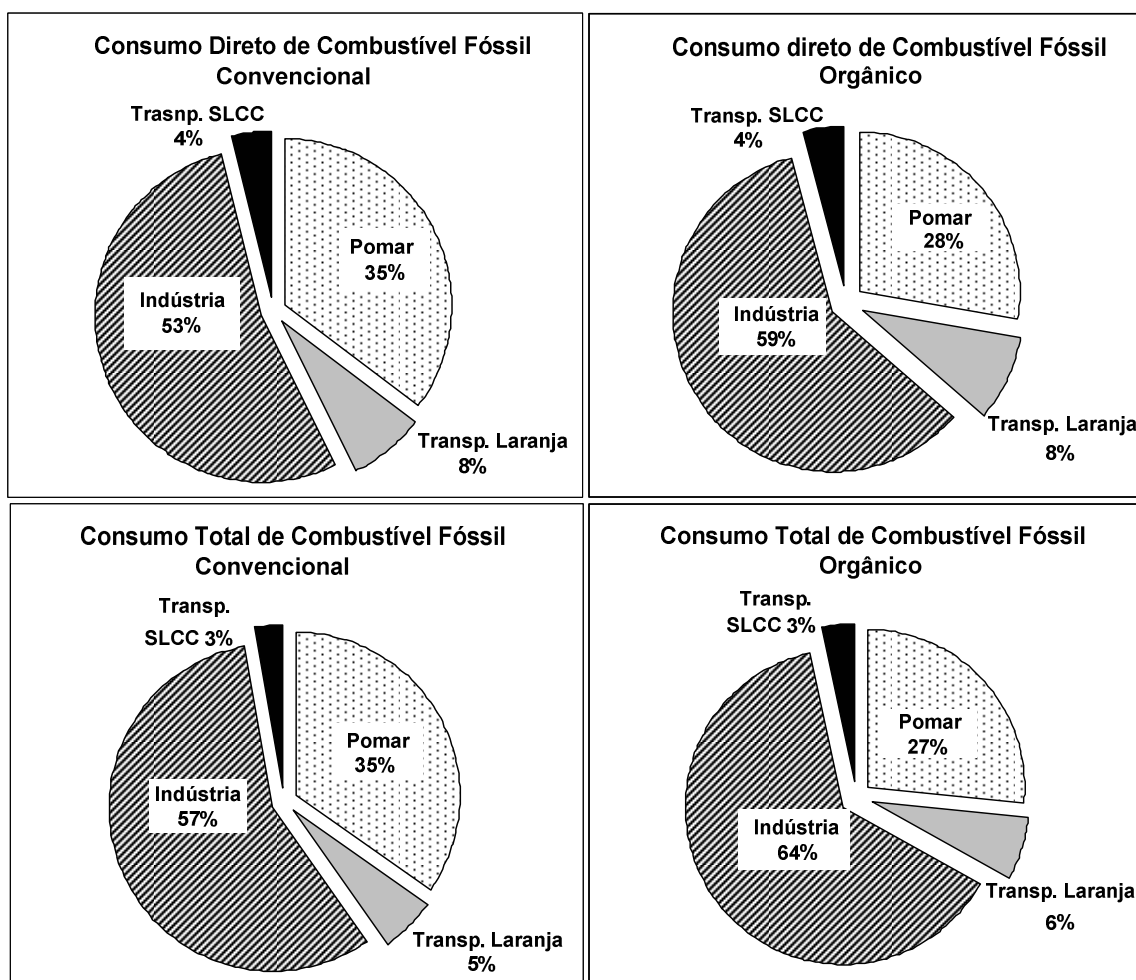


Figura 23: Consumo direto e total de combustível fóssil por etapa da cadeia de SLCC
Onde Transp. é transporte.

Apesar de menor, o consumo da etapa agrícola é também expressivo, mesmo para o sistema orgânico. As etapas de transporte são aquelas com menor consumo da cadeia de SLCC. Apesar de surpreendente, pois estão envolvidas grandes distâncias, este resultado se deve a logística deste setor. A utilização de transporte de grandes volumes de SLCC a granel, mesmo na etapa marítima, resulta em grande eficiência energética, além de diminuição dos custos operacionais. Outro fator importante é o fato do produto transportado, SLCC, ser bastante concentrado. Em outras palavras, o maior volume de água do suco de laranja, retirado pelo processo de evaporação, não é transportado. Assim, ocorre transferência de consumo de combustível que ocorreria nesta etapa para a

etapa de processamento industrial.

Nos dois casos o resultado é importante, pois indica a forte dependência da cadeia produtiva do suco de laranja em combustíveis fósseis. A produção agrícola da laranja, bem como seu processamento industrial, é dependente da utilização de combustível fóssil.

Demanda energética é o volume total de energia necessária para produzir uma unidade funcional. A energia utilizada na produção de alimentos pode ser dividida em uso direto e indireto. No uso indireto são contabilizados os combustíveis e a energia elétrica necessárias à produção dos insumos para a lavoura ou processo industrial (fertilizantes, calcário, mudas, ácido sulfúrico, lubrificantes etc.) e a energia necessária para a produção e manutenção de equipamentos e instalações.

O presente estudo calculou em 11,5 MJ por litro de suco de laranja diluído demanda energética do sistema convencional, sendo a demanda do sistema orgânico 14% inferior (10,2 MJ por litro de suco orgânico). Estes valores são superiores aos calculados por Carlsson-Kanyama et al., 2003) que o estimaram em 10 MJ/kg (ou 9,6 MJ/litro). Também são bastante superiores à demanda calculada por Schlich e Fleissner (2005) que a estimaram em 2,5 MJ/litro de suco de laranja.

As etapas industrial brasileira e agrícola são aquelas com maior demanda energética, 42% e 36% do total, respectivamente, no sistema convencional. No caso orgânico, as contribuições são 48% e 27%, respectivamente.

O modelo orgânico de produção demanda menor volume indireto de combustível na etapa agrícola, pois não utiliza fertilizantes e pesticidas. No presente estudo, considerando somente esta etapa, o sistema orgânico consumiu 46% menos energia do que o sistema convencional por hectare, porém esta diferença cai para 32% por kg de laranja produzido. Este resultado está consistente com o Relatório do DEFRA (Department for Environment Food and Rural Affairs) do Reino Unido (DEFRA, 2001) que comparou os gastos energéticos entre o sistema orgânico e convencional e concluiu que as culturas orgânicas demandam consumo menor de combustível fóssil por hectare cultivado do que as culturas convencionais. Entretanto, como a produtividade do sistema orgânico é menor, em algumas culturas o consumo por quilograma de produto é igual ou ligeiramente superior ao do sistema convencional.

Na etapa agrícola, portanto, a adoção de práticas mais ecológicas menos intensivas

no uso de insumos e materiais, e que utilizem mais recursos locais, contribui para a diminuição de sua demanda energética.

Entretanto, a partir do pomar, todas as outras etapas da cadeia são iguais para os dois sistemas, não havendo diferença no consumo de energia. A etapa industrial de processamento de SLCC é intensiva no uso de energia devido, principalmente, ao processo de evaporação e à necessidade de refrigeração para a estocagem do produto congelado. O óleo combustível é responsável por 82% da demanda energética desta etapa. As etapas de transporte do SLCC e de diluição também aumentam a demanda energética, independente do tipo de suco. Assim, a diferença da demanda energética entre o suco orgânico e convencional cai para somente 13% no ponto de consumo.

Na etapa industrial brasileira a utilização de outros combustíveis, como por exemplo, resíduos agrícolas como o bagaço, substituindo o óleo na geração de energia, pode reduzir a demanda energética da etapa. Porém, o consumo energético das etapas de transporte, não se alteram.

Carlsson-Kanyama et al. (2003) calcularam a demanda energética de diversos alimentos consumidos na Europa, incluindo produtos in natura (frutas, verduras e legumes, cereais, carnes e temperos) e produtos processados (cereais matinais, derivados do leite, bebidas, vegetais enlatados, entre outros). A demanda energética variou de 1.3 MJ/kg (mel da Suécia) até 220 MJ/kg (camarões sem casca). Os autores concluíram que a demanda energética depende da origem do produto, do grau de processamento, tecnologia de processamento e distância entre o produtor e consumidor. Considerando o padrão de consumo da Suécia, concluíram que, somente para suprir sua alimentação, os suecos demandam entre 13 e 50 MJ diariamente. Considerando-se a população européia de aproximadamente 760 milhões (UE, 2007), a demanda energética passa a ser de 10×10^9 MJ a 38×10^9 MJ diários, que corresponde a um consumo entre 250 a 900 milhões de toneladas de óleo diários somente para suprir o padrão de alimentação européia. Os autores sugerem que, visando a diminuição de emissões de gases de efeito estufa, deve-se adotar uma alimentação que inclua mais produtos frescos, ou menos processados, e, de preferência, produzidos localmente.

Considerando o trabalho de Carlsson-Kanyama e colaboradores, a demanda energética do suco de laranja brasileiro consumido na Europa é bastante elevada: apenas um litro de suco convencional corresponde a, pelo menos, 23% da demanda diária total de 50 MJ.

O mercado europeu é o principal destino do suco de laranja brasileiro. Como existe grande preocupação do consumidor europeu em relação aos impactos ambientais, notadamente as emissões de gases de efeito estufa, a diminuição do gasto energético devido a sua produção, agrícola e industrial, e ao seu transporte, constitui fator importante na manutenção deste mercado.

Emissões de CO₂ - A principal causa das mudanças climáticas do planeta é o elevado nível de emissões de CO₂ decorrente, principalmente, da queima de combustíveis fósseis (derivados de petróleo, gás natural, carvão, etc.), força motriz do sistema produtivo vigente. Sua concentração na atmosfera aumentou muito causando o que é conhecido como efeito estufa, ou o aquecimento da atmosfera terrestre devido aos gases que retêm os raios infravermelhos da luz solar. Tal aquecimento leva a inúmeras alterações climáticas.

Os sistemas produtivos vigentes de produção de alimentos são altamente dependentes em combustíveis fósseis. A agricultura é tanto uma fonte emissora como mitigadora de CO₂. A mitigação pode ocorrer pelo sequestro de carbono via material orgânico no solo. Porém, trata-se de um sequestro temporário, pois, conforme o solo é trabalhado, este carbono pode facilmente ser liberado. Por outro lado, grandes volumes de óleo combustível, gás e carvão são utilizados na produção e transporte de fertilizantes, pesticidas e maquinários, no uso direto nas operações agrícolas, para a irrigação e para o transporte de matérias-primas até o processador.

Igualmente, combustíveis fósseis são consumidos nas etapas de processamento, estocagem, transporte e distribuição dos produtos agrícolas. Novamente o consumo é tanto indireto, na fabricação e transporte de insumos, equipamentos e embalagens, e direto para a operação dos equipamentos e transporte. Em especial, nos casos de produtos congelados e de produtos transportados entre continentes, o consumo de derivados do petróleo é significativo.

Na etapa agrícola, modelos produtivos que utilizam grandes volumes de insumos (fertilizantes, herbicidas, etc.) e de materiais (equipamentos e maquinário) consomem, por consequência, maiores volumes de combustível do que sistemas que adotam práticas mais ecológicas, utilizando recursos locais e naturais. Como as emissões de CO₂ estão relacionadas ao consumo de combustível fóssil, estes sistemas, conseqüentemente, emitem maiores volumes de CO₂.

Segundo o relatório “*An assessment of the environmental impacts of organic farming*” (Shepherd et al., 2003) preparado para o *Department for Environment Food Affairs* do Reino Unido as culturas orgânicas emitem entre 30 e 50% menos CO₂ por hectare cultivado devido às diferenças nas práticas agrícolas. Tal diferença no volume emitido é grande o suficiente para compensar a menor produtividade do sistema orgânico.

Da mesma forma que na demanda energética, as emissões de CO₂ nas etapas de transporte e de processamento industrial são idênticas para os dois modelos, orgânico ou convencional, pois o processo é o mesmo, portanto o consumo de combustível fóssil também o é.

O presente estudo estimou em 1650 kg de CO₂ emitido por hectare cultivado de forma convencional, 45% superior ao emitido pelo sistema orgânico (930 kg de CO₂ por hectare). Esta diferença cai para 30% se a comparação for feita por quilograma de laranja e, para apenas 12% no caso de quilograma de suco diluído (0,73 kg de CO₂ emitidos por litro de suco de laranja convencional e 0,64 kg de CO₂ emitidos por litro de suco orgânico).

Os sistemas produtivos de alimentos são grandes consumidores de combustíveis e, portanto, também emissores de gases de efeito estufa, devido ao modelo de produção atual: produção em grande escala concentrada em poucas regiões e distribuição mundial. Neste modelo a produção agrícola é muito intensa no uso de materiais e serviços para permitir altas taxas de produtividade, garantindo a viabilidade econômica do sistema. Da mesma forma, processamento e embalagens, necessários para permitir esta distribuição, são grandes consumidores de combustíveis. Portanto, apesar de economicamente mais competitivo, este modelo, por sua base, não é sustentável do ponto de vista ambiental.

No presente estudo, o consumo energético, ocorrem principalmente nas etapas industriais (Figura 23) em especial na brasileira onde ocorre a evaporação e o congelamento do suco, processos que aumentam a vida útil do produto, além de reduzir o volume a ser transportado. Já as etapas de transporte, consomem menor volume relativo de combustível. No caso do SLCC, parte do gasto com combustíveis fósseis é, portanto, transferido da etapa de transporte para a etapa de processamento.

Pressão dos consumidores, sobretudo o consumidor europeu, bem como restrições regulatórias, levaram grandes processadores de alimentos a se comprometerem publicamente a diminuir as emissões de CO₂ causadas por seus produtos. Alguns

exemplos são Nestlé, Coca Cola, Pepsico, Dole Foods (bananas e abacaxi, e seus derivados), Cadbury (chocolates e bebidas), ADM (produtora de ingredientes para alimentos). Estas empresas propõem uma combinação de adoção de práticas agrícolas menos intensivas no uso de combustível fóssil, uso de fontes de energia renováveis (eólica e solar), programas de reflorestamento, manutenção de áreas de vegetação natural, uso de metano produzido pelo lixo gerado, melhoria na logística de transporte, entre outras.

Entretanto, todas estas medidas, não evitam que sejam consumidos volumes expressivos de combustível fóssil para produzir alimentos nos países menos desenvolvidos, processá-los, e transportá-los até os países onde serão consumidos. Portanto, podem melhorar a eficiência energética e diminuir as emissões totais, mas, devido ao seu desenho, produção concentrada e distribuição mundial, serão sempre grandes consumidores de energia e emissores de CO₂.

A demanda de mão-de-obra, expressa em horas empregadas por unidade funcional, indica a intensidade de uso de mão de obra. Este indicador é importante para avaliar a questão social, que leva em consideração a geração de postos de trabalho e a absorção de trabalhadores. Porém não avalia a qualidade do posto de trabalho gerado.

A Tabela 15 apresenta a intensidade de mão-de-obra por etapa da cadeia produtiva. As etapas industriais e de transporte utilizam a mesma demanda de mão-de-obra, independente do tipo de produto, orgânico ou convencional. Existe diferença na etapa agrícola, onde o sistema orgânico utiliza menos mão de obra. A princípio, este resultado é inesperado, pois a agricultura orgânica é conhecida por demandar mais intensamente o uso de mão-de-obra. Entretanto, a citricultura convencional, faz uso de forma mais intensiva de irrigação e de aplicação de herbicidas e pesticidas, operações que utilizam mão de obra. Daí a diferença entre os dois sistemas. Nos dois casos, entretanto, a maior demanda de mão-de-obra é para a colheita, ao redor de 70%.

A etapa industrial brasileira é aquela que mais demanda mão-de-obra, ao redor de 65% de toda a mão de obra empregada na cadeia do SLCC. Destes, 50% é mão-de-obra temporária empregada durante a safra da laranja que é de 6 meses.

Tabela 15: Demanda de mão-de-obra por etapa da cadeia produtiva de SLCC

Etapa	Demanda de mão de obra Convencional		Demanda de mão de obra Orgânico	
	(h/l suco)	%	(h/l suco)	%
Agrícola	$3,17 \times 10^{-4}$	5,8	$2,05 \times 10^{-4}$	3,8
Transporte Laranja	$7,83 \times 10^{-4}$	14,3	$7,83 \times 10^{-4}$	14,6
Indústria Brasil	$3,51 \times 10^{-3}$	64,1	$3,51 \times 10^{-3}$	65,4
Transporte SLCC	$2,71 \times 10^{-4}$	4,9	$2,71 \times 10^{-4}$	5,0
Indústria Europa	$6,00 \times 10^{-4}$	10,9	$6,00 \times 10^{-4}$	11,2
Total	$5,48 \times 10^{-3}$		$5,37 \times 10^{-3}$	

5.4. Conclusões

Os sistemas convencional e orgânico de produção de suco de laranja concentrado congelado (SLCC), produzido no Brasil e consumido na Europa foram avaliados e comparados combinando-se os índices das metodologias emergéticas e de ciclo de vida.

A diferença entre estes sistemas produtivos se dá na etapa agrícola, quando as práticas de produção são distintas. As outras etapas, desde o transporte da laranja, até o consumo final, são idênticas em termos de consumo de material e de serviços. Portanto, as diferenças nos índices ocorrem, na verdade, devido ao desempenho da etapa agrícola.

A laranja orgânica apresentou melhores resultados do que a convencional para todos os índices avaliados, com exceção do uso da terra: renovabilidade mais alta; maior rendimento emergético, menor taxa de carga ambiental, menor razão de investimento emergético, maior índice de sustentabilidade emergética, menor perda de solo, menor consumo direto de combustível, menor equivalente de óleo combustível (consumo total de combustível fóssil, direto e indireto) e menor emissão de CO₂. O consumo de água por hectare é menor no sistema orgânico, porém, quando avaliado por quilograma de produto, o resultado se inverte.

Portanto, como esperado devido a sua natureza, o sistema orgânico é menos intensivo no consumo de materiais e serviços, porém devido a sua menor produtividade por área de cultivo, alguns índices são piores do que os do sistema convencional quando

comparados por quilograma produzido.

A inclusão de etapas subseqüentes à produção agrícola aumenta o consumo de recursos da economia, materiais e serviços, sem aumentar a utilização de recursos da natureza. Por esse motivo, o suco de laranja diluído é menos sustentável do que o SLCC, que por sua vez é menos sustentável do que a laranja. O melhor desempenho do produto orgânico se mantém para o SLCC e para o suco diluído. Porém, a diferença entre eles cai com a inclusão de etapas da cadeia.

Nos dois sistemas a etapa agrícola é aquela com maior consumo de fluxos energéticos. Também nos dois sistemas, são os serviços da economia, em especial os impostos e taxas, os maiores fluxos utilizados pelo sistema.

Também nos dois sistemas, a etapa industrial brasileira é aquela com maior demanda energética e, conseqüentemente, a que gera maiores emissões de CO₂. Em segundo lugar fica a etapa agrícola, também no Brasil.

As etapas de transporte, surpreendentemente e apesar das grandes distâncias envolvidas, consomem menos combustíveis e, portanto, emitem menos CO₂ para a atmosfera do que a etapa agrícolas e do que as etapas industriais.

Os resultados indicam que a cadeia do suco de laranja produzido no Brasil e consumido na Europa, embora extremamente eficiente na utilização de energia e no aproveitamento de resíduos, especialmente na etapa industrial, não é sustentável.

Além de utilizar grandes volumes de recursos provenientes da economia, 80% do total, também representa grande impacto no meio ambiente. Até mesmo o subsistema agrícola, bem como o modelo orgânico de produção, apresentaram desempenho fraco devido à intensa utilização de materiais e serviços, especialmente combustível fóssil, nesta etapa.

A melhora do desempenho ambiental da etapa agrícola pode resultar em melhora de toda a cadeia, como observado comparando-se o modelo orgânico e o modelo convencional. Como a diferença entre os dois modelos ocorre na etapa agrícola, uma vez que todas as etapas seguintes são idênticas, e considerando que esta é também a etapa com maior contribuição para o sistema, o melhor desempenho do sistema orgânico se deveu ao desempenho da etapa.

Os impactos da etapa agrícola, majoritariamente locais ou regionais, produzem externalidades que recaem sobre o Brasil e que não são adequadamente remuneradas

pelo preço internacional do SLCC. Portanto, a diminuição destes impactos, por exemplo, pela adoção do modelo orgânico, é mais vantajoso para o Brasil, pois pode diminuir tais externalidades, além de agregar mais valor ao produto uma vez que o mercado externo, em especial o europeu, valoriza este tipo de produto.

Em âmbito global, a vantagem da adoção de práticas mais sustentáveis, é perdida pela intensidade do processamento industrial do suco e pela necessidade de transporte, de tal forma que a diferença entre os impactos do suco diluído orgânico e do convencional é muito pequena.

A cadeia de SLCC, portanto, é extremamente dependente e sensível ao preço e à disponibilidade de combustível fóssil.

A diminuição desta dependência depende da adoção de modelos produtivos agrícolas mais sustentáveis e melhorias na eficiência energética das etapas industriais e de logística de distribuição, e na adoção de fontes renováveis de energia. Entretanto, devido ao modelo de produção e distribuição, esta cadeia sempre será grande consumidora de recursos, especialmente de fontes energéticas.

6. Avaliação da Cadeia do Etanol de Cana-de-açúcar

6.1. Introdução

A cana-de-açúcar (*Saccharum officinarum* L.) é uma planta da família das gramíneas cultivada em regiões tropicais e subtropicais e, devido a sua composição apresentada na Tabela 16, é a base para a produção de açúcar e álcool. Acredita-se que tenha chegado ao país em 1532 na expedição de Martim Afonso de Souza e, tendo encontrado condições ambientais extremamente favoráveis, transformou-se em cultura comercial de grande sucesso.

Tabela 16: Composição média da cana-de-açúcar

Composição	Teor (%)
Água	65-75
Açúcares	11-18
Fibras	8-14
Sólidos solúveis	12-23

Fonte: COPERSUCAR, 2006

Segundo Mallet et al. (2000) a cana-de-açúcar é matéria-prima de aproximadamente 100 produtos, porém seus principais derivados são o açúcar e o álcool. Os sub-produtos desta indústria também possuem valor econômico expressivo, como é o caso do bagaço utilizado como combustível na geração de energia, na fabricação de papel (como pasta de celulose) e na alimentação animal; e da vinhaça, resíduo da destilação utilizado como fertilizante.

Diferentes tipos de açúcares podem ser produzidos sendo que seu mercado é tanto industrial, nos segmentos de alimentos e bebidas, como doméstico. Seu valor econômico depende do mercado a que se destina.

No caso da produção de álcool são três grandes grupos de produtos: álcoois neutros, utilizados na fabricação de bebidas, cosméticos e produtos farmacêuticos; álcool etílico hidratado carburante (AEHC), mistura hidroalcoólica com no mínimo 92,6º GL, mas chegando até 96ºGL, usado para consumo direto como combustível em automóveis; e álcool etílico anidro carburante (AEAC), apresentando no mínimo 99,3º GL, adicionado à gasolina para formar combustível conhecido como “gasool” (gasolina brasileira “aditivada”

com álcool anidro). (COPERSUCAR, 2006; UNICA, 2006; Macedo, 2007).

Além destes produtos principais, vários outros produtos podem ser fabricados a partir da cana. Comercialmente são produzidos adoçantes (frutose, glucose, sorbitol e glicerol), ácidos orgânicos (ascórbico, cítrico, glucônico e láctico), aminoácidos (MSG, lisina, treonina), enzimas e extratos de leveduras, entre outros. Porém, já se encontra em avançado desenvolvimento outras possibilidades de utilização, tanto da cana como de seus subprodutos, para a produção de uma série de outros co-produtos, como por exemplo, polímeros para embalagens. A previsão é que a médio e longo prazo as usinas passem a operar como “bio-refinarias”, utilizando integralmente a cana, a palha e o bagaço na geração de múltiplos produtos (Mallet et al., 2000; Macedo, 2007).

6.1.1. Agroindústria Canavieira

Historicamente a cana desempenha papel de grande importância econômica e social no Brasil. Durante o período colonial o açúcar foi o principal produto agrícola de exportação brasileiro. Desde então o setor tem experimentado períodos de crescimento expressivo, bem como de crises causadas principalmente por super produção, momentos em que, via de regra, o Estado intervém, sempre em favor dos usineiros.

Segundo Vian (2003) o setor passou por quatro fases distintas. Na primeira a Coroa Portuguesa era sócia dos produtores na fundação do engenho e o açúcar era comercializado somente com a Metrópole, Portugal. Na segunda fase Portugal incentivou a produção do açúcar, mas impôs-lhe significativa limitação e taxou fortemente sua comercialização. Na terceira, após a independência, o Estado brasileiro adotou uma política mais liberal, deixando a atividade à iniciativa privada, tanto investimentos como produção e comercialização, e criando incentivos para a exportação e a modernização do complexo sucroalcooleiro. Na quarta fase, após a década de 30 do século XX, o Estado passou a ser intervencionista adotando medidas de planejamento e controle da produção de açúcar. Em todas estas fases as políticas adotadas visavam garantir bons preços para os produtores, além do escoamento do produto brasileiro no mercado externo.

Em 1933 o Instituto do Açúcar e do Alcool (IAA) foi criado, passando a regular o setor, além de controlar a produção de açúcar, incentivar a modernização e expansão da agroindústria canavieira, e a fomentar as exportações. A criação do IAA é um marco da intervenção estatal no setor, que anteriormente ocorria como resposta às crises e que, a

partir deste momento, passa a ser definitiva e permanente (Vian, 2003). É importante salientar que um dos objetivos e funções do IAA, desde sua criação era fomentar a fabricação de álcool para a adição à gasolina, que ocorria desde 1931. Inicialmente o percentual de adição era de 5%. Desde então os percentuais de adição têm variado ao longo dos anos de acordo com diretrizes políticas energéticas e em função dos preços do açúcar e do álcool no mercado externo.

Em 1975 foi lançado o Proálcool, Programa Brasileiro de Álcool, com o objetivo de estimular a substituição da gasolina por álcool produzido a partir de cana e, assim, diminuir os impactos da crise do petróleo. Nesta época o setor sucroalcooleiro apresentava capacidade ociosa, os preços externos do açúcar eram baixos e o Brasil importava 80% do petróleo que necessitava. O programa, além de promover a substituição em larga escala de gasolina por álcool também determinou a adição de álcool anidro à gasolina na proporção de até 25%. Ainda previa o incentivo à produção de álcool através do aumento da produção agrícola, da modernização e ampliação do complexo industrial, incluindo a instalação de novas destilarias anexas às usinas ou autônomas e de unidades de armazenamento do álcool. Na primeira fase do Programa, o IAA atrelou o preço do álcool ao do açúcar, 44 litros de álcool equivalendo a uma saca de 60 kg de açúcar, e disponibilizou financiamentos para a instalação de destilarias a juros bastante vantajosos. Já em 1978 surgiram os primeiros carros movidos exclusivamente a álcool. Como consequência, a área plantada com cana-de-açúcar e o rendimento médio por hectare aumentaram continuamente, conforme apresentado na Figura 24.

O projeto inicial do Proálcool previa o uso de várias matérias primas além da cana, como a mandioca e o sorgo sacarino, produzidos em pequenas propriedades rurais. Desta forma, além de seu objetivo principal, a autonomia energética brasileira, o projeto tinha um componente social, favorecendo a fixação do homem no campo. Entretanto, a força política dos usineiros, usando como argumento a ociosidade das usinas, a alta produtividade agrícola da cana e o curto prazo para a implantação do projeto, conseguiu que a cana-de-açúcar fosse apresentada como matéria-prima principal do programa.

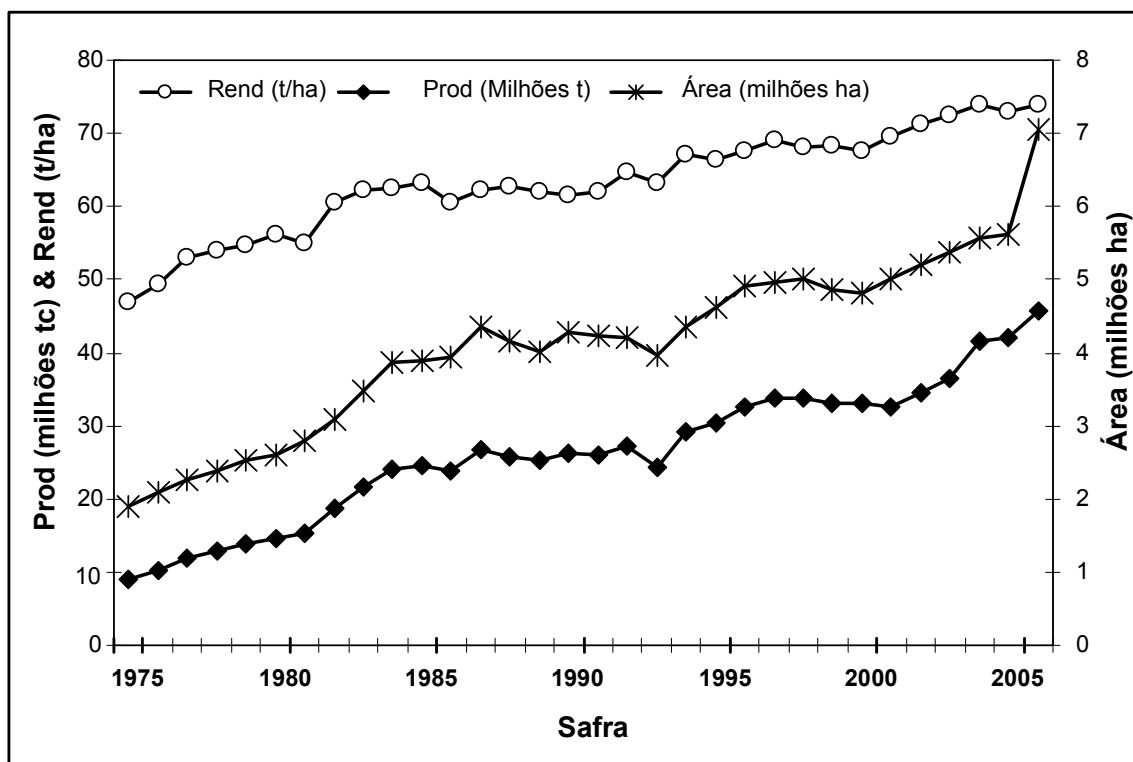


Figura 24: Evolução da área plantada, produção e rendimento da cana-de-açúcar.

Fonte: MAPA, 2007.

Em 1979 ocorre o Segundo Choque do Petróleo e, como resposta, o Proálcool é ampliado através de maiores incentivos à instalação de destilarias e melhorando a relação de preço do álcool em relação ao açúcar. Também a partir de 1979 o governo passou a incentivar a compra de carros a álcool reduzindo impostos, concedendo financiamentos subsidiados e fixando o preço de venda do álcool em 50% do preço da gasolina. Em decorrência destas medidas, a produção e uso de carros a álcool aumentou significativamente no país, sendo que entre 1985 e 1989 mais de 75% dos automóveis produzidos pelas montadoras brasileiras eram movidos por este combustível (ANFAVEA, 2007). Como resultado deste novo cenário, o setor sucroalcooleiro experimentou expressivo crescimento e ocorreu diminuição significativa das importações de petróleo ao longo da década de 80 (Moreira e Goldemberg, 1999; Vian, 2003; MAPA, 2007).

Entretanto, após crescer continuamente na primeira metade desta década, a produção de álcool combustível apresenta estagnação na segunda metade principalmente devido aos baixos preços pagos aos usineiros (Figura 25) (Rosillo-Calle e Cortez, 1998). Este fato, juntamente com outros fatores como a recuperação dos preços do açúcar no

mercado internacional, a reversão do preço do petróleo, que sofreu forte queda a partir de 1985, incertezas quanto à política governamental para o setor e ao aumento da produção de petróleo nacional, levam ao desabastecimento de álcool combustível no país. Em 1989 o país importou metanol para garantir o suprimento do mercado. A escassez de álcool, que afetou grande parte dos usuários de carros no país, abalou sobremaneira o Proálcool e gerou grande insegurança dos consumidores resultando em queda da procura e, conseqüentemente, da produção de carros à álcool na década de 90. Entre 1998 e 2000 a produção de carros à álcool caiu para aproximadamente 1% (Rosillo-Calle e Cortez, 1998; Vian, 2003; ANFAVEA, 2007).

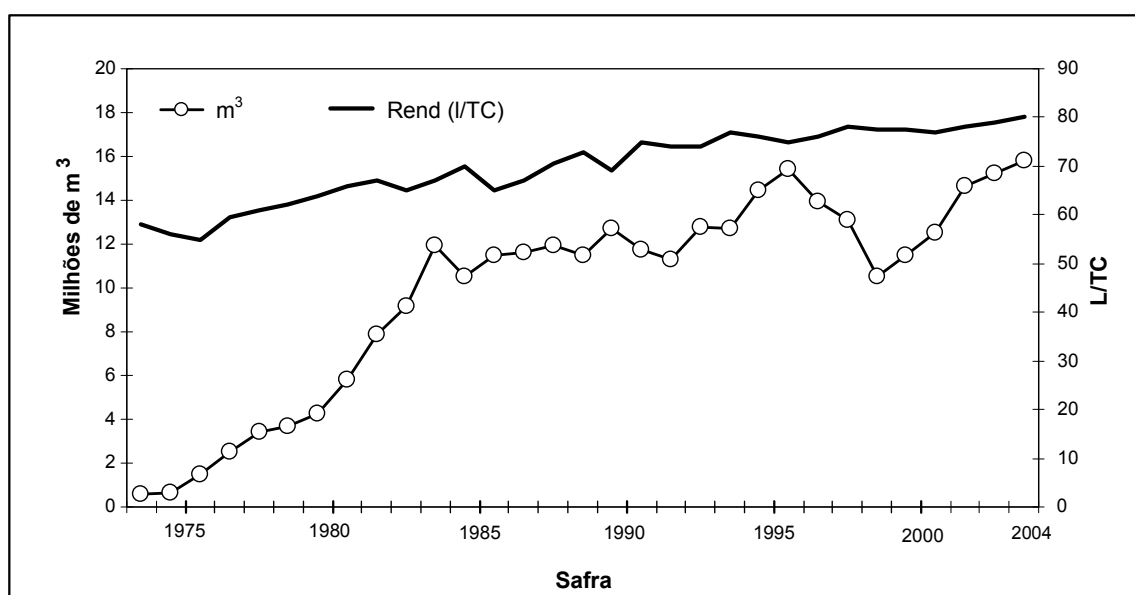


Figura 25: Evolução da produção de álcool combustível no Brasil
Onde TC é Tonelada de cana. Fonte: MAPA, 2007

A partir da década de 90 o setor foi gradualmente desregulamentado. O IAA foi extinto e o controle e planejamento do setor passou para o Conselho Interministerial do Álcool. O preço do açúcar foi liberado em 1991 e gradualmente ocorreu a flexibilização dos preços do álcool, primeiramente do anidro até a total liberação do preço do álcool hidratado e da cana em 1999. Este período foi caracterizado por grande embate entre os usineiros, cada vez mais organizados e cartelizados, e o governo. O preço do álcool combustível sofreu grande variação decorrente de superprodução e posterior diminuição de fornecimento praticado pelos usineiros. Com os preços de venda próximo aos custos de produção, e sem o protecionismo do Estado, os usineiros foram forçados a dar um

salto em termos de produtividade para garantir sua competitividade (Moreira e Goldemberg, 1999; Vian, 2003; Goldemberg et al., 2004). Devido às pesquisas incentivadas pelo Proálcool desde 1975, várias inovações tecnológicas foram introduzidas, tanto na etapa agrícola - como por exemplo a utilização de novas variedades de cana, uso de controle biológico, otimização das operações de corte, carregamento e transporte da cana e mecanização da colheita, como na etapa industrial, através do uso integral dos subprodutos na geração de energia e na fertilização da lavoura, melhora na tecnologia de extração e fermentação e da automação industrial (Vian, 2003; Macedo, 2007). A Figura 26 apresenta a evolução do rendimento agrícola e industrial apresentado pelo setor sucroalcooleiro após a introdução do Proálcool em 1975.

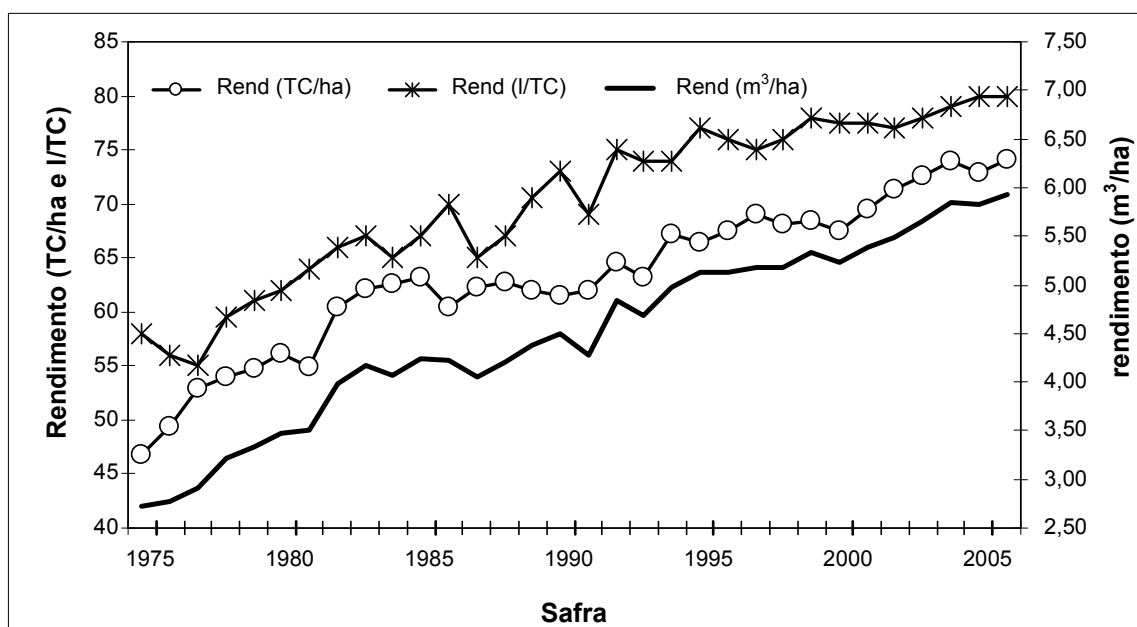


Figura 26: Evolução da produtividade agrícola e industrial da cana-de-açúcar
Onde TC é Tonelada de cana. Fonte: MAPA, 2007.

Simultaneamente, o mundo se conscientizou do esgotamento das reservas de petróleo enquanto continuava o aumento da demanda mundial de energia. O impacto da poluição causada pela queima de combustível fóssil, também passou a ser preocupação mundial. A partir de 1999 o álcool passou a ser visto como uma opção viável de substituição à gasolina. Passou a crescer novamente seu consumo no mercado interno, que a partir de 2003 passou a contar com carros de tecnologia Flex, veículo movido a gasolina, álcool ou uma mistura dos dois combustíveis (Vian, 2003; Goldemberg, 2007).

O Brasil, pioneiro no uso de etanol combustível em larga escala, é hoje o maior produtor mundial de cana-de-açúcar e seus produtos. Em 2005 foi responsável por 34% da cana, 18,5% do açúcar e 36% do etanol produzido no mundo (FAOSTAT, 2007; MAPA, 2007). Também é líder nos setores relacionados à sua produção como implementos agrícolas, equipamentos industriais, tecnologia de produção, motores automotivos (Farina e Zylbersztajn, 1998; BNDES, 2003; Vian, 2003).

A região Nordeste Brasileira foi a principal região produtora de cana-de-açúcar do país desde o período colonial até meados de século XX, quando São Paulo passou a liderar sua produção. Devido à grande extensão territorial brasileira, a safra brasileira é praticamente ininterrupta sendo que na região Norte/Nordeste ela se dá de novembro a abril, e na região Centro/Sul se dá de abril/maio a novembro. Conforme mostrado na Figura 27, a localização das usinas produtoras de açúcar e álcool está concentrada no litoral dos estados do Nordeste, no estado de São Paulo e na região norte do estado do Paraná. Entretanto, observa-se a expansão da cana para outras regiões, notadamente para os estados de Minas Gerais, Mato Grosso do Sul, Goiás e Mato Grosso. Expansão que pode afetar biomas importantes, como o pantanal e a floresta amazônica (Gardini, 2007).

Hoje, o setor sucroalcooleiro brasileiro movimenta cerca de R\$ 40 bilhões por ano, correspondendo à aproximadamente 2,35% do PIB nacional e gerando ao redor de 3,6 milhões de empregos diretos e indiretos, além de incluir mais de 70.000 agricultores. Na safra 2004/05 380 milhões de toneladas de cana produziram 24 milhões de toneladas de açúcar e 15 bilhões de litros de álcool (Farina e Zylbersztajn, 1998; Vian, 2003; UNICA, 2006).

A cana-de-açúcar é o principal produto agrícola do estado de São Paulo, representando 36% do valor da produção agrícola do estado. Na safra 2004/2005 o estado de São Paulo produziu 255 milhões de toneladas de cana proveniente de 3,6 milhões de hectares de cultivo. Deste total, aproximadamente 40% foi destinado à produção de açúcar e 60% à produção de álcool, sendo que a grande maioria das usinas do estado (ao redor de 90%) tem capacidade para a produção dos dois produtos, podendo definir seu mix de produto de acordo com o mercado consumidor (IBGE, 2007; IEA, 2007).



Figura 27: Localização das usinas sucroalcooleiras.

Fonte: Gardini, 2007

O açúcar é um importante e tradicional produto da pauta de exportação do Brasil desde o século XVI, sendo o maior exportador mundial, com fatia de mercado de 28%. Em 2006 as exportações brasileiras de açúcar representaram 6,2 bilhões de dólares sendo que os principais destinos foram África, Europa Oriental (em especial a Rússia), e o Oriente Médio. São Paulo lidera a produção de açúcar sendo responsável por aproximadamente 65% da produção nacional, seguido por Alagoas (8%), Minas Gerais (7%), Paraná (6%) e Pernambuco (5%). O principal destino do açúcar paulista é a Rússia (12%) e os Emirados Árabes (12%), seguidos pela Índia. Espera-se que as exportações brasileiras aumentem devido à decisão da OMC favorável ao Brasil, Tailândia e Austrália determinando o fim dos subsídios à produção de açúcar por parte da União Européia (Perez e Torquato, 2006).

Em 2006 a produção brasileira de álcool foi da ordem de 15,8 bilhões de litros.

Destes, 13,3 bilhões (ou 85%) foi destinado ao mercado interno. São Paulo liderou as exportações, sendo responsável por 60% do volume exportado, ou 1,4 bilhões de litros, através do porto de Santos. Os principais destinos de exportação do álcool brasileiro são Japão, Índia, Holanda e Coréia do Sul, Estados Unidos (terceiro destino no caso da produção paulista) e Suécia. A Índia concentrou sua importação nas safras 2004/2005 devido a grande quebra de sua produção (Torquato e Perez, 2006; MAPA, 2007).

As exportações de álcool dependem dos preços tanto do mercado interno como do externo que, por sua vez, dependem de diferentes fatores de mercado - tamanho das frotas nacional e internacional, mercado internacional do açúcar e fatores técnicos -, área plantada de cana, logística de distribuição e fatores políticos, em especial a pressão de alguns mercados por combustíveis mais “limpos e políticas energéticas”.

A União Européia, por exemplo, determina que seja adicionado 2% de álcool à gasolina, sendo que a partir de 2010 este percentual subirá para 6%. Os Estados Unidos aprovaram legislação que obriga a adição de 5% de álcool até 2013. No Brasil o percentual de adição de álcool anidro à gasolina é atualmente de 25%. Tais políticas energéticas devem resultar em aumento da procura e consumo de álcool combustível. Estima-se que em 2010 o Brasil estará produzindo ao redor de 27 bilhões de litros, sendo que 18% desta produção deverá ser destinada à exportação (BNDES, 2003; Petrobrás, 2006; Torquato e Perez, 2006).

Devido ao grande número de produtos e possibilidades de distribuição, a cadeia da cana-de-açúcar é bastante complexa. Um resumo desta cadeia produtiva, considerando os vários produtos e suas formas de comercialização, é apresentada na Figura 28.

A presente pesquisa focará o estudo do ciclo de vida na cadeia de álcool hidratado carburante devido a dois fatores principais: a) o volume produzido pelo estado de São Paulo e sua grande importância na matriz energética nacional; b) crescente demanda internacional devido aos benefícios ambientais decorrentes da sua utilização como combustível carburante em substituição aos combustíveis fósseis.

CADEIA SUCROALCOOLEIRA

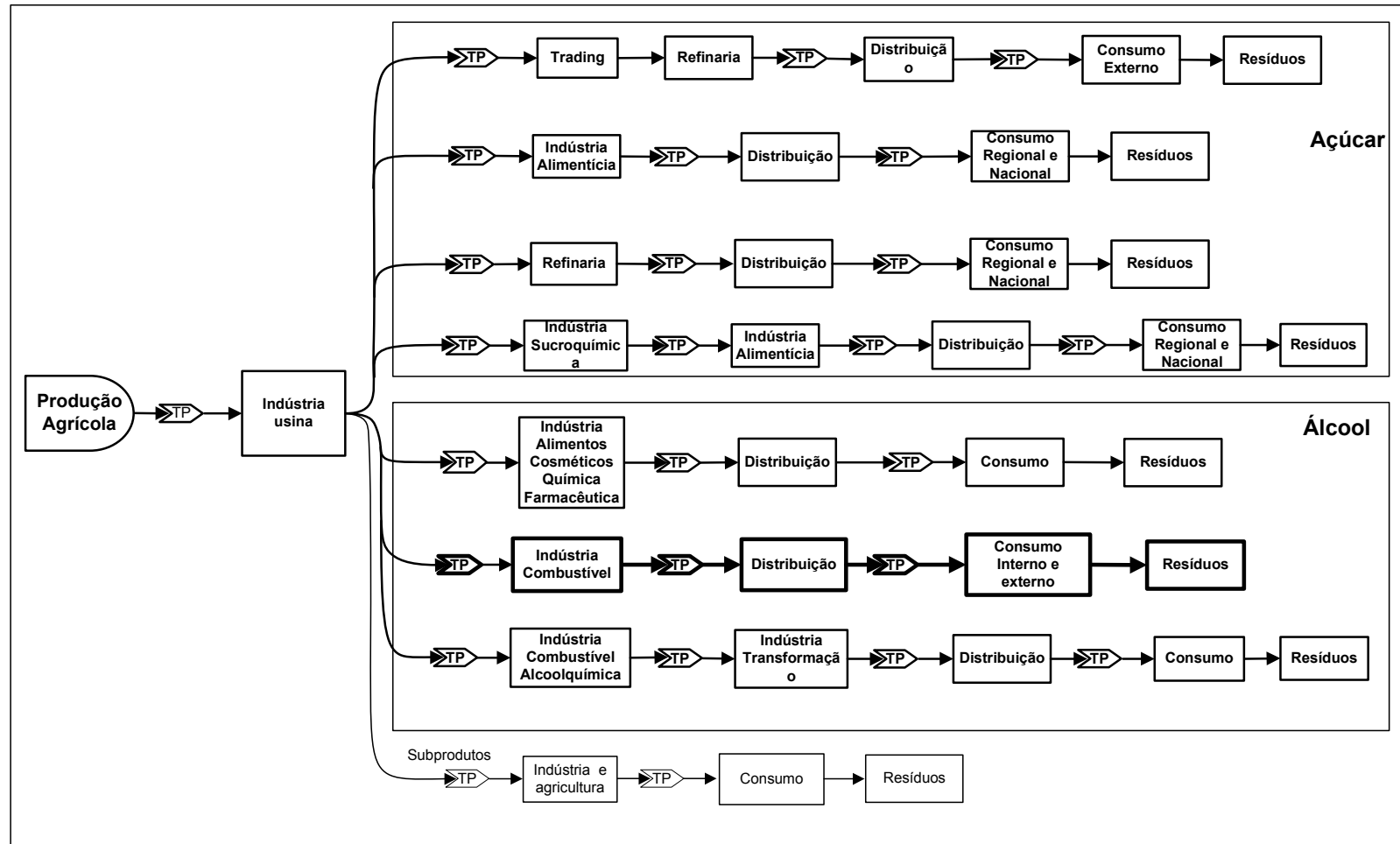


Figura 28: Diagrama resumido da Cadeia produtiva da Cana-de-açúcar.

O caminho em negrito foi aquele abordado pelo presente estudo. Onde TP – transporte

6.1.2. Cadeia produtiva do álcool combustível

O álcool hidratado tem dois destinos: o nacional (85%) e a exportação (15%) (MAPA, 2007). O maior volume do álcool produzido pelo estado de São Paulo é consumido pelo mercado interno. Assim, apesar do crescente aumento das exportações devido, principalmente, às pressões por combustíveis mais limpos que têm aumentado nos países desenvolvidos, decidiu-se estudar o ciclo de vida do produto utilizado no mercado interno.

Esta cadeia produtiva inclui: produção agrícola, transporte da propriedade agrícola até a usina, processamento do álcool, armazenagem do álcool, transporte até o distribuidor, estoque, transporte até o posto de venda e consumo via utilização em automóveis, conforme apresentado na Figura 29.

A produção de cana-de-açúcar ocupa 3,6 milhões de hectares no estado de São Paulo sendo caracterizada pelo uso intensivo de insumos, equipamentos e energia. As práticas agrícolas da cana, cujo ciclo de produção é de 5 a 7 anos, incluem as operações de preparo do solo, plantio (manual ou mecanizado), fertilização (pela adição de fertilizantes químicos e dos subprodutos das usinas sucroalcooleiras), controle de pragas (via aplicação de agrotóxicos) e colheita (IAC, 1994). A Figura 30 apresenta o diagrama típico de uma fazenda produtora de cana-de-açúcar e será utilizado como base para a análise emergética desta etapa do processo.

A colheita é uma etapa importante da fase agrícola de produção da cana-de-açúcar. Pode ser manual, quando é muito intensiva no emprego de mão-de-obra, ou mecânica. No caso da colheita manual, tradicionalmente é feita a queima do canavial com o objetivo de facilitar esta operação, aumentando o rendimento do corte e evitando problemas com animais peçonhentos. Entretanto, tal procedimento resulta em liberação de grandes quantidades de CO₂ e CH₄. A adoção de colheita mecanizada elimina a necessidade de queima, porém resulta em grande diminuição de uso de mão-de-obra resultando em desemprego e, devido à declividade do terreno, está limitada a certas regiões produtoras. Outros benefícios da colheita da cana crua são o aumento da cobertura vegetal do solo, diminuindo a erosão e aumentando a infiltração de água (Furlani Neto et al., 1997).

CADEIA PRODUTIVA DO ÁLCOOL DE CANA-DE-AÇÚCAR

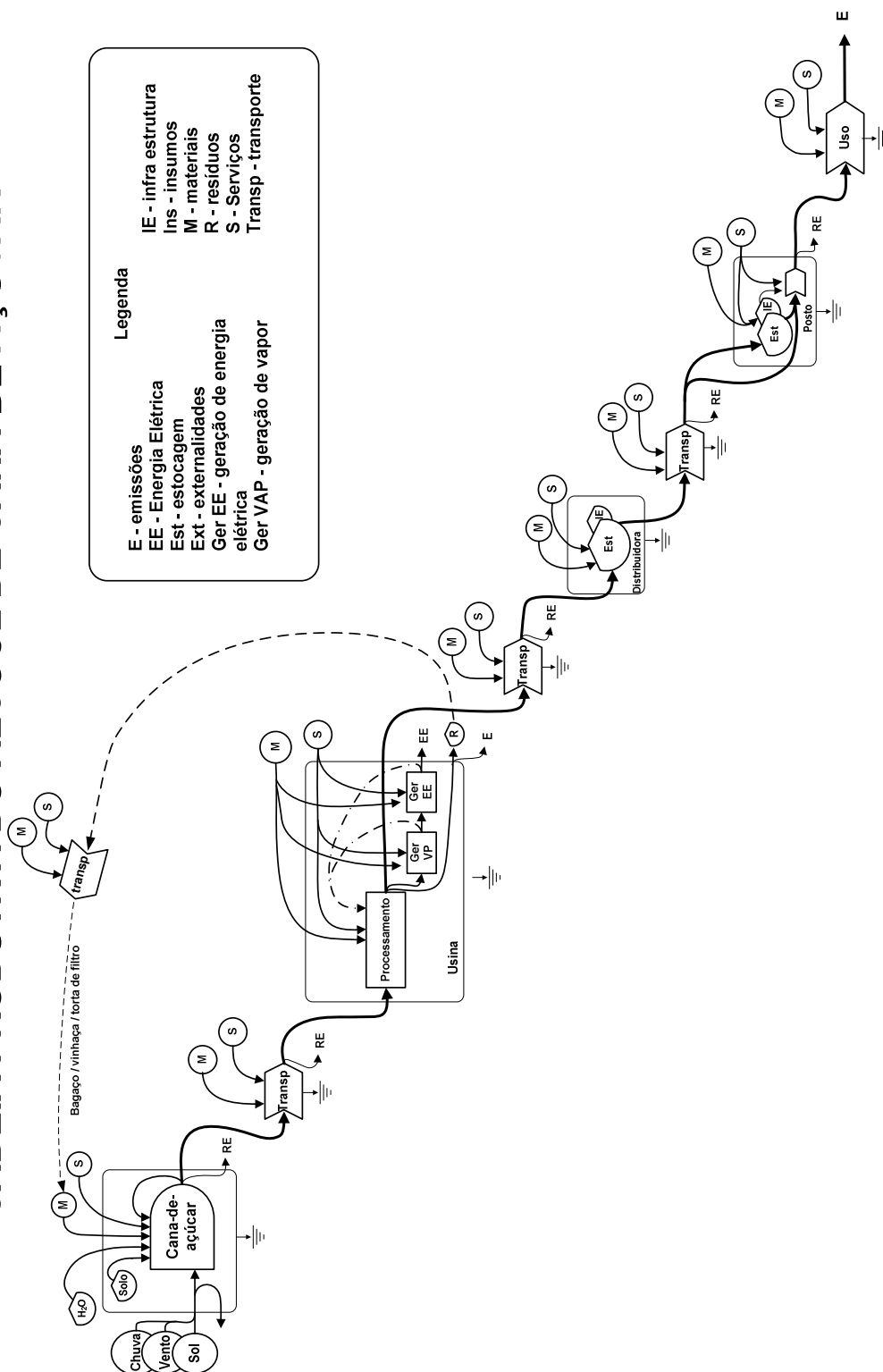


Figura 29: Diagrama resumido da cadeia produtiva do Alcool etanol Combustível

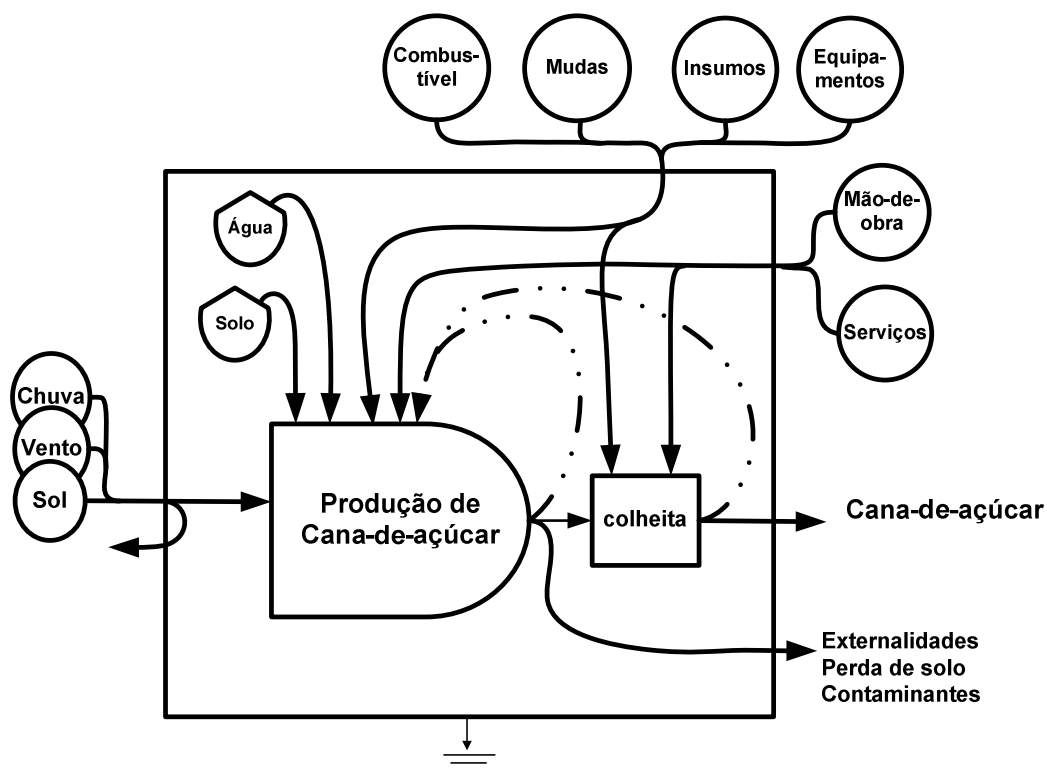


Figura 30: Diagrama da etapa agrícola da produção da cana-de-açúcar.

O transporte da cana até a usina é feito a granel por caminhões do tipo Romeu e Julieta, caminhão plataforma acoplado a um reboque com capacidade de 25 toneladas; treminhão, caminhão plataforma acoplado a dois reboques com capacidade de 35 toneladas; e Rodotrem, formado por um cavalo mecânico, um semi-reboque e um reboque, com capacidade 50 toneladas. A distância entre a unidade produtora e a usina não, em geral, é superior a 50 km sendo em média 40km (Farina e Zylbersztajn, 1998; BNDES, 2003).

As operações industriais que acontecem na usina foram agrupadas em três subgrupos: extração do caldo, produção de álcool, e geração de vapor e energia. Para a realização do presente estudo foi considerada uma usina autônoma, ou seja, que processa a cana para produção exclusiva de álcool. Os subprodutos da etapa industrial são reciclados pela etapa agrícola, através da fertilização da lavoura, conforme apresentado na Figura 31.

Diagrama do Sistema Produtivo de Álcool

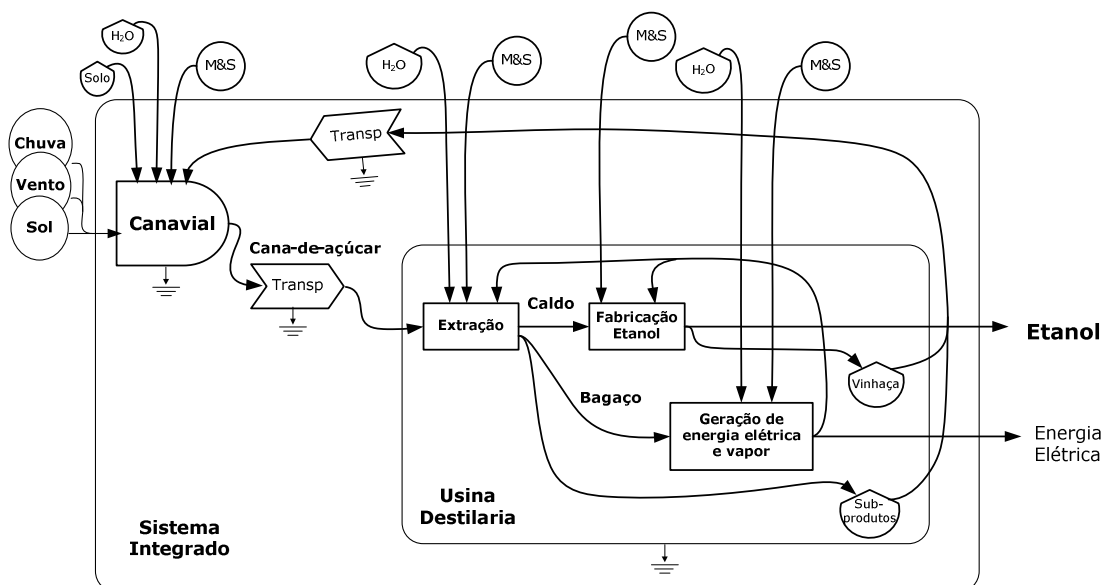


Figura 31: Diagrama resumido das etapas agrícola e da destilaria de álcool.

A primeira etapa do processamento a extração do caldo, apresentada na Figura 32, inclui o recebimento, quando são coletadas amostras para análise de ATR⁵, que determinará o preço a ser pago pela cana, pesagem e descarregamento dos caminhões, lavagem, e a extração propriamente dita, composta por desintegração, desfibrção e esmagamento. Os produtos desta etapa são: o caldo misto, o bagaço utilizado na geração de vapor e de energia elétrica, água suja, argila, e resíduos que retornam ao campo para a fertilização.

O segundo sub-sistema da usina é o da produção de álcool, conforme apresentado na Figura 33, e é composto pelas seguintes etapas: 1) tratamento do caldo; 2) preparação do mosto com a adição de produtos químicos, mel ou xarope e água; 3) fermentação do caldo quando são adicionados levedura e aditivos e é produzido vinho com aproximadamente 9,5% de álcool; 4) centrifugação do vinho para a separação do fermento (leveduras); e 5) destilação do vinho para a produção do álcool. Os produtos desta etapa são o álcool, a vinhaça e a torta de filtro também utilizadas para a fertilização das lavouras de cana-de-açúcar. A levedura é recuperada e a água quente passa por

⁵ Açúcar Total Recuperável

resfriamento para ser novamente utilizada na etapa de fermentação.

Extração do Caldo - Diagrama Detalhado

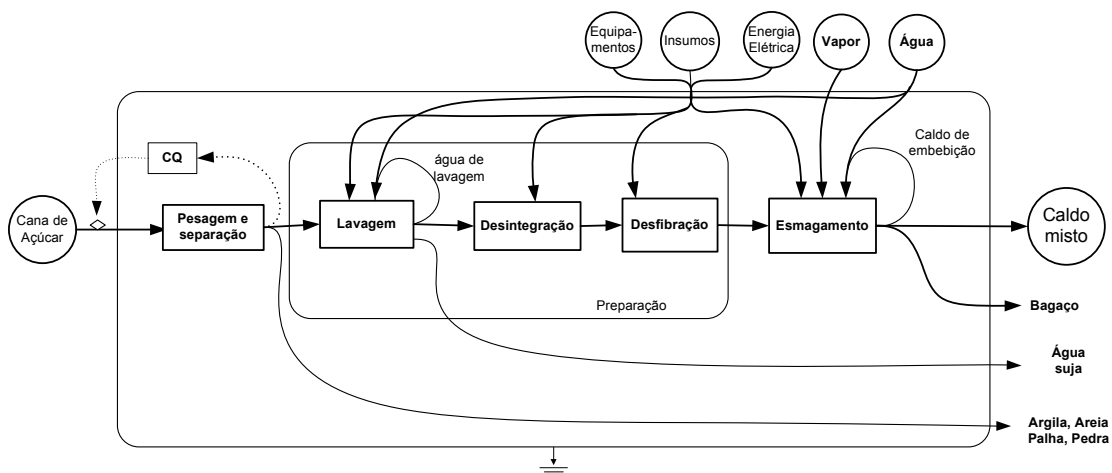


Figura 32: Diagrama detalhado da etapa de extração do caldo

Fabricação do Álcool - Diagrama Detalhado

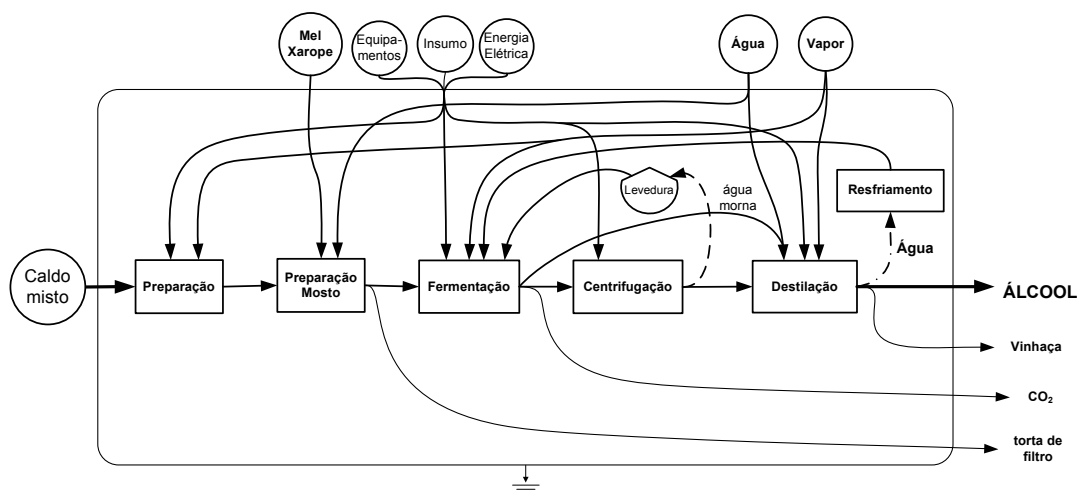


Figura 33: Diagrama detalhado da etapa de produção do álcool.

O terceiro e último sub-sistema da usina é o de geração de vapor e de energia elétrica, conforme apresentado na Figura 34. Nesta etapa o bagaço proveniente da extração do caldo é queimado gerando vapor de alta pressão que será utilizado nas etapas de processamento, e também na geração de energia elétrica, que resulta em vapor de escape, de menor pressão, igualmente utilizado nas etapas produtivas da usina.

O álcool produzido é estocado em tanques na própria usina que o fornece para as distribuidoras de combustível. O álcool é enviado tanto para bases coletoras primárias como secundárias e, a partir deste momento, a sua distribuição segue a logística de distribuição de combustível (gasolina e diesel): de bases primárias o combustível é transferido às bases secundárias e das bases secundárias é entregue aos postos combustíveis. Na primeira etapa, até as bases primárias, o transporte é feito via transporte ferroviário ou rodoviário, sendo que para o álcool este último representa 70% do fornecimento. No estado de São Paulo esta distância é, em média, de 150 km e o transporte é feito utilizando-se caminhões tanques com capacidade de 35.000 litros (Ometto, 2005; Figueiredo, 2006).

Caldeira e Turbogenerador - Diagrama Detalhado

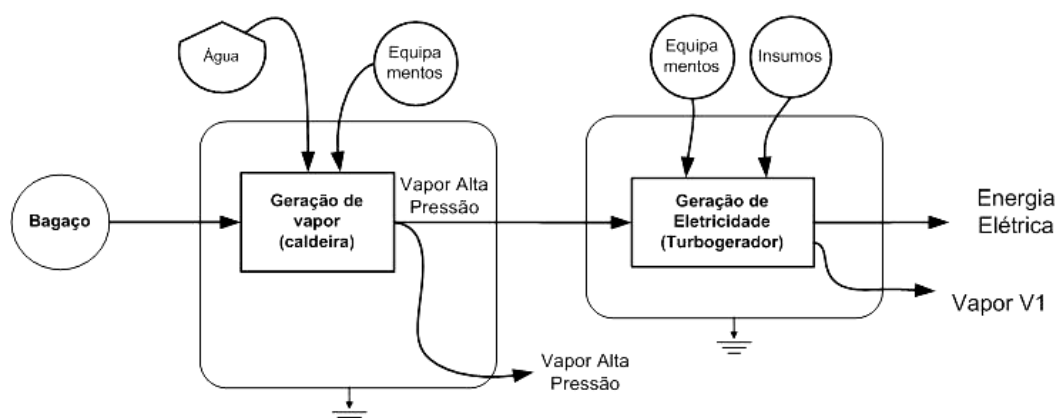


Figura 34: Diagrama detalhado da etapa de geração de vapor e energia elétrica.

As transferências para as bases secundárias são feitas para manter os estoques próximos aos mercados consumidores sendo que aproximadamente 33% do álcool produzido é consumido fora de seu estado produtor. Assim, esta etapa corresponde, via de regra, a grandes distâncias. As transferências são feitas por uma combinação de

modais que inclui transporte ferroviário, rodoviário, via alcoolduto e, também, por transporte fluvial (Cunha, 2003; Figueiredo, 2006). No momento a logística de distribuição de álcool é o gargalo da cadeia e a incorporação de alcoodutos, integrados aos outros modais, diminuiria até 40% no custo de transporte, porém depende de investimentos em dutos, estações de bombeamento e tancagem para estocagem (Andrade, 2007).

Partindo das bases de distribuição, as entregas aos postos são 100% rodoviárias e de curta distância, sendo que aproximadamente 80% delas tem percurso inferior à 200 km (Cunha, 2003; Figueiredo, 2006).

6.2. Materiais e Métodos

Os dados necessários para a realização da análise emergética e de ciclo de vida, incluindo equipamentos, mão de obra e taxas e impostos, foram obtidos através de entrevistas com profissionais da área, fabricantes de equipamentos, insumos e embalagens e da literatura. A Tabela 17 apresenta os dados de cada etapa e as fontes de informação utilizadas nos cálculos. Os dados considerados foram relativos à safra 2005/2006.

A produtividade anual do canavial varia bastante dependendo do corte. No presente estudo foi considerada a produtividade média da área considerando 6 cortes. Para a safra 2005/2006 diferentes valores de produtividade média foram encontrados na literatura, 74 t/ha (IBGE, 2007) e 77 t/ha (Agrianual, 2006), 85 t/ha (MAPA, 2007). Assim, o valor observado na visita a campo, 80 por hectare por ano e 6 cortes, foi o utilizado no estudo.

Considerou-se o manejo convencional do canavial sendo a fertilização feita com os subprodutos de usinas, vinhaça e torta de filtro, e complementada com fertilizantes químicos. Nesta etapa também foram considerados os fluxos emergéticos, materiais e serviços, relativos ao transporte dos fertilizantes e dos subprodutos.

A colheita foi considerada como 85% manual com queima do canavial e 15% mecanizada, conforme condição encontrada na visita a campo. Nesta etapa foram incluídos os fluxos relativos ao transporte de mão-de-obra para a colheita.

Tabela 17: Dados utilizados na análise emergética da cadeia produtiva de álcool

Etapa	Características	Fonte de informações utilizadas
Agrícola	Nº de cortes: 6 cortes Produção média: 80 t /ha Manejo: convencional Fertilização: vinhaça, torta de filtro e fertilizantes químicos Transporte dos subprodutos: incluído Colheita: 85% manual 15% mecânica	Dados: Visita a campo Literatura
Transporte da cana	Distância média: 40 km Capacidade por viagem: 60 t	Entrevistas - produtores Fabricante caminhões e pneus
Usina de açúcar e álcool	<u>Capacidade:</u> 8100 t /dia <u>Produção:</u> 100% da cana para álcool • 82 l de álcool/TC • 270 kg bagaço/ TC • 35 kg de torta de filtro • 10 l de vinhaça por l de álcool • 190 kg de outros subprodutos/ TC • 450 m³ de águas residuárias/h	Visita a Usina Fornecedores de equipamentos Entrevistas - Técnicos Literatura
Distribuição SP	Transporte até Base Primária: • Distância: 150 km • Caminhão tanque • Capacidade: 30 000 litros Distribuição até Posto Combustível • Distância média: 100 km • Capacidade: 26.000 litros	Entrevista: transportadoras e técnicos da área Fabricante de caminhão e pneus Agência Nacional de Transportes Literatura
Distribuição MT	Transporte até Base Primária: • Distância: 150 km • Caminhão tanque • Capacidade: 30 000 litros Transferência até Base secundária • Distância: 1500 km • Caminhão tanque • Capacidade: 60 000 litros Distribuição até Posto Combustível • Distância média: 100 km Capacidade: 26.000 litros	Entrevista: transportadoras e técnicos da área Fabricante de caminhão e pneus Agência Nacional de Transportes Literatura

Foi considerada uma usina autônoma com capacidade de esmagamento de 8200 toneladas/dia e com produtividade de 82 litros de álcool por tonelada processada. A produtividade utilizada corresponde à média apresentada no Balanço Nacional da Cana-de-Açúcar e de Bioenergia (MAPA, 2007). Valores semelhantes foram encontrados na literatura, 80 l/TC (Lamonica, 2005), 85 e 87 l/TC (Macedo e Koller, 1997), bem como na usina visitada (80 l/TC).

A energia elétrica e a geração de vapor foram consideradas como geradas a partir de bagaço da cana, proveniente da extração do caldo, conforme apresentado na Figura 34, portanto, foram considerados como reciclagem dentro do sistema não aparecendo como fluxo deste sub-sistema. Da mesma forma, a vinhaça e a torta de filtro são totalmente recicladas para a etapa agrícola, conforme apresentado na Figura 31.

A etapa de distribuição do álcool foi estudada considerando-se dois cenários: consumo final no estado de São Paulo e consumo final no estado do Mato Grosso. No primeiro caso foram consideradas somente a etapas de transferência até a base primária e a entrega ao posto distribuidor, ambas rodoviárias, porém utilizando caminhões tanques com capacidades diferentes, 35 e 26 mil litros respectivamente.

No caso de consumo no estado do Mato Grosso, além destas duas etapas, também foi incluída no cálculo a etapa de transferência entre a base primária e a secundária. Também esta etapa foi considerada rodoviária, porém utilizando rodotrem com capacidade de 60 mil litros por viagem (Guerra, 2006)

O Fluxograma completo do processamento industrial de álcool é apresentado no Apêndice 2 onde também são listados os equipamentos utilizados nestas operações.

6.2.1 Análise Emergética da cadeia produtiva

A análise emergética da cadeia produtiva foi realizada, conforme descrito por Odum (1996), em quatro etapas: (a) Preparação de um diagrama do sistema estudado com identificação dos fluxos de entrada, de saída e internos ao sistema, ou inventário do sistema; (b) Análise dos fluxos identificados; (c) Obtenção dos índices emergéticos; (d) Interpretação dos índices emergéticos. A renovabilidade parcial dos recursos provenientes da economia foram considerados, conforme descrito por Ulgiati et al. (1995) e Ortega et al. (2002). Os cálculos foram realizados considerando como base 1 hectare de área plantada. Os sub produtos da cadeia, vinhaça, bagaço e torta de filtro, não foram

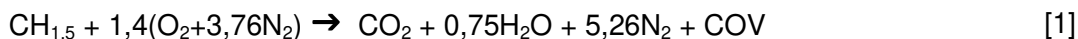
considerados nos cálculos, pois se tratam de fluxos internos ao sistema estudado.

6.2.2 Inventário do Ciclo de Vida da cadeia produtiva

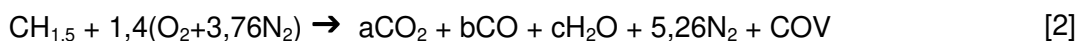
Complementando a Análise Emergética, foi realizado estudo dos consumos de recursos naturais, demanda energética e das emissões associadas à cadeia produtiva, que corresponde à etapa de inventário da metodologia de Avaliação do ciclo de vida. Este estudo é importante para o estudo dos impactos ambientais, uma vez que não restringe a análise aos processos produtivos da cadeia, mas inclui também todos os processos necessários para suportar a produção e transporte das matérias-primas utilizadas pela cadeia.

No presente estudo foram calculados os consumos dos seguintes recursos naturais: água (uso direto), solo (perda de solo por atividade agrícola), uso da terra (área necessária para o plantio da matéria-prima principal), consumo direto de combustível fóssil, óleo equivalente que considera o consumo total – direto e indireto – de combustível fóssil. Também foram calculadas as demandas energéticas e de mão de obra para a cadeia. Como saídas do sistema foram consideradas as emissões de CO₂ decorrentes da queima da cana para a colheita, da perda de solo (oxidação do solo), do uso direto de combustível fóssil e da queima de combustível durante os processos que suportam a cadeia (uso indireto). Os cálculos da oxidação do solo perdido por erosão foram realizadas conforme descrito por Ulgiati (2001).

Os cálculos de emissões de gases devido à queima direta de combustíveis foram baseados na equação de combustão completa de hidrocarboneto.



E na equação de combustão considerando os outros compostos formados durante este processo:



Os valores de “b”, “c” e COV (compostos orgânicos voláteis) foram determinados utilizando-se os dados do “CORINAIR Emission Inventory Guidebook” (Manual de Inventário de emissões CORINAR) (CORINAR, 2002). Os valores de “a” foram determinados pela relação estequiométrica da equação 2.

No caso da queima de combustível fóssil pelos sistemas que suportam a cadeia, o cálculo de emissões foi realizado somente para o CO₂. Neste caso foi utilizado o inventário de entradas e saídas do sistema preparado para a Análise Emergética. Para cada fluxo entrando no sistema foi computado o equivalente de óleo, ou seja, a quantidade necessária de combustível para a produção do bem (Boustead e Hancock, 1979). Para o total de combustível requerido pelo sistema foram calculadas as emissões de CO₂, considerando-se a combustão completa do combustível (Ulgiati, 2001).

Os cálculos foram feitos considerando duas unidades funcionais: 1 tonelada de cana-de-açúcar e 1 litro de etanol.

6.3 Resultados e Discussão

6.3.1 – Resultados da Análise Emergética

Os cálculos completos, assim como as tabelas emergéticas completas, são apresentados no Apêndice 2. Diagramas sistêmicos resumidos das etapas da cadeia produtiva considerando a distribuição no estado de São Paulo e do Mato Grosso são apresentados na Figura 35 e Figura 36, respectivamente. A Tabela 18 apresenta o resumo da análise emergética para o caso do álcool combustível consumido no estado de São Paulo, enquanto a Tabela 19 apresenta os dados para o estado do Mato Grosso.

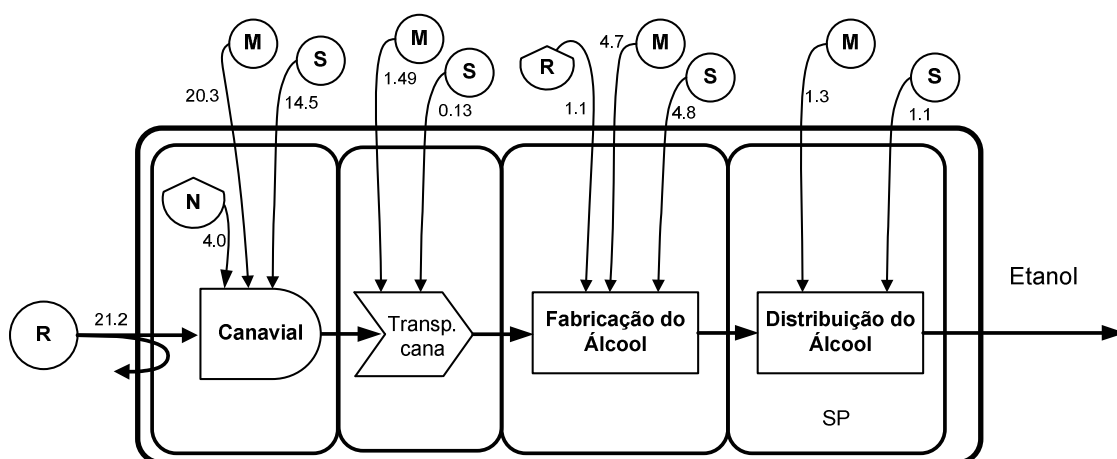


Figura 35: Diagrama sistêmico resumido da cadeia produtiva do etanol (distribuição - SP) Onde R- recursos renováveis; N- recursos não renováveis da natureza; M – materiais da economia e S- serviços da economia. Fluxos emergéticos em 1×10^{14} seJ/ha.

Tabela 18: Fluxos emergéticos da cadeia de álcool combustível, por etapa da cadeia e tipo de fluxo para a Distribuição no estado de São Paulo.

	Canavial		Indústria		Transporte		Total	
	1×10^{14} seJ/ha.a	%	1×10^{14} seJ/ha.a	%	1×10^{14} seJ/ha.a	%	1×10^{14} seJ/ha.a	%
Renovável	21,24	35,4	1,11	10,5	---	---	22,35	29,9
Não Renovável	4,00	6,7	---	0,0	---	---	4,00	5,4
Material	20,31	33,8	4,69	44,3	2,79	69,5	27,78	37,2
Serviço	14,48	24,1	4,79	45,2	1,22	30,5	20,50	27,5
Total								
SeJ/l	60,03		10,59		4,01		74,63	
% do total	80,4%		14,2%		5,4%			

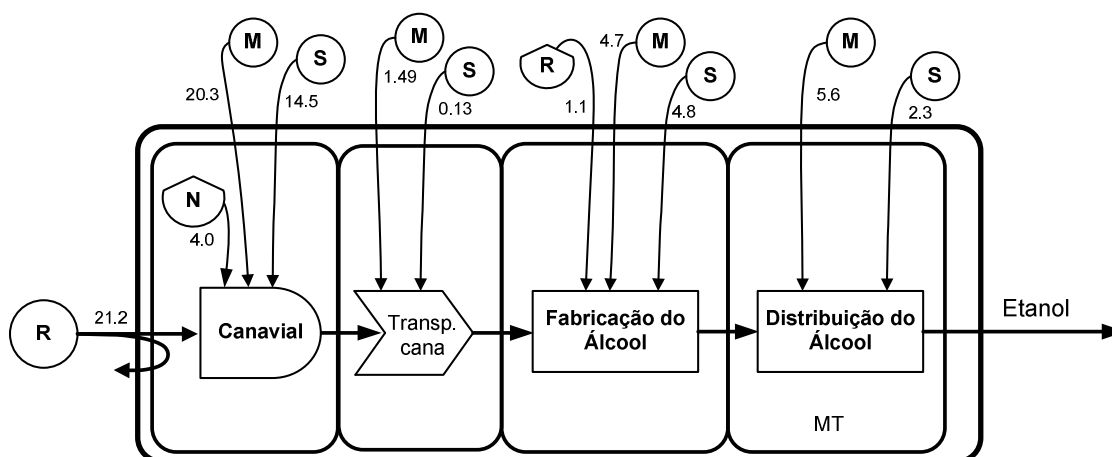


Figura 36: Diagrama sistêmico resumido da cadeia produtiva do etanol (distribuição - MT)
Onde R - recursos renováveis; N - recursos não renováveis da natureza; M – materiais da economia e S- serviços da economia. Fluxos emergéticos em 1×10^{14} seJ/ha.

Nos dois casos, distribuição em SP e em MT a maior contribuição de toda a cadeia produtiva é dada pela etapa agrícola, $6,00 \times 10^{15}$ seJ/ ha.ano, que corresponde a 80,4% (SP) e 74,9% (MT) de todos os fluxos da cadeia (Figura 37). Deste total, aproximadamente 40% são fluxos provenientes da natureza, tanto renováveis (35%), como não renováveis (6,7%), e materiais da economia (34%). Dos fluxos provenientes da economia, portanto com custo financeiro, os materiais utilizados na etapa agrícola correspondem a 34% e os serviços a 24%. Mesmo considerando que a fertilização do canavial é feita utilizando-se os resíduos das usinas sucroalcooleiras, portanto considerados como fluxo interno da cadeia, e somente complementado com fertilizantes

sintéticos, o consumo de materiais pode ser considerado alto. Nestes fluxos estão incluídos aqueles relativos ao transporte dos insumos da usina até o canavial.

Tabela 19: Fluxos emergéticos da cadeia de álcool combustível, por etapa da cadeia e tipo de fluxo para a distribuição no estado do Mato Grosso

	Canavial		Indústria		Transporte		Total	
	1×10^{14} seJ/ha.a	%	1×10^{14} seJ/ha.a	%	1×10^{14} seJ/ha.a	%	1×10^{14} seJ/ha.a	%
Renovável	21,24	35,4	1,11	10,5	---	---	22,34	27,9
Não Renovável	4,00	6,7	---	0,0	---	---	4,00	5,0
Material	20,31	33,8	4,69	44,3	7,11	69,5	32,10	40,1
Serviço	14,48	24,1	4,79	45,2	2,42	30,5	21,69	27,1
Total								
SeJ/l	60,03		10,58		9,53		80,14	
% do total	74,9%		13,2%		11,9%			

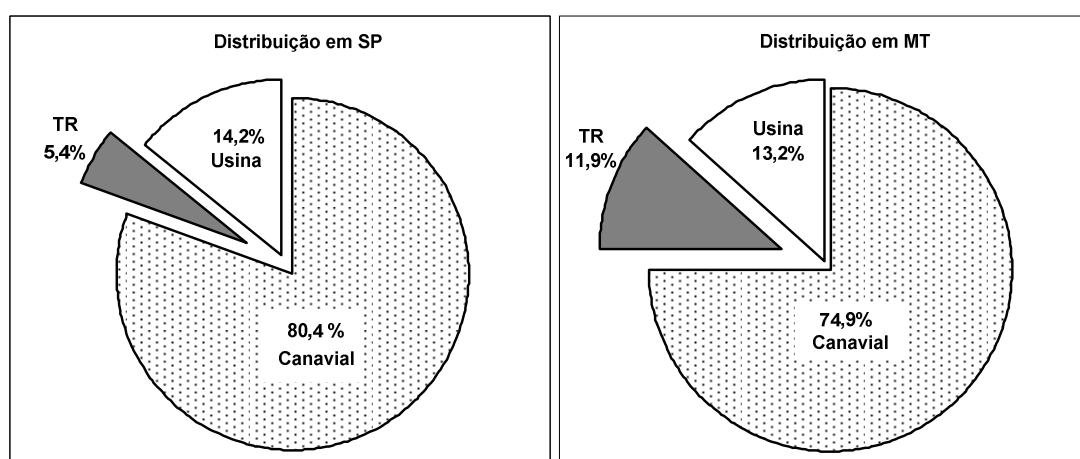


Figura 37: Contribuições por etapa da cadeia para a distribuição de etanol em SP e MT

A expressiva contribuição devido à etapa agrícola evidencia a importância desta etapa no desempenho de toda a cadeia produtiva. Melhorias de eficiência nesta etapa repercutirão de forma significativa em toda a cadeia. Da mesma forma, o grande volume de recursos provenientes da economia utilizados por esta etapa, indica sua grande dependência da economia e, portanto, sua vulnerabilidade aos preços de mercado e à disponibilidade de combustíveis fósseis.

A etapa industrial consome $1,06 \times 10^{15}$ seJ/ha.ano, ou 14,2% (SP) e 13,2% (MT) dos

recursos utilizados pela cadeia. Esta etapa utiliza em sua maioria recursos provenientes da economia, materiais (44%) e serviços (45%). Os recursos renováveis (água utilizada pela usina) correspondem a 10%.

A diferença entre as duas cadeias estudadas, SP e MT, se encontra nos fluxos utilizados para o transporte, conforme apresentado na Figura 37. As etapas de transporte são: o transporte da cana entre o canavial e a usina (35km) e distribuição do álcool. No caso do estado de SP a distribuição consiste de transporte do álcool da usina até a base primária (150 km) e, posteriormente, até o posto revendedor (100km). Já para a distribuição em MT há a inclusão da transferência entre base primária e secundária.

No caso de SP as etapas de transporte contribuem com aproximadamente 5% dos fluxos, ou 4.01×10^{14} seJ/ha.ano. Este resultado pode ser explicado pelas pequenas distâncias envolvidas na cadeia de distribuição estudada, restrita ao estado de São Paulo. No caso da distribuição para MT, a contribuição desta etapa corresponde a 9.53×10^{14} seJ/ha.ano, ou 11,9% dos fluxos. Esta diferença corresponde a um aumento de 66% nos fluxos emergéticos, indicando que a importância que a etapa de transporte e, portanto a distância a ser percorrida para a distribuição do álcool, tem no desempenho da cadeia.

Quando as etapas são consideradas individualmente observa-se que: a etapa agrícola utiliza principalmente recursos renováveis da natureza (35% desta etapa), a etapa industrial utiliza majoritariamente serviços (45% desta etapa) e materiais (44%). As etapas de transporte utilizam majoritariamente materiais, 68 e 75% para distribuição em SP e MT, respectivamente. A Figura 38 apresenta estes resultados para o estado de SP e a Figura 39 para o estado de MT.

O fluxo de maior contribuição individual para a cadeia completa é a água da chuva, que corresponde a 27% (SP) e 25% (MT) de todos os fluxos. Este fluxo não tem custo financeiro e pode variar grandemente de uma safra para outra (no presente estudo foi utilizada média de 10 anos). Entretanto, é importante salientar, que se trata de uma vantagem ambiental apresentada pelo estado de SP que pode ser perdida devido às alterações climáticas decorrentes do aquecimento global.

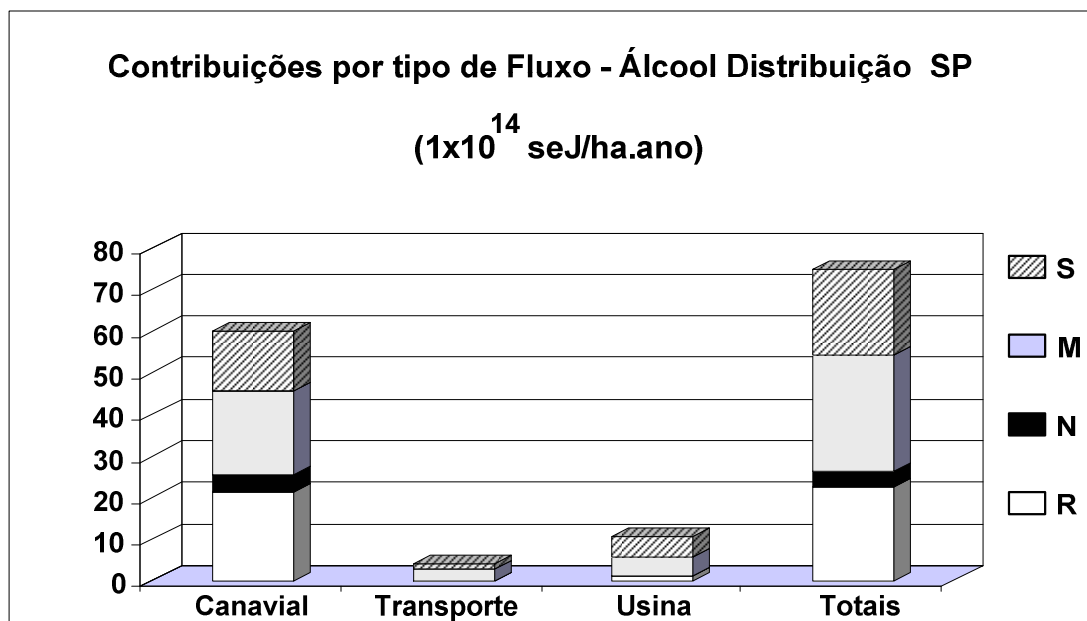


Figura 38: Fluxos emergéticos por tipo de recurso e etapa da cadeia. Distribuição em SP

Onde: R – Recursos renováveis; N – recursos não renováveis da Natureza; M – materiais da economia; S – serviços.

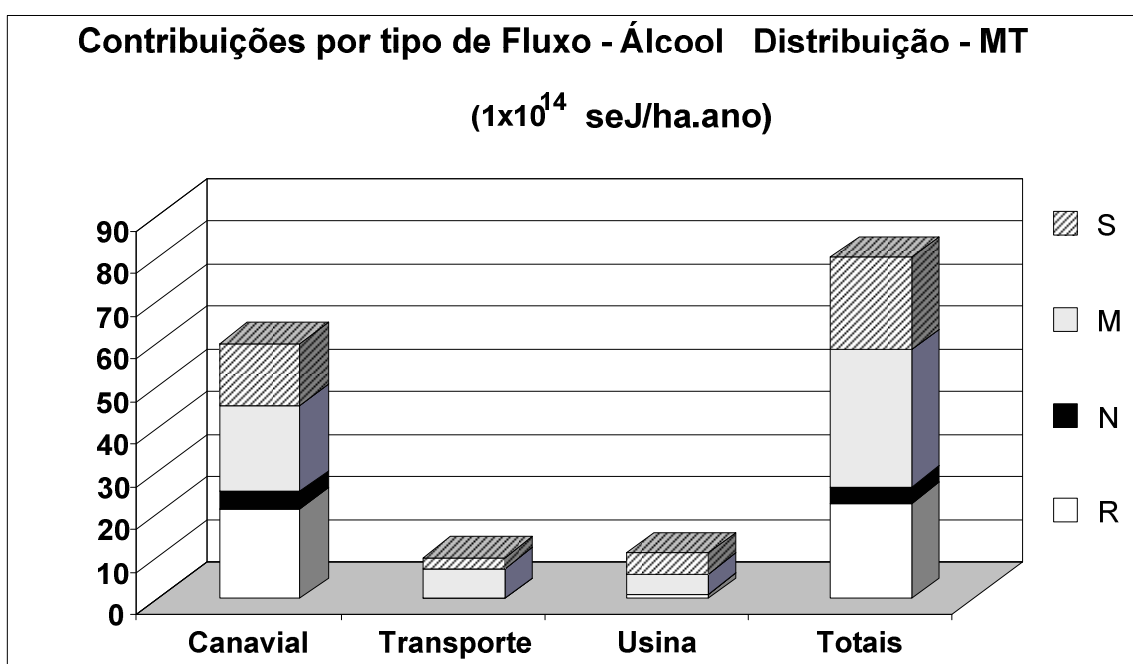


Figura 39: Fluxos emergéticos por tipo de recurso e etapa da cadeia. Distribuição em MT

Onde: R – Recursos renováveis; N – recursos não renováveis da Natureza; M – materiais da economia; S – serviços.

Os corretivos e fertilizantes utilizados no canavial compõem o segundo fluxo de maior contribuição à cadeia, correspondendo a 20 % (SP) e 19% (MT) de todos os fluxos. Novamente, são fluxos utilizados na etapa agrícola, reforçando a importância desta etapa na cadeia. A mão-de-obra, tanto fixa como temporária, nas várias etapas da cadeia corresponde a 8,5% de seus fluxos. Os combustíveis fósseis utilizados ao longo da cadeia (etapa agrícola, transporte da cana e distribuição do álcool) correspondem a 6,5% (SP) e a 9,8%(MT). Destes, ao redor de 3,5% são devidos à etapa agrícola.

6.3.1.1. Índices Emergéticos

A Tabela 20 apresenta os índices emergéticos tradicionais e modificados (em negrito) para os produtos da cadeia do álcool combustível: cana no canavial; álcool combustível na saída da Usina e álcool vendido em posto distribuidor localizado no estado de São Paulo e de Mato Grosso.

Tabela 20: Índices emergéticos dos produtos da cadeia de álcool.

	Cana	Álcool Usina	Álcool Posto SP	Álcool Posto MT
Tr				
seJ/ J	2,80 E +04	4,87 E+04	5,03E+04	5,41E+04
seJ/kg	7,50 E +10	1,10E+12	1,14E+12	1,22E+12
% R	35,4 %	30,9 %	29,9 %	27,9 %
%R*	40,3%	35,4%	34,4%	32,1%
EYR	1,73	1,57	1,55	1,49
ELR	1,83	2,23	2,34	2,59
ELR*	1,48	1,82	1,91	2,11
EIR	1,38	1,74	1,83	2,04
SI	0,94	0,71	0,66	0,58
SI*	1,27	0,93	0,87	0,75
EER	1,25	0,68	0,55	0,79

Onde Tr – Transformidade, %R – renovabilidade considerando somente os recursos da natureza; %R* – renovabilidade considerando as parcelas renováveis dos materiais e serviços; EYR – Razão de Rendimento Emergético; ELR – Taxa de Carga Ambiental; ELR* – Taxa de Carga Ambiental considerando as parcelas renováveis dos materiais e serviços; EIR – Razão de Investimento de Energia; SI – Índice de sustentabilidade; SI* – Índice de sustentabilidade considerando as parcelas renováveis dos materiais e serviços.

Transformidade é uma medida da eficiência do sistema estudado: comparando-se dois ou mais sistemas produtivos, quanto maior seu valor, menor a eficiência do sistema. Ela aumenta ao longo da cadeia produtiva do álcool passando de $2,80 \times 10^4$ seJ/J de cana-de-açúcar, para $4,87 \times 10^4$ seJ/J para o álcool na porta da usina, um aumento de 74%. A transformidade do álcool no posto de gasolina depende da etapa de distribuição. No presente estudo observou-se aumento de 3 e 10% para a distribuição em SP e MT, respectivamente, conforme apresentado na Figura 40.

Este resultado era esperado. Na etapa agrícola ocorre a produção de biomassa através da utilização de fluxos renováveis da natureza (luz solar, chuva, biodiversidade) e da economia (fertilizantes, pesticidas, combustíveis). A transformidade da cana-de-açúcar, portanto, reflete a eficiência do sistema agrícola. A etapa industrial, embora fundada na utilização de materiais e energias não renováveis, constitui um processo de transformação da biomassa, neste caso uma transformação biológica (fermentação). O produto desta etapa, álcool, é produzido em volume bem menor, porém mais concentrado em termos energéticos, do que a biomassa inicial (cana). Portanto, a transformidade do álcool deve ser maior do que a da biomassa. Nas etapas seguintes não ocorre transformação do produto, apenas incorporação de recursos para sua distribuição. Em outras palavras, a cada etapa da distribuição são consumidos recursos, em sua maioria não renováveis, sem que se ganhe em energia disponibilizada. Desta forma, com o aumento do consumo de recursos na distribuição, devido a distâncias maiores e a sistemas pouco eficientes, aumenta-se a transformidade do álcool, diminuindo a eficiência do sistema como um todo.

A Tabela 21 apresenta as transformidades de alguns combustíveis utilizados comercialmente. A comparação entre a transformidade do álcool e a de combustíveis fósseis, indica que são de mesma grandeza, ao redor de 50.000 seJ/J, enquanto que o etanol de milho apresentou transformidade superior, na casa de 100.000 seJ/J. Bastianoni e Marchettini (1996) estudaram a produção de etanol a partir da cana-de-açúcar produzido em duas regiões dos Estados Unidos e encontraram dois valores distintos de transformidade: 140.000 seJ/J (Flórida) e 93.000 seJ/J (Louisiana). Tal diferença ocorreu devido à grande perda de solo observada no canavial da Flórida.

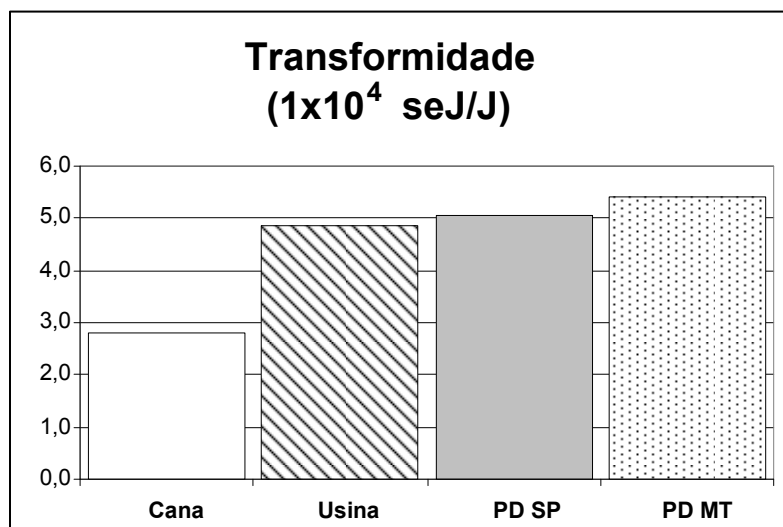


Figura 40: Transformidade dos produtos da cadeia de cana-de-açúcar.

Onde: PD SP corresponde ao álcool no posto revendedor de SP e PD MT ao de MT.

Considerando-se que a transformidade é também uma medida do trabalho ambiental necessário para suportar o sistema produtivo, quanto maior a transformidade maior a necessidade de trabalho ambiental, estes valores de transformidade indicam que o sistema produtivo do etanol de cana brasileiro é ligeiramente mais eficiente na conversão de energia solar em produto disponível para uso pela sociedade. Entretanto, apesar de ser um ciclo bastante curto de produção, apresenta eficiência similar ao processo de produção de combustível fóssil caracterizado por ciclos bastante longos.

Tabela 21: Transformidade e renovabilidade de alguns combustíveis

Combustível	Transformidade	%R	Referência
Carvão	$4,00 \times 10^4$ seJ/J	0%	Odum, 1996
Diesel	$5,50 \times 10^4$ seJ/J	0%	Bastianoni et al., 2005
Gás Natural	$4,80 \times 10^4$ seJ/J	0%	Odum, 1996
Etanol de cana			
Flórida	$14,0 \times 10^4$ seJ/J	14,2%	Bastianoni e Marchettini, 1996
Louisiana	$9,3 \times 10^4$ seJ/J		
Etanol de milho	$17,3 \times 10^4$ seJ/J	5,4%	Ulgianti, 2001
Biodiesel	$26,9 \times 10^4$ seJ/J		Ulgianti et al., 1997

Renovabilidade (%R*), ou a porção de recursos renováveis utilizados pelo sistema,

é uma medida direta de sua sustentabilidade. Quanto mais alto seu valor, maiores as chances do sistema se manter no longo prazo. A renovabilidade dos produtos da cadeia diminui de 35,4% (cana) para 30,9% (álcool na usina), correspondendo a aproximadamente 12% de redução (Figura 41). A etapa de distribuição diminui ainda mais a renovabilidade, diminuição esta que depende da distância percorrida nesta etapa. Esta variação se deve ao fato de que na etapa agrícola são utilizados maiores volumes de recursos da natureza, via energia solar e, sobretudo, água da chuva, enquanto que nas etapas subseqüentes praticamente só são utilizados recursos da economia.

Quando a porção renovável dos recursos da economia é considerada no cálculo da renovabilidade, $\%R^*$, ocorre um aumento de aproximadamente 14%, passando de 35,4% para 40,3% para a cana e de 30,9% para 35,4% para o álcool na usina (Tabela 20). O mesmo padrão de queda na renovabilidade ao longo da cadeia é observado. Dos recursos da economia, dois apresentam renovabilidade parcial: a) as mudas utilizadas na etapa agrícola, 35,4% (calculado pelo presente estudo) e b) mão-de-obra ao longo da cadeia, 38% (Brown, 2003).

Estes resultados são significativos, apesar de serem melhores do que aqueles calculados para o etanol de cana produzido nos Estados Unidos, 15,5% (Bastianoni e Marchettini, 1996), e para o etanol de milho, 5,4% (Ulgiati et al., 1997), conforme apresentado na Tabela 21. Significa que sessenta por cento dos recursos utilizados para produzir a cana-de-açúcar, e ao redor de setenta por cento para produzir o etanol, não são renováveis. Mesmo com a inclusão das parcelas renováveis dos recursos da economia, a renovabilidade, tanto da cana-de-açúcar como do etanol, ainda é baixa, 40% e 35%, respectivamente, posto que se trata de um produto agrícola e que o etanol tem sido apresentado como um combustível renovável.

Aumentar a renovabilidade do álcool significa aumentar a renovabilidade da etapa agrícola, pois, além de ser esta a etapa de maior contribuição para o sistema, nas etapas seguintes são utilizados quase que exclusivamente recursos não renováveis. A baixa renovabilidade da etapa agrícola se deve ao uso intensivo de fertilizantes, maquinário e combustível, responsáveis por 30% de todos os recursos utilizados nesta etapa, logo a diminuição de uso destes recursos resultará em aumento da renovabilidade do sistema.

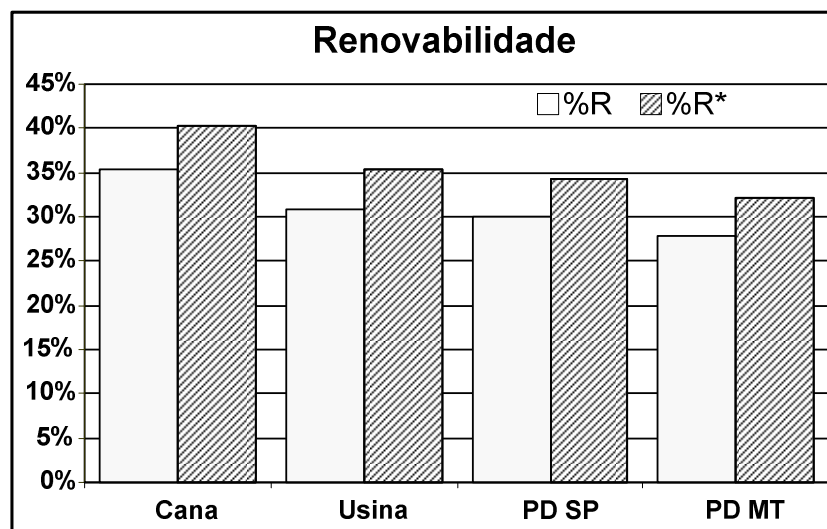


Figura 41: Renovabilidade dos produtos da cadeia do álcool combustível.

Onde: %R – renovabilidade considerando somente os recursos da natureza; %R* – renovabilidade considerando as parcelas renováveis dos materiais e serviços; PD SP corresponde ao álcool no posto revendedor de SP e PD MT ao de MT.

Na literatura são encontrados diferentes valores para a renovabilidade de produtos agrícolas convencionais: desde 5-10% para produtos como café, soja, milho e frutas (Ortega et al., 2002; Panzieri et al., 2002; Cuadra e Rydberg, 2006) até 20-30% (Ortega et al., 2002; Cavalett et al., 2006; Pereira e Ortega, 2006). Por outro lado, as renovabilidades apresentadas por sistemas de produção orgânico são ligeiramente superiores, na casa de 40-45% (Comar, 2000; Panzieri et al., 2002; Cavalett et al., 2005; Pereira e Ortega, 2005). Com a adoção de práticas agroecológicas este valor sobe para 70-80% (Agostinho, 2005; Martin et al., 2006). Portanto a adoção de práticas agrícolas mais adequadas, como a rotação com amendoim antes da renovação do canavial, ou mesmo o consórcio com outras culturas, e a utilização de fertilizantes orgânicos, de tal forma a diminuir a necessidade de fertilização química intensa pode melhorar o desempenho desta etapa e ter impacto significativo em toda a cadeia.

Razão de Rendimento Emergético (EYR), definida como energia total utilizada pelo sistema (Y) dividida pela energia dos insumos da economia (F), é uma medida do ganho em energia primária disponibilizada para ser utilizada pela sociedade. Os sistemas utilizam em seus processos recursos naturais e recursos provenientes da economia, sendo estes últimos recursos naturais que foram previamente obtidos da natureza,

processados por outros sistemas e disponibilizados para o uso pela sociedade. Em teoria, a energia liberada por um sistema é, no mínimo, igual àquela investida com recursos da economia. Neste caso EYR é igual à unidade. Valores de EYR superiores a um indicam que o sistema foi capaz de disponibilizar energia primária para a sociedade e quanto maior este valor, maior é a eficiência do sistema na utilização dos recursos investidos da economia. Desta forma, o EYR pode ser utilizado para avaliar a contribuição potencial de uma fonte emergética, em especial na comparação entre fontes energéticas (Ulgiati et al., 1995).

O valor de EYR observado no presente estudo decresceu com a cadeia, passando de 1,73 (cana-de-açúcar) para 1,57 (álcool combustível na usina) e para 1,55 (SP) e 1,49 (MT) para o álcool vendido nos postos de gasolina, conforme apresentado na Tabela 20 e na Figura 42. A diminuição na capacidade do sistema em capturar e disponibilizar energias primárias por unidade investida se deve ao fato de que nas etapas de processamento e distribuição somente são utilizados recursos da economia sem incorporação de recursos da natureza, com exceção da água utilizada pela usina. Novamente, o desempenho da etapa agrícola é fundamental para o desempenho da cadeia como um todo e a melhora deste índice está ligado à diminuição da utilização de recursos da economia.

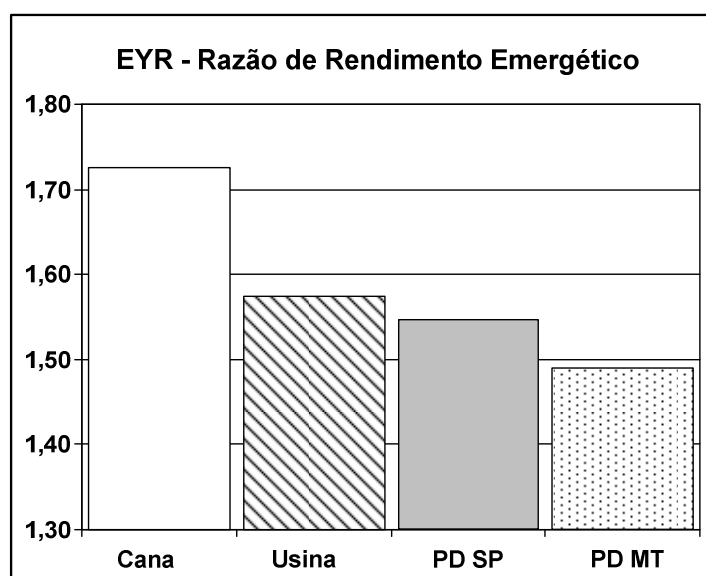


Figura 42: Razão de Rendimento Emergético dos produtos da cadeia do álcool.

Onde: Usina corresponde aos valores para álcool na saída da usina, PD SP corresponde ao álcool no posto revendedor de SP e PD MT ao de MT.

Quando os valores de EYR de biocombustíveis são comparados com os de combustíveis fósseis, percebe-se uma grande diferença a favor destes últimos, conforme Tabela 22. Este resultado poderia levar a conclusão que o uso destes combustíveis, por ter rendimento emergético significativamente maior, é mais indicado do que o de combustíveis de biomassa. Entretanto, tal diferença se deve ao espaço de tempo necessário para a formação dos recursos. No caso da biomassa o ciclo é bastante curto enquanto no caso dos combustíveis fósseis foi necessário um tempo extremamente grande, considerando os ciclos da sociedade atual, para sua formação e acúmulo. Segundo Odum (1996), quanto mais trabalho é deixado para a Natureza realizar, maior será o rendimento emergético, como consequência os biocombustíveis não são competitivos até que as reservas de combustíveis fósseis sejam significativamente baixas e a sociedade tenha se reorganizado para um sistema menos intensivo no uso energético.

Tabela 22: Valores de EYR encontrados na literatura para diferentes combustíveis

Combustível	EYR	Referência
Óleo Cru		
Texas	3,2	Odum, 1996
Oriente Médio	8,4	
Alaska	11,1	
Madeira/Floresta Tropical	12,0	Odum, 1996
Carvão	10,5	Odum, 1996
Etanol de cana		
Florida	1,17	Bastianoni e Marchettini, 1996
Louisiana	1,86	
Etanol de milho	1,08	Ulgiati, 2001

Taxa de Carga Ambiental (ELR), razão entre a soma dos recursos não renováveis tanto da economia (F) quanto da natureza (N) e os recursos renováveis locais (R), é uma medida do impacto ambiental decorrente do sistema produtivo. Em teoria, se não ocorrem investimentos da economia, os fluxos emergéticos renováveis disponíveis localmente deveriam sustentar um ecossistema maduro sujeito às restrições impostas pelo meio ambiente, e neste caso ELR seria igual a zero. Quando ocorrem investimentos de fluxos emergéticos externos ao ecossistema, o padrão de desenvolvimento é diferente do ecossistema original. Desta forma, o ELR mede a distância entre o sistema em estudo e o ecossistema original e pode ser interpretado como o *stress* causado ao meio ambiente

pelo sistema produtivo. Quanto mais alto for seu valor, maior a distância do sistema original, e maior será o impacto, ou o stress no ecossistema associado. Conforme anteriormente citado, valores de ELR até 2 indicam sistemas de baixo impacto, valores de 2 a 10 indicam sistemas de impacto moderado. Já valores superiores à 10 estão associados a sistemas que causa grandes impactos ambientais (Brown e Ulgiati, 2004).

O valor de ELR calculado para a cana-de-açúcar e para o álcool combustível produzido pela usina foi 1,83 e 2,23, respectivamente (Figura 43). Este valor aumenta ainda mais quando a etapa de distribuição é incluída, passando a 2,34 (SP) e 2,39 (MT). Portanto, os valores de ELR indicam um sistema de impactos ambientais moderados. Quando comparados com outros valores de ELR calculados, 6,04 para etanol de cana produzido na Flórida (Bastianoni e Marchettini, 1996) e 7,42 para o etanol de milho na Europa (Ulgiati, 2001), os valores obtidos pelo presente estudo podem ser considerados razoáveis. Entretanto, deve-se considerar a extensa área de cultivo da cana-de-açúcar necessária para suprir o mercado de álcool combustível. Em 2005 aproximadamente 5,6 milhões de hectares foram destinados a esta cultura, sendo que somente no estado de São Paulo foram 3,9 milhões de hectares (IBGE, 2007). As projeções são de que até a safra 2016/2017 11 milhões de hectares do país estarão cobertos por cultura da cana (Agrianual, 2006). Portanto, os impactos serão significativos, pois a área é imensa.

Para o cálculo da Taxa de Carga Ambiental modificada, ELR^* , as parcelas renováveis dos recursos da economia são consideradas, passando da porção não renovável dos recursos, $N+F$, para a parcela renovável. Conforme apresentado na Tabela 20 o ELR^* apresenta valores aproximadamente 35% inferiores do que os de ELR, indicando que o impacto ambiental é inferior quando a parcela renovável dos serviços, basicamente da mão-de-obra, é considerada.

Novamente, a melhora deste índice, ou a diminuição dos impactos causados pelo sistema, depende do desempenho da etapa agrícola. Como os recursos renováveis são, basicamente, a chuva, portanto independente do tipo de manejo adotado, a redução do ELR somente será alcançada com a redução da utilização de recursos da economia e com adoção de práticas que diminuam a perda de solo.

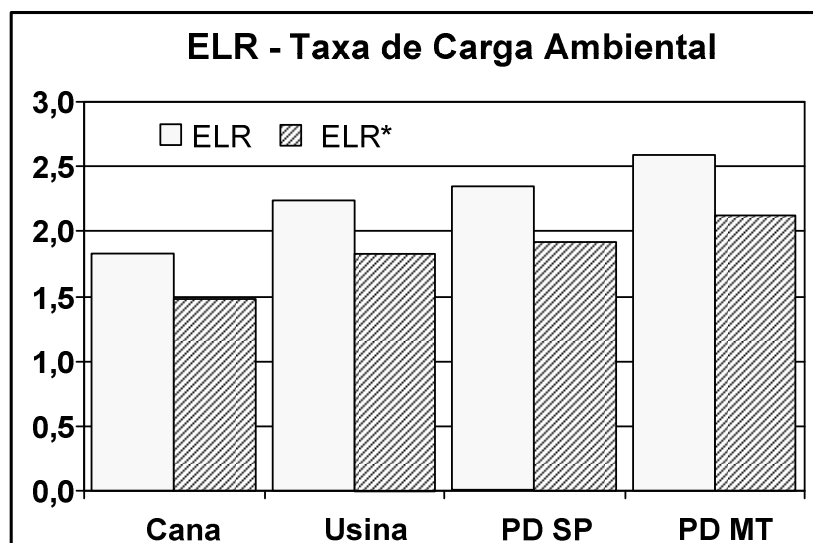


Figura 43: Taxa de carga Ambiental para os produtos da cadeia do álcool.

Onde: ELR considera somente os recursos da natureza; ELR* considera as parcelas renováveis dos materiais e serviços; Usina corresponde aos valores para álcool na saída da usina, PD SP ao álcool no posto revendedor de SP e PD MT ao de MT.

O Índice de Sustentabilidade (SI), definido como a razão entre EYR e ELR, é uma medida da contribuição potencial de um sistema (EYR) por unidade de carga ambiental, ou impacto ambiental (ELR), imposto à área ocupada pelo sistema. Em teoria o menor valor possível de SI é zero, quando ELR é infinito. Já o maior valor de SI, infinito, ocorre quando EYR tende ao infinito, situação que somente ocorre para ecossistemas maduros não explorados (F igual a zero). Portanto, quanto mais alto for o SI, menor o impacto por unidade de energia primária disponibilizada para a sociedade. Segundo Brown e Ulgiati (2004) valores de SI inferiores a 1 indicam sistemas que consomem recursos, enquanto que valores superiores a 1 indicam sistemas que contribuem com liberação de recursos para uso pela economia sem afetar o equilíbrio do meio ambiente. Assim, valores inferiores a 1 estão associados às economias altamente desenvolvidas e orientadas para o consumo, valores de SI entre 1 e 10 estão associados às economias em desenvolvimento, enquanto valores superiores a 10 indicam economias pouco desenvolvidas industrialmente.

Os valores calculados de SI para todos os produtos da cadeia de álcool foram inferiores a unidade, 0,94 (cana) e 0,71 (álcool), indicando que a contribuição deste sistema produtivo para a sociedade é bastante pequeno. Ou seja, o impacto ambiental, ou

as alterações causadas ao meio ambiente, é bastante intenso, se comparado com a energia primária disponibilizada para uso pela sociedade.

Se SI é calculado utilizando o ELR*, ou seja, considerando as porções renováveis dos recursos da economia, obtém-se o SI*, ou índice de sustentabilidade modificado. Na cadeia do álcool, o SI* é aproximadamente 30% mais alto do que o SI, conforme apresentado na Figura 44. Este aumento é grande em termos percentuais, e indica que a utilização de insumos e materiais com parcelas renováveis mais altas tem impacto positivo no desempenho do sistema.

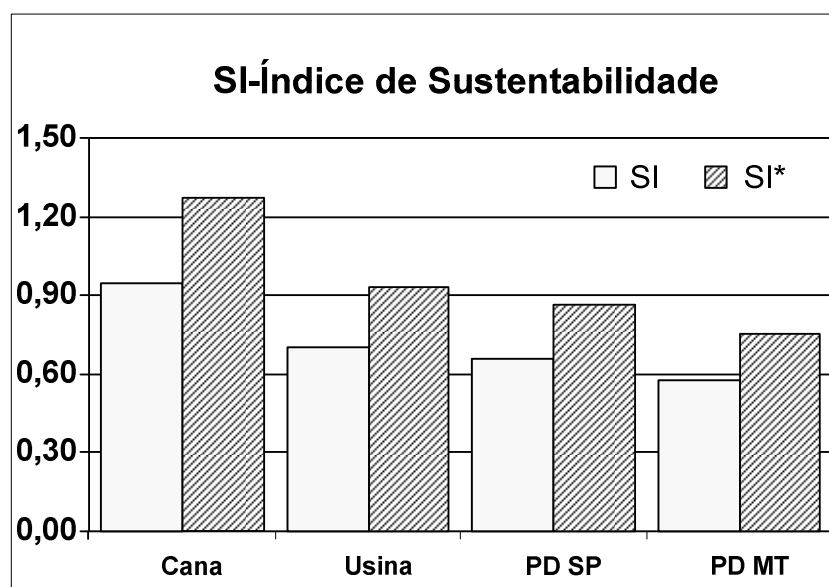


Figura 43: índice de Sustentabilidade para os produtos da cadeia do álcool.

Onde: SI considera somente os recursos da natureza; SI* considera as parcelas renováveis dos materiais e serviços; Usina corresponde aos valores para álcool na saída da usina, PD SP ao álcool no posto revendedor de SP e PD MT ao de MT.

A Razão de Investimento Emergético (EIR) é a razão entre recursos da economia e da natureza e indica o investimento da sociedade para produzir um bem, em relação à contribuição da natureza. Pode ser utilizado para avaliar a eficiência, ou competitividade, de um sistema produtivo na utilização dos recursos investidos da economia. Comparando-se dois ou mais sistemas produtivos, aquele com menor EIR será o mais competitivo, uma vez que para cada unidade de recursos naturais utilizado, portanto sem custo financeiro,

necessita investir um volume menor de recursos da economia.

No presente estudo os valores de EIR passaram de 1,38 para o sistema agrícola para 1,74 para o sistema produtivo do álcool. Considerando a etapa de distribuição estes valores passam para 1,83 (SP) e 2,04 (MT), dependendo do local de consumo, Figura 45. Como acontece para os outros índices, nas etapas de processamento e distribuição ocorre incorporação de recursos da economia, sem utilização de recursos da natureza. Portanto o índice piora ao longo da cadeia.

Razão de Intercâmbio de Emergia (EER), definida como a razão de emergia recebida em relação a emergia fornecida em uma troca, indica a vantagem que um operador (vendedor ou comprador) leva em relação ao outro. Pode ser utilizada como uma medida de comércio justo já que uma troca equilibrada deveria resultar em EER próximo a 1, ou valor entregue pelo vendedor igual ao valor pago pelo comprador. Em geral as matérias-primas, tais como minerais e produtos rurais tendem a ter um valor alto de EER, quando são comprados a preço de mercado, pois, geralmente, o valor monetário somente remunera os serviços humanos e não o extenso trabalho realizado pela Natureza (Brown e Ulgiati, 2004).

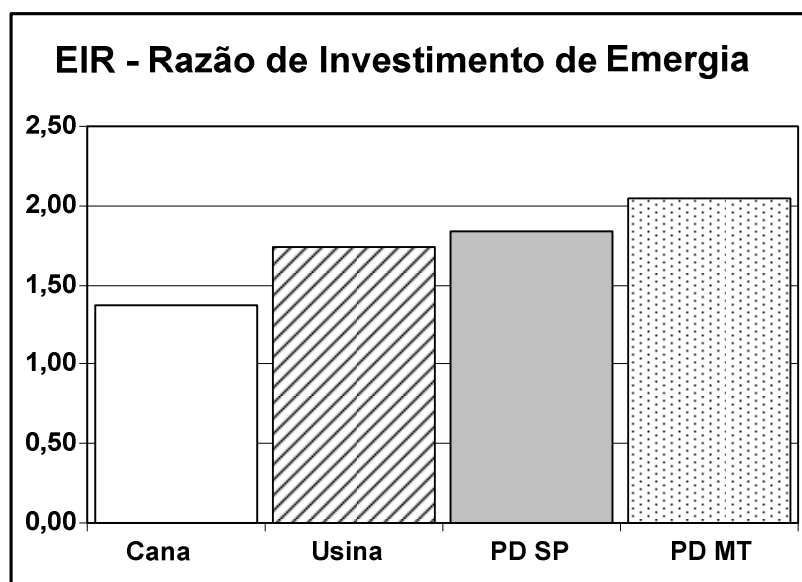


Figura 45: Razão de Investimento Energético para os produtos da cadeia do álcool. Onde: Usina corresponde aos valores para álcool na saída da usina, PD SP ao álcool no posto revendedor de SP e PD MT ao de MT.

No presente estudo o EER da transação de venda da cana para a usina é de 1,25, indicando que o agricultor entrega 25% mais energia do que recebe através do pagamento monetário da cana-de-açúcar. Entretanto, nas operações de venda do álcool, tanto pela usina, como pelos postos distribuidores, os valores de EER são inferiores à unidade, indicando que os vendedores (usina e postos distribuidores) estão fornecendo um volume menor de energia do que o recebido pelo pagamento do álcool (Figura 46). Todos os valores indicam uma troca desequilibrada e aparentemente, é a etapa industrial que leva a maior vantagem, já que recebe mais energia através da cana e também mais pelo pagamento do álcool.

Quando EER é igual a 1 a troca é justa, pois em bases energéticas a troca foi igual. Nesta condição o preço justo a ser pago pela cana seria R\$ 43,60, enquanto que o preço pago na safra 2005/2006 era 24% inferior, R\$ 35,00 (IEA, 2007). Já no caso do etanol, a troca em bases energéticas corresponderia a um preço inferior aos preços praticados pelo mercado.

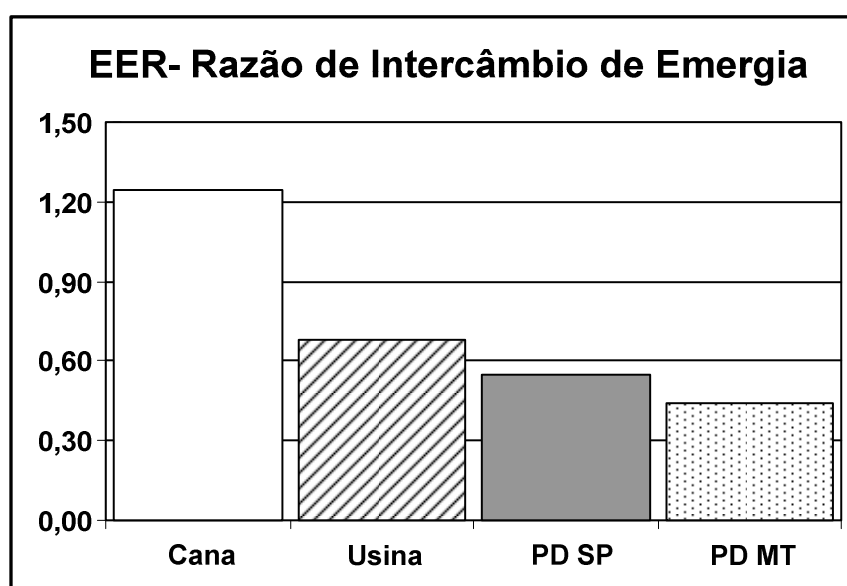


Figura 46: Razão de Intercâmbio de Energia para os produtos da cadeia do álcool. Onde: Usina corresponde aos valores para álcool na saída da usina, PD SP ao álcool no posto revendedor de SP e PD MT ao de MT.

6.3.2 – Resultados do Inventário de Ciclo de Vida

Os cálculos foram realizados considerando duas unidades funcionais, 1 tonelada de cana-de-açúcar, para permitir a comparação com outras biomassas utilizadas como matéria prima de biocombustível, e 1 litro de etanol. Alguns resultados são expressos com base em um hectare, para permitir a avaliação do impacto considerando outras culturas. No Apêndice 2 são apresentados os cálculos completos.

Os resultados foram divididos em dois grupos. O primeiro se refere ao consumo de recursos naturais e demanda de mão de obra, ou seja, as entradas do sistema. O segundo grupo de resultados diz respeito às saídas do sistema, tanto os produtos, no caso o etanol, como as emissões indesejáveis. Neste grupo também são incluídos os indicadores de desempenho do sistema estudado.

6.3.2.1. Indicadores de Consumo – Entradas do Sistema

A Tabela 23 apresenta os consumos de recursos naturais associados à cadeia de produção e distribuição do etanol para as duas unidades funcionais estudadas, 1 tonelada de cana e 1 litro de etanol, considerando o etanol fornecido pela usina produtora e distribuído no estado de São Paulo e no estado do Mato Grosso.

Tabela 23: Consumo de recursos da cadeia produtiva do etanol

Indicadores de consumos	Cana de açúcar ^a	Etanol Usina ^b	Etanol SP ^b	Etanol MT ^b	Unidade ^{a, b}
Perda de solo por erosão	149	1,81	1,81	1,81	kg/UF
Uso da terra	125	1,52	1,52	1,52	m ² /UF
Consumo de água	6,25	18,4	18,4	18,4	l/UF
Consumo direto de combustível	1,89	0,03	0,04	0,06	l/UF
Equivalente de óleo combustível	3,99	0,07	0,08	0,13	kg óleo/UF
Demanda Energética	167	2,77	3,42	5,56	MJ/UF
Mão de Obra	1,39	0,0187	0,0192	0,020	h/UF

^a A Unidade Funcional (UF) considerada para a cana é 1 tonelada de cana-de-açúcar no canavial.

^b A Unidade Funcional (UF) para o etanol é 1 litro considerando o etanol na Usina, distribuído no estado de SP e no estado de MT.

Perda de solo que ocorre devido à erosão - Trata-se de um indicador importante, pois a perda de solo fértil leva à diminuição da capacidade produtiva das terras agriculturáveis, além de resultar em diminuição de taxas de infiltração de água, da capacidade de retenção de umidade, da diminuição do material orgânico, da biodiversidade do solo e da profundidade do solo (Lal, 2001). A erosão hídrica é um processo natural que ocorre mesmo em áreas naturais. Entretanto, sua intensidade pode variar grandemente dependendo do regime hídrico, topografia do terreno, natureza do solo e das práticas agrícolas (Lombardi Neto e Drugowich, 1994).

Em geral, a perda de fertilidade do solo é compensada com a incorporação de fertilizantes químicos, em especial fontes de nitrogênio. Borrero e colaboradores (Borrero et al., 2003) relatam que, mesmo com a incorporação dos subprodutos industriais nos canais para melhorar a fertilidade, em muitos deles não ocorre diminuição do uso de fertilizantes químicos.

São muitas as consequências da crescente utilização de fertilizantes químicos. Em primeiro lugar a renovabilidade e, portanto, a sustentabilidade do sistema produtivo diminui, uma vez que os recursos não renováveis, em especial combustíveis fósseis, são utilizados em volumes maiores, tanto durante sua produção, como para seu transporte. Como consequência da utilização de maior volume de combustível fóssil ocorre aumento nas emissões de CO₂.

Em segundo lugar, o nitrogênio em excesso não é absorvido pelas plantas passando a contaminar tanto os ecossistemas terrestres como os corpos d'água. A poluição por nitrogênio resulta em eutrofização, ou o crescimento excessivo da biota aquática, que restringe o uso da água em várias atividades, e também em toxicidade humana, especialmente devido a contaminação do lençol freático por NO₂ (Cassol et al., 2002; Bertol et al., 2005)

Outra consequência importante do aumento do uso de fertilizantes é a diminuição do rendimento do agricultor devido à baixa produtividade e ao aumento do custo de produção associado à utilização dos fertilizantes. A pressão econômica pode ser suficiente para a que o produtor procure outra cultura, ou até mesmo mude para uma atividade não agrícola, resultando em êxodo rural (Assis e Romeiro, 2005).

A perda de solo considerada no estudo foi de 11,9 toneladas de solo por hectare por ano (ECOAGRI, 2007) que resulta em uma perda de 149 kg de solo por tonelada de cana-de-açúcar, ou 1,81 kg de solo por litro de etanol. Este resultado é melhor do que o

encontrado pelo estudo de Ulgiati (Ulgiati, 2001) avaliando a produção de etanol de milho na Itália quando a perda de solo de 17 toneladas por hectare ano representou uma perda de solo de 6,2 kg por litro de etanol. Entretanto, este indicador deve ser avaliado considerando a produção de etanol em larga escala, como é o caso do Brasil. A perda de solo associada ao cultivo da área de plantio de cana da safra 2004/2005 no Brasil, 3,6 milhões de hectares (UNICA, 2006), é de 42,8 milhões de toneladas de solo por ano. Este impacto pode também ser avaliado pela perda de solo associado a um tanque de combustível de 50 litros, capaz de rodar aproximadamente 500 km, que é de aproximadamente 90 kg de solo perdido.

Uso do solo indica a área necessária para a produção de uma unidade funcional expresso em metro quadrado por unidade funcional. Trata-se, também, de um indicador importante na avaliação da sustentabilidade dos biocombustíveis pois as culturas energéticas, ou destinadas à produção de bioenergia, competem com as culturas produtoras de alimentos pelo uso de áreas agriculturáveis (Ulgiati, 2001). No Brasil, devido à produção de etanol, já ocorre a substituição de culturas como a laranja e o café por cana-de-açúcar (Borrero et al., 2003).

Wackernagel e Rees (1996) apresentam o conceito de Pegada Ecológica, ou a área necessária para o suporte da população, considerando a produção de alimentos e bens, a geração de energia e serviços da natureza como infiltração de água, absorção e diluição das emissões e resíduos da atividade antrópica. Este conceito é importante porque possibilita o cálculo de capacidade de carga de regiões e países através da quantificação de um bem, a área terrestre, que é finito, porém normalmente tratado como infinito. O relatório Planeta Vivo (WWF, 2006) calcula a pegada ecológica de diversos países para o ano de 2003, e considerou a pegada ecológica sustentável de 1,8 hectares por habitante. O mesmo estudo estimou que já em 2003 havia em média um déficit de 0,45 hectares por habitante e que, no caso dos países de renda per capita mais alta este déficit é, em média, de 3,12 ha/habitante.

No presente estudo os valores calculados foram 125 m² por tonelada de cana-de-açúcar e 1,52 m² por litro de etanol. Andreoli e Souza (2006) comparando a eficiência da produção de etanol de cana-de-açúcar no Brasil com a produção de etanol de milho nos Estados Unidos, estimaram em 3,3 m²/l de etanol. Neste estudo os autores consideraram a área necessária para a produção de 1 litro de etanol de cana como 1,23 m². Ulgiati (2001) calculou uma área de 5,0 m² para produzir um litro de etanol de milho na Itália. A

comparação dos resultados indica que a produção de etanol a partir de cana-de-açúcar requer área menor do que para a produção de etanol a partir de milho.

Este resultado, entretanto, deve ser avaliado considerando o consumo total de combustíveis. No Brasil em 2005 foram consumidos 23,5 milhões de metros cúbicos de gasolina (ANP, 2007). A área necessária para a substituição total deste volume de gasolina por etanol, sem considerar a diferença de consumo médio entre os veículos movidos a gasolina e a etanol, corresponde à área de plantio de cana no estado de São Paulo na safra 2004/2005 (3,5 milhões de hectares). Segundo o relatório Planeta Vivo (WWF, 2006) em 2003 o Brasil já possuía pegada ecológica de 2,1 ha/habitante, portanto superior ao considerado sustentável, porém ainda inferior à sua biocapacidade. Entretanto, há de se considerar que as novas áreas destinadas ao plantio de cana estão deslocando outras culturas, provavelmente alimentos, de terras mais férteis para outras mais pobres ou mesmo para áreas de vegetação nativa.

O consumo de água necessário para a produção de 1 litro de etanol é de 18,4 litros, devido principalmente à etapa industrial, conforme apresentado na Tabela 24. O consumo de água na etapa agrícola se deve somente à fertirrigação. Já a etapa industrial necessita grandes volumes para operar, em especial nas etapas de lavagem da cana, geração de vapor, resfriamento de gases e na lavagem de gases da caldeira. Diferentes consumos por tonelada esmagada são encontrados na literatura. Segundo um estudo do Centro de Tecnologia Canavieira (CTC) o consumo de água pelas usinas do Centro-Sul tem caído continuamente nos últimos anos, passando de consumo médio de água 5,6 metros cúbicos por tonelada de cana-de-açúcar esmagada em 1990 para 5 metros cúbicos por TC em 1997, e para 1,8 metro cúbico de água por TC em 2005 (CTC, 2007). No presente trabalho foi considerado um consumo de 1,5 metros cúbicos por TC esmagada, conforme o observado em visita a campo. A meta da usina visitada, entretanto, é de 1 metro cúbico por TC.

A diminuição do consumo pelas usinas pode ser alcançado pela recuperação e reutilização de água através da adoção de circuitos fechados e com a diminuição da água utilizada para a lavagem da cana, que pode ser atingido com a eliminação da queima da palha da cana na colheita (CTC, 2007).

Tabela 24: Consumo de água por etapa da cadeia produtiva

Etapa	Água^a (l / l álcool)
Agrícola	0,10
Transporte cana	---
Industrial	18,29
Distribuição	---
Total	18,39

^a – uso direto

Consumo de combustível fóssil - foi estimado o consumo direto de combustível fóssil, medido em litros de combustível por hectare, e o equivalente de óleo cru, expresso em kg de óleo equivalente por unidade funcional. No primeiro caso foram considerados os volumes de combustível utilizados na operação de equipamentos agrícolas, transporte de insumos e de trabalhadores, transporte da cana até a usina e distribuição do etanol. No segundo caso, foram considerados os equivalentes de óleo para produzir os equipamentos (agrícolas e industriais), insumos, matérias-primas e coadjuvantes de produção, além do uso direto de combustível.

Os dois índices são importantes. O primeiro permite avaliar a dependência direta do sistema na disponibilidade de combustíveis fósseis, considerando seu uso direto nas etapas da cadeia, principalmente produção agrícola e transporte de cana. Enquanto que o segundo aponta o volume total, direto e indireto, de combustíveis utilizados na produção, e distribuição do bem, considerando os processos que suportam a cadeia principal, permitindo, assim, uma avaliação da dependência do sistema a nível global.

Os resultados do estudo mostram que a etapa agrícola é aquela com maior consumo de combustíveis por unidade funcional, tanto diretamente como indiretamente, conforme apresentado na Tabela 25. O volume utilizado para produzir uma tonelada de cana é de 3,99 kg de óleo equivalente (Tabela 23), volume que corresponde a um consumo de aproximadamente 380 litros por hectare de canavial. Deste total, 1,80 kg de óleo equivalente (ou 150 litros por hectare) são utilizados diretamente para as operações de máquinas agrícolas, no transporte de subprodutos industriais utilizados como fertilizantes e também para o transporte de funcionários.

Utiliza-se 0,07 kg (0,08 litros) de óleo equivalente para produzir 1 litro de etanol,

conforme apresentado na Tabela 23. Desse total, 0,05 kg (75%) são utilizados na etapa agrícola, 0,013 kg (20%) no transporte da cana para a usina e somente 0,004 kg (5%) na etapa industrial, conforme apresentado na Tabela 25.

Tabela 25: Consumo de combustíveis fósseis da cadeia produtiva do etanol

Etapa	Consumo direto (l/ l etanol)			Óleo Equivalente (kg óleo /l etanol)		
	Usina	SP	MT	Usina	SP	MT
Agrícola	0,023	0,023	0,023	0,050	0,050	0,050
Transporte cana	0,006	0,006	0,006	0,013	0,013	0,013
Industrial	-----	-----	-----	0,004	0,004	0,004
Distribuição	-----	0,008	0,033	-----	0,014	0,067
Total	0,029	0,037	0,062	0,067	0,081	0,134

Por sua vez, o consumo direto de combustível fóssil é de 0,03 litros por litro de etanol. O uso direto de combustíveis se dá na etapa agrícola e de transporte da cana porque durante a etapa industrial não há consumo direto de combustível fóssil uma vez que tanto o vapor como a energia elétrica são produzidos a partir de bagaço de cana. A Figura 47 e a Figura 48 apresentam de forma gráfica os consumos de combustível fóssil, por etapa da cadeia produtiva do etanol para o etanol distribuído em São Paulo e no Mato Grosso, respectivamente.

Estes resultados indicam a forte dependência da produção de etanol em combustíveis fósseis uma vez que a produção de cana e, conseqüentemente, do etanol, é dependente da utilização de combustível fóssil. Para cada litro de etanol produzido, aproximadamente 8% do seu valor calorífico é consumido na forma de combustível fóssil, não renovável.

O fato do consumo direto de combustíveis se dar na etapa agrícola, quando a etapa de distribuição não é considerada, somado ao fato de que o maior consumo indireto também se dar nesta etapa reforça a importância da etapa agrícola no desempenho ambiental e, portanto, na sustentabilidade dos biocombustíveis. Corretivos, fertilizantes e herbicidas são responsáveis pelo maior volume de combustíveis usados indiretamente no canavial, aproximadamente 57% do total. A diminuição de fertilização química, bem como de uso de herbicidas, é imprescindível para a sustentabilidade deste setor produtivo. Tal diminuição somente será alcançada através da adoção de práticas agrícolas mais adequadas, como os sistemas de produção orgânica e agroecológica.

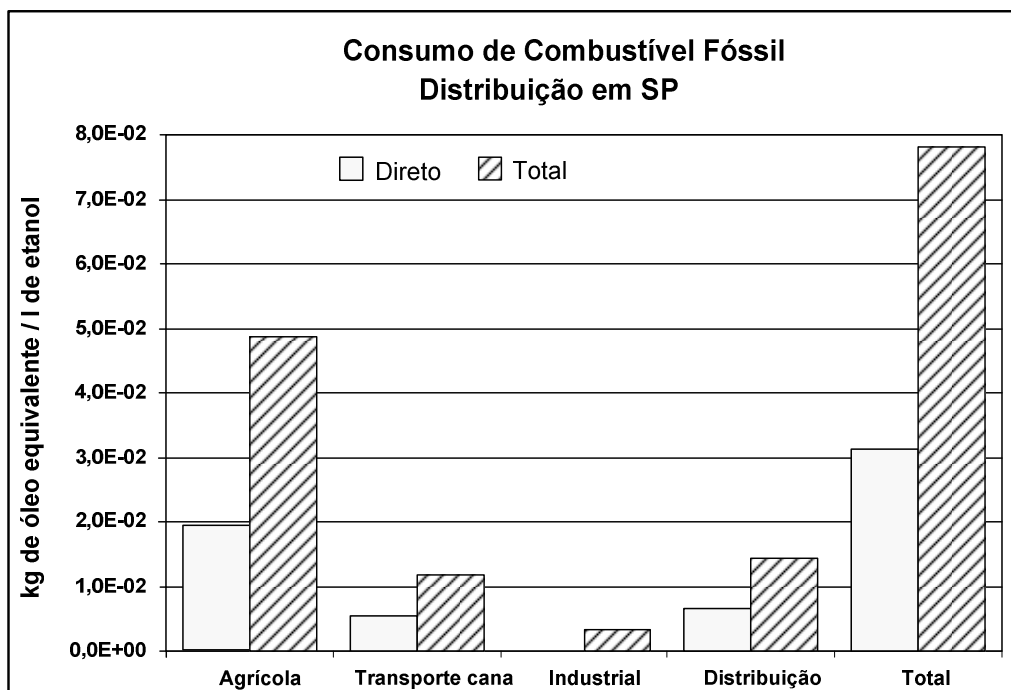


Figura 47:Consumo de Combustível Fóssil por etapa da cadeia – Distribuição em SP

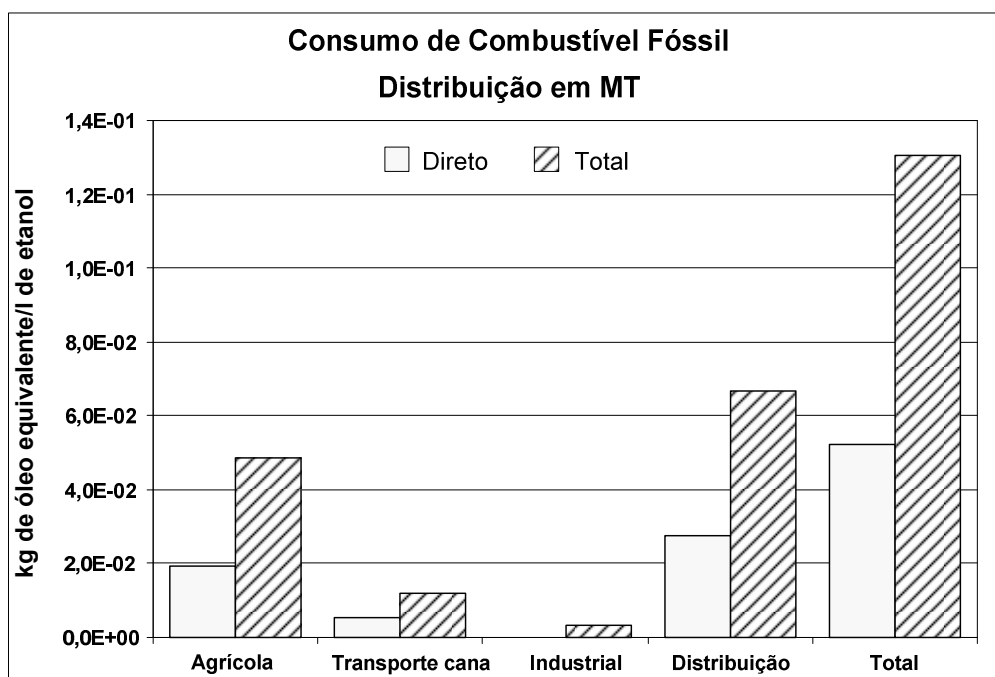


Figura 48: Consumo de Combustível Fóssil por etapa da cadeia – Distribuição em MT

Macedo e Koller (1997) realizaram um balanço energético da produção de etanol e consideraram dois cenários, no primeiro utilizaram as médias de consumos e produções das usinas e no segundo utilizaram os melhores valores praticados tendo como base o ano de 1996. Seus resultados indicam a utilização inferior à observada pelo presente estudo, entre 0,04 e 0,05 kg de óleo por litro de etanol. Os valores encontrados pelos dois estudos são aproximadamente 10 vezes menores do que o valor calculado por Ulgiati (Ulgiati, 2001) para o etanol de milho produzido na Itália (0.5 kg/l de etanol) indicando que o etanol produzido a partir de cana demanda volume menor de combustível fóssil do que a partir de milho.

Quando a etapa de distribuição é considerada na cadeia o consumo de óleo combustível aumenta em 20% para a distribuição no estado de SP e em 100% para a distribuição no estado de MT. O consumo direto de combustível é de 0,04 kg (0.05 litros) de óleo equivalente por litro de etanol distribuído em São Paulo e de 0,06 kg (0.07 litros) de óleo equivalente por litro de etanol no Mato Grosso, conforme apresentado na Tabela 25. A etapa de distribuição aumenta o consumo indireto de combustíveis através da utilização de equipamentos e o direto pelo uso no transporte para as bases de distribuição e para os postos combustíveis.

Para São Paulo a etapa de distribuição representa 17% do consumo e, assim, a contribuição devido à etapa agrícola cai para 58%. Para a distribuição no Mato Grosso a etapa de distribuição do etanol, que é formada por uma perna a mais, a transferência entre bases, passa a representar quase 50% do consumo indireto de combustível. Neste caso a etapa agrícola passa a representar somente 36% das contribuições. A Figura 49 apresenta estas variações de forma gráfica.

Este resultado é bastante importante, pois indica como a distribuição pode influenciar a sustentabilidade de biocombustíveis e deve ser considerado no desenho de sistemas produtivos. Distribuição de biocombustível pelo modal rodoviário em regiões distantes da usina produtora diminui a sustentabilidade do produto, não sendo indicado. Outras formas de distribuição, como os alcodutos e o modal ferroviário, devem ser estudados para determinar seus impactos. Da mesma forma, a validade de produção de etanol para exportação deve ser avaliada mais detalhadamente para determinar sua sustentabilidade.

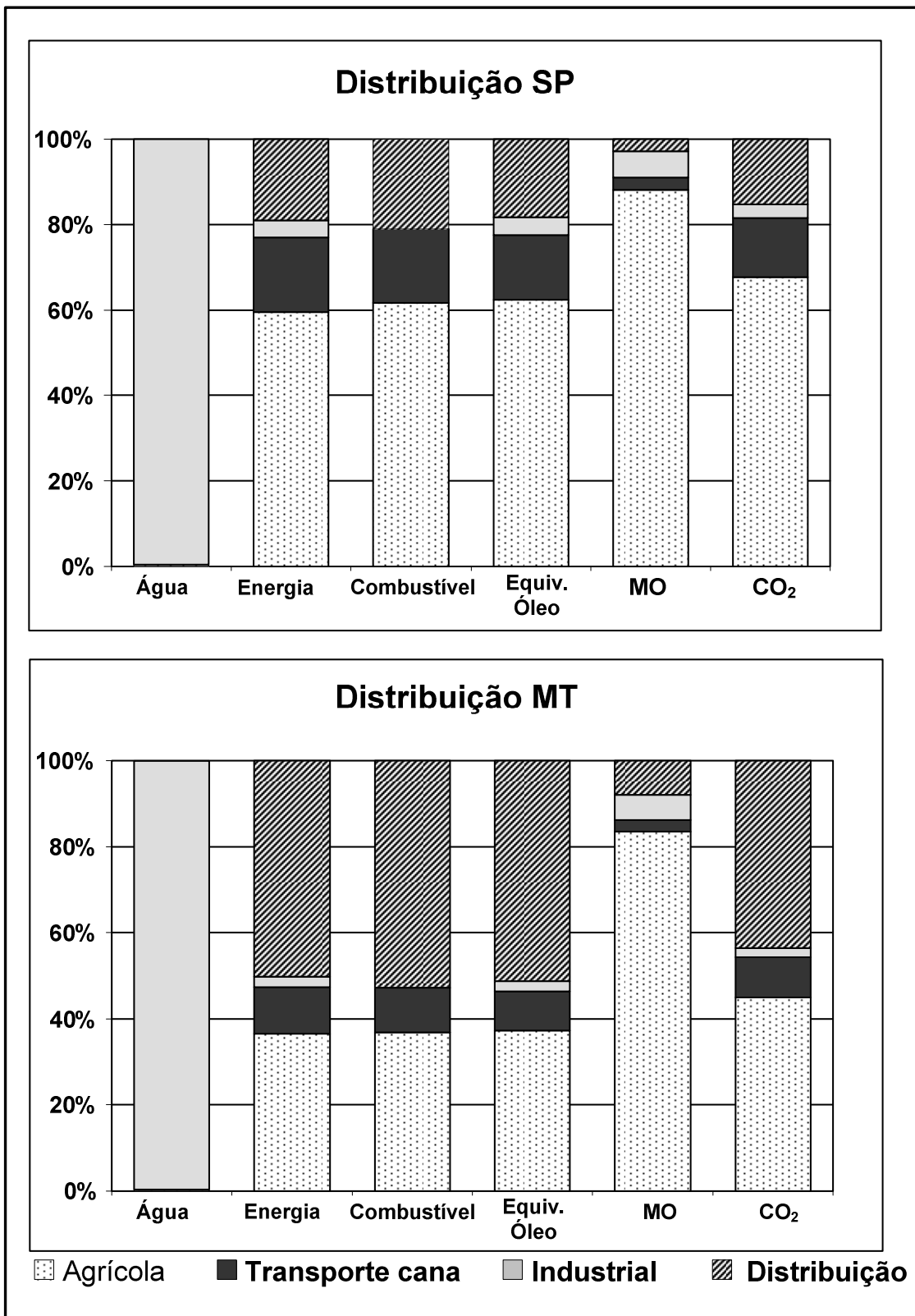


Figura 49: Impactos ambientais por etapa da cadeia produtiva do etanol

A demanda de mão-de-obra, expresso em horas empregadas por unidade funcional, indica a intensidade de uso de mão de obra. Este indicador pode ser avaliado de duas formas, considerando a questão econômica, quando os valores menores são considerados melhores, e considerando a questão social, que leva em consideração a geração de postos de trabalho e a absorção de trabalhadores.

A Tabela 26 apresenta a intensidade de mão-de-obra por etapa da cadeia produtiva. A etapa agrícola é aquela que mais demanda mão-de-obra, ao redor de 85% de toda a mão-de-obra empregada na cadeia do etanol. Destes, 70% é mão de obra temporária empregada para a colheita da cana. Este resultado é semelhante ao encontrado por Ulgiati (2001) para a produção de etanol de milho.

Tabela 26: Demanda de mão-de-obra por etapa da cadeia produtiva

Etapa	Demanda de Mão-de-obra SP (h/l etanol)	Demanda de Mão-de-obra MT (h/l etanol)
Agrícola	0,0169	0,0169
Transporte cana	0,0005	0,0005
Industrial	0,0012	0,0012
Distribuição	0,0005	0,0017
Total	0,0191	0,0203

É importante salientar, que as condições de trabalho são precárias. Em geral o pagamento é feito sobre a produtividade do trabalhador que recebe pela quantidade que colheu no dia. Por essa razão os trabalhadores costumam aumentar a jornada de trabalho. Num período de 40 anos a produtividade passou de 2 toneladas/homem/dia para até 12 toneladas/homem/dia, já tendo sido registrado até 30 toneladas. O aumento de produtividade é obtido devido a muito esforço físico. Existe entre os cortadores de cana alto índice de morte por parada cardiorrespiratória, associada ao esforço físico e a exposição aos gases provenientes das queimadas (Veiga, 2005)

Demanda energética é o volume total de energia necessária para produzir uma unidade funcional, considerando os combustíveis e a energia elétrica consumidos diretamente pelo sistema, a energia necessária à produção dos insumos para a lavoura ou processo industrial (fertilizantes, calcário, mudas, ácido sulfúrico, lubrificantes etc.) e a energia necessária para a produção e manutenção de equipamentos e instalações. Trata-

se de uma informação importante, especialmente para o cálculo do rendimento energético do produto, pois o biocombustível deve ser capaz de fornecer mais energia do que a que foi utilizada para sua produção.

O estudo calculou em 2,77 MJ/l de etanol a demanda energética, considerando as condições de processo descritas anteriormente. Este valor é igual ao encontrado por Macedo e Koller (1997), conforme indicado na Tabela 27, que apresenta alguns valores encontrados na literatura para etanol.

Tabela 27: Demanda energética para biocombustível encontrados na literatura

Matéria Prima	Demanda Energética MJ/litro	Fonte
Cana de açúcar	2,77	Presente estudo
Cana de açúcar	2,49 a 2,77	Macedo e Koller, 1997
Milho (USA)	25,4	Pimentel, 1991
Milho (USA)	3,6	Shapouri et al., 2002
Milho (USA)	27,6	Pimentel e Patzek, 2005
Celulose (USA)	33,7	Pimentel e Patzek, 2005

Os dados da Tabela 27 indicam que a demanda energética para a produção de etanol de cana-de-açúcar é menor do que a demanda para etanol de milho. Este resultado se deve aos rendimentos menores na etapa agrícola (8,5 toneladas de milho /hectare contra 80 toneladas de cana/hectare). Além desta diferença, a etapa industrial do etanol de cana utiliza o bagaço como combustível para gerar vapor e energia elétrica, e no caso do etanol de milho utiliza-se gás natural e carvão para este fim.

Mesmo as análises de produção de etanol de milho apresentam resultados bastante diferentes. Os trabalhos de Pimentel apresentam valores bastante superiores aos outros estudos. No trabalho de Shapouri e colaboradores não são incluídos o consumo energético para a produção de equipamentos agrícolas e industriais, incluídos no presente trabalho, enquanto que Pimentel inclui estes consumos além de incluir a demanda energética para o tratamento de efluentes. De qualquer forma, a demanda energética para o etanol de cana-de-açúcar é menor do que a demanda para o etanol de milho e de celulose.

6.3.2.2. Índices e Indicadores de produção da cadeia

A Tabela 28 apresenta os índices e indicadores de produção da cadeia de produção e distribuição do álcool etanol para as duas unidades funcionais estudadas, 1 kg de cana e 1 litro de etanol, considerando o etanol fornecido pela usina produtora e distribuído no estado de São Paulo e no estado do Mato Grosso.

Tabela 28: Índices Indicadores de produção e emissões

	Cana de açúcar^a	Etanol Usina^b	Etanol SP^b	Etanol MT^b	Unidade^{a,b}
Produção	80 000	5 576	5 576	5 576	Kg/ha.a
Rendimento energético líquido	200 960	130 100	125 800	111 800	MJ/ha.a
Emissão de CO ₂	18.2	0.22	0.33	0.49	Kg CO ₂ /FU
E. Gerada / E.Utilizada ^c	16.0	8.2	6.6	4.1	

^a A Unidade Funcional (UF) considerada para a cana é 1 tonelada de cana-de-açúcar no canavial.

^b A Unidade Funcional (UF) para o etanol é 1 litro considerando o etanol na Usina, distribuído no estado de SP e no estado de MT.

^c Onde E. Gerada é a energia fornecida pelo sistema e E. Utilizada é a energia consumida pelo sistema

O rendimento energético líquido, expressos em MJ por hectare, é a diferença entre a energia fornecida pelo sistema e demanda energética, ou o uso de recursos, em bases energéticas. Resumindo, total de entradas menos total de saídas. Permite avaliar a eficiência energética da cultura considerada. No estudo, cada hectare cultivado com cana de açúcar produziu um rendimento de 200.000 MJ de cana-de-açúcar, transformados em 130.100 MJ de álcool fornecido pela usina. É importante salientar que também ocorre geração de energia elétrica, via combustão do bagaço de cana. Entretanto, o presente estudo considerou que esta energia é reutilizada pela própria usina e não foi considerada, pois se trata de fornecimento interno ao sistema.

Comparada com outras culturas a cana-de-açúcar apresenta um alto rendimento energético, 200 GJ/ha. Hanegraaf et al. (1998) relatam um rendimento de 124 GJ/ha para a cultura de trigo enquanto Shapouri et al. (2002) adotaram rendimento de somente 38MJ/ha para o milho.

Macedo e Koller (1997) estimaram o rendimento líquido da produção de etanol 1980 MJ/TC enquanto o presente trabalho calculou em 1630 MJ/TC. Entretanto, os autores consideraram a energia gerada pelo bagaço como produto do sistema, mas não consideraram a utilização desta energia pelo sistema. Se a energia do bagaço for desconsiderada, este valor cai para 1800 MJ/TC, ainda superior ao estimado pelo presente estudo.

Quando a etapa de distribuição é acrescentada à cadeia, o rendimento cai ao redor de 3% para a distribuição no estado de São Paulo e 14% para a distribuição no estado do Mato Grosso.

Este resultado reforça a importância que a etapa de distribuição tem no desempenho energético e ambiental de biocombustível. Apesar de a etapa de distribuição causar impactos também na distribuição de combustíveis fósseis, tais impactos deveriam ser considerados quando planejando a logística de distribuição.

A eficiência energética do sistema foi avaliada através da razão entre energia disponibilizada pelo sistema e a consumida pelo sistema, ou razão saída/entrada. Este indicador permite avaliar se o sistema é uma opção viável como fonte de energia, pois os biocombustíveis somente são termicamente viáveis se fornecerem volume maior de energia do que a consumida em sua produção. Em outras palavras, a razão fornecimento por consumo deve ser superior a 1.

A eficiência energética é uma medida da eficiência do sistema na conversão de biomassa em combustível. Quanto maior seu valor, maior o rendimento em relação à energia investida, ou consumida e, portanto, maior a eficiência do sistema. Também pode ser utilizado como uma indicação de sua renovabilidade: quanto menor seu valor, menor a “renovabilidade” do combustível pois maior o uso de combustível fóssil (Malça e Freire, 2006).

Alguns autores (Malça e Freire, 2006; Macedo, 2007) sugerem que a avaliação da eficiência termodinâmica e da renovabilidade de biocombustíveis seja feita através da razão entre o rendimento líquido e a energia consumida, que segundo o autor é a razão entre a energia renovável disponibilizada e a energia fóssil consumida. Matematicamente, entretanto, este indicador é igual ao anterior subtraído de uma unidade e, portanto, avalia a eficiência energética da mesma forma que o primeiro. Além disso, a relação fornecimento por consumo é utilizada por vários trabalhos sobre biocombustíveis

permitindo a comparação entre os estudos. Ainda, a energia líquida disponibilizada é gerada a partir de energia fóssil e, portanto, não pode ser considerada renovável, pois depende, para ser fornecida, de energia não renovável.

A Tabela 29 apresenta valores encontrados na literatura para a eficiência energética do etanol gerado a partir de diferentes biomassas. Ainda que a mesma biomassa seja considerada, variação entre as eficiências energética é observada na literatura. Os diferentes resultados são devidos, principalmente, às variações de produtividade agrícola, bem como de utilização de insumos nesta etapa. Por sua vez, estas diferenças são decorrentes de variação em fertilidade do solo e do manejo agrícola.

A eficiência energética do etanol de cana-de-açúcar foi calculada no presente estudo em 8,2, de mesma grandeza dos outros estudos de etanol de cana. Trata-se da biomassa que fornece o maior rendimento energético, mais de duas vezes superior às outras biomassas. Este resultado se deve, principalmente, a grande produtividade alcançada por área na etapa agrícola, juntamente com a eficiência na utilização de subprodutos industriais. Segundo von Blottnitz e Curran (2007) outro fator importante diferenciando a cana é seu alto teor de açúcares, que apresenta melhor conversão para o etanol, enquanto as outras biomassa se destacam pelo teor de amidos e celulose.

Tabela 29: Razão Energia Fornecida/ Energia Consumida

Matéria Prima	E. Fornecida/ E. Consumida	Fonte
Cana-de-açúcar	8,2	Presente estudo
Cana-de-açúcar	8,3	Lamonica, 2005
Cana-de-açúcar	9,2	Macedo, 1998
Cana-de-açúcar	9,9	Macedo, 2007
Cana-de-açúcar	3,38	Bastianoni e Marchettini, 1996
Milho (Itália)	1,36	Ulgiati, 2001
Milho (USA)	1,11	Shapouri et al., 2002
Milho (USA)	0,78	Pimentel e Patzek, 2005
Trigo (França)	1,92	Malça e Freire, 2006
Beterraba (França)	1,60	Malça e Freire, 2006
Beterraba (Alemanha)	3,0	Macedo, 2007
Trigo (Europa)	3,0	Macedo, 2007
Celulose (USA)	0,63	Pimentel e Patzek, 2005

Ulgiati (2001) propõe o uso da eficiência energética para avaliar outros impactos ambientais. Considerando um cenário onde o combustível fóssil utilizado pelo sistema é totalmente substituído pelo próprio etanol, por exemplo, pelo uso de tratores e caminhões movidos a etanol, o aumento necessário na produção deste combustível para repor o fóssil poder ser estimado e, assim, pode ser relacionado ao aumento dos impactos ambientais.

Por exemplo, considerando o rendimento bruto do etanol em 8,5 unidades energéticas fornecidas por unidade investida, o rendimento líquido, ou a energia fornecida à sociedade, é de 7.5 unidades energéticas. Desta forma, para cada litro de etanol fornecido, deve-se produzir 1.13 litros de etanol, que corresponde a um aumento de 13%. Ou seja, a demanda por área agrícola e por água, a perda de solo, a utilização de substâncias químicas, etc., devem ser acrescidos em 13% para o sistema ser auto-suficiente em combustíveis fósseis.

6.3.2.3. Emissões e Ciclo de CO₂

As mudanças climáticas são motivo de grande preocupação entre os cientistas, pois afetam sobremaneira os ecossistemas e a atividade humana em todas as regiões e continentes. A principal causa destas mudanças é o elevado nível de emissões de CO₂ decorrente, principalmente, da queima de combustíveis fósseis (derivados de petróleo, gás natural, carvão, etc.), força motriz do sistema produtivo vigente. Sua concentração na atmosfera aumentou muito causando o que é conhecido como efeito estufa, ou o aquecimento da atmosfera terrestre devido aos gases que retêm os raios infravermelhos da luz solar. Tal aquecimento leva a inúmeras alterações climáticas.

As queimadas e a destruição das florestas também contribuem para o aumento do CO₂ na atmosfera. As plantas, durante seu crescimento, capturam CO₂ da atmosfera pela fotossíntese e, desta forma, acumulam carbono na biomassa produzida. Na maturidade (florestas) mantém equilíbrio dinâmico entre a absorção e a liberação através de seu metabolismo. Ou seja, tanto pela queima dos combustíveis fósseis como a destruição das florestas, carbono estocado pela natureza no decorrer de um longo período de tempo está sendo liberado para a atmosfera.

A utilização de biocombustíveis é normalmente associada à diminuição das emissões de CO₂, pois substitui o consumo de combustível fóssil. O etanol também tem sido tratado como uma fonte mitigadora de emissões de CO₂, devido à absorção de CO₂

que ocorre na produção de biomassa e à substituição de combustível fóssil pelo uso de subprodutos, como por exemplo, a geração de energia elétrica a partir de bagaço. Baseado nesta lógica algumas usinas já comercializam créditos de carbono no mercado (Folha de São Paulo, 16/2/2005; MCT, 2006) dentro do Mecanismo de Desenvolvimento Limpo (MDL).

Para avaliar as emissões associadas ao consumo de combustível há que se considerar os ciclos de carbono para os biocombustíveis e para os combustíveis de origem fóssil. O ciclo de CO_2 para biocombustíveis é considerado fechado, ou seja, todas as emissões causadas pela queima do biocombustível são re-absorvidas pela produção da biomassa num próximo ciclo. No caso de combustíveis fósseis este ciclo é considerado aberto, pois utiliza reservas fossilizadas de carbono (petróleo, carvão, etc.) e o CO_2 é emitido para a atmosfera, sem re-absorção. A Figura 50 apresenta estes dois ciclos.

Entretanto, esta abordagem simplifica os dois ciclos, mascarando as reais emissões associadas a eles. A Figura 51 apresenta o ciclo de CO_2 de uma forma mais completa. Nos dois casos há consumo de combustíveis fósseis em todas as etapas das cadeias, através do uso de bens e de serviços. No caso dos combustíveis fósseis o ciclo é longo. Os combustíveis são obtidos de reservas de carbono que se formaram durante um período de tempo muito longo. No processo de extração e de processamento, bem como para sua distribuição, são utilizados combustíveis. A queima do combustível disponibilizado e consumido pelo sistema no processo produtivo resulta em emissões de CO_2 para a atmosfera que contribuem para o efeito estufa, pois não são re-absorvidos na formação de novas reservas (florestas, por exemplo) na mesma velocidade em que são emitidos.

No caso dos biocombustíveis o ciclo é curto. Através da fotossíntese ocorre absorção de carbono na biomassa que é, posteriormente, transformada em um biocombustível. O CO_2 absorvido pela biomassa é emitido novamente para a atmosfera pela queima do etanol, e ainda devido à queima da lavoura antes da colheita, devido à queima do bagaço para a geração de energia, e devido à fermentação dos açúcares. Neste sistema também ocorre utilização de combustível fóssil em todas as suas etapas - produção agrícola, transporte, processamento industrial e distribuição - gerando também emissões de CO_2 . Mais, na etapa agrícola, também ocorre emissão de CO_2 devido à oxidação do solo erodido.

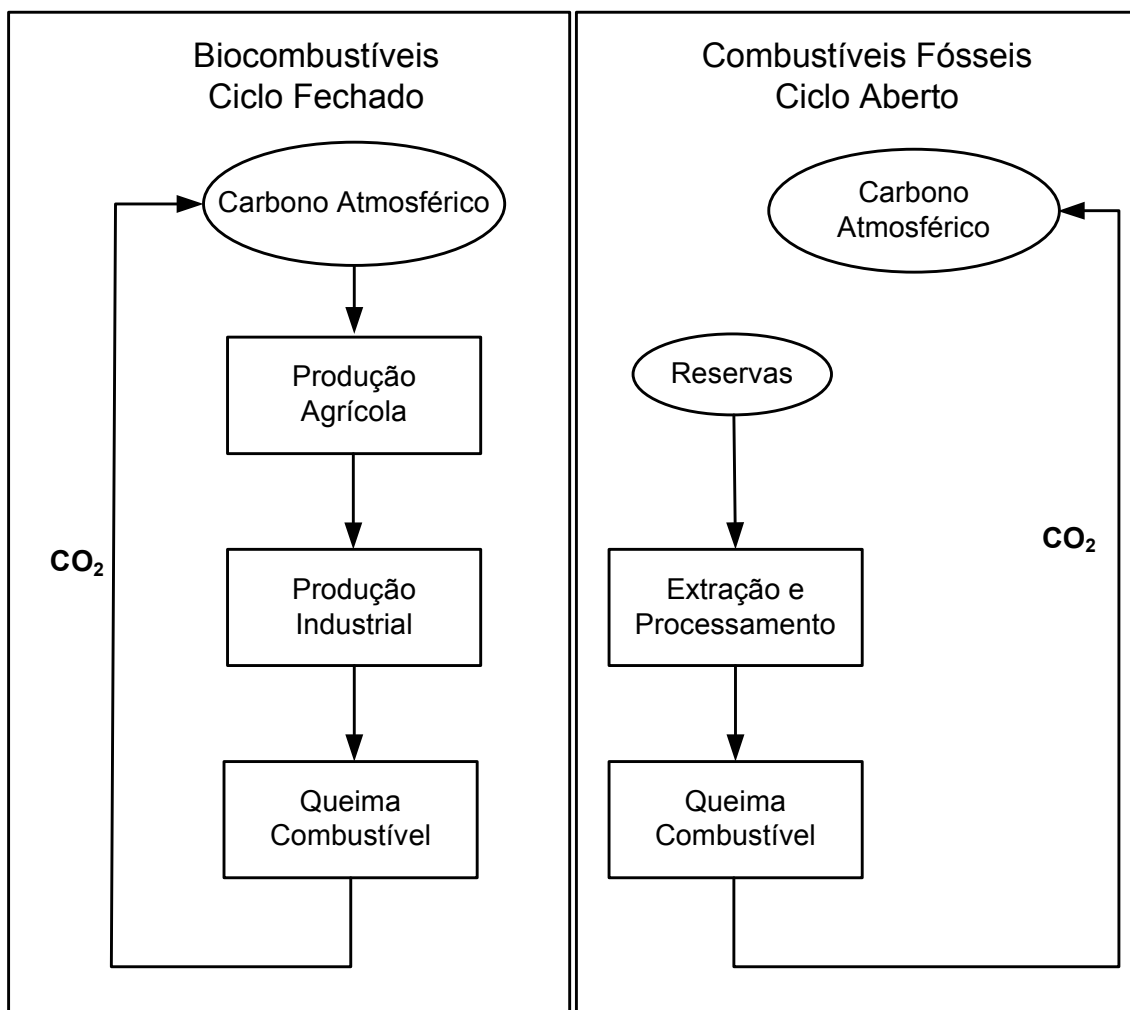


Figura 50: Representação simplificada dos ciclos de CO_2 de combustíveis

Ao se considerar este ciclo como sendo fechado (Figura 50), assume-se que todo o carbono absorvido pela biomassa é emitido na forma de CO_2 pela utilização das biomassas (palha, bagaço e combustível) e pela fermentação industrial (Panray Beeharry, 2001; Yoshida et al., 2003).

Portanto, e considerando que há emissões devido ao uso de combustíveis fósseis, este sistema certamente não absorve, ou mitiga, CO_2 . Ademais, um canavial não pode ser considerado um sumidouro de CO_2 , como o é uma floresta, pois não armazena carbono, apenas o absorve para produzir combustível que logo será queimado e novamente emitirá CO_2 .

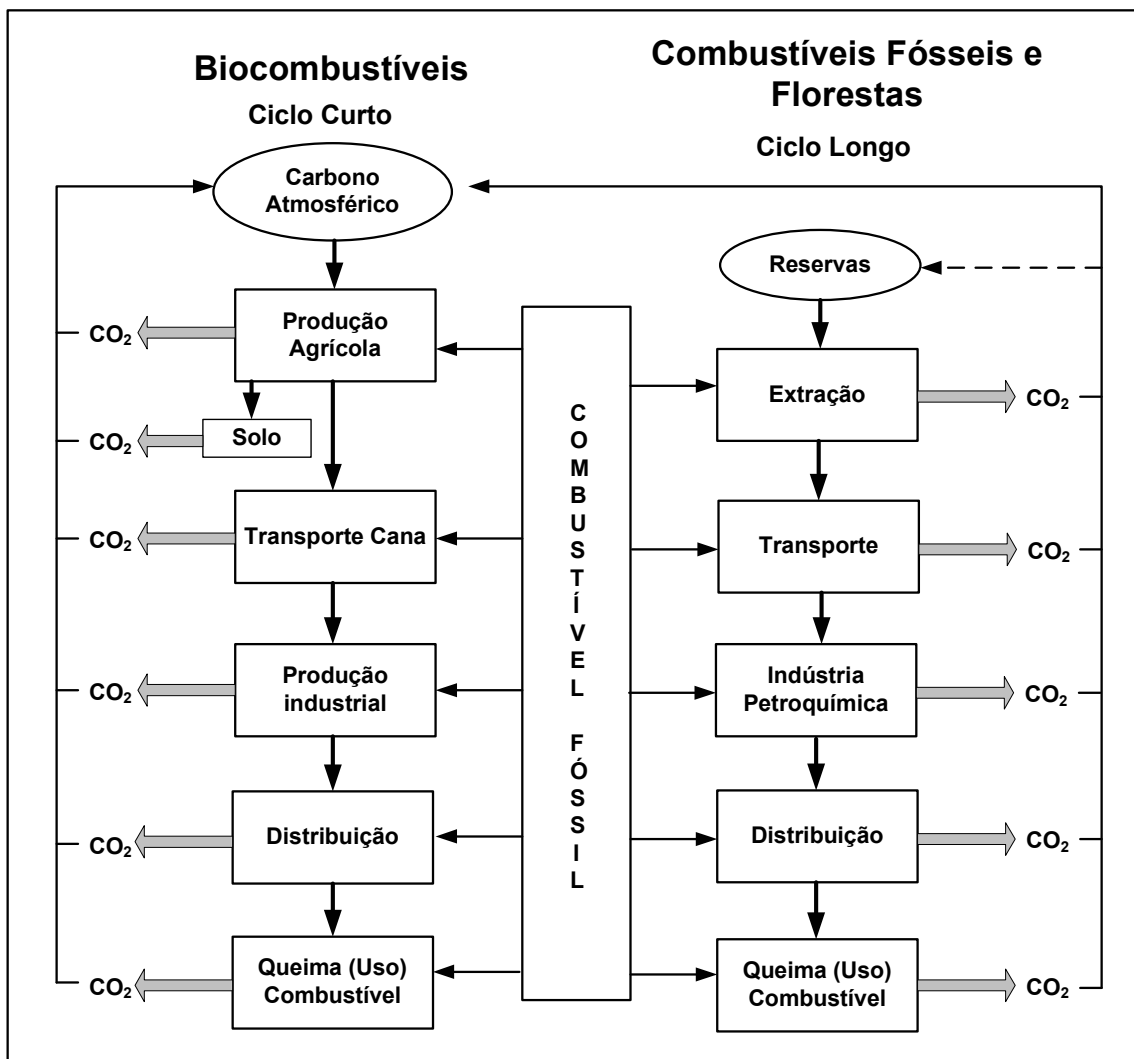


Figura 51: Ciclo do Carbono para os combustíveis

Adaptado de Panray Beeharry, 2001.

Da mesma forma a queima da cana antes da colheita com a finalidade de facilitar a colheita manual é responsável pela emissão de grande volume de CO_2 . Sua redução, além de obrigatória pela legislação vigente do Estado de São Paulo, tem sido tratada como um fator mitigante de emissões de gases de efeito estufa (Campos, 2003). Lima et al. (1999) estimaram que estas emissões correspondiam em 1995 a 97,5% de todas as emissões de resíduos agrícolas no Brasil. Entretanto, as emissões da queima não são consideradas como emissões líquidas, pois são re-absorvidas no próximo ciclo (Lima et al., 1999) e o carbono que não foi emitido na forma de CO_2 , presente na palha que fica

depositada e é incorporada ao solo, também será reciclado nos próximos ciclos produtivos.

Há que se destacar, entretanto, que a eliminação da queima apresenta alguns benefícios. A cobertura do solo devido a deposição da palhada resulta em diminuição da erosão, pois a palha impede a ação direta dos ventos e da chuva (Furlani Neto et al., 1997), portanto diminuindo este impacto ambiental e também diminuindo as emissões devido à oxidação do solo. Da mesma forma, a cobertura de solo com a palha propicia desenvolvimento de microflora de decomposição da palha melhorando a fertilidade do solo, bem como o controle de ervas daninhas, fato que permite a diminuição do uso de fertilizantes e de herbicidas (Primavesi, 1987; Campos, 2003), diminuindo as emissões associadas a estes materiais. Entretanto, esta diminuição não deve ser considerada como um fator de mitigação, porém com uma melhora do sistema produtivo e será refletido no desempenho deste sistema frente a outros sistemas.

Na literatura é comum encontrar cálculos de balanço de CO₂ considerando as emissões evitadas no processo industrial e pelo uso do etanol (Macedo, 1998; Macedo, 2000; Panray Beeharry, 2001; Kim e Dale, 2005). A lógica destes estudos é que, substituindo o combustível fóssil pelo uso de subprodutos para fertilização e para gerar vapor e energia elétrica, diminui-se as emissões. Assim, são calculadas as emissões evitadas e subtraídas das emissões do sistema. Ora, a afirmação de que emissões são evitadas é correta, porém a matemática utilizada não o é. Quando o cálculo de emissões é feito, são considerados os consumos efetivos de materiais e serviços. Portanto, as emissões a eles associadas efetivamente ocorrem. Se os subprodutos não fossem utilizados, provavelmente os consumos de materiais e serviços seriam maiores e, portanto, corresponderiam a volume de emissões maiores do que o calculado. Portanto, quando as emissões evitadas são subtraídas, estas estão sendo contabilizadas duplamente.

Naturalmente que a estimativa das emissões evitadas são importantes para se avaliar o sistema produtivo, especialmente quando são comparados diferentes sistemas ou biomassas. Entretanto, estas emissões não podem ser tratadas como se fossem equivalentes ao CO₂ absorvido.

Patzek (2004) propõe a comparação entre as emissões evitadas pelo uso do biocombustível e as emissões geradas pela produção do mesmo. Para este autor os biocombustíveis só deveriam ser considerados como uma opção renovável se as

emissões evitadas forem superiores àquelas que efetivamente ocorrem. Este raciocínio é mais lógico do que o anterior. Entretanto, há que se considerar que as reservas de combustíveis fósseis são finitas, portanto, não renováveis, enquanto que os biocombustíveis, produzidos a partir de biomassa, são, em teoria, renováveis a cada nova safra.

Bastianoni e Marchettini (1996) avaliam que as emissões devidas à produção e combustão de um biocombustível devem ser menores do que as emissões associadas a um volume equivalente de energia de combustível fóssil. Entretanto utilizam a razão entre as emissões efetivas pelas emissões evitadas para comparar a eficiência de biocombustíveis.

Entendemos que para avaliar as emissões de CO₂ deve-se, em primeiro lugar, considerar o ciclo de carbono da cana e de seus produtos fechado, pois se trata de um ciclo curto. Ou seja, o CO₂ absorvido pela biomassa é emitido via produtos e subprodutos e não é considerado no cálculo, nem mesmo a emissão devido à queima do etanol. Em segundo lugar, as emissões associadas ao biocombustível são aquelas associadas ao sistema produtivo - emissões devido à oxidação do solo erodido e devidas ao consumo de combustível fóssil via utilização de materiais, insumos e serviços. Assim, entre biocombustíveis de diferentes biomassas, a comparação é direta, o sistema produtivo com menor emissão é aquele mais adequado.

Já no caso de comparação entre os biocombustíveis e os combustíveis fósseis, devem ser incluídas as emissões devido ao uso do combustível, gasolina, por exemplo, o que não ocorre no caso dos biocombustíveis, pois seu ciclo é fechado.

Esta abordagem permite avaliar de forma mais coerente a utilização dos diferentes combustíveis. As vantagens que um determinado sistema tem em relação ao outro devido à diminuição da utilização de insumos, independente da etapa em que ocorre, e em razão da melhor utilização dos subprodutos é refletido em menor volume de emissões por unidade funcional. Também permite avaliar os casos de sistemas que geram outros produtos, ou co-produtos, como por exemplo, a energia elétrica comercializada por algumas usinas. Neste caso a comparação pode ser feita em termos de emissões por energia gerada (kg de CO₂/MJ), considerando-se que as emissões efetivamente ocorrem, porém o sistema é capaz de disponibilizar maior volume de energia.

A Tabela 30 apresenta os resultados do cálculo de emissões de CO₂ para o etanol de cana-de-açúcar. Os resultados indicam que a etapa agrícola é responsável por 80%

das emissões de CO₂ do sistema. O transporte da cana é responsável por 17% e a etapa industrial somente 3% das emissões.

Tabela 30: Balanço de emissões de CO₂ para o etanol de cana-de-açúcar

Etapa	Kg de CO ₂ /ha	Kg de CO ₂ /TC	Kg de CO ₂ / l etanol	% do Total
Agrícola				
Uso direto de Combustível	408	5.08	0.06	22
Oxidação do solo	428	5.36	0.07	23
Materiais	622	7.78	0.09	35
Total Agrícola	1458	18.22	0.22	80
Transporte				
Uso de Combustíveis	115	1.43	0.02	7
Materiais	186	2.32	0.03	10
Industrial				
Materiais	68	0.85	0.01	3
Total	1827	22.82	0.28	

Dentro da etapa agrícola, as emissões são devido ao uso de materiais (35%), à oxidação do solo (23%) e ao uso direto de combustíveis fósseis (22%). Novamente, a etapa agrícola é aquela com maior impacto reforçando a importância do desempenho desta etapa no desempenho global do sistema. Bernesson et al. (2006) relataram o mesmo resultado para etanol produzido a partir de trigo.

A Tabela 31 apresenta alguns valores de emissões associadas à produção de biocombustíveis encontrados na literatura. Somente foram incluídos os estudos que adotam a mesma abordagem do presente estudo, qual seja a suposição de ciclo de CO₂ fechado, sem desconto de emissões devido a geração de outros produtos. Os resultados são apresentados em duas bases, emissões por hectare e por litro de etanol.

Considerando as diferentes biomassas, a cana-de-açúcar é aquela com menor volume de emissão de CO₂ por litro produzido. O etanol de trigo emite até 4 vezes mais, enquanto que o de milho, calculado por Ulgiati emite ao redor de 10 vezes mais do que o calculado pelo presente estudo.

Tabela 31: Emissões de Biocombustíveis

Matéria Prima	kg CO₂/ha	kg CO₂/l etanol	g CO₂/MJ	Fonte
Cana-de-açúcar	1827	0,28	12,4	Presente estudo
Cana-de-açúcar		0,12	5,3	Ometto, 2005
Cana-de-açúca (Brasil)	1890			Bastianoni e Marchettini, 1996
Cana-de-açúcar (USA)	4860			Bastianoni e Marchettini, 1996
Trigo		0,8	35,4	Bernesson et al., 2006
Milho		2,2	97,3	Ulgiati, 2001
Uva	8050			Bastianoni e Marchettini, 1996

O volume de emissões de CO₂ calculado por Ometto (2005) para o etanol de cana é aproximadamente a metade do volume calculado pelo presente estudo. Entretanto, em seu estudo Ometto não considera as emissões devidas à oxidação do solo, que são significativas para o sistema. Se fossem consideradas, as emissões totais seriam da ordem de 0,2 kg CO₂ por litro de etanol, ainda menores do que as calculadas pelo presente estudo. Tal diferença pode ser explicada pela adoção de parâmetros de produção e de processo, em especial rendimentos, que diferem de um trabalho para outro.

Bastianoni e Marchettini (1996) avaliaram três sistemas produtivos de etanol, dois a partir de cana, um no Brasil e outro nos Estados Unidos, e um a partir de uvas na Itália. Encontraram grande diferença entre as emissões do sistema brasileiro e americano, sendo que as emissões associadas a este último é duas vezes e meia superior às emissões do primeiro. Esta diferença está associada a intensidade de utilização de materiais, em especial na etapa agrícola. As emissões calculadas por Bastianoni e Marchettini para o sistema brasileiro são superiores às calculadas pelo presente trabalho, sendo esta diferença devido a melhora de desempenho agrícola e industrial observados no período de tempo que separa os dois estudos (10 anos).

Como foi indicado anteriormente, a energia elétrica gerada pela queima do bagaço não foi considerada nos cálculos, pois se trata de um produto interno do sistema estudado. Entretanto, há excedente de bagaço e algumas usinas comercializam este excedente de energia elétrica. Neste caso, apesar das emissões de CO₂ por hectare cultivado e por litro de etanol serem as mesmas, quando calculada por energia gerada elas são menores do que as apresentadas na Tabela 31.

Segundo Lamonica (2005) há um excedente de 7% de bagaço, capaz de gerar 41kwh de energia elétrica por tonelada de cana. Se comercializado, as emissões correspondentes a este sistema correspondem à 11,5 g de CO₂/MJ disponibilizado. Este valor é ainda melhor do que o anterior, mas ainda superior ao encontrado por Ometto (5,3 g de CO₂/MJ).

Se as etapas de distribuição forem incluídas, conforme apresentado na Tabela 32, observa-se que a distância tem grande influência nas emissões de CO₂. Para a distribuição no estado de São Paulo ocorre um aumento de 18 % no volume de emissões por litro de etanol. No caso da distribuição para o estado de Mato Grosso este aumento é de 80%.

Tabela 32: Emissões de CO₂ da cadeia do etanol considerando a distribuição.

Etapa	São Paulo		Mato Grosso	
	Kg de CO ₂ / l etanol	%	Kg de CO ₂ / l etanol	%
Agrícola				
Uso direto de Combustível	0,06	18	0,06	12
Oxidação do solo	0,07	21	0,07	14
Materiais	0,09	28	0,09	18
Total Agrícola	0,22	67	0,22	44
Transporte				
Uso de Combustíveis	0,02	6	0,02	4
Materiais	0,03	9	0,03	6
Industrial				
Materiais	0,01	3	0,01	2
Distribuição				
Uso de Combustíveis	0,02	6	0,10	20
Materiais	0,03	9	0,13	24
Total	0,33		0,51	

Apesar da comparação entre combustíveis, fósseis e biocombustíveis, não considerar a etapa de distribuição, este resultado é importante porque indica que o desempenho geral do biocombustível depende desta etapa. Portanto, os sistemas de distribuição devem ser avaliados e considerados na definição de estratégias e modelos de produção, especialmente na comparação entre a adoção de grandes usinas e biorefinarias versus pequenas usinas regionais. Da mesma forma os modais de transporte, por exemplo os álcoodutos e o transporte ferroviário, devem ser avaliados

considerando-se não somente a questão econômica, mas deve ser incluído também uma avaliação de seus impactos ambientais, notadamente as emissões de CO₂ decorrentes de sua implementação e operação.

Este resultado também traz à tona a questão de exportação de etanol para outros países, como tem ocorrido para a Europa, o Japão e para os Estados Unidos. Considerando-se as emissões de CO₂, pelos resultados do presente estudo, o etanol de cana-de-açúcar é, dos biocombustíveis, aquele que produz menores volumes de emissões de CO₂ no seu processo produtivo. Assim, poderia se inferir que sua produção no Brasil e exportação para os países desenvolvidos constitui uma opção que contribuiria para a redução das emissões por combustíveis fósseis. Entretanto, como as etapas de transporte e de distribuição a longas distâncias também consomem combustíveis fósseis, portanto emitem CO₂, seus impactos devem ser avaliados cuidadosamente antes de se adotar este modelo.

Aqui, poderíamos considerar que os combustíveis fósseis também necessitam ser transportados a longas distâncias e distribuídos. Porém, no caso do etanol produzido a partir de biomassa, há a possibilidade de desenhar um sistema de produção e distribuição mais adequado, onde a produção poderia ser realizada em escala menor para a distribuição a uma área também reduzida, diminuindo, assim, os efeitos causados pela etapa de distribuição.

A inclusão da etapa de distribuição nos cálculos da emissão de CO₂ também levanta uma questão importante: os créditos de carbono comercializados pelas usinas, baseados em emissões evitadas, não consideram a etapa de distribuição. Porém, os resultados do presente estudo indicam que os benefícios do etanol podem ser neutralizados pela etapa de distribuição.

A avaliação do ciclo do CO₂ deixa claro que o etanol, assim como outros biocombustíveis, recicla o CO₂ emitido durante sua queima. Porém esta reciclagem não é suficiente. Para ser considerado neutro (emissões iguais à absorção do CO₂ pela etapa agrícola) o sistema deve ser capaz de absorver todas as emissões direta e indiretamente associadas à cadeia produtiva. A fim de compensar o CO₂ emitido pela cadeia, é necessária maior área agrícola. Ou seja, a área agrícola deve incluir não somente o canavial, mas também a área de mata nativa, não cultivada. Como também foi mostrado que as emissões dependem da etapa de distribuição, o tamanho desta área depende do

modelo adotado, e será maior com o aumento da distância de distribuição e do sistema de transporte.

Tal prática, além de neutralizar as emissões de CO₂ do sistema, traz algumas vantagens que serão discutidas a seguir.

6.3.3 – Reserva Legal

Código Florestal Brasileiro define a Reserva legal como a “área localizada no interior de uma propriedade ou posse rural, excetuada a de preservação permanente, necessária ao uso sustentável dos recursos naturais, à conservação e reabilitação dos processos ecológicos, à conservação da biodiversidade e ao abrigo e proteção de fauna e flora nativas”. Determina que estas áreas devem ser de oitenta por cento em propriedades situadas em área de floresta da Amazônia Legal, trinta e cinco por cento em propriedades situadas em área de cerrado da Amazônia Legal, e vinte por cento em propriedades situadas nas demais regiões do País. Quando a propriedade não possuir reserva legal, fica o proprietário obrigado a recompor a reserva, regenerando a vegetação nativa ou ; compensar a reserva legal por outra área equivalente extensão (Brasil, 1965).

Desta forma, toda propriedade rural, incluindo aquelas produzindo cana-de-açúcar, deve manter área de preservação ambiental que no estado de São Paulo corresponde à 20% da propriedade. Ou seja, supondo que a propriedade cumpre o Código Florestal, deve haver uma área correspondente a 25% da área cultivada sem atividade agrícola destinada a reserva legal.

Nos cálculos anteriores, a reserva legal não foi considerada para permitir a comparação com estudos de outros biocombustíveis. Por este motivo os cálculos foram refeitos incluindo esta área. A Figura 52 apresenta o diagrama sistêmico desse sistema.

Nesta nova condição há duas diferenças em relação à anterior: a) o rendimento agrícola por hectare é alterado, pois 20% da área não é cultivada, passando de 80 toneladas de cana por hectare (rendimento real da área cultivada) para 64 toneladas por hectare (rendimento da área total); b) Da mesma maneira, a utilização dos materiais e serviços da área agrícola, quando convertidos para a área total, diminuem da intensidade. As etapas posteriores, transporte, industrialização e distribuição, não foram alterados.

Diagrama do Sistema Produtivo de Álcool

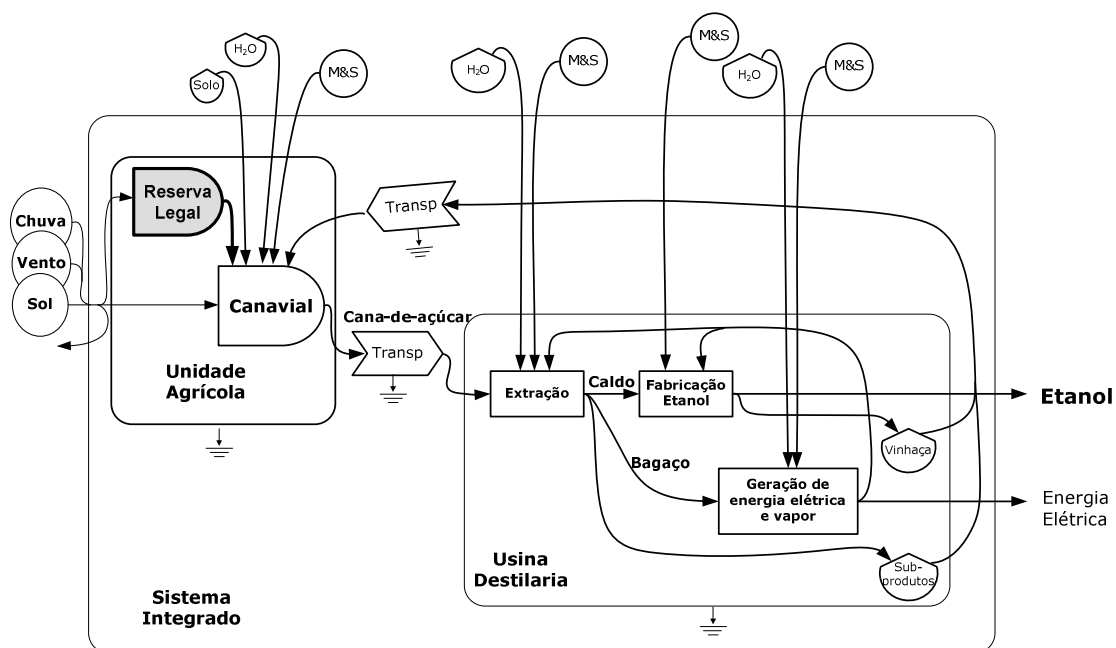


Figura 52:Diagrama Sistêmico da produção de etanol considerando a Reserva Legal

Os resultados da análise emergética considerando a reserva legal são apresentados na Tabela 33 para a distribuição no estado de São Paulo e na Tabela 34 para a distribuição no estado do Mato Grosso.

Tabela 33: Fluxos Emergéticos da cadeia produtiva do etanol distribuído em SP e considerando a reserva técnica

	Canaíal		Indústria		Transporte		Total	
	1×10^{14} seJ/ha.a	%	1×10^{14} seJ/ha.a	%	1×10^{14} seJ/ha.a	%	1×10^{14} seJ/ha.a	%
Renovável	21,24	40,6	0,71	10,5	---	---	21,94	35,6
Não Renovável	3,20	6,1	---	---	---	---	3,20	5,2
Material	16,24	31,1	3,00	44,3	1,78	70,5	21,12	34,1
Serviço	11,59	22,2	3,06	45,2	0,78	29,5	15,43	25,1
Total								
SeJ/l	52,27		6,77		2,56		61,60	
% do total	84,8%		11,0%		4,2%			

Tabela 34: Fluxos Emergéticos da cadeia produtiva do etanol distribuído em MT e considerando a reserva técnica

	Canavial		Indústria		Transporte		Total	
	1×10^{14} seJ/ha.a	%	1×10^{14} seJ/ha.a	%	1×10^{14} seJ/ha.a	%	1×10^{14} seJ/ha.a	%
Renovável	21,24	40,6	0,71	10,5	---	---	21,94	33,7
Não Renovável	3,20	6,1	---	---	---	---	3,20	4,9
Material	16,24	31,1	3,00	44,3	4,55	70,5	23,79	36,5
Serviço	11,59	22,2	3,06	45,2	1,55	29,5	16,20	24,9
Total								
SeJ/l	52,27		6,77		6,10		65,14	
% do total	80,2%		10,4%		9,4%			

Nos dois casos ocorre diminuição dos fluxos totais por hectare ano porque somente 80% da área é efetivamente cultivada. Assim, considerando a área da unidade agrícola no lugar da área cultivada, todos os fluxos diminuem, com exceção da insolação e da chuva, pois estes entram no sistema independentemente do uso do solo. A diminuição é da ordem de 20% para os materiais e serviços da economia e de 2% para os recursos renováveis. A Figura 53 apresenta graficamente esta diferença considerando o etanol distribuído no estado de São Paulo, quando a distribuição ocorre no estado do Mato Grosso a diminuição segue este mesmo patamar.

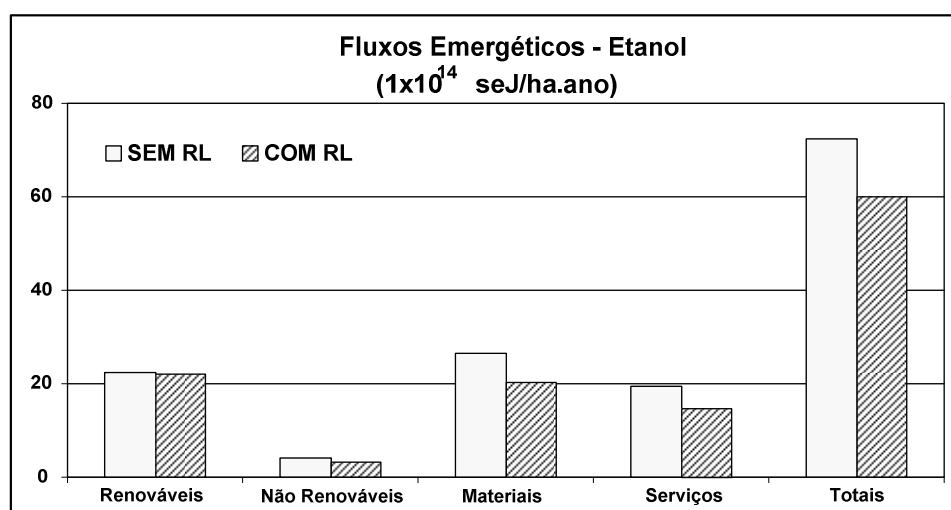


Figura 53: Fluxos emergéticos da produção de etanol com e sem inclusão de reserva legal na unidade agrícola. Onde RL é reserva legal.

A Tabela 35 apresenta os índices emergéticos dos produtos da cadeia produtiva do etanol considerando a reserva legal. A inclusão da área de reserva legal melhora todos os índices emergéticos, com exceção da transformidade.

Tabela 35: Índices emergéticos dos produtos da cadeia de etanol considerando a reserva legal

	Cana	Álcool Usina	Álcool Posto SP	Álcool Posto MT
Tr				
seJ/ J	3,05 E +04	5,07 E+04	5,19E+04	5,49E+04
seJ/Kg	8,17 E +10	1,14E+12	1,17E+12	1,24E+12
% R	40,6 %	36,5 %	35,6 %	33,7 %
%R*	45,2%	40,8%	39,9%	37,7%
EYR	1,88	1,72	1,69	1,63
ELR	1,46	1,74	1,81	1,97
ELR*	1,21	1,45	1,51	1,65
EIR	1,14	1,39	1,45	1,59
SI	0,94	0,99	0,93	0,83
SI*	1,29	1,28	1,20	1,06
EER	1,36	0,71	0,57	0,45

Onde Tr – Transformidade, %R – renovabilidade considerando somente os recursos da natureza; %R* – renovabilidade considerando as parcelas renováveis dos materiais e serviços; EYR – Razão de Rendimento Emergético; ELR – Taxa de Carga Ambiental; ELR* – Taxa de Carga Ambiental considerando as parcelas renováveis dos materiais e serviços; EIR – Razão de Investimento de Energia; SI – Índice de sustentabilidade; SI* – Índice de sustentabilidade considerando as parcelas renováveis dos materiais e serviços.

A transformidade dos produtos da cadeia, cana e etanol, aumenta com a inclusão da área de reserva legal. Este aumento ocorre devido à queda na produtividade por área, mesmo considerando a diminuição no consumo de insumos. Entretanto estes valores são de mesma grandeza, sendo que o maior aumento ocorre para a cana-de-açúcar (9%), caindo com o aumento da cadeia produtiva e com a aumento da etapa de distribuição, conforme mostrado na Figura 54.

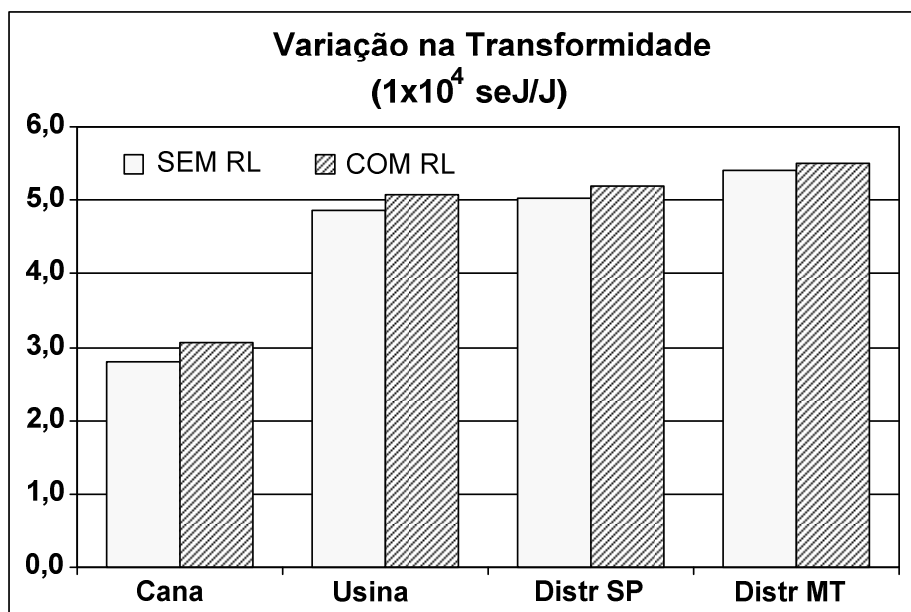


Figura 54: Comparação entre as transformidades dos produtos da cadeia do etanol considerando a inclusão da reserva legal

A renovabilidade da cana-de-açúcar e do etanol aumenta com a inclusão da reserva legal, uma área onde a energia solar e a chuva, dois fluxos renováveis, continuam incidindo, porém não recebe os fluxos de materiais e serviços da economia, na sua maioria não renováveis. Assim a renovabilidade da cana-de-açúcar aumenta de 35% para 41% (aumento de 15%) e a do etanol passa de 31% para 37% (aumento de 18%). Quando as parcelas renováveis dos materiais e serviços da economia são consideradas no cálculo da renovabilidade (renovabilidade modificada) esta também aumenta, porém somente 12% para a cana-de-açúcar passando de 40% para 45%, e 15% para o etanol, passando de 35% para 41%. A Figura 55 apresenta graficamente o aumento da renovabilidade.

Além da renovabilidade os outros índices emergéticos da cadeia também melhoram, conforme apresentado na Figura 56 para cana-de-açúcar e na Figura 57 para o etanol. A Razão de Rendimento Emergético (EYR) aumenta ao redor de 9%, passando de 1,73 para 1,87 no caso da cana-de-açúcar, e de 1,57 para 1,72 para o etanol. Indicando que o sistema tem rendimento emergético maior quando a área de reserva legal é incluída.

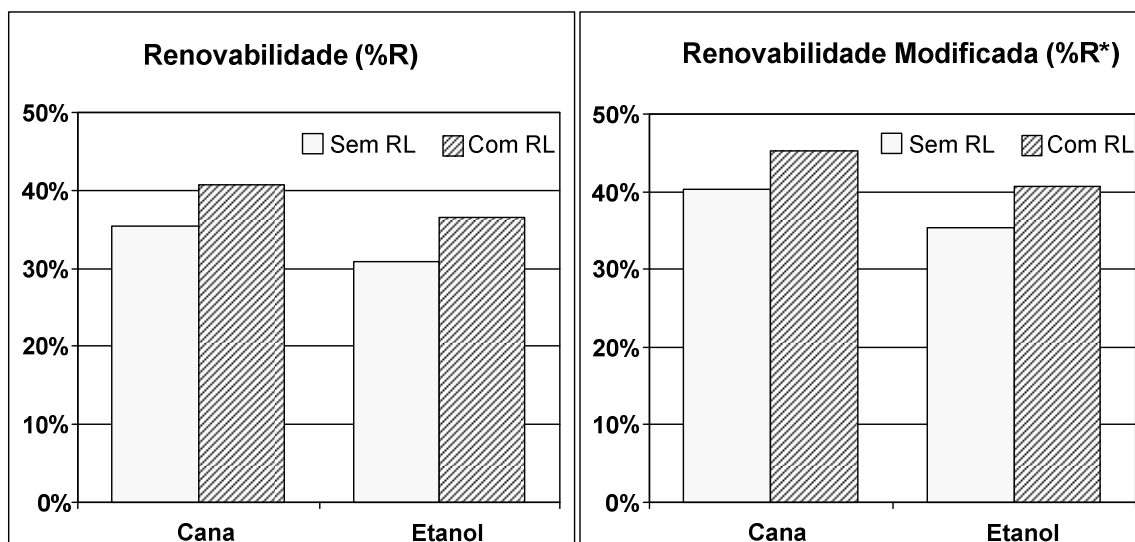


Figura 55: Renovabilidade considerando a reserva legal (RL)

Da mesma forma, a Taxa de Carga Ambiental (ELR) que indica a pressão do sistema no ecossistema associado diminui em 20% quando a reserva legal foi acrescentada. Neste caso, todos os sistemas considerados, agrícola, industrial e com distribuição, apresentam ELR inferior a 2, que é o valor indicado em literatura para sistemas de moderado impacto ambiental. O mesmo resultado é obtido para a Taxa de Carga Ambiental Modificada (ELR*), calculada considerando as parcelas renováveis dos materiais e serviços da economia.

A Razão de Investimento Emergético (EIR), que indica o investimento da sociedade para produzir um bem em relação à contribuição da natureza, diminui 18% para o sistema agrícola e 20% para o etanol com a inclusão da reserva legal incluída. Em outras palavras, este sistema é mais competitivo do que aquele que não possui a reserva legal, pois necessita investir volume maior de recursos da economia.

O Índice de Sustentabilidade (SI), ou a razão da contribuição potencial de um sistema por unidade de carga ambiental, aumenta 36% para a cana-de-açúcar e 40% para o etanol. Este resultado indica que o impacto por unidade de energia primária disponibilizada é menor quando a reserva legal é respeitada. Mesmo assim, somente o sistema agrícola apresentou SI superior a 1, indicando que o sistema contribui com a liberação de recursos para uso pela economia sem afetar o equilíbrio do meio, enquanto que o sistema produtivo de etanol continua com SI inferior à unidade, indicando sistema que consome recursos naturais.

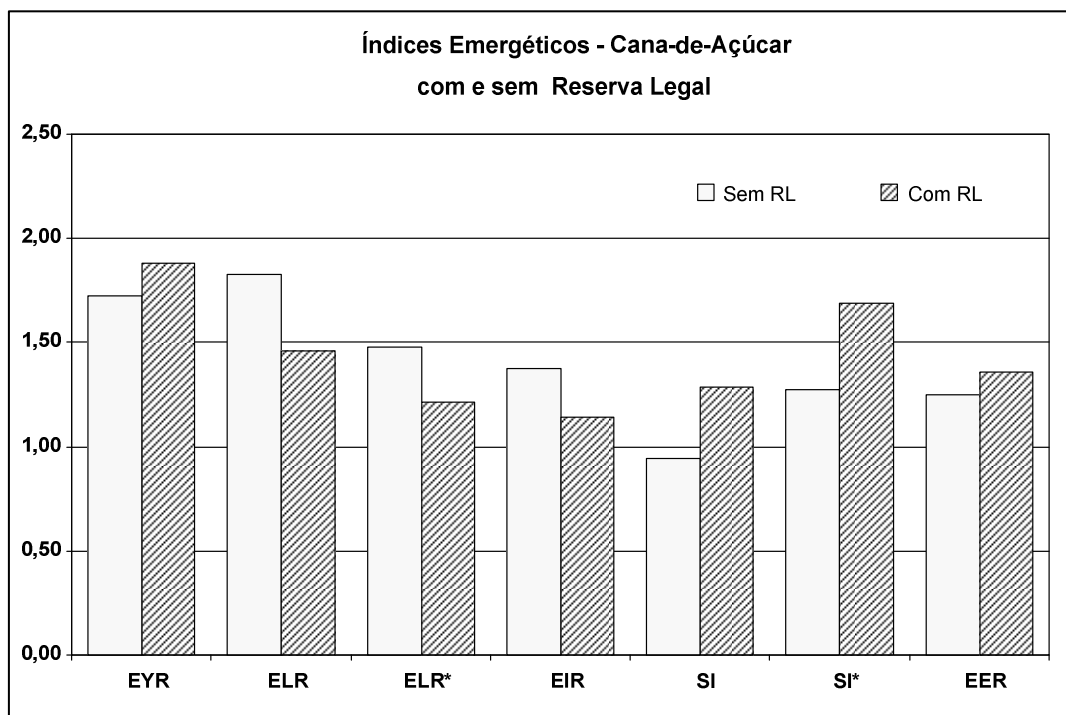


Figura 56: Índices emergéticos da cana-de-açúcar com e sem inclusão da Reserva Legal (RL)

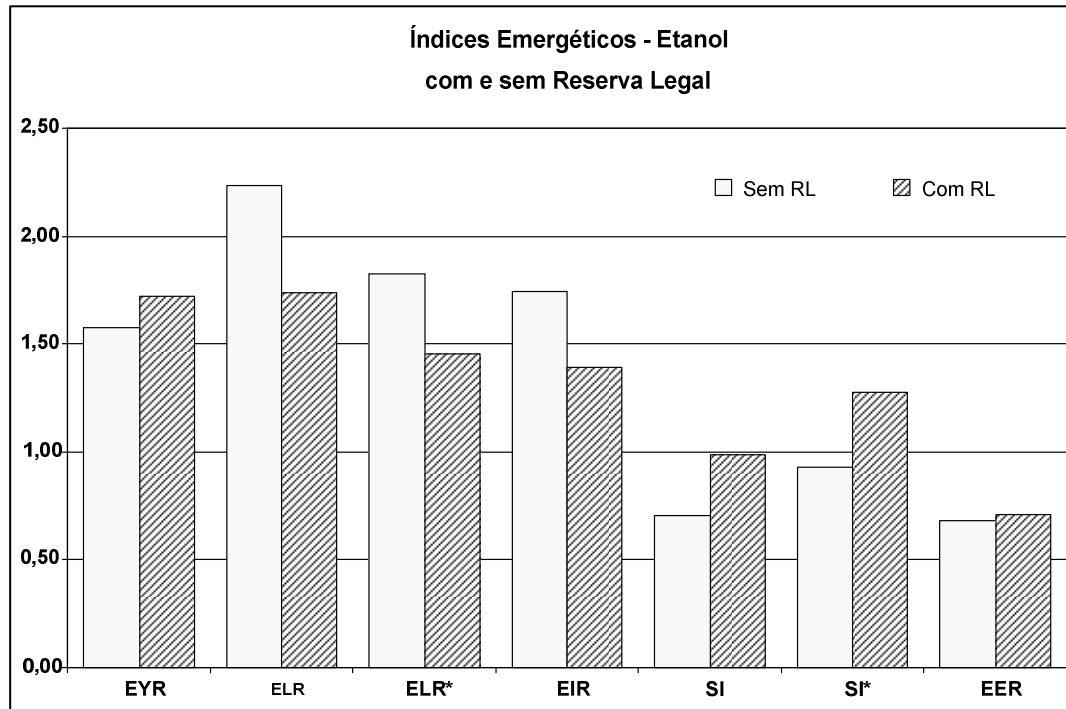


Figura 57: Índices Emergéticos do etanol com e sem inclusão da Reserva Legal (RL)

Entretanto, quando as parcelas renováveis dos recursos da economia são incluídos, o Índice de Sustentabilidade Modificado (SI*) calculado para os produtos da cadeia, cana-de-açúcar e etanol, são superiores a 1, o que não ocorria para os sistemas sem reserva legal.

A Razão de Intercâmbio de Energia (EER), que indica a vantagem que um operador (vendedor ou comprador) leva em relação ou outro, aumenta quando a reserva legal é respeitada tanto para a cana-de-açúcar como para o etanol. Este resultado é interessante, pois no caso da cana se distancia do valor unitário, que seria o caso de preço justo. Já no caso do etanol, o EER se aproxima da unidade, indicando que a troca se tornou mais justa. Neste novo cenário a preço justo da cana seria 36% superior ao praticado (R\$ 47,50).

Os índices de consumo, avaliados por litro de etanol, não são alterados com a inclusão da reserva legal, com exceção do uso do solo, que aumenta passando de 1,51 m² por litro para 1,91 m² por litro de etanol. Este resultado era esperado, pois a área agrícola passa a contar com uma parcela de conservação.

As emissões de CO₂ por litro de etanol também não se alteram. Se a comparação for feita com base nas emissões de CO₂ por hectare, sem considerar as etapas de distribuição, a inclusão da reserva legal representa uma diminuição de 10% nas emissões, passando de 1827 kgCO₂/ha.ano para 1630 kg de CO₂/ha.ano. Além, desta diminuição, a inclusão da reserva legal também permite aumento da absorção de CO₂, melhorando o balanço de CO₂.

6.4. Conclusões

Na avaliação de sustentabilidade de biocombustíveis três questões básicas devem ser examinadas: a) redução na dependência em combustível fóssil; b) redução das emissões de gases de efeito estufa; c) redução dos impactos ambientais.

A dependência em combustíveis fósseis pode ser avaliada pelo seu uso total na cadeia e pela eficiência energética, pois os sistemas mais eficientes disponibilizam maior volume de energia por unidade de energia fóssil consumida. Dentre os biocombustíveis, o etanol de cana-de-açúcar apresenta rendimento energético alto (8,2 energia fornecida por energia consumida), devido principalmente a elevada produtividade da etapa agrícola. Entretanto, os resultados indicam que a cadeia produtiva é dependente em combustíveis

fósseis. Diretamente, são utilizados 150 litros de combustível por hectare por ano, somente para a produção da cana-de-açúcar. Quando se somam os consumos indiretos, via equipamentos e insumos (fertilizantes, pesticidas) este volume sobe para 380 litros por hectare por ano. Ou seja, a produção de cana-de-açúcar e, portanto, do etanol é totalmente dependente do uso de combustíveis fósseis. Mesmo substituindo o combustível diretamente utilizado nas operações agrícolas, ainda assim, ocorre expressivo consumo de combustíveis fósseis via a utilização de materiais e serviços.

Os biocombustíveis, e o etanol em especial, têm sido apresentados como combustíveis que possibilitam a redução das emissões de gases de efeito estufa. Devido à utilização do bagaço para a geração de energia elétrica, créditos de carbono vêm sendo comercializados por algumas usinas. Entretanto, o ciclo de produção de biocombustíveis é curto e fechado. Assim, todo CO_2 absorvido na etapa agrícola, é emitido à atmosfera durante os próximos ciclos. Ademais, ao longo do ciclo produtivo há queima de combustíveis fósseis, tanto direta como indiretamente, e, portanto, há emissão de CO_2 para a atmosfera proveniente de fontes fossilizadas que estavam imobilizadas. Quando comparados a outros combustíveis, fósseis ou de biomassa, a cadeia produtiva do etanol emite menores volumes de gases. Porém, sua produção e seu uso não podem ser considerados como mitigadores de emissões, uma vez que emitem CO_2 para a atmosfera. A inclusão de área de conservação de vegetação pode compensar as emissões do sistema produtivo.

Em geral, as vantagens do etanol sobre os outros combustíveis, fósseis e de biomassa, são justificadas e discutidas considerando-se somente as duas questões anteriores, diminuição da dependência em combustíveis fósseis e redução das emissões de CO_2 . Os resultados do presente estudo estão de acordo com outros estudos e também indica que, comparativamente, o etanol apresenta desempenho melhor em termos energéticos e considerando as emissões totais de CO_2 . Entretanto, há que se considerar a terceira questão da sustentabilidade que são os impactos ambientais decorrentes de sua produção e uso.

À cadeia produtiva do etanol produzido em grande escala a partir de cana-de-açúcar estão associados consumos significativos de recursos naturais e emissões de gases de efeito estufa, causando impactos ambientais a nível local, regional e global. A perda de solo associada a um litro de etanol é de 1.8 kg (11.9 toneladas por hectare), enquanto que o consumo de água é de 18 litros por litro de etanol produzido. Já a área agrícola

necessária para a produção de etanol é de 1.52 m² por litro (125 m² por tonelada). Estes consumos são ainda mais expressivos quando o volume total de etanol necessário para suprir o mercado, bem como à área necessária para cana-de-açúcar, são considerados.

A análise Emergética complementa estes indicadores e permite uma avaliação ainda mais apurada dos sistemas produtivos. Seus índices indicam que o modelo de produção de etanol de cana-de-açúcar adotado tem baixa renovabilidade, 35%. Em outras palavras, 65% dos recursos utilizados pelo sistema não são renováveis, portanto, não se pode considerar o etanol como um combustível renovável. Na verdade, trata-se de um combustível que, em teoria, pode ser produzido a cada nova safra da cana. Todavia, as custas do esgotamento de recursos naturais e do uso de combustíveis fósseis. Pode-se, portanto, prever que sua produção se tornará mais difícil e custosa com o esgotamento dos recursos, podendo se tornar inadequado economicamente.

O estudo indica que etapa agrícola é, dentre as etapas da cadeia de produção e distribuição do etanol combustível, aquela de maior importância e, portanto, seu desempenho é fundamental para o desempenho da cadeia como um todo. Trata-se da etapa com maior consumo de recursos, superior a 75% do total. Com exceção da água utilizada na etapa industrial, a utilização de recursos renováveis se dá nesta etapa. Ao mesmo tempo, é a etapa que utiliza o maior volume de recursos da economia. Portanto, é o desempenho desta etapa que define os índices de desempenho do sistema. Logo, conclui-se que os índices somente melhorarão com a adoção de um sistema agrícola, mais adequado, menos impactante ao meio ambiente, como o sistema orgânico e o agroecológico.

Este resultado é confirmado pela inclusão da reserva legal nos cálculos. Esta área, 20% da área cultivada, deve manter a vegetação nativa e, desta forma, contribui com alguns benefícios ambientais, como por exemplo, a manutenção da biodiversidade e infiltração de água, entre outros. Comparando-se os resultados para o sistema com e sem a reserva legal, observa-se melhoria dos índices emergéticos no segundo caso: aumenta o rendimento emergético, aumenta a renovabilidade do sistema, diminui a taxa de carga ambiental, e aumenta o índice de sustentabilidade. Ou seja, apenas com a inclusão de uma área preservada, o sistema apresenta maior sustentabilidade.

Este resultado é importante. A vantagem competitiva do Brasil é sua condição ambiental decisiva para a produção agrícola: solo adequado, regime de chuvas adequado, insolação excelente. Porém, é exatamente a etapa agrícola da cadeia que

causa maiores impactos e que consome maiores volumes de recursos sem custo financeiro. Impactos que podem a longo prazo levar a perda desta vantagem competitiva. Ademais, será a população local que irá sofrer ao impactos ambientais causados por este modelo produtivo.

Resumindo, os resultados indicam que as vantagens da utilização de etanol como substituto de combustíveis fósseis se dá a nível global porque, apesar do ciclo produtivo não ser mitigador, este combustível emite menos CO₂ do que os combustíveis fósseis e de alguns biocombustíveis. Entretanto, o sistema resulta numa série de impactos negativos, como perda de solo, consumo elevado de água, uso de área agrícola, que se dão a nível regional. Deve-se considerar aqui, também, a pressão que a cultura da cana exerce sobre outras culturas deslocando-as para outras regiões, resultando em desmatamento de biomas importantes como o pantanal e a Amazônia.

Aqui, cabe avaliar a etapa de distribuição do etanol. O estudo mostra que esta etapa pode alterar os indicadores de desempenho do sistema. Quando a distância entre a usina produtora e o posto de distribuição aumenta, os índices emergéticos apresentam valores piores: a renovabilidade, o rendimento emergético e o índice de sustentabilidade diminuem enquanto que a taxa de carga ambiental aumenta. Porém, alterações mais expressivas ocorrem no consumo direto de combustível fóssil e de emissões decorrentes deste consumo. Portanto, a distribuição do biocombustível em regiões distantes da usina produtora diminui a sustentabilidade do produto, não sendo indicado. Da mesma forma, a validade de produção de etanol para exportação deve ser avaliada mais detalhadamente para os impactos a ela associados.

O uso do etanol de cana-de-açúcar como substituto de combustível fóssil apresenta vantagens em relação a outros biocombustíveis. Entretanto, seu uso representa uma série de impactos ambientais e o modelo de produção e distribuição deve considerar estes impactos a fim de que as vantagens do uso do etanol não se percam pelo modelo de produção, muito intensivo, ou devido à etapa de distribuição.

7. Conclusões do Estudo

O trabalho mostrou que o modelo atual de produção de suco de laranja, mesmo no caso orgânico, não é sustentável, pois é dependente do uso de combustível fóssil, por conseguinte é grande emissor de CO₂, além de consumir grandes volumes de recursos naturais, como por exemplo, a água nas etapas agrícola e industrial.

O estudo da cadeia produtiva do etanol mostrou que, apesar de seu desempenho ser melhor do que outros biocombustíveis, não é sustentável a longo prazo, pois é uma cadeia dependente de combustíveis fósseis. Trata-se, portanto, de um sistema que não é nem neutro nem mitigador, como muitos pesquisadores acreditam, mas sim emissor de CO₂. Para ser considerado neutro em termos de emissões, as áreas agrícolas deveriam incluir, não somente a área cultivada com a cana-de-açúcar, mas também área de reserva natural com tamanho tal a garantir a absorção de todo o CO₂ emitido pela cadeia, direta e indiretamente.

Os estudos destas cadeias produtivas mostraram que a adoção do conceito de avaliação do ciclo de vida associado à análise emergética é uma ferramenta poderosa na avaliação da sustentabilidade de produtos agroindustriais, pois permitiu a avaliação da cadeia como um sistema único, além do estudo de cada uma das etapas individualmente.

A abordagem sistêmica combinada com o conceito de avaliação do ciclo de vida é muito interessante porque contabiliza não somente os recursos provenientes da economia, portanto, com custo financeiro, mas também inclui na análise os recursos da natureza, sem custo financeiro, porém indispensável à produção agrícola, e que não são normalmente considerados.

Também permitiu a identificação das etapas críticas das cadeias produtivas, ou seja, aquelas com maiores consumos de recursos e de maiores emissões de resíduos para o meio ambiente. Ao mesmo tempo foram identificados aqueles recursos, renováveis ou não, consumidos mais intensamente por cada uma das etapas e pela cadeia completa. Na comparação entre os modelos produtivos e de distribuição, foi possível identificar suas diferenças, indicando os benefícios e os impactos decorrentes de cada um deles.

Os resultados oferecem informações importantes que podem ser utilizadas para o desenho de modelos produtivos mais sustentáveis, para sustentar políticas públicas e programas de desenvolvimento sustentável. Tornam-se especialmente importantes,

quando se considera a certificação de etanol para o mercado europeu.

Em especial, esta combinação de metodologias pode ser utilizada por sistemas de certificação com o objetivo de avaliar o desempenho ambiental dos produtos certificados. Na certificação de produtos orgânicos, a inclusão deste estudo não representa grande esforço, pois os dados necessários para sua realização já são, em sua maioria, coletados na inspeção anual. Os índices fornecidos introduzem no processo de certificação a possibilidade de se avaliar parâmetros, como por exemplo, a renovabilidade, que, apesar de estarem presentes como um dos princípios básicos do IFOAM, não são avaliados durante inspeção e, portanto, não são necessariamente cumpridos pelas unidades produtoras.

Da mesma forma, pode ser utilizada na certificação socioambiental de produtos que o país exporta, pois agrega as etapas da cadeia produtiva. O exemplo mais relevante é o caso do etanol a ser exportado para a Europa. Como o objetivo da União Européia é a sustentabilidade do combustível, o modelo de certificação deverá incluir as três dimensões da sustentabilidade: econômica, social e ambiental. A metodologia aqui utilizada permite esta abordagem.

Finalizando, os resultados fornecem subsídios para a avaliação comparativa de cenários alternativos na busca pela sustentabilidade. Assim, outras cadeias devem ser estudadas, em especial aquelas de grande importância na pauta de exportações brasileiras como a soja, a carne bovina, o frango e o café.

8. Bibliografia

BRASIL começa a mover mercado de carbono. **Folha de S. Paulo**. 16/02/05.

ABECITRUS. **Associação Brasileira de Exportadores de Cítricos**. Disponível em: <Disponível em: <<http://www.abecitrus.com.br>>>. Acessado em: Acessado em: 15/08/07.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR ISO 14040: Gestão Ambiental - Avaliação do ciclo de vida - Princípios e estrutura. Brasil, 2001.

AGOSTINHO, F. D. R. **Uso de Análise Emergética e Sistema de Informações Geográficas no Estudo de Pequenas Propriedades Agrícolas**. 2005. 226 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia de Alimentos). Universidade Estadual de Campinas, Campinas, SP.

AGRIANUAL **Anuário da Pecuária Brasileira**. São Paulo, SP: FNP Consultoria e Comércio. Editora Argos, 2006.

----- **Anuário da Pecuária Brasileira**. São Paulo, SP: FNP Consultoria e Comércio. Editora Argos, 2007.

AHLGREN, S. **Environmental Impact of Chemical and Mechanical weed Control in Agriculture - a comparing study using Life Cycle Assessment (LCA) methodology**. Swedish Institute for Food and Biotechnology. Slk - Rapport.2004.

ANDERSSON, K.;OHLSSON, T.;OLSSON, P. R. **Screening life cycle assessment (LCA) of tomato ketchup: a case study**. Journal of Cleaner Production, v. 6, p. 277-288, 1998.

ANDRADE, R. **Apenas alcooldutos resolverão gargalos da logística do etanol**. Disponível em: <<http://br.today.reuters.com/News/Default.aspx>>. Acessado em: 8/06/07.

ANDREOLI, C.;SOUZA, S. P. D. **Cana-de-Açúcar: A Melhor Alternativa para Conversão da Energia Solar e Fóssil em Etanol**. Economia e Energia, v. 59, p. 27-33, 2006.

ANDREOLI, M.;ROSSI, R.;TELLARINI, V. **Farm sustainability assessment: some procedural issues**. Landsc. Urban Plan. , v. 46, p. 41-50, 1999.

Associação Nacional dos Fabricantes de Veículos Automotores - ANFAVEA. **Anuário da Indústria Automobilística Brasileira** Disponível em: <<http://www.anfavea.com.br/>>. Acessado em: 03/03/2007.

Agência Nacional do Petróleo. **Anuário Estatístico 2006**. Disponível em: <<http://www.anp.gov.br/>>. Acessado em: 22/06/07.

AGÊNCIA DE PROMOÇÃO DE EXPORTAÇÕES E INVESTIMENTOS Disponível em: <<http://www.apexbrasil.com.br/>>. Acessado em: 05/10/07.

ASSIS, R. L. D.;ROMEIRO, A. R. **Agroecologia e agricultura familiar na região centro-sul do estado do Paraná**. Revista de Economia e Sociologia Rural, v. 43, n. 1 p. 155-177, 2005.

BAKSHI, B. R. **A thermodynamic framework for ecologically conscious process system engineering**. Computer and Chemical Engineering, v. 24, p. 1767-1773, 2000.

BARGIGLI, S.;ULGIATI, S. **Emergy and Life-cycle assessment of steel production**. In: Biennial Emergy Evaluation and Research Conference, 2nd, 2003, Gainesville, Florida. Emergy Synthesis 2: Theory and Applications of the Emergy Methodology.

BASSET-MENS, C., VAN DER WEEF, H. M. G., DURAND, P., LETERME, P. **Implications of uncertainty and variability in the life cycle assessment of pig production systems**. International Journal of Life Cycle Assessment, v. 11, n. 5 p. 298-304., Set. 2006.

BASTIANONI, S.;MARCHETTINI, N. **Ethanol production from biomass: Analysis of process efficiency and sustainability**. Biomass and Bioenergy, v. 11, 5 p. 411-418, 1996.

BASTIANONI, S.;PANZIERI, M.;TIEZZI, E. **Sustainability Assessment of a Chianti Area (Italy)**. Journal of Cleaner Production v. 9, n. 4 p. 365-373, 2001.

BASTIANONI, S.;CAMPBELL, D.;SUSANI, L.;TIEZZI, E. **The solar transformity of oil and petroleum natural gas**. Ecological Modeling, v. 186 p. 212-220, 2005.

BERNESSON, S.;NILSSON, D.;HANSSON, P.-A. **A limited LCA comparing large- and small-scale production of ethanol for heavy engines under Swedish conditions**. Biomass and Bioenergy, v. 30, 1 p. 46-57, 2006.

BERTOL, O. J.;RIZZI, N. E.;FAVARETTO, N.;LAVARANTI, O. J. **Perdas de nitrogênio via superfície e subsuperfície em sistema de semeadura direta**. Revista Floresta, v. 35, n. 3 p. 429-443, 2005.

BERTONI, J.;PASTANA, F. I.;LOMBARDI NETO, F.;BENATTI JUNIOR, R. **Conclusões gerais das pesquisas sobre conservação do solo do Inst. Agrônomo**. Circular 20 do Instituto Agrônomo. Campinas.1972.

Ampliação da Produção de Etanol e Co-geração de Energia Elétrica. 2003.Banco Nacional de Desenvolvimento Econômico e Social - BNDES Disponível em:<http://www.bndes.gov.br/conhecimento/publicacoes/catalogo/s_alcool.asp>. Acessado em: 12/01/07.

BOER, I. J. **Environmental impact assessment of conventional and organic milk production**. Livestock Production Science, v. 8, n. 1 p. 69-77., 2003.

BORRERO, M. A. V.;PEREIRA, J. T. V.;MIRANDA, E. E. **An environmental management method for sugar cane alcohol production in Brazil**. Biomass and Bioenergy, v. 25, 3 p. 287-299, 2003.

BOTEON, M. **Cadeia Agroindustrial de Citros**. Disponível em:<<
http://cepea.esalq.usp.br/indicador/citros/cadeia_citros.pdf >>. Acessado em: 16/ 9/2004.

BOUSTEAD, I.;HANCOCK, G. F. **Handbook of Industrial Energy Analysis**. Chichester: Ellisted Horwood Limited, 1979.

BRANDT-WILLIAMS, S.;PILLET, G. **Fertilizer Co-Products as Agricultural Emternalities: Quantifying Environmental Services used in Production of Food**. In: 2nd Emergy Evaluation and Research Conference. Emergy Synthesis 2: Theory and Applications of the Emergy Methodology, 2003, Gainesville, FL.

Center for Evorimental Policy, Environmental Engineering Sciences, Univ. of Florida.
Emergy of Florida Agriculture, Folio #4. In: Handbook of Emergy Evaluation. Gainesville 2002.

BRANDT-WILLIAMS, S. L.;FOGELBERG, C. L. **Nested Comparative Emergy Assessments Using Milk Production** In: Biennial Emergy Conference, 3rd. , 2005, University of Florida, Gainesville, FL. Theory and Applications of the Emergy Methodology.

Código Florestal Brasileiro. Lei Nº 4.771 de 15 de Setembro de 1965.

BRASIL. Instrução Normativa Nº 007, de 17 de Maio de 1999.Dispõe sobre normas para a produção de produtos orgânicos vegetais e animais.1999.

BRASIL. Lei 10.831, Promulgada em 23 de dezembro de 2003.Dispõe sobre a agricultura orgânica e dá outras providências.2003.

BRENTUP, F.;KÜSTERS, J.;KUHLMANN, H.;LMEL, J. **Environmental impact assessment of agricultural production systems using the life cycle assessment methodology I. Theoretical concept of a LCA method tailored to crop production**. Europ. J. Agronomy v. 20, p. 247–264, 2004.

BROWN, M. **Resource Imperialism: Emergy Perspectives on Sustainability, International trade and Balancing the welfare of Nations**. In: 3rd Biennial International Workshop Advances in Energy Studies: reconsidering the importance of Energy, 2003, Porto Venere, Italia.

BROWN, M.;ULGIATI, S. **Emergy Analysys and Environmental Accounting**. Encyclopedia of Energy, v. 2, p. 329-353, 2004.

BYERLEE, D.;MURGAI, R. **Sense and sustainability revisited: the limits of total factor productivity measures of sustainable agricultural systems**. Agric. Econ. , v. 26, p. 227-236, 2001.

CAMPOS, D. C. D. **Potencial do Sistema de Colheita sem Queima da Cana-de-açúcar para o Sequestro de Carbono**. 2003. 103 f. Dissertação (Doutorado em Agronomia). USP, Piracicaba.

CANALS, L. M. I.;BURNIP, G. M.;COWELL, S. J. **Evaluation of the environmental impacts of apple production using Life Cycle Assessment (LCA): Case study in New Zealand**. Agriculture, Ecosystems and Environment v. 114 p. 226-238, 2006.

CARLSSON-KANYAMA, A.;EKSTRÖM, M. P.;SHANAHAN, H. **Food and life cycle energy inputs: consequences of diet and ways to increase efficiency**. Ecological Economics, v. 44, p. 293-307, 2003.

CASSOL, E. A.;LEVIEN, R.;ANGHINONI, I.;BADELUCCHI, M. P. **Perdas de nutrientes por erosão em diferentes métodos de melhoramento de pastagem nativa no Rio Grande do Sul**. Revista Brasileira de Ciência do Solo, v. 26, p. 705-712, 2002.

CASTELLINI, C.;BASTIANONI, S.;GRANAI, C.;DAL BOSCO, A.;BRUNETTI, M. **Sustainability of poultry production using the emergy approach: Comparison of conventional and organic rearing systems**. Agriculture Ecosystems & Environment, v. 114, n. 2-4 p. 343-350, Jun. 2006.

CAVALETT, O.;PEREIRA, C. F.;ORTEGA, E. **Avaliação Emergética dos Modelos de Produção Orgânica e Convencional de Soja no Estado do Paraná**. In: Congresso Brasileiro de Agroecologia, 3^o, 2005, Florianópolis, Brasil.

CAVALETT, O.;QUEIROZ, J. F.;ORTEGA, E. **Emergy assessment of integrated production systems of grains, pig and fish in small farms in the South Brazil**. Ecological Modelling, v. 193, n. 3-4, p. 205-224, Mar. 2006.

CEDEBERG, C.;FLYSJÖN, A. **Life Cycle Inventory of 23 Dairy Farms in South - Western Sweden**. Swedish Institute for Food and Biotechnology (Série SIK - rapport).2004.

CIALANI, C.;RUSSI, D.;ULGIATI, S. **Investigating a 20-year National Economic Dynamics by Means of Emergy-Based Indicators**. In: Proceeding of the 3rd Biennial Emergy Conference, 2005, Gainesville, Florida.

COELHO, O.;ORTEGA, E.;COMAR, V. **Balanço de Energia do Brasil (Dados de 1996, 1989 e 1981)**. In: Engenharia Ecológica e Agricultura Sustentável. Disponível em: <<http://www.fea.unicamp.br/docentes/ortega/livro/index.htm>>. Acessado em: 15/07/2004.

COHEN, M. J.;BROWN, M. T.;SHEPHERD, K. D. **Estimating the environmental costs of soil erosion at multiple scales in Kenya using emergy synthesis**. Agriculture, Ecosystems and Environment, v. 114, p. 249-269, 2006.

COLTRO, L. (org). **Avaliação de Ciclo de Vida como Instrumento de Gestão**. Campinas: CETEA/ITAL, 2007. 72 p.

COLTRO, L.;MOURAD, A. L.;OLIVEIRA, P.;BADDINI, J. P.;KLETECKE, R. **Environmental Profile of Brazilian Green Coffee** International Journal of LCA v. 11, 1 p. 16-21 2006.

COMAR, V. **Emergy Evaluation of Organic and Conventional Horticultural production in Botucatu, SP**. In: Biennial Emergy Analysis Research Conference, 1^o, 2000, Gainesville, Florida.

COPERSUCAR. Disponível em:<Disponível em: <<http://www.copersucar.com.br/>>.>.

Acessado em: Acessado em: 25/05/06.

CORINAIR. **EMEP/CORINAIR Emission Inventory Guidebook - 3rd edition October 2002 UPDATE**. 2002. Disponível em:

<http://reports.eea.europa.eu/EMEP_CORINAIR3/en/page003.html> Acessado em: 4/04/07.

COWELL, S. J.; LINDEIJER, E. **Impacts on ecosystems due to land use: Biodiversity, life support, and soil quality in LCA**. In: B.P. Weidema and M.J.G. Meeusen (eds.). Agricultural data for Life Cycle Assessments. Agricultural Economics Research Institute (LEI), 2000. v. 2. pg. 86-98.

Centro de Tecnologia Canavieira. Disponível em: <<http://www.ctcanavieira.com.br/>>. Acessado em: 20/06/07.

CUADRA, M.; RYDBERG, T. **Emergy evaluation on the production, processing and export of coffee in Nicaragua**. Ecological Modelling, v. 196, n. 3-4 p. 421-433, 2006.

CUNHA, F. **A Logística Atual de Transporte das Distribuidoras e a Infra-Estrutura para a Exportação de Álcool**. In: Álcool: Potencial gerador de divisas e empregos, 2003, Disponível em: <<http://www.bndes.gov.br>>.

Department for Environment Food and Rural Affairs (DEFRA). **Energy use in organic farming systems Project OF0182**. London, 2001

DEVUYST, D. **Linking impact Assessment and Sustainable Development at the Local Level: The introduction of Sustainability Assessment Systems**. Sust. Dev., v. 8, p. 67-78, 2000.

ECOAGRI. Diagnóstico Ambiental da Agricultura no Estado de São Paulo - Bases para um Desenvolvimento Rural Sustentável. 2007

U.S. Environmental Protection Agency and Science Applications International Corporation. **LCAccess - LCA 101 - Introduction to LCA**. 2001. Disponível em: <http://www.epa.gov/ORD/NRMRL/lcaccess/lca101.htm> Acessado em: 18/01/07.

Office for Official Publications of the European Communities. **A selection of Environmental Pressure Indicators for the EU and Acceding countries** Disponível em: <http://epp.eurostat.ec.europa.eu/cache/ITY_OFFPUB/KS-59-04-249/EN/KS-59-04-249-EN.PDF>. Acessado em: 1/07/07.

FOOD AND AGRICULTURE ORGANIZATION. **Organic Agriculture: The Challenge of Sustaining Food Production While Enhancing Biodiversity**. Priority Area for Inter-Disciplinary Action on Organic Agriculture Food and Agriculture Organization of the United Nations, Rome, Italy. 2003.

Food and Agriculture Organization - FAOSTAT. Disponível em: <<http://faostat.fao.org/>>. Acessado em: 15/05/07.

PENSA/FIA/FEA/USP. **Sistema Agroindustrial da Cana-de-Açúcar - Competitividade no Agribusiness Brasileiro**. 1998.

- FERRAZ, J. M. G. **As dimensões da Sustentabilidade e seus indicadores**. In: L. A. Skorupa J. F. Marques, J. M. G. Ferraz. . Indicadores de Sustentabilidade em Agroecossistemas. Jaguariúna, SP: EMBRAPA, 2003. P. 17-35.
- FERREIRA, C. R. R. P. T.;VEGRO, C. L. R. **Fertilizantes: mercado com forte demanda em 2007**. Análises e Indicadores do Agronegócio. Disponível em: <<http://www.iea.sp.gov.br>>. Acessado em: 10/10/07.
- FIGUEIREDO, R. **Gargalos Logísticos na Distribuição de combustíveis brasileiro**. Disponível em: <Disponível em: <<http://joomla.coppead.ufrj.br>>.>. Acessado em: 15/12/06.
- FURLANI NETO, V. L.;RIPOLI, T. C.;VILA NOVA, N. A. **Biomassa de cana-de-açúcar: energia contida no palhico remanescente de colheita mecânica**. Stab – Açúcar, Álcool e Subprodutos, v. 15, p. 24-27, 1997.
- GARDINI, A. **Novas fronteiras agrícolas da cana**. ComCiencia - Revista Eletrônica de Jornalismo Científico Disponível em: <<http://www.comciencia.br/comciencia/?section=8&edicao=23&id=253>>. Acessado em: 10/08/2007.
- GOLDEMBERG, J. **Ethanol for a Sustainable Energy Future**. Science, v. 315, 5813 p. 808-810, February 9, 2007. 2007.
- GOLDEMBERG, J.;COELHO, S. T.;NASTARI, P. M.;LUCOND, O. **Ethanol learning curve—the Brazilian experience**. Biomass and Bioenergy v. 26, p. 301 - 304, 2004.
- GUERRA. Disponível em:<www.guerra.com.br>. Acessado em: 18/12/06.
- HAAS, G.;WETTERICH, F.;KOPKE, U. **Comparing intensive, extensified and organic grassland farming in southern Germany by process life cycle assessment**. Agriculture Ecocystem & Environment, v. 83, p. 43-53, 2001.
- HANEGRAAF, M. C.;BIEWINGA, E. E.;VAN DER BIJL, G. **Assessing the ecological and economic sustainability of energy crops**. Biomass and Bioenergy, v. 15, 4-5 p. 345-355, 1998.
- HASSE, G. **A Laranja no Brasil**. São Paulo: 1984.
- HAU, J. O. L.;BAKSHI, B. R. **Expanding Exergy Analysis to Account for Ecosystem Products and Services**. Environ. Sci. Technol., v. 38, p. 3768-3777, 2004.
- HERENDEEN, R. A. **Energy analysis and EMERGY analysis--a comparison**. Ecological Modelling, v. 178, 1-2 p. 227-237, 2004.
- HOSPIDO, A.;VAZQUEZ, M. E.;CUEVAS, A.;FEIJOO, G.;MOREIRA, M. T. **Environmental assessment of canned tuna manufacture with a life-cycle perspective**. Resources, Conservation and Recycling, v. 47, n. 1, p. 56-72, 2006.
- INSTITUTO AGRONÔMICO DE CAMPINAS. **Estudo de Caso: Destilarias de álcool e**

usinas de açúcar. Documentos Técnicos. IAC n.49. Campinas, 1994.

INSTITUTO BRASILEIRO DE GEOGRAFIA E ESTATÍSTICA (IBGE). **Vocabulário Básico de Recursos Naturais e Meio Ambiente.** Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística (IBGE)Rio de Janeiro, 2004.

INSTITUTO BRASILEIRO DE GEOGRAFIA E ESTATÍSTICA (IBGE). Disponível em: <<http://www.ibge.gov.br>>. Acessado em: 7/04/07.

IEA. Disponível em:<<http://www.iea.sp.gov.br/>>. Acessado em: 28/05/2007.

Principles of Organic Agriculture Disponível em: <<http://www.ifoam.org/>>. Acessado em: 25/10/05

Intergovernmental Panel on Climate Change. **Climate Change 2007:The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Fourth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change.** S. Solomon, D. Qin, M. Manning, Z. Chen, M. Marquis, K.B. Averyt, M. Tignor and H.L. Miller (eds.). Cambridge, Reino Unido e Nova York, USA, 2007.

Intergovernmental Panel on Climate Change. **Climate Change 2007: Impacts, Adaptation and Vulnerability. Working Group II Contribution to the Intergovernmental Panel on Climate Change Fourth Assessment Report.** 2007.

ISO, I. O. F. S. **ISO Survey 2005.** Disponível em:<www.iso.org>. Acessado em: 10/09/2006.

KADAM, K. L. **Environmental benefits on a life cycle basis of using bagasse-derived ethanol as a gasoline oxygenate in India.** Energy Policy, v. 30, 5 p. 371-384, 2002.

KATES, W. C.;CLARK, R.;CORELL, M. J.;HALL, C. C.;JAEGER, I.;LOWE, J. J.;MCCARTHY, H. J.;SCHELLNHUBER, B.;N.M., B. A. **Sustainability science.** Science, v. 292, p. 641-642, 2001.

KIM, S.;DALE, B. E. **Life cycle assessment of various cropping systems utilized for producing biofuels: Bioethanol and biodiesel.** Biomass and Bioenergy, v. 29, 6 p. 426-439, 2005.

KIRCHMANN, H.;THORVALDSSON, G. **Challenging targets for future agriculture.** Eur. J. Agron. , v. 12, p. 145–161, 2000.

LAGERBERG, C. **Emergy analysis of tomato production systems.** In: Biennial Emergy Analysis Research Conference, 1st. , 2000, Gainesville, Florida. Emergy synthesis: Theory and applications of the emergy methodology.

LAGERBERG, C.;BROWN, M. T. **Improving agricultural sustainability: the case of Swedish greenhouse tomatoes.** J. Cleaner Production, v. 7, p. 421-434, 1999.

LAL, R. **Soil degradation by erosion.** . Land Degradation & Development, v. 12, p. 519-539, 2001.

LAMONICA, H. M. **Geração de Eletricidade a partir da Biomassa da Cana-de-Açúcar.** In: Seminário de Bioeletricidade. A Segunda Revolução Energética da Cana-de-açúcar, 2005, Rio de Janeiro Disponível em: <<http://www.inee.org.br/>> Acessado em: 19/10/06.

LANZOTTI, C. R. **Uma análise emergética de tendências do setor sucroalcooleiro.** 2000. 95 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Mecânica). Universidade Estadual de Campinas, Campinas, SP.

LANZOTTI, C. R.;ORTEGA, E.;GUERRA, S. M. **Emergy Analysis and Trends for Ethanol Production in Brazil.** In: Biennial Emergy Analysis Research Conference, 1st., 2000, University of Florida, Gainesville, FL. Emergy synthesis: Theory and applications of the emergy methodology.

LAVE, L.;MACLEAN, H.;HENDRICKSON, C.;LANKEY, R. **Life-Cycle Analysis of Alternative Automobile Fuel/Propulsion Technologies.** Environ. Sci. Technol., v. 34, p. 3598-3605, 2000.

LEFROY, E.;RYDBERG, T. **Emergy evaluation of three cropping systems in southwestern Australia.** Ecological Modelling, v. 161, p. 195-211, 2003.

LABORATÓRIO DE ENGENHARIA ECOLÓGICA E INFPORMÁTICA APLICADA - LEIA. **Lista de Transformidades** Disponível em: <: <http://www.unicamp.br/fea/ortega/>>. Acessado em: 1/6/2006.

LIMA, M. A.;LIGO, M. A.;CABRAL, M. R.;BOEIRA, R. A.;PESSOA, M. C. P. Y.;NEVES, M. C. **Emissões de gases de efeito estufa proveniente da queima de resíduos agrícolas no Brasil.** Jaguariuna: Embrapa Meio Ambiente, 1999. 60 p.

LOMBARDI NETO, F.;DRUGOWICH, M. I. (org). **Manual Técnico de Manejo-Conservação do Solo e Água.** CATI, Manual Técnico 38. Campinas, SP: 1994.

MACEDO, I. C. **Situação atual e perspectivas do etanol.** Estudos Avançados, v. 21, p. 157-165, 2007.

MACEDO, I. C.;KOLLER, H. W. **Emissões de Gases de Efeito Estufa e Emissões Evitadas na Produção e Utilização de Cana-de-Açúcar, Açúcar e Álcool no Brasil: 1990-1994.** Disponível em: <http://ftp.mct.gov.br/Clima/comunic_old/energia.htm>. Acessado em: 12/09/2006.

MACEDO, I. D. C. **Greenhouse Gas Emissions and Energy Balances in Bio-ethanol Production and Utilization in Brazil (1996).** Biomass & Bioenergy, v. 14, p. 77-81, 1998.

----- **O Ciclo da Cana-de-Açúcar e reduções adicionais nas emissões de CO2 através do uso como combustível da palha da Cana.** Disponível em: <http://ftp.mct.gov.br/Clima/comunic_old/egee.htm>. Acessado em: 15/01/2007.

MALÇA, J.;FREIRE, F. **Renewability and life-cycle energy efficiency of bioethanol and bio-ethyl tertiary butyl ether (bioETBE): Assessing the implications of allocation.** Energy, v. 31 p. 3362–3380, 2006.

MALLET, S.;GUERRA, G.;MARTA, J. M. C. **Pelo enquadramento do álcool em uma**

nova regulamentação. In: Encontro de Energia no Meio Rural, 3., 2000, Campinas.

Disponível em:

<http://www.proceedings.scielo.br/scielo.php?script=sci_arttext&pid=MSC0000000022000000200054&lng=en&nrm=abn> . Acessado em: 1/06/07.

Ministério da Agricultura, Pecuária e Abastecimento. **Balanço Nacional da Cana-de-açúcar e de Bioenergia.** 2007. Disponível em: <<http://www.agricultura.gov.br/>>. Acessado em: 05/06/07.

MARQUES, J. F.; LOMBARDI NETO, F.; BACELLAR, A. A. A. **Erosão do solo: Indicadores Físicos e Econômicos.** In: L. A. Skorupa J. F. Marques, J. M. G. Ferraz. Indicadores de Sustentabilidade em Agroecossistemas. Jaguariúna, SP: EMBRAPA, 2003. p 131-153.

MARTIN, J. F.; DIEMONT, S. A. W.; POWELL, E.; STANTON, M.; LEVY-TACHER, S. **Emergy evaluation of the performance and sustainability of three agricultural systems with different scales and management.** Agriculture, Ecosystems & Environment, v. 115, 1-4 p. 128-140, 2006.

MATTSSON, B.; CEDERBERG, C.; BLIX, L. **Agricultural land use in life cycle assessment (LCA): case studies of three vegetable oil crops.** Journal of Cleaner Production v. 8, p. 283-292, 2000.

Ministério da Ciência e Tecnologia. **Usinas aproveitam co-geração e lucram com créditos de carbono.** Disponível em: <<http://agenciact.mct.gov.br/>>. Acessado em: 20/08/07.

MEADOWS, D. L. M., D. H.; RANDERS, J. AND BEHRENS, I.W.W. **Limites do crescimento: um relatório para o projeto clube de Roma sobre o dilema da humanidade.** São Paulo: Perspectiva, 1978.

Ministério do Meio Ambiente. Comissão de Políticas de Desenvolvimento Sustentável e da Agenda 21 Nacional. **Agenda 21 Brasileira. Ações Prioritárias.** 2^a ed. 2004. Disponível em: <http://www.mma.gov.br/> Acessado em: 15/03/07.

Ministério do Meio Ambiente. **Agenda 21 Brasileira** Disponível em: <<http://www.mma.gov.br/>>. Acessado em: 15/06/07.

MOREIRA, J. R.; GOLDEMBERG, J. **The alcohol program.** Energy Policy, v. 27, 4 p. 229-245, 1999.

MOURON, P.; SCHOLZ, R. W.; NEMECEK, T.; WEBER, O. **Life cycle management on Swiss fruit farms: Relating environmental and income indicators for apple-growing.** Ecological Economics, v. 58, p. 561- 578, 2006.

Núcleo de Estudos e Pesquisas em Alimentação - NEPA/UNICAMP **Tabela Brasileira de Composição de Alimentos.** Versão II. 2 ed. Campinas, SP, 2006.

NESS, B.; URBEL-PIRSALU, E.; ANDERBERG, S.; OLSSON, L. **Categorising tools for sustainability assessment.** Ecological Economics, v. 60, 3 p. 498-508, 2007.

Workshop do Sistema Agroindustrial Citrícola. 2004. PENSA - Programa de Estudos dos Negócios do Sistema Agroindustrial da Universidade de São Paulo (USP)

NEVES, M. F.; LOPES, F. F. **Estratégias para a Laranja no Brasil**. 1. São Paulo: Editora Atlas 2005.

NOVAES, W. A construção da sustentabilidade. **O Estado de São Paulo**. 07/01/2000.p 2.

ODUM, H. T. **Environmental Accounting. Emergy and Environmental Decision Making**. New York: J.Wiley, 1996.

Center for Environmental Policy, Environmental Engineering Sciences, Univ. of Florida.
Emergy of Global Processes, Folio #2. In: Handbook of Emergy Evaluation. Gainesville, Florida 2000.

ODUM, H. T.; ODUM, E. C. **A Prosperous way down. Principles and Policies**. Boulder, Colorado: University Press of Colorado, 2001.

ODUM, H. T.; BROWN, M. T.; BRANDT-WILLIAMS, S. **Introduction and Global Budget, Folio #1. In: Handbook of Emergy Evaluation**. Center for Environmental Policy, Environmental Engineering Sciences, Univ. of Florida. 2001.

OMETTO, A. **Avaliação do Ciclo de vida do Álcool Etílico Hidratado Combustível pelos métodos EDIP, Exergia e Emergia**. 2005. Dissertação (Doutorado). Universidade de São Paulo, São Carlos.

ORTEGA, E. **Contabilidade Ambiental e Econômica de Projetos Agro-industriais. Apresentado a XVI Congresso da SBCTA, Rio de Janeiro**. Disponível em: <<http://www.unicamp.br/fea/ortega/sbcta98/sld001.htm> >. Acessado em: 6 /10/2004.

ORTEGA, E.; ANAMI, M.; DINIZ, G. **Certification of food products using emergy analysis**. In: III International Workshop Advances in Energy Studies, 2002, Porto Venere, Italy.

ORTEGA, E.; OMETTO, A. R.; RAMOS, P. A. R.; ANAMI, M. H.; LOMBARDI, G.; COELHO, O. F. **Emergy comparison of ethanol production in Brazil: traditional versus small distillery with food and electricity production**. In: Second Biennial Emergy Analysis Research Conference: "Energy Quality and Transformities", 2001, Gainesville, Florida.

PACINI, C.; WOSSINK, A.; GIESEN, G.; VAZZANA, C.; HUIRNE, R. **Evaluation of sustainability of organic, integrated and conventional farming systems: a farm and field-scale analysis** Agriculture, Ecosystems & Environment, v. 95, 1 p. 273-288, 2003.

PANRAY BEEHARRY, R. **Carbon balance of sugarcane bioenergy systems**. Biomass and Bioenergy, v. 20, 5 p. 361-370, 2001.

PANZIERI, M.; MARCHETTINI, N.; BASTIANONI, S. **A Thermodynamic methodology to assess how different cultivation methods affect sustainability of agricultural systems**. Int. J. Sustain. Dev. World Ecol. , v. 9, p. 1-8, 2002.

PANZIERI, M.; MARCHETTINI, N.; RIDOLFI, R. **Environmental Certification: a Scientific**

tool for Sustainability. Evaluation of Possible indicators for the environmental Performance Evaluation (EPE) of Ravenna Province (Italy). Ann. Chim. , v. 93, p. 429-438, 2003.

PATZEK, T. W. **Thermodynamics of the Corn-Ethanol Biofuel Cycle.** Critical Reviews in Plant Sciences, v. 23, 6 p. 519-567, 2004.

PENTEADO, S. R. **Fruticultura Orgânica.** Viçosa, MG: Aprenda Fácil Editora, 2004.

PEREIRA, C. L. F.;ORTEGA, E. **Avaliação de Sustentabilidade de laranja para SLCC.** In: Congresso Brasileiro de Agroecologia, 3^o, 2005, Florianópolis, Brasil

----- **Study of the sustainability of Frozen Concentrated Orange Juice production through emergy analysis. Part 1: Processing in Brazil.** In: Biennial Emergy Conference, 4 th. , 2006, University of Florida, Gainesville, FL.

PEREZ, L. H.;TORQUATO, S. A. **Evolução das Exportações Brasileiras de Açúcar, 1996 a 2004.** Informações Econômicas, v. 36, 1 p. 43-60, 2006.

PETROBRÁS. Disponível em:<<http://www2.petrobras.com.br/>>. Acessado em: 28/05/2006.

PIMENTEL, D. **Ethanol Fuels - Energy Security, Economics, and the Environment.** Journal of Agricultural & Environmental Ethics, v. 4, 1 p. 1-13, 1991.

PIMENTEL, D.;PATZEK, P. **Ethanol production using corn, switchgrass, and wood; Biodiesel production using soybean and sunflower.** Natural Resources Research, v. 14, n. 1 p. 65-76, 2005.

PIORR, H.-P. **Environmental policy, agri-environmental indicators and landscape indicators.** Agriculture, Ecosystems & Environment, v. 98, 1-3 p. 17-33, 2003.

PIRES, A. C.;RABELO, R. R.;XAVIER, J. H. **Uso potencial da Análise de Ciclo de Vida (ACV) Associada aos conceitos de Produção Orgânica aplicados a agricultura familiar.** Cadernos de Ciência & Tecnologia, v. 19, 2 p. 149-178, 2002.

PNUD. **Programa das Nações Unidas para o Desenvolvimento.** Disponível em:<<http://www.pnud.org.br/idh/>>. Acessado em: 18/06/07.

PNUMA. **Programa das Nações Unidas para o Meio Ambiente.** Disponível em:<<http://www.brasilpnuma.org.br/>>. Acessado em: 12/08/2006.

PRIMAVESI, A. **Manejo Ecológico do Solo.** São Paulo: Nobel, 1987.

REGANOLD, J. P.;GLOVER, J. D.;ANDREWS, P. K.;HINMAN, H. R. **Sustainability of three apple production systems.** Nature, v. 410, p. 926-929, 2001.

REYNOLDS, L. **The Globalization of Organic Agro-food Networks.** World Development v. 32, p. 725-743., 2004.

RIGBY, D.;CÁCERES, D. **Organic farming and the sustainability of agricultural**

systems. Agri. Sys. . v. 68, p. 21-40, 2001.

RILEY, J. **Indicator quality for assessment of impact of multidisciplinary systems.** Agri. Ecosyst Environ. , v. 87, p. 121-128, 2001.

ROEST, K. D. **Interrelationships between nitrogen balances and technical and structural characteristics of dairy farms in Northern Italy.** In: B.P. Weidema and M.J.G. Meeusen (eds.). Agricultural data for Life Cycle Assessments. Agricultural Economics Research Institute (LEI), 2000. v. 1. pg 177-192.

ROSILLO-CALLE, F.;CORTEZ, L. A. B. **Towards ProAlcool II--a review of the Brazilian bioethanol programme.** Biomass and Bioenergy, v. 14, 2 p. 115-124, 1998.

SACHS, I. **Ecodesenvolvimento, crescer sem destruir.** São Paulo: Vértice, 1986.

SANJUÁN, N.;CLEMENTE, G.;ÚBEDA, L. **LCA of the Integrated production of oranges in the Comunidad Valenciana (Spain).** In: 4th International Conference Life Cycle Assessment in the Agri-food Sector, 2003, Bygholm, Dinamarca.

SARCINELLI, O.;ORTEGA, E. **Emergy Analysis and Bookkeeping Accounting of Conventional and Organic Coffee Production in Brazil.** In: IV International Biennial Workshop - Advances in Energy Studies. "Energy-Ecology Issues in Latin America". 2004, Campinas, SP.

SCHLICH, E. H.;FLEISSNER, U. **The Ecology of Scale: Assessment of Regional Energy Turnover and Comparison with Global Food.** Int J LCA v. 10 3 p. 219 – 223, 2005.

SEPPÄNEM, L.;HELENIUS, J. **Do inspection practices in organic agriculture serve organic values? A case study from Finland.** Agriculture and Human Values v. 21, p. 1-13, 2004.

SHAPOURI, H.;DUFFIELD, J. A.;WANG, M. **The Energy Balance of Corn Ethanol: An Update.** USDA Agricultural Economic Report No. 814., v. p. 2002.

SHEPHERD, M.;PEARCE, B.;CORMACK, B.;PHILIPPS, L.;CUTTLE, S.;ANNE BHOGAL;COSTIGAN, P.;UNWIN, R. **An Assessment of the Environmental Impacts of Organic Farming.** A review for Defra-funded project OF0405.2003.

SKORUPA, L. A.;SAITO, M. L.;NEVES, M. C. **Indicadores de Cobertura Vegetal.** In: L. A. Skorupa J. F. Marques, J. M. G. Ferraz. Indicadores de Sustentabilidade em Agroecossistemas. Jaguariúna, SP: EMBRAPA, 2003. p. 157-189.

SONESSON, U.;BERLIN, J. **Environmental impact of future milk supply chain in Sweden: a scenario study.** J. of Cleaner Production, v. 11:13, p. 253-266., 2003.

TORQUATO, S. A.;PEREZ, L. H. **Evolução das Exportações Brasileiras de Alcool, período de 1996 a julho de 2005.** Informações Econômicas, v. 36, 3 p. 18-32, 2006. 2006.

UNIÃO EUROPÉIA Regulamento (CEE) 2092/91, de 24 de junho de 1991. Relativo ao

modo de produção biológico de produtos agrícolas e à sua indicação nos produtos agrícolas e nos géneros alimentícios.1991.

Regulamento (CE) nº 1804/1999, de 17 julho de 1999 .Relativo ao modo de produção biológico da produção animal e à sua indicação nos produtos agrícolas e nos géneros alimentícios.1999.

União Européia. Disponível em: <http://europa.eu/index_pt.htm>. Acessado em: 12/10/2007.

ULGIATI, S. **A comprehensive energy and economic assessment of biofuels: when "green" is not enough**. Critical Reviews in Plant Sciences, v. 20, p. 71-106, 2001.

ULGIATI, S.;GIAMPIETRO, M.;PIMENTEL, D. **A critical appraisal of energy assessment of biofuel production systems. A standardized overview of literature data**. Environmental Biology, v. 2, p. 1-129, 1997.

ULGIATI, S.;BROWN, M. T.;BASTIANONI, S.;MARCHETTINI, N. **Emergy-based indices and ratios to evaluate the sustainable use of resources**. Ecol. Eng. , v. 5, p. 519-531, 1995.

Programa das Nações Unidas para o Desenvolvimento. **Relatório do Desenvolvimento Humano 2004. Liberdade Cultural num Mundo Diversificado**. 2004. Disponível em: http://hdr.undp.org/reports/global/2004/portuguese/pdf/hdr04_po_complete.pdf. Acessado em:1/07/07.

United Nations Division for Sustainable Development. **Indicators of Sustainable Development: Guidelines and Methodologies**. New York., 2001.

UNICA. **União da Agroindústria Canavieira de São Paulo**. Disponível em:<<http://www.portalunica.com.br>>. Acessado em: 15/12/2006.

Estados Unidos Norma 7 CFR Part 205 National Organic Program. US Department of Agriculture - Agricultural Marketing Service.2002.

VEIGA, J. E. R. **Cana: nova expansão e a insustentável exploração de sua força de trabalho**. . Instituto de Economia Agrícola Disponível em: <<http://www.iea.sp.gov.br/>>. Acessado em: 28/08/07.

VERHOOG, H.;MATZE, M.;VAN BUEREN, E. L.;BAARS, T. **The Role of the Concept of the Natural (Naturalness) in Organic Farming**. Journal of Agricultural and Environmental Ethics v. 16, p. 29–49, 2003.

VIAN, C. E. F. **Agroindústria Canavieira**. 1. ed. Campinas: Editora Átomo, 2003. 216.

VON BLOTTNITZ, H.;CURRAN, M. A. **A review of assessments conducted on bio-ethanol as a transportation fuel from a net energy, greenhouse gas, and environmental life cycle perspective**. Journal of Cleaner Production, v. 15, 7 p. 607-619, 2007.

WACKERNAGEL, M.;REES, W. E. **Our Ecological Footprint. Reducing Human Impact**

on the Earth. Gabriola Island: New Society Publishers, 1996.

World Comission on Environment and Development. **Our Common Future.** Oxford University Press. Oxford, 1987.

WOOD, R.;LENZEN, M.;DEY, C.;LUNDIE, S. **A comparative study of some environmental impacts of conventional and organic farming in Australia.** Agricultural Systems, v. 89, 2-3 p. 324-348, 2006.

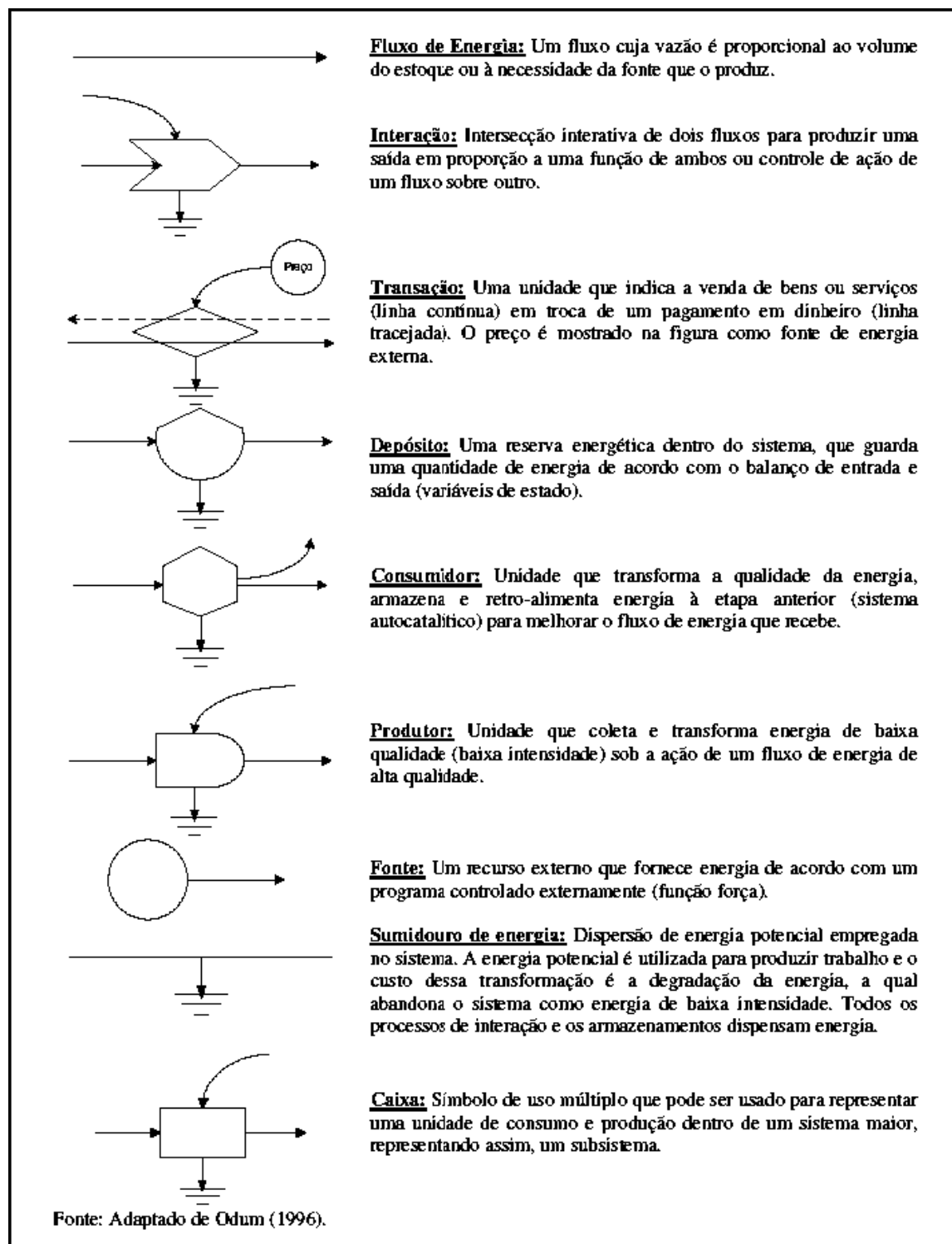
Worlwide Fund for Nature. Relatório Planeta Vivo2006. Disponível em: <http://www.wwf.org> . Acessado em: 20/08/07.

YOSHIDA, Y.;DOWAKI, K.;MATSUMURA, Y.;MATSUHASHI, R.;LI, D.;ISHITANI, H.;KOMIYAMA, H. **Comprehensive comparison of efficiency and CO2 emissions between biomass energy conversion technologies--position of supercritical water gasification in biomass technologies.** Biomass and Bioenergy, v. 25, 3 p. 257-272, 2003.

YUSOFF, S.;HANSEN, S. **Feasibility Study of Performing an Life Cycle Assessment on Crude Palm Oil Production in Malaysia.** International Journal of LCA, v. 12, 1 p. 50-58, 2007.

ZABANIOTOU, A.;KASSIDI, E. **Life Cycle Assessment applied to egg packaging made from polystyrene and recycled paper.** J. of Cleaner Production v. 11, 5 p. 549-559, 2003.

ANEXO 1 – Símbolos Utilizados nos diagramas sistêmicos



APÊNDICE 1 - Avaliação da Cadeia Produtiva do Suco de Laranja

1. Suco de Laranja Convencional

1.1. DADOS GERAIS

1.1.1. Dados da Propriedade Agrícola

Os dados utilizados foram coletados na visita à campo, em entrevistas e obtidos em literatura. Resumo dos dados utilizados:

- Localizada em município da região produtora de laranja no estado de São Paulo;
- Produção: 40.6 t / ha.ano;
- Área total do pomar: 131 hectares;
- Área total da propriedade; 163 hectares (131 ha de pomares e 32 ha de reserva legal);
- Manejo Convencional;
- Número de Funcionário para área total: 14 fixos e 70 temporários;
- Safra: 180 dias de colheita;
- Utiliza irrigação.

1.1.2. Dados de Transporte da laranja

- Laranja transportada a granel em caminhões com capacidade de 25 toneladas (65% da safra) ou 24 toneladas (25% da safra);
- Distância média da fazenda até a fábrica de 100 km.

1.1.3. Dados da etapa industrial Brasileira (Produção de SLCC)

Os cálculos consideraram dados obtidos em visita à unidade fabril, entrevista com técnicos e em dados de literatura. Foi considerada uma unidade produtora de 15 extratoras, uma vez que as fábricas instaladas possuem múltiplos de 15 extratoras. Assim as características da fábrica são:

Esmagamento – 1500 cx de 40.8 kg / h

Produção:

- o Suco conc. a 66°Brix-5.652kg/h
- o Suco de pulp wash - 283 kg/h
- o Ração - 6.732 kg/h
- o Óleo centrifugado 153 kg/h
- o Aroma 92 kg/h
- o Óleo de essência 4,6 kg/h
- o D'limoneno 122 kg/h

Equipamentos:

Tabela 1: Lista de equipamentos presentes na fábrica

Equipamento	Peso (kg)
Fábrica de suco	
Mesa Lavadora	2200
Espalhadora de fruta	1025
Classificadora de frutas	2465
Correia alimentadora	7500
Finisher	200
Extrator	1450
Turbo Filter	600
Evaporador	110000
Centrífuga	3000
Trocador de calor	500
Tubulações (% dos equip.)	18700
Fábrica de pellet	
Moinho	*
prensa	7000
Evaporador EER	80000
Secador	100000
Peletizadora	
Peneiras	1115
Outros	
Bombas	1120
Compressor	442
Caldeira	50

* foi utilizado valor monetário

1.1.4. Dados de Transporte terrestre de SLCC - Brasil

- SLCC transportado a granel em caminhões isolados com capacidade de 26 toneladas
- Distância média da fábrica até o porto de Santos

1.1.5. Dados do Porto de Santos

Foram considerados os dados do terminal portuário da Cutrale, disponíveis na página da Agencia Nacional de Transporte Aquaviário:

- Capacidade: 1.500.000 toneladas/ano de suco de laranja
- Instalações:
 - Tanques de inox para armazenagem (60.000 t);
 - Área construída – 12.000m²;
 - Funcionários: 70 funcionários

1.1.6. Dados de Transporte Marítimo

Nesta foram considerados os dados do navio “Sol do Brasil” de propriedade da Citrosuco:

- Capacidade: 10.000 t de SLCC a granel, estocado a – 10°C
- Tripulação: 8 oficiais e 17 marinheiros
- Tempo de viagem – 12 dias na ida e 11 dias na volta
- 1 viagem por mês
- Distância Santos – Ghent (Bélgica) – 10.000km;

1.1.7. Dados do porto de Ghent

Foram utilizados dados da página do Porto de Ghent: www.havengent.be/ e dos fabricantes de SLCC

- Capacidade: 600.000 toneladas/ano de suco de laranja
- Instalações (estimadas):
 - tanques de inox para armazenagem (23.000 t);
 - Funcionários: 30 funcionários (estimado).

1.1.8 Dados de Transporte terrestre de SLCC - Europa

Foram utilizados os dados de literatura (Schilch e Fleissner, 2005):

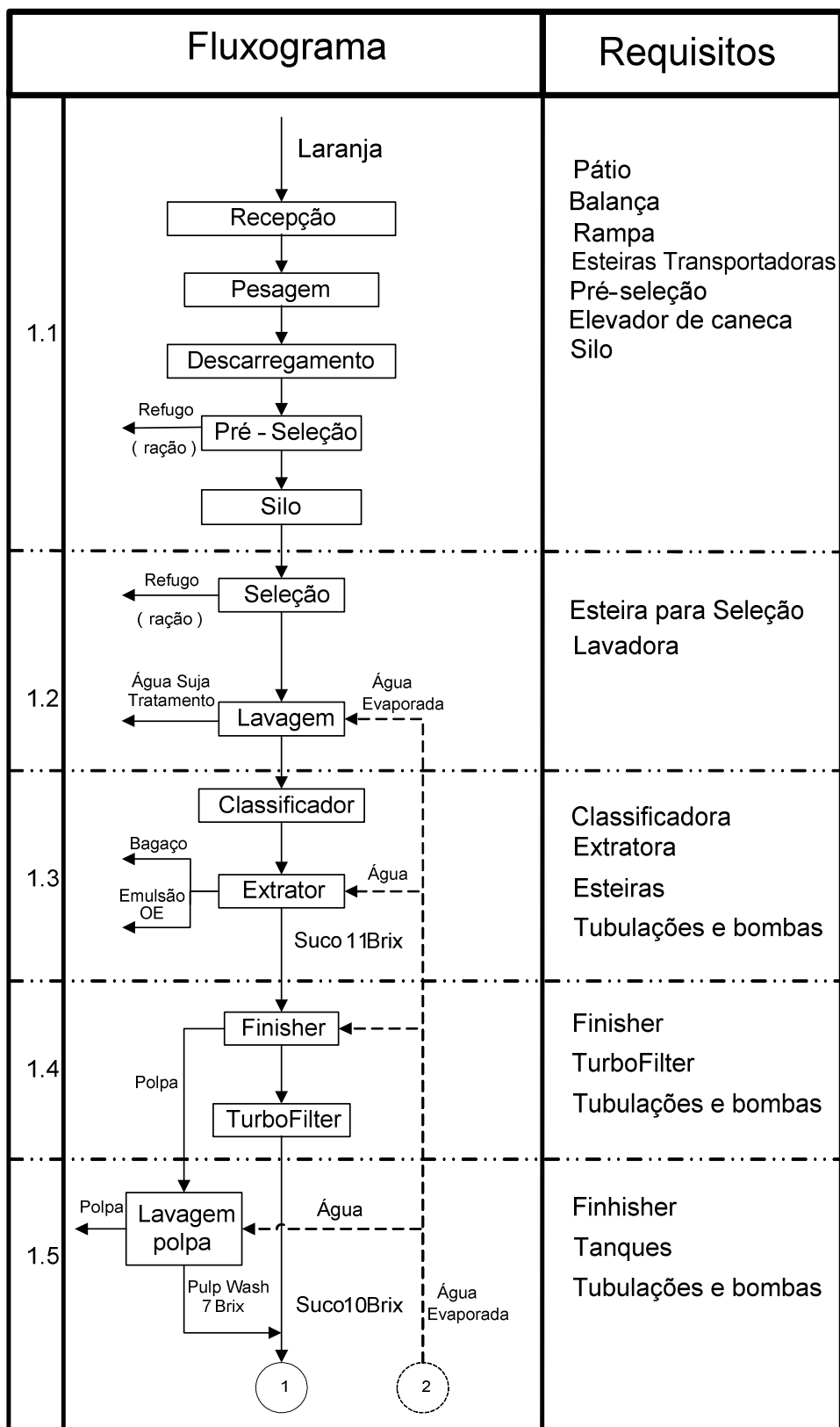
- SLCC transportado a granel em caminhões isolados com capacidade de 26 toneladas
- Distância média do Porto até a fábrica- 400km
- País da fábrica: Alemanha

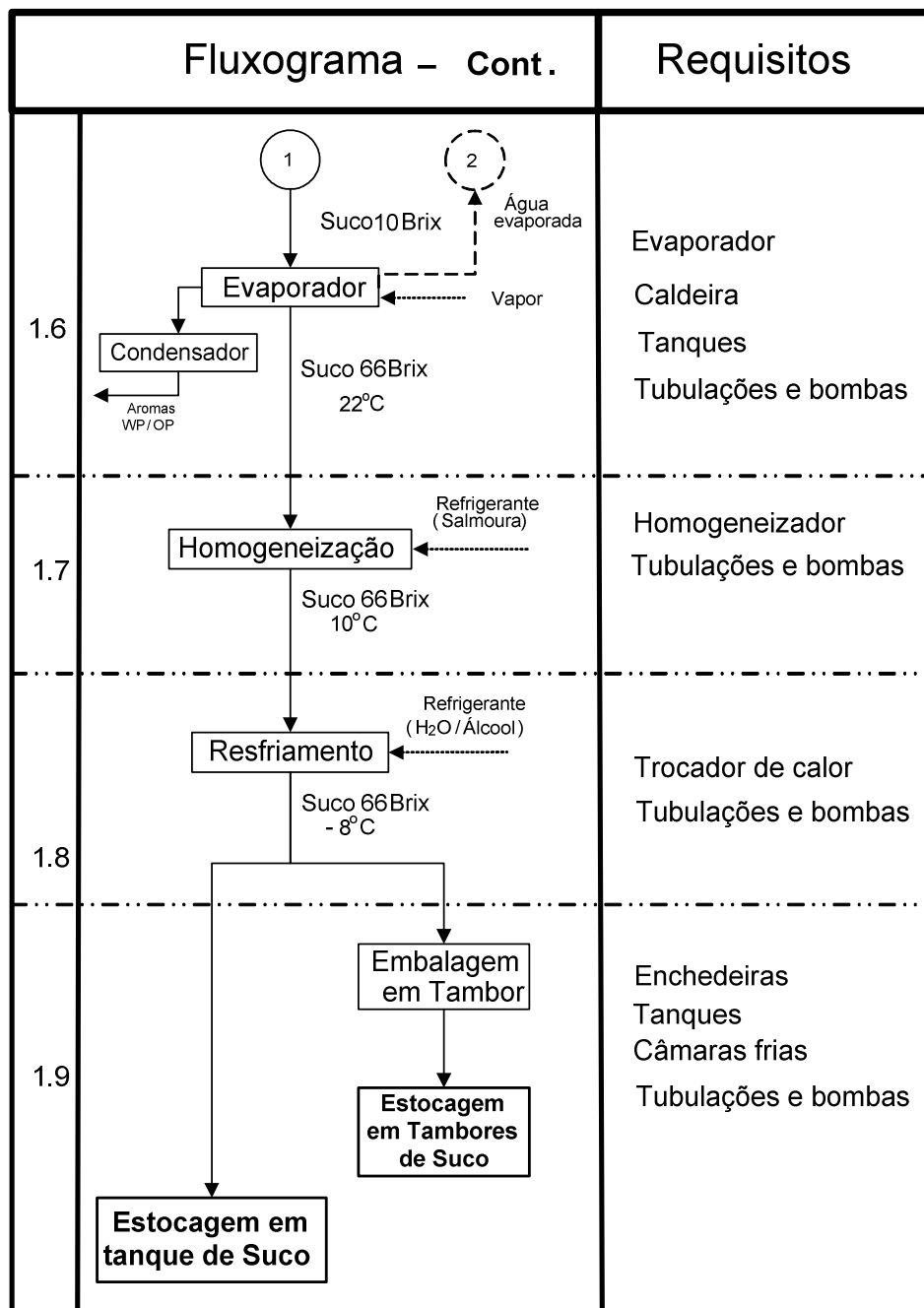
1.1.9 Dados de etapa industrial - Europa

Foi considerada uma fábrica de tamanho médio, conforme informação da Tetra Pak. Capacidade: 30.000 l de suco diluído 11 brix /h

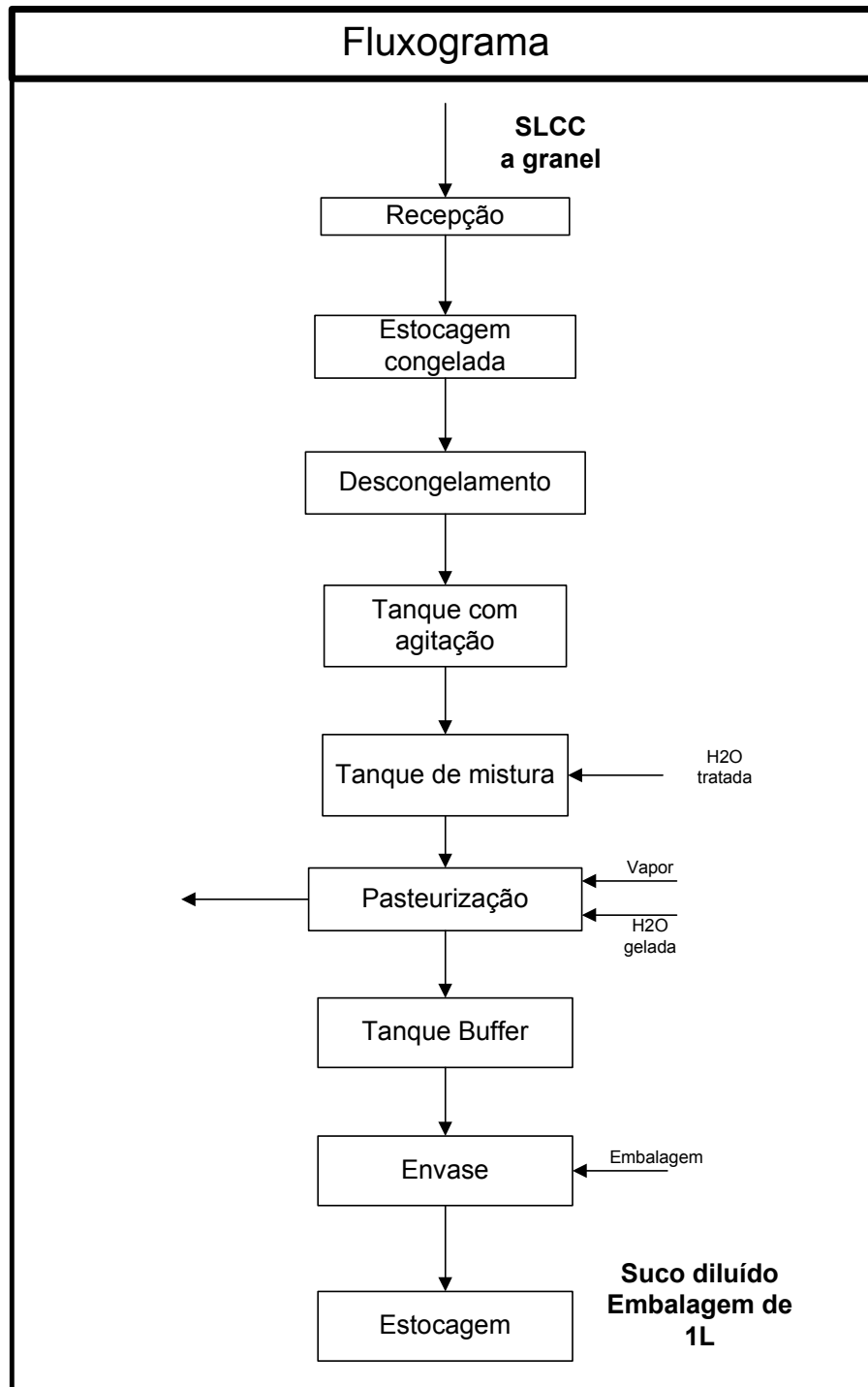
- ou 5,3 t de SLCC/h, correspondendo a 6 linhas envasadoras;
- Peso total dos equipamentos – 45 toneladas;
- Embalagem: Tetra Pak de 1 litro;
- Número de funcionários: 50 funcionários
- Operação: 22 h/dia;

1.2. FLUXOGRAMA DA FÁBRICA DE SLCC CONVENCIONAL





1.3 FLUXOGRAMA DA FÁBRICA NA EUROPA



1.4 AVALIAÇÃO EMERGÉTICA

Tabela 3: Análise Emergética do suco de laranja convencional.

Fluxos		% R.	Dado	Unida de	Transf. (sej/unit)	Energia Solar (seJ/ha.a)		
						Porção Ren	Porção Não Ren	Total
RENOVÁVEIS						3,69x10 ¹⁵	0,00	2,69x10 ¹⁵
Fazenda						3,66x10 ¹⁵	0,00	3,66x10 ¹⁵
1	Sol	100	5,53x10 ¹³	J/há.a	1	5,53x10 ¹³	0,00	5,53x10 ¹³
2	Chuva	100	6,93x10 ¹⁰	J/ha.a	3,06x10 ⁴	2,12x10 ¹⁵	0,00	2,12x10 ¹⁵
3	Água (irrigação)	100	8,00x10 ⁹	J/ha.a	1,85x10 ⁵	1,48x10 ¹⁵	0,00	1,48x10 ¹⁵
Indústria Brasil						8,83x10 ¹²	0,00	8,83x10 ¹²
4	Água (poço ou rio)	100	4,78x10 ⁷	J/ha.a	1,85x10 ⁵	8,83x10 ¹²	0,00	8,83x10 ¹²
Transporte SLCC						8,32x10 ¹²	0,00	8,32x10 ¹²
5	Água (poço ou rio)	100	4,50x10 ⁷	J/ha.a	1,85x10 ⁵	8,32x10 ¹²	0,00	8,32x10 ¹²
Indústria Europa						1,39x10 ¹³	0,00	1,39x10 ¹³
6	Água (poço ou rio)	100	7,50x10 ⁷	J/ha.a	1,85x10 ⁵	1,39x10 ¹³	0,00	1,39x10 ¹³
NÃO RENOVÁVEIS						0,00	3,01x10 ¹⁴	3,01x10 ¹⁴
Fazenda						0,00	3,01x10 ¹⁴	3,01x10 ¹⁴
7	Perda de solo	0	8,10x10 ⁹	J/ha.a	1,24x10 ⁵	0,00	3,01x10 ¹⁴	3,01x10 ¹⁴
MATERIAIS						8,59x10 ¹⁴	7,35x10 ¹⁵	8,23x10 ¹⁵
Fazenda						3,03x10 ¹⁴	3,76x10 ¹⁵	4,06x10 ¹⁵
8	Corretivos	0	4,89x10 ⁸	J/ha.a	7,72x10 ⁶	0,00	1,33x10 ¹⁵	1,33x10 ¹⁵
9	Nitrogênio	0	1,10x10 ⁵	g/ha.a	6,38x10 ⁹	0,00	7,04x10 ¹⁴	7,04x10 ¹⁴
10	Fósforo	0	1,38x10 ¹	kg/ha.a	6,55x10 ¹²	0,00	9,07x10 ¹³	9,07x10 ¹³
11	Potássio	0	1,04x10 ¹	kg/ha.a	2,92x10 ¹²	0,00	3,03x10 ¹³	3,03x10 ¹³
12	Pesticidas Herbicidas	0	7,70x10 ⁰	kg/ha.a	2,48x10 ¹⁰	0,00	1,91x10 ¹¹	1,91x10 ¹¹
13	Outros Insumos	0	1,86x10 ¹	U\$/ha.a	3,70x10 ¹²	0,00	6,89x10 ¹³	6,89x10 ¹³

14	Diesel	0	$2,15 \times 10^{10}$	J/ha.a	$5,50 \times 10^4$	0,00	$1,18 \times 10^{15}$	$1,18 \times 10^{15}$
15	Implementos (Aço)	0	$7,09 \times 10^0$	kg/ha.a	$1,13 \times 10^{10}$	0,00	$8,01 \times 10^{13}$	$8,01 \times 10^{13}$
16	Energia Elétrica	68	$1,61 \times 10^9$	J/ha.a	$2,77 \times 10^5$	$3,03 \times 10^{14}$	$1,42 \times 10^{14}$	$4,45 \times 10^{14}$
17	Investimentos	0	$3,40 \times 10^1$	U\$/ha.a	$3,70 \times 10^{12}$	0,00	$1,26 \times 10^{14}$	$1,26 \times 10^{14}$
Transporte Laranja						0,00	$3,44 \times 10^{14}$	$3,44 \times 10^{14}$
18	Caminhão	0,	$6,66 \times 10^0$	kg/ha.a	$1,13 \times 10^{13}$	0,00	$7,53 \times 10^{13}$	$7,53 \times 10^{13}$
19	Pneus	0	$2,97 \times 10^0$	kg/ha.a	$4,30 \times 10^{12}$	0,00	$1,28 \times 10^{13}$	$1,28 \times 10^{13}$
20	Diesel	0	$4,66 \times 10^9$	J/ha.a	$5,50 \times 10^4$	0,00	$2,56 \times 10^{14}$	$2,56 \times 10^{14}$
Indústria Brasil						$5,56 \times 10^{14}$	$2,38 \times 10^{15}$	$2,94 \times 10^{15}$
21	Equipamentos (Aço)	0	$1,48 \times 10^0$	kg/ha.a	$1,13 \times 10^{13}$	0,00	$1,67 \times 10^{13}$	$1,67 \times 10^{13}$
22	Equipamentos (ferro)	0	$1,27 \times 10^{-1}$	kg/ha.a	$2,50 \times 10^9$	0,00	$3,18 \times 10^8$	$3,18 \times 10^8$
23	Insumos Industriais	0	$3,39 \times 10^{-1}$	kg/ha.a	$3,80 \times 10^{12}$	0,00	$1,29 \times 10^{12}$	$1,29 \times 10^{12}$
24	Investimentos	0	$8,23 \times 10^1$	U\$/ha.a	$3,70 \times 10^{12}$	0,00	$3,05 \times 10^{14}$	$3,05 \times 10^{14}$
25	Diesel	0	$3,26 \times 10^{10}$	J/ha.a	$5,50 \times 10^4$	0,00	$1,80 \times 10^{15}$	$1,80 \times 10^{15}$
26	Energia Elétrica	68	$2,95 \times 10^9$	J/ha.a	$2,77 \times 10^5$	$5,56 \times 10^{14}$	$2,62 \times 10^{14}$	$8,18 \times 10^{14}$
Transporte do SLCC						$2,16 \times 10^8$	$2,04 \times 10^{14}$	$2,04 \times 10^{14}$
27	Equipamentos (Aço)	0	$4,65 \times 10^0$	kg/ha.a	$1,13 \times 10^{13}$	0,00	$5,25 \times 10^{13}$	$5,25 \times 10^{13}$
28	Pneus	0	$1,67 \times 10^0$	kg/ha.a	$4,30 \times 10^{12}$	0,00	$7,17 \times 10^{12}$	$7,17 \times 10^{12}$
29	Diesel	0	$2,32 \times 10^9$	J/ha.a	$5,50 \times 10^4$	0,00	$1,28 \times 10^{14}$	$1,28 \times 10^{14}$
30	Energia Elétrica	68	$1,15 \times 10^3$	J/ha.a	$2,77 \times 10^5$	$2,16 \times 10^8$	$1,02 \times 10^8$	$3,18 \times 10^8$
31	Investimentos BR	0	$2,60 \times 10^0$	U\$/ha.a	$3,70 \times 10^{12}$	0,00	$9,62 \times 10^{12}$	$9,62 \times 10^{12}$
32	Investimentos Euro	0	$1,00 \times 10^1$	U\$/ha.a	$7,30 \times 10^{11}$	0,00	$7,30 \times 10^{12}$	$7,30 \times 10^{12}$
Indústria Europa						0,00	$6,69 \times 10^{12}$	$6,69 \times 10^{12}$
33	Equipamentos (Aço)	0	$1,59 \times 10^{-1}$	kg/ha.a	$1,13 \times 10^{13}$	0,00	$1,79 \times 10^{12}$	$1,79 \times 10^{12}$
34	Papel	0	$4,06 \times 10^2$	kg/ha.a	$3,90 \times 10^{11}$	0,00	$1,58 \times 10^{14}$	$1,58 \times 10^{14}$
35	Plástico	0	$5,07 \times 10^1$	kg/ha.a	$7,20 \times 10^{12}$	0,00	$3,65 \times 10^{14}$	$3,65 \times 10^{14}$
36	Alumínio	0	$2,54 \times 10^1$	kg/ha.a	$3,42 \times 10^{12}$	0,00	$8,67 \times 10^{13}$	$8,67 \times 10^{13}$
37	Investimentos	0	$1,06 \times 10^2$	U\$/ha.a	$7,30 \times 10^{11}$	0,00	$7,72 \times 10^{13}$	$7,72 \times 10^{13}$
SERVIÇOS						$1,52 \times 10^{15}$	$1,00 \times 10^{16}$	$1,16 \times 10^{16}$

Fazenda						$1,39 \times 10^{15}$	$3,44 \times 10^{15}$	$8,82 \times 10^{15}$
38	Mão de obra - Fixa	38	$3,34 \times 10^8$	J/ha.a	$2,80 \times 10^6$	$3,55 \times 10^{14}$	$5,80 \times 10^{14}$	$9,35 \times 10^{14}$
39	Mão de Obra Temp.	38	$9,69 \times 10^8$	J/ha.a	$2,80 \times 10^6$	$1,03 \times 10^{15}$	$1,68 \times 10^{15}$	$2,71 \times 10^{15}$
40	Desp. Administrativas	0	$3,19 \times 10^1$	U\$/ha.a	$3,70 \times 10^{12}$	0,00	$1,18 \times 10^{14}$	$1,18 \times 10^{14}$
41	Impostos e Taxas	0	$2,86 \times 10^2$	U\$/ha.a	$3,70 \times 10^{12}$	0,00	$1,06 \times 10^{15}$	$1,06 \times 10^{15}$
Transporte da Laranja						$1,84 \times 10^{13}$	$3,01 \times 10^{13}$	$4,85 \times 10^{13}$
42	Mão de Obra	38	$1,73 \times 10^7$	J/ha.a	$2,80 \times 10^6$	$1,84 \times 10^{13}$	$3,01 \times 10^{13}$	$4,85 \times 10^{13}$
Indústria Brasil						$1,11 \times 10^{14}$	$3,41 \times 10^{15}$	$3,52 \times 10^{14}$
43	Mão de obra Fixa	38	$6,14 \times 10^7$	J/ha.a	$2,80 \times 10^6$	$6,53 \times 10^{13}$	$1,07 \times 10^{14}$	$1,72 \times 10^{14}$
44	Mão de Obra Temp.	38	$4,29 \times 10^7$	J/ha.a	$2,80 \times 10^6$	$4,56 \times 10^{13}$	$7,45 \times 10^{13}$	$1,20 \times 10^{14}$
45	Impostos e Taxas	0	$8,73 \times 10^2$	U\$/ha.a	$3,70 \times 10^{12}$	0,00	$3,23 \times 10^{15}$	$3,23 \times 10^{15}$
Transporte do SLCC						$4,17 \times 10^{12}$	$1,11 \times 10^{14}$	$1,15 \times 10^{14}$
46	Mão de Obra BR	38	$2,95 \times 10^6$	J/ha.a	$2,80 \times 10^6$	$3,14 \times 10^{12}$	$5,12 \times 10^{12}$	$8,26 \times 10^{12}$
47	Mão de Obra Euro	4	$5,34 \times 10^6$	J/ha.a	$4,85 \times 10^6$	$1,04 \times 10^{12}$	$2,49 \times 10^{13}$	$2,59 \times 10^{13}$
48	Taxas BR	0	$1,83 \times 10^1$	U\$/ha.a	$3,70 \times 10^{12}$	0,00	$6,77 \times 10^{13}$	$6,77 \times 10^{13}$
49	Taxas Euro	0	$1,83 \times 10^1$	U\$/ha.a	$7,30 \times 10^{11}$	0,00	$1,34 \times 10^{13}$	$1,34 \times 10^{13}$
Indústria Europa						$3,92 \times 10^{12}$	$3,06 \times 10^{15}$	$3,06 \times 10^{15}$
50	Mão de Obra	4	$2,02 \times 10^7$	J/ha.a	$2,80 \times 10^6$	$3,92 \times 10^{12}$	940×10^{13}	$9,79 \times 10^{13}$
51	Taxas e impostos	0	$4,06 \times 10^3$	U\$/ha.a	$7,30 \times 10^{11}$	0,00	$2,96 \times 10^{15}$	$2,96 \times 10^{15}$
TOTAL						$6,07 \times 10^{15}$	$1,77 \times 10^{16}$	$2,38 \times 10^{16}$
Produção								
Suco de Laranja diluído			$1,69 \times 10^4$	Litro		$3,4 \times 10^{10}$	J	

1.4.1 Memorial de Cálculo – Suco Convencional

1 – Sol, J

REFERÊNCIA

Insolação 1830 kWh/m².ano

NASA, 2006

Albedo = 16 %

NASA, 2006

$$\begin{aligned}
 \text{Energia (J)} &= (\text{insolação média}) \cdot (1 - \text{albedo}) \\
 &= (\text{kWh/m}^2 \cdot \text{ano}) \cdot (3,6\text{E6 J/kWh}) \cdot (1\text{E04 m}^2/\text{ha}) \cdot (1 - \text{albedo}) \\
 &= 5,53\text{E+13 J/ha ano} \\
 &= 3,27\text{E+09 J/l suco}
 \end{aligned}$$

Odum, 1996

Transformidade 1 sej/J Definição

2– Potencial Químico da Chuva, J

Precipitação anual 1700 mm INMET, 2005

Evapotranspiração 82% EMBRAPA, 2006

$$\begin{aligned}
 \text{Energia (J)} &= (\text{precipitação}) \cdot (\text{evapotranspiração}) \cdot (\text{energia da chuva}) \cdot (\text{densidade}) \\
 &= (\text{mm}) \cdot (\text{evapotranspiração}) \cdot (1\text{E-3 m}^3/\text{mm}) \cdot (5000 \text{ J/kg}) \cdot (1\text{E04 m}^2/\text{ha}) \cdot (1\text{E3 kg/m}^3) \\
 &= 6,93\text{E+10 J/ha ano} \\
 &= 4,10\text{E+06 J/l suco}
 \end{aligned}$$

Odum, 1996

Transformidade 3,06E+10 sej/J Brown e Ulgiati, 2004

3 – Água (irrigação), J

Consumo 2000 m³ /ha.ano

$$\begin{aligned}
 \text{Energia (J)} &= (\text{Consumo}) \cdot (\text{energia da água}) \cdot (\text{densidade}) \cdot (\text{área pomar}) / (\text{área total}) \\
 &= (\text{m}^3) \cdot (5000 \text{ J/kg}) \cdot (1\text{E3 kg/m}^3) \cdot (131 \text{ ha pomar}) / (163 \text{ ha}) \\
 &= 1,00\text{E+10 J/ha ano} \\
 &= 4,73\text{E+05 J/l suco}
 \end{aligned}$$

Odum, 1996

Transformidade 1,85E+05 sej/J LEIA, 2006

4 – Água, Uso Industrial, Brasil, J

Consumo 18 m³/h

$$\text{Energia (J)} = (\text{Consumo}) * (\text{energia da água}) * (\text{densidade}) / (\text{produção})$$

$$= (\text{---m}^3) * (5000 \text{ J/kg}) * (1\text{E}3 \text{ kg/m}^3) / (5,6 \text{ t SLCC/h})$$

Odum, 1996

$$= 1,59\text{E}+07 \text{ J/t SLCC}$$

$$= 4,78\text{E}+07 \text{ J/ha.ano}$$

$$= 2,82\text{E}+03 \text{ J/l suco}$$

$$\text{Transformidade} \quad 1,85\text{E}+05 \text{ sej/J}$$

Lanzotti, 2000

5 – Água, Transporte (operações Portuárias), J

$$\text{Consumo} \quad 3 \text{ m}^3/\text{t SLCC}$$

$$\text{Energia (J)} = (\text{Consumo}) * (\text{energia da água}) * (\text{densidade})$$

$$= (\text{---m}^3) * (5000 \text{ J/kg}) * (1\text{E}3 \text{ kg/m}^3)$$

$$= 1,50\text{E}+07 \text{ J/t SLCC}$$

Odum, 1996

$$= 4,50\text{E}+07 \text{ J/ha.ano}$$

$$= 2,66\text{E}+03 \text{ J/l suco}$$

$$\text{Transformidade} \quad 1,85\text{E}+05 \text{ sej/J}$$

Lanzotti, 2000

6 – Água, Uso Industrial, Europa, J

$$\text{Consumo} \quad 5 \text{ m}^3/\text{t SLCC}$$

$$\text{Energia (J)} = (\text{Consumo}) * (\text{energia da água}) * (\text{densidade})$$

$$= (\text{---m}^3) * (5000 \text{ J/kg}) * (1\text{E}3 \text{ kg/m}^3)$$

$$= 2,50\text{E}+07 \text{ J/t SLCC}$$

Odum, 1996

$$= 7,50\text{E}+07 \text{ J/ha.ano}$$

$$= 4,43\text{E}+03 \text{ J/l suco}$$

$$\text{Transformidade} \quad 1,85\text{E}+05 \text{ sej/J}$$

Lanzotti, 2000

7 – Perda de Solo, J

$$\text{Perda de solo} \quad 11,2 \text{ t /ha.ano}$$

ECOAGRI, 2007

$$\text{Matéria Orgânica} \quad 4\%$$

$$\text{Energia (J)} = (\text{perda de solo}) * (\% \text{ mat. Org.}) * (\text{Energia da Mat.org.}) * (\text{área pomar}) / (\text{área total})$$

$$= (\text{___ t /ha.ano}) * (10\text{E}3 \text{ kg/t}) * (\text{___ \%MO}) * (5400\text{kcal/kgMO}) * (4186\text{J/kcal}) * (131\text{ha pomar}) / (163 \text{ ha})$$

Odum, 1996

$$= 2,43\text{E}+09 \text{ J/ha ano}$$

$$= 1,44\text{E}+05 \text{ J/l suco}$$

$$\text{Transformidade } 1,24\text{E}+05 \text{ sej/J}$$

Brown e Ulgiati, 2004

8 – Corretivos, J

$$\text{Consumo } 1 \text{ t /ha de pomar . ano}$$

$$\text{Consumo (J)} = (\text{Consumo}) * (\text{energia Corretivo}) * (\text{área pomar}) / (\text{área total})$$

$$= (\text{___ kg/ha.ano}) * (1\text{E}3 \text{ g/kg}) * (611 \text{ J/g}) * (131\text{ha pomar}) / (163 \text{ ha})$$

Odum, 1996

$$= 4,89\text{E}+08 \text{ J/ha ano}$$

$$= 2,89\text{E}+04 \text{ J/l suco}$$

$$\text{Transformidade } 2,72\text{E}+06 \text{ sej/J}$$

Brown e Ulgiati, 2004

9 – Nitrogênio, g

$$\text{Consumo } 0,3 \text{ t de uréia/ha. ano}$$

$$\text{Consumo (g)} = (\text{Consumo}) * (\% \text{nitrogênio}) * (\text{área pomar}) / (\text{área total})$$

$$= (\text{___ kg/ha.ano}) * (1\text{E}3 \text{ kg/t}) * (1\text{E}3 \text{ g/kg}) * (0,46\%) * (131\text{ha pomar}) / (163 \text{ ha})$$

Odum, 1996

$$= 1,10\text{E}+05 \text{ g/ha ano}$$

$$= 6,53\text{E}00 \text{ g/l suco}$$

$$\text{Transformidade } 6,38\text{E}+09 \text{ sej/g}$$

Brown e Ulgiati, 2004

10 – Fosfato, kg

Consumo 600 g de Superfosfato /pé. ano

Consumo (kg) = (Consumo)*(densidade do pomar)*(%de P)*
(área pomar)/(área total)

= (___g/pé.ano)*(1E-3 kg/g)*(330 pés/ha)*
(8,74% de P)*(131ha pomar)/ (163 ha)

Odum, 1996

= 13,84 kg/ha ano

= 8,19E-04 kg/l suco

Transformidade 6,55E+12 sej/kg

Brown e Ulgiati, 2004

11 – Potássio, kg

Consumo 15 kg Cloreto de Potássio /200 pés

Consumo (kg) = (Consumo)*(densidade do pomar)*(%de K)*
(área pomar)/(área total)

= (___kg/pé.ano)*(330 pés/ha)* (52% de
K)*(131ha pomar)/ (163 ha)

Odum, 1996

= 10,37 kg/ha ano

= 6,13E-04 kg/l suco

Transformidade 2,92E+12 sej/kg

Brandt-Williams, 2002

12 – Herbicidas, kg

Consumo 9,6 kg /ha.ano

Consumo (kg) = (Consumo)*(área pomar)/(área total)

= (___kg/ha.ano)*(131ha pomar)/ (163 ha)

Odum, 1996

= 7,70 kg/ha ano

= 4,55E-04 kg/l suco

Transformidade 2,482E+10 sej/kg

Brown e Ulgiati, 2004

13 – Outros Insumos, U\$

Gasto U\$ 23,30 /ha de pomar.ano

Consumo (U\$) = (Gasto)*(área pomar)/(área total)

Odum, 1996

$$= (\text{___ U\$/ha.ano}) * (131 \text{ ha pomar}) / (163 \text{ ha})$$

$$= 18,61 \text{ U\$/ha ano}$$

$$= 1,10\text{E-}03 \text{ U\$/l suco}$$

Transformidade 3,70E+12 sej/U\$

Coelho et al., 2003

14 - Diesel (Agrícola), J

Consumo 100 000 l diesel /ano

$$\text{Consumo (J)} = (\text{consumo}) * (\text{densidade}) * (\text{energia do diesel}) / (\text{área total})$$

$$= (\text{___ l/ha.ano}) * (8,40\text{E-}01 \text{ kg/l}) * (1\text{E+}04 \text{ kcal/kg})$$

$$* (4186 \text{ J/kcal}) / (163 \text{ ha})$$

$$= 2,15\text{E+}10 \text{ J/ha ano}$$

$$= 1,27\text{E+}06 \text{ J/l suco}$$

Odum, 1996

Transformidade 5,50E+04 sej/J

Bastianoni et al., 2006

15 – Implementos e Equipamentos (Agrícola), kg

Peso 7,1 kg /ha.ano (inclui implementos, tratores e equipamentos)

$$\text{Consumo (kg)} = 7,1 \text{ kg/ha ano}$$

$$= 4,19\text{E-}04 \text{ kg/l suco}$$

Transformidade 1,13E+13 sej/kg

Brown e Ulgiati, 2004

16 – Energia Elétrica (Agrícola), J

Consumo 72,94 MWh

$$\text{Consumo (J)} = (\text{consumo}) / (\text{área})$$

$$= (\text{___ MWh/ano}) * (1\text{E}03 \text{ kWh/MWh}) * (3,60\text{E+}06 \text{ J/kWh}) / (163 \text{ ha})$$

$$= 1,61\text{E+}09 \text{ J/ha.a}$$

$$= 9,51\text{E+}04 \text{ J/l suco}$$

Odum, 1996

Transformidade 2,77E+05 sej/J

Brown e Ulgiati, 2004

17 – Infra-estrutura Agrícola, U\$

Investimentos U\$ 105 000,00

$$\begin{aligned}\text{Investimentos (U\$)} &= ((\text{Investimento})/(\text{vida útil})) / (\text{área}) \\ &= ((\text{U\$}) / (20 \text{ anos})) / (163 \text{ ha}) \\ &= 3,42\text{E}+01 \text{ U\$}/\text{ha.a} \\ &= 2,01\text{E}-03 \text{ U\$}/\text{l suco}\end{aligned}$$

Transformidade 3,70E+12 sej/U\$

Coelho et al., 2003

18 – Caminhão para Transporte da Laranja (aço), kg

Peso 2,05E-01 kg /t de laranja

$$\begin{aligned}\text{Consumo (kg)} &= 6,60\text{E}00 \text{ kg}/\text{ha.a} \\ &= 3,94\text{E}-04 \text{ kg}/\text{l suco}\end{aligned}$$

Transformidade 1,13E+13 sej/kg

Brown e Ulgiati, 2004

19 – Pneus (Transporte da laranja), kg

Peso 9,10E-02 kg /t de laranja

$$\begin{aligned}\text{Consumo (kg)} &= 2,38\text{E}00 \text{ kg}/\text{ha.a} \\ &= 3,94\text{E}-04 \text{ kg}/\text{l suco}\end{aligned}$$

Transformidade 4,30E+12 sej/kg

LEIA, 2006

20 – Diesel (Transporte da Laranja), J

Consumo 4,1 l diesel /t laranja

$$\begin{aligned}\text{Consumo (J)} &= (\text{consumo}) * (\text{densidade}) * (\text{energia do diesel}) \\ &= (\text{l}/\text{t}) * (8,40\text{E}-01 \text{ kg}/\text{l}) * (1\text{E}+04 \text{ kcal}/\text{kg}) \\ &\quad * (4186 \text{ J}/\text{kcal}) \\ &= 1,44\text{E}+08 \text{ J}/\text{t laranja} \\ &= 3,73\text{E}09 \text{ J}/\text{ha.a} \\ &= 2,75\text{E}+05 \text{ J}/\text{l suco}\end{aligned}$$

Odum, 1996

Transformidade 5,50E+04 sej/J

Bastianoni et al., 2006

21 – Equipamentos Industriais (Aço), Brasil, kg

Peso 220 t

Consumo (kg) = (Peso)/(vida útil)/(produção)

$$= ((\text{--- t}) * (1\text{E}+03 \text{ kg/t}) / (20 \text{ anos})) / (2,24\text{E}+04 \text{ t SLCC/ano})$$

$$= 4,93\text{E}-01 \text{ kg/t SLCC}$$

$$= 1,48\text{E}00 \text{ kg/ha.ano}$$

$$= 8,75\text{E}-05 \text{ kg/l suco}$$

Transformidade 1,13E+13 sej/kg

Brown e Ulgiati, 2004

22 – Equipamentos Industriais (Ferro), Brasil, kg

Peso 19 t

Consumo (kg) = (Peso)/(vida útil)/(produção)

$$= ((\text{--- t}) * (1\text{E}+03 \text{ kg/t}) / (20 \text{ anos})) / (2,24\text{E}+04 \text{ t SLCC/ano})$$

$$= 4,24\text{E}-02 \text{ kg/t SLCC}$$

$$= 1,27\text{E}-01 \text{ kg/ha.ano}$$

$$= 7,535\text{E}-06 \text{ kg/l suco}$$

Transformidade 2,50E+09 sej/kg

Brown e Ulgiati, 2004

23 – Insumos industriais, Brasil, kg

Peso 1,13E-01 kg /t SLCC

Consumo (kg) = 3,39E-01 kg/ha.a

$$= 1,01\text{E}-05 \text{ kg/l suco}$$

Transformidade 3,80E+12 sej/kg

LEIA, 2006

24 – Infra-estrutura Industrial, Brasil, U\$

(a)Outros equipamentos U\$ 2,60E+06

Investimentos (U\$) = (Investimento)/(vida útil)/(produção)

$$= ((__\text{ U\$})/(20\text{ anos}))/ (2,24\text{E}+04\text{ t SLCC/ano})$$

$$= 5,74\text{ U\$}/\text{ t SLCC}$$

(b) Infra-estrutura U\$ 14,6E+06

$$\text{Investimentos (U\$)} = (\text{Investimento})/(\text{vida útil})/(\text{produção})$$

$$= ((__\text{ U\$})/(30\text{ anos}))/ (2,24\text{E}+04\text{ t SLCC/ano})$$

$$= 21,72\text{ U\$}/\text{ t SLCC}$$

$$\text{Total (a)+(b)} = 27,46\text{ U\$}/\text{t SLCC}$$

$$= 8,23\text{E}+01\text{ U\$}/\text{ha.ano}$$

$$= 4,87\text{E}-03\text{ U\$}/\text{l suco}$$

Transformidade 3,70E+12 sej/U\$

Coelho et al., 2003

25 – Diesel Industrial, Brasil, J

Consumo 5,82 E+06 l diesel /ano

$$\text{Consumo (J)} = (\text{consumo}) * (\text{densidade}) * (\text{energia do diesel})/$$

$$(\text{produção})$$

$$= (__\text{ l/t}) * (8,40\text{E}-01\text{ kg/l}) * (1\text{E}+04\text{ kcal/kg})$$

$$* (4186\text{ J/kcal})/ (2,24\text{E}4\text{ t SLCC/ano})$$

Odum, 1996

$$= 1,09\text{E}+10\text{ J/t SLCC}$$

$$= 3,26\text{E}10\text{ J/ha.a}$$

$$= 1,93\text{E}+06\text{ J/l suco}$$

Transformidade 5,50E+04 sej/J

Bastianoni et al., 2006

26 – Energia Elétrica (Industrial), Brasil, J

(a) Processamento 1 Mwatts

$$\text{Consumo (J)} = (\text{consumo})/(\text{produção})$$

$$= (__\text{ Mwatts}) * (1\text{E}6)\text{ watts/Mwatts}) * (1\text{ J/s}) * (3600$$

$$\text{ s/h})/ (5,65\text{ t SLCC})$$

$$= 6,37\text{E}+08\text{ J/t SLCC}$$

Odum, 1996

(b) Estocagem 500 kwatts

$$\begin{aligned}
\text{Consumo (J)} &= (\text{consumo})/(\text{produção anual})^a \\
&= (\text{___kwatts}) * (1 \text{ J/s}) * (6 \text{ meses/ano}) * (2,59\text{E}+06) \\
&\quad \text{s/mês}) / (2,24\text{E}+04) \\
&= 3,47\text{E}+08 \text{ J/t SLCC}
\end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
\text{Total (a)+(b)} &= 9,84 \text{ J/t SLCC} \\
&= 2,95\text{E}+09 \text{ J/ha.ano} \\
&= 1,75\text{E}+05 \text{ J/l suco}
\end{aligned}$$

$$\text{Transformidade} = 2,77\text{E}+05 \text{ sej/L}$$

Brown e Ulgiati, 2004

^aOBS.: Considerando que o suco fica em média 6 meses na estocagem

27 – Equipamentos para Transporte do SLCC (Aço), kg

$$(a) \text{ Transporte rodoviário} = 1,50 \text{ kg/t SLCC}$$

$$(b) \text{ Oper. portuárias BR} = 1200 \text{ t}$$

$$\begin{aligned}
\text{Consumo} &= (\text{peso})/(\text{vida útil})/(\text{capacidade}) \\
&= (\text{___ t}) * (1\text{e}03 \text{ kg/ton}) / (30 \text{ anos}) / (1,5\text{E}+06 \\
&\quad \text{ton/ano}) \\
&= 2,7\text{E}-02 \text{ kg/t SLCC}
\end{aligned}$$

$$(c) \text{ Infra-estrutura Euro.} = 2,7\text{E}-02 \text{ kg/t SLCC}$$

$$\begin{aligned}
\text{Total (a)+(b)+(c)} &= 1,57 \text{ kg/t SLCC} \\
&= 6,10 \text{ kg/ha.ano} \\
&= 4,87\text{E}-03 \text{ U$/l suco}
\end{aligned}$$

$$\text{Transformidade} = 1,13\text{E}+13 \text{ sej/U\$}$$

Brown e Ulgiati, 2004

28 – Pneus para Transporte do SLCC, kg

$$\text{Peso} = 0,56 \text{ kg /t SLCC (Brasil e Europa)}$$

$$\begin{aligned}
\text{Consumo (kg)} &= 1,67\text{E}00 \text{ kg/ha.a} \\
&= 9,86\text{E}-05\text{kg/ l suco}
\end{aligned}$$

$$\text{Transformidade} = 4,30\text{E}+12 \text{ sej/kg}$$

LEIA, 2006

29 – Diesel para Transporte do SLCC, J

(a) Transporte Terrestre 22,98 l diesel /t SLCC

$$\begin{aligned}\text{Consumo (J)} &= (\text{consumo}) * (\text{densidade}) * (\text{energia do diesel}) \\ &= (\text{___ l/TC}) * (8,40\text{E-}01 \text{ kg/l}) * (1\text{E+}04 \text{ kcal/kg}) \\ &\quad * (4186 \text{ J/kcal}) \\ &= 7,72\text{E+}08 \text{ J/t SLCC}\end{aligned}$$

Odum, 1996

(b) Transporte Marítimo 0,323 MJ/t SLCC

$$\begin{aligned}\text{Consumo (J)} &= 3,23\text{E+}05 \text{ J/t SLCC} \\ \text{Total (a)+(b)} &= 7,75\text{E+}08 \text{ J/t SLCC} \\ &= 2,32\text{E+}09 \text{ J/ha.a} \\ &= 1,37\text{E+}05 \text{ J/l suco}\end{aligned}$$

Transformidade 5,50E+04 sej/J

Bastianoni et al., 2006

30 – Energia Elétrica Transporte do SLCC, J

Consumo 3,84E+02 J/t SLCC

$$\begin{aligned}\text{Consumo (J)} &= 5,74\text{E+}02 \text{ J/ha.a} \\ &= 6,8\text{E-}02 \text{ J/l suco}\end{aligned}$$

Odum, 1996

Transformidade 2,77E+05 sej/J

Brown e Ulgiati, 2004

31 – Infra-estrutura Portuária, Brasil, U\$

Investimentos (U\$) U\$ 65.000.000,00

$$\begin{aligned}\text{Consumo (U\$)} &= (\text{Investimento}) / (\text{vida útil}) / (\text{capacidade}) \\ &= ((\text{___ U\$}) / (50 \text{ anos})) / (1,5\text{E+}06 \text{ t SLCC/ano}) \\ &= 8,67\text{E-}01 \text{ U\$ / t SLCC} \\ &= 2,6\text{E}00 \text{ U\$ / ha.a} \\ &= 1,54\text{E-}04 \text{ U\$ / l suco}\end{aligned}$$

Transformidade 3,70E+12 sej/U\$

Coelho et al., 2003

32 – Infra-estrutura Portuária, Europa, U\$

Investimentos (U\$) U\$ 100.000.000,00

$$= (\text{Investimento})/(\text{vida útil})/(\text{produção})$$

$$= ((\text{U\$})/(50 \text{ anos}))/ (6,00\text{E}+05 \text{ t SLCC/ano})$$

$$= 3,33 \text{ U\$/ t SLCC}$$

$$= 1,00\text{E}+01 \text{ U\$/ha.ano}$$

$$= 5,91\text{E}-04 \text{ U\$/l suco}$$

Transformidade 7,30E+11 sej/U\$

Brown e Ulgiati, 2004

33 – Equipamentos Industriais (Aço), Europa, kg

Peso 45 t

Consumo (kg) = (Peso)/(vida útil)/(produção)

$$= ((\text{t})*(1\text{E}+03 \text{ kg/t})/(30 \text{ anos}))/ (1,6\text{E}+08 \text{ t SLCC/ano})$$

$$= 9,38\text{E}-06 \text{ kg/ l suco}$$

$$= 1,59\text{E}-01 \text{ kg/ha.ano}$$

Transformidade 1,13E+13 sej/kg

Brown e Ulgiati, 2004

34 – Papel , kg

Peso 24 g/embalagem

Consumo (kg) = (Peso)/(volume embalagem)

$$= ((\text{g})*(1\text{E}-03 \text{ kg/g})/(1 \text{ l}))$$

$$= 2,40\text{E}-02 \text{ kg/ l suco}$$

$$= 4,06\text{E}02 \text{ kg/ha.ano}$$

Transformidade 3,90E+11 sej/kg

Cialani et al., 2005

35 – Plástico , kg

Peso 3 g/embalagem

Consumo (kg) = (Peso)/(volume embalagem)

$$= ((\text{g})*(1\text{E}-03 \text{ kg/g})/(1 \text{ l}))$$

$$= 3,0\text{E-}03 \text{ kg/l suco}$$

$$= 5,07\text{E}01 \text{ kg/ha.ano}$$

Transformidade 7,20E+12 sej/kg

LEIA, 2006

36 – Alumínio, kg

Peso 1,5 g/embalagem

$$\text{Consumo (kg)} = (\text{Peso})/(\text{volume embalagem})$$

$$= ((\text{___ g}) * (1\text{E-}03 \text{ kg/g}) / (1 \text{ l}))$$

$$= 1,50\text{E-}03 \text{ kg/l suco}$$

$$= 2,54\text{E}01 \text{ kg/ha.ano}$$

Transformidade 3,42E+12 sej/kg

Brown e Odum 1993

37 – Investimentos Industrial, Europa, U\$

$$\text{Investimentos (U\$)} \text{ U\$ } 30.000.000,00$$

$$= (\text{Investimento})/(\text{vida útil})/(\text{produção})$$

$$= ((\text{___ U\$}) / (20 \text{ anos})) / (1,6\text{E}+08 \text{ l suco/ano})$$

$$= 9,37\text{E-}03 \text{ U$/l suco}$$

$$= 1,00\text{E}+01 \text{ U$/ha.ano}$$

Transformidade 7,30E+11 sej/U\$

Brown e Ulgiati, 2004

38 – Mão-de-Obra Fixa no pomar, J

Funcionários 14

Área 163 ha

Consumo energético 2500 kcal/dia

$$\text{Consumo (J)} = (\text{n}^\circ \text{ Funcionários}) * (\text{Consumo energético/dia})$$

$$* (\text{n}^\circ \text{ dias/ano}) / (\text{área})$$

$$= (\text{___ fucionários}) * (2,5\text{E}+03 \text{ kcal/dia}) *$$

$$(365 \text{ dias/ano}) * (4186 \text{ J/kcal})$$

$$= 3,27\text{E}+08 \text{ J/ha.ano}$$

$$= 1,98\text{E}+04 \text{ J/l suco}$$

Transformidade 2,80E+06 sej/J

Brown, 2003

39 – Mão-de-Obra Temporária (Colheita), J

Funcionários 70

Agrianual, 2007

Safra 180 dias

Área 163 ha

Consumo energético 3000 kcal/dia

$$\text{Consumo (J)} = (\text{n}^\circ \text{ Funcionários}) * (\text{Consumo energético/dia}) * (\text{n}^\circ \text{ dias/ano}) / (\text{área})$$

$$= (\text{___funcionários}) * (3,0\text{E}+03 \text{ kcal/dia}) * (180 \text{ dias/ano}) * (4186 \text{ J/kcal})$$

$$= 9,69\text{E}+08 \text{ J/ha.ano}$$

$$= 5,73\text{E}+04 \text{ J/l suco}$$

Transformidade 2,80E+06 sej/J

Brown, 2003

40 – Despesas Administrativas (Agrícola), U\$

Despesas U\$ 5200,00/ano

Área 163 ha

$$\text{Despesas (J)} = (\text{Despesas}) / (\text{área})$$

$$= (\text{___U\$/ano}) / (163 \text{ ha})$$

$$= 3,19\text{E}+01 \text{ U\$/ha.ano}$$

$$= 1,89\text{E}-03 \text{ U\$/l suco}$$

Transformidade 3,7E+12 sej/U\$

Coelho et al., 2003

41 – Impostos e Taxas (Agrícola), U\$

Total U\$ 46 500,00 /ano

Área 163 ha

$$\text{Despesas (U\$)} = (\text{Despesas}) / (\text{área})$$

$$\begin{aligned}
&= (\text{___ U\$/ano})/(163 \text{ ha}) \\
&= 2,86\text{E}+02 \text{ U\$/ha.ano} \\
&= 1,69\text{E}-02 \text{ U\$/l suco}
\end{aligned}$$

Transformidade 3,70E+12 sej/U\$

Coelho et al., 2003

42 – Mão-de-Obra transporte Laranja, J

Média Viagens 1 viagem/dia

Consumo energético 2500 kcal/dia

Peso transportado 21,1 t/viagem (considerando 65% em capacidade 25t e 35% em capacidade 14t)

$$\begin{aligned}
\text{Consumo (J)} &= (\text{gasto energético}) \cdot (4186\text{J/kcal}) / \\
&\quad ((\text{viagens/dia}) \cdot (\text{peso transportado/viagem})) \\
&= (2,5\text{E}+03\text{kcal/dia}) \cdot (4186\text{J/kcal}) / \\
&\quad ((\text{___vg/dia}) \cdot (\text{___t/vg})) \\
&= 5,34\text{E}+05\text{J/t laranja} \\
&= 1,73\text{E}+07 \text{ J/ha.a} \\
&= 1,02\text{E}+03 \text{ J/l suco}
\end{aligned}$$

Transformidade 2,80E+06 sej/J

Brown, 2003

43 – Mão-de-Obra Fixa Industrial, Brasil, J

Funcionários 120

Produção 2,24E+04 toneladas/ano

Consumo energético 2500 kcal/dia

$$\begin{aligned}
\text{Consumo (J)} &= (\text{funcionários}) \cdot (\text{gasto energético}) \cdot (\text{dias trabalho}) / (\text{produção}) \\
&= (\text{___fucionários}) \cdot (2,5\text{E}+03\text{kcal/dia}) \cdot \\
&\quad \cdot (4186\text{J/kcal}) \cdot (365 \text{ dias ano}) / (\text{___t/ano}) \\
&= 2,05\text{E}+05 \text{ J/t SLCC} \\
&= 6,14\text{E}+07 \text{ J/ha.a} \\
&= 2,63\text{E}+03 \text{ J/l suco}
\end{aligned}$$

Transformidade 2,80E+06 sej/J

Brown, 2003

44 – Mão-de-Obra Temporária Industrial, Brasil, J

Funcionários 170 funcionários

Produção 2,24E+04 t /ano

Safra 180 dias

Consumo energético 2500 kcal/dia

$$\begin{aligned}\text{Consumo (J)} &= (\text{funcionários}) * (\text{safra}) * (\text{gasto energético}) * (4186 \text{ J/kcal}) / (\text{produção}) \\ &= ((\text{funcionários}) * (180 \text{ dias}) * \\ &\quad (2,50\text{E}+03 \text{ kcal/dia}) * (4186 \text{ J/kcal}) / (2,24\text{E}+04 \text{ t} \\ &\quad / \text{ano}) \\ &= 1,46\text{E}+07 \text{ J/ t SLCC} \\ &= 4,29\text{E}+07 \text{ J/ha.a} \\ &= 2,54\text{E}+03 \text{ J/l suco}\end{aligned}$$

Transformidade 2,80E+06 sej/J

Brown, 2003

45 – Impostos e Taxas, Industrial, Brasil, U\$

Total U\$ 291,00 /t SLCC

$$\begin{aligned}\text{Despesas (U\$)} &= 8,73\text{E}+02 \text{ U\$/ha.a} \\ &= 5,16\text{E}-02 \text{ U\$/l suco}\end{aligned}$$

Transformidade 3,70E+12 sej/U\$

Coelho et al., 2003

46 – Mão-de-Obra Transporte SLCC, Brasil, J

(a) Transporte Terrestre

Viagens 15 viagens/mês

Volume transportado 26 t

Consumo energético 2500 kcal/dia

$$\begin{aligned}\text{Consumo (J)} &= (\text{gasto energético}) * (\text{dias/mês}) * \\ &\quad (\text{viagens/mês}) / (\text{volume transportado/mês})\end{aligned}$$

$$= (2,5E+03\text{kcal/dia}) \cdot (4186\text{J/kcal}) \cdot (30 \text{ dias}) /$$

$$[(26 \text{ t /viagem}) \cdot (15 \text{ viagens/mês})]$$

$$= 8,05E+05 \text{ J/t SLCC}$$

(b) Operações Portuárias, Brasil, J

Funcionários 70

Capacidade 1500000 toneladas/ano

Consumo energético 2500 kcal/dia

Consumo (J) $= (\text{funcionários}) \cdot (\text{gasto energético}) / (\text{capacidade})$

$$= (\text{funcionários}) \cdot (2,5E+03\text{kcal/dia}) \cdot$$

$$(4186\text{J/kcal}) \cdot (365 \text{ dias/ano}) / (1,5E+06 \text{ t/a})$$

$$= 1,78E+05 \text{ J/ t SLCC}$$

Total (a)+(b) $= 9,83E+05 \text{ J/ t SLCC}$

$$= 2,95E+06 \text{ J/ha.a}$$

$$= 1,74E+02 \text{ J/l suco}$$

Transformidade $2,80E+06 \text{ sej/J}$

Brown, 2003

47 – Mão-de-Obra Transporte SLCC, Internacional, J

(a) Transporte Marítimo

Tripulação 25 tripulantes

Viagens 1 viagem/mês

Gasto Energético 2500 kcal/dia

Capacidade 10 000 t/viagem

Consumo (J) $= (\text{Tripulantes}) \cdot (\text{gasto energético}) \cdot (\text{dias/mês}) \cdot$

$$(\text{viagens/mês}) / (\text{volume transportado/mês})$$

$$= (25\text{tripulantes}) \cdot (2,5E+03\text{kcal/dia}) \cdot$$

$$(4186\text{J/kcal}) \cdot (30 \text{ dias}) / [(1,0E+4 \text{ t /viagem}) \cdot$$

$$(1 \text{ viagem/mês})]$$

$$= 7,85E+5 \text{ J/t SLCC}$$

(b) Operações Portuárias, Europa,

Funcionários 30
 Capacidade 600 000 toneladas/ano
 Consumo energético 2500 kcal/dia
 Consumo (J) $= (\text{funcionários}) * (\text{gasto energético}) / (\text{capacidade})$
 $= (30 \text{ funcionários}) * (2,5E+03 \text{ kcal/dia}) * (4186 \text{ J/kcal}) * (365 \text{ dias/ano}) / (6,0E+05 \text{ t/a})$
 $= 1,91E+05 \text{ J/t SLCC}$

(c) Transporte Terrestre, Europa,

Viagens 15 viagens/mês
 Volume transportado 26 t
 Consumo energético 2500 kcal/dia
 Consumo (J) $= (\text{gasto energético}) * (\text{dias/mês}) * (\text{viagens/mês}) / (\text{volume transportado/mês})$
 $= (2,5E+03 \text{ kcal/dia}) * (4186 \text{ J/kcal}) * (30 \text{ dias}) / [(26 \text{ t/viagem}) * (15 \text{ viagens/mês})]$
 $= 8,05E+05 \text{ J/t SLCC}$

Total (a)+(b) $= 1,78E+06 \text{ J/t SLCC}$
 $= 5,34E+06 \text{ J/ha.a}$
 $= 3,16E+02 \text{ J/l suco}$

Transformidade $4,85E+06 \text{ sej/J}$

Brown, 2003

48 – Impostos e Taxas Transporte SLCC, Brasil, U\$

Total U\$ 6,10 /t SLCC
 Despesas (U\$) $= 1,83E01 \text{ U$/ha.a}$
 $= 1,08E-03 \text{ U$/l suco}$

Odum, 1996

Transformidade $3,70E+12 \text{ sej/U\$}$

Coelho et al., 2003

49 – Impostos e Taxas Transporte SLCC, Europa, U\$

Total U\$ 6,10 /t SLCC

$$\begin{aligned}\text{Despesas (U\$)} &= 1,83\text{E}01 \text{ U\$/ha.a} \\ &= 1,08\text{E}-03 \text{ U\$/l suco}\end{aligned}$$

Odum, 1996

$$\text{Transformidade} \quad 7,30\text{E}+12 \text{ sej/U\$}$$

Brown e Ulgiati, 2004

50 – Mão-de-Obra Indústria, Europa, J

$$\text{Funcionários} \quad 50$$

$$\text{Produção} \quad 1,60\text{E}+08 \text{ l suco/ano}$$

$$\text{Consumo energético} \quad 2500 \text{ kcal/dia}$$

$$\begin{aligned}\text{Consumo (J)} &= (\text{funcionários}) * (\text{gasto energético}) * (\text{dias trabalho}) / (\text{produção}) \\ &= (\text{___funcionários}) * (2,5\text{E}+03 \text{ kcal/dia}) * \\ &\quad * (4186 \text{ J/kcal}) * (365 \text{ dias ano}) / (\text{___l/ano}) \\ &= 1,19\text{E}+03 \text{ J/l suco} \\ &= 2,02\text{E}+07 \text{ J/ha.a}\end{aligned}$$

$$\text{Transformidade} \quad 4,85\text{E}+06 \text{ sej/J}$$

Brown, 2003

51 – Impostos e Taxas Indústria, Europa, U\$

$$\text{Total} \quad \text{U\$ } 0,24/\text{l suco}$$

$$\text{Despesas (U\$)} \quad = 4,06\text{E}+03 \text{ U\$/ha.a}$$

$$\text{Transformidade} \quad 7,30\text{E}+12 \text{ sej/U\$}$$

Brown e Ulgiati, 2004

1.4.2 – Resumo da Análise Emergética

Tabela 4: Resumo dos Fluxos emergéticos – Distribuição no Estado de São Paulo

Fluxos emergéticos		
I = Total da Natureza	$3,99 \times 10^{15}$ seJ/ ha.a	16.8%
R = Renováveis da Natureza	$3,69 \times 10^{15}$ seJ/ ha.a	15.5%
N = Não Renováveis da Natureza	$3,01 \times 10^{14}$ seJ/ ha.a	1.3%
F = Totais da Economia	$1,98 \times 10^{16}$ seJ/ ha.a	83.2%
M = Materiais	$8,23 \times 10^{15}$ seJ/ ha.a	34.6%
S = Serviços	$1,16 \times 10^{16}$ seJ/ ha.a	48.6%
Y = Totais = (I+F)	$2,38 \times 10^{16}$ seJ/ ha.a	100.0%

Tabela 5: Índices emergéticos – Distribuição no Estado de São Paulo

índices emergéticos		
Índice - Tradicionais	valor	Unidade
$Tr = Y/O =$	$7,00 \times 10^5$	seJ/J
$Tr = Y/O =$	$1,41 \times 10^{12}$	seJ/L suco
$\%R = 100(R)/Y =$	15,5%	
$EYR = Y/F =$	1,20	
$EIR = F/I =$	4,96	
$ELR = (F+N)/R =$	5,45	
$SI = EYR/ELR =$	0,22	
$EER = Y/[(\$)(seJ/\$)] =$	1,20	
Índice - Modificados	Valor	
$\%R = 100(R+Mr+Sr)/Y =$	25,5%	
$ELR^* = (N+Mn+Sn)/(R+Mr+Sr) =$	2,73	
$SI^* = EYR/ELR =$	0,47	

2 Suco de Laranja Orgânica

2.1 DADOS GERAIS

2.1.1 Dados da Propriedade Agrícola

Os dados utilizados foram coletados na visita à campo, em entrevistas e obtidos em literatura. Resumo dos dados utilizados:

- Localizada em município da região produtora de laranja no estado de São Paulo;
- Produção: 32.1 t/ ha.ano;
- Área total do pomar: 140 hectares;
- Área total da propriedade; 175 hectares (140 ha de pomares e 35 ha de reserva legal);
- Manejo Orgânico;
- Número de Funcionário para área total: 10 fixos e 35 temporários;
- Safra: 180 de colheita;
- Utiliza irrigação.

2.1.2. Dados de Transporte da laranja

Idem 1.1.2, dados de Transporte de laranja convencional.

2.1.3. Dados da etapa industrial Brasileira (Produção de SLCC)

Idem 1.1.3, dados da etapa Industrial Brasileira Convencional.

2.1.4. Dados de Transporte terrestre de SLCC - Brasil

Idem 1.1.4, dados de transporte terrestre de SLCC convencional no Brasil.

2.1.5 Dados do Porto de Santos

Idem 1.1.5, dados da operação portuária em Santos para SLCC convencional.

2.1.6 Dados de Transporte Marítimo

Idem 1.1.6, dados do Transporte marítimo de SLCC convencional.

2.1.7 Dados do porto de Ghent

Idem 1.1.7, Dados do Porto de Ghent para SLCC convencional.

2.1.8 Dados de Transporte terrestre de SLCC - Europa

Idem 1.1.8, dados do transporte terrestre de SLCC convencional na Europa.

2.1.9 Dados de etapa industrial - Europa

Idem 1.1.9, dados da etapa industrial europeia.

2.2 FLUXOGRAMA DA FÁBRICA DE SLCC ORGÂNICO

Idem 1.2 Diagrama da fábrica de SLCC convencional.

2.3 FLUXOGRAMA DA FÁBRICA DILUIDORA NA EUROPA

Idem 1.3, Diagrama da fábrica Diluidora convencional.

Tabela 6: Análise Emergética do suco de laranja Orgânico.

Fluxos		% R.	Dado	Unida de	Transf. (sej/unit)	Energia Solar (seJ/ha.a)		
						Porção Ren	Porção Não Ren	Total
RENOVÁVEIS						3,78x10 ¹⁵	0,00	3,78x10 ¹⁵
Fazenda						3,76x10 ¹⁵	0,00	3,76x10 ¹⁵
1	Sol	100	5,44x10 ¹³	J/ha.a	1	5,54x10 ¹³	0,00	5,54x10 ¹³
2	Chuva	100	6,12x10 ¹⁰	J/ha.a	3,06x10 ⁴	1,87x10 ¹⁵	0,00	1,87x10 ¹⁵
3	Água (irrigação)	100	8,00x10 ⁹	J/ha.a	1,85x10 ⁵	1,48x10 ¹⁵	0,00	1,48x10 ¹⁵
4	Nitrogênio	100	5,09x10 ⁹	g/ha.a	6,38x10 ⁹	3,25x10 ¹⁴	0,00	3,25x10 ¹⁴
5	Fósforo	100	9,32x10 ²	g/ha.a	2,99x10 ¹⁰	2,79x10 ¹³	0,00	2,79x10 ¹³
6	Potássio	100	4,23x10 ¹	g/ha.a	2,92x10 ¹⁰	1,24x10 ¹²	0,00	1,24x10 ¹²
Indústria Brasil						6,98x10 ¹²	0,00	6,98x10 ¹²
7	Água (poço ou rio)	100	3,77x10 ⁷	J/ha.a	1,85x10 ⁵	6,98x10 ¹²	0,00	6,98x10 ¹²
Transporte SLCC						6,572x10 ¹²	0,00	6,57x10 ¹²
8	Água (poço ou rio)	100	3,55x10 ⁷	J/ha.a	1,85x10 ⁵	6,57x10 ¹²	0,00	6,57x10 ¹²
Indústria Europa						1,02x10 ¹³	0,00	1,02x10 ¹³
9	Água (poço ou rio)	100	4,49x10 ⁷	J/ha.a	1,85x10 ⁵	1,02x10 ¹³	0,00	1,02x10 ¹³
NÃO RENOVÁVEIS						0,00	2,83x10 ¹⁴	2,83x10 ¹⁴
Fazenda						0,00	2,83x10 ¹⁴	2,83x10 ¹⁴
10	Perda de solo	0	2,28x10 ⁹	J/ha.a	1,24x10 ⁵	0,00	2,83x10 ¹⁴	2,83x10 ¹⁴
MATERIAIS						8,31x10 ¹⁴	5,61x10 ¹⁵	6,44x10 ¹⁵
Fazenda						3,92x10 ¹⁴	2,84x10 ¹⁵	3,23x10 ¹⁵
11	Esterco	29	3,12x10 ⁵	J/ha.a	1,27x10 ⁸	1,15x10 ¹³	2,81x10 ¹³	3,96x10 ¹³
12	Melaço	11	2,76x10 ⁷	g/ha.a	2,00x10 ⁶	6,07x10 ¹²	4,91x10 ¹⁴	5,52x10 ¹³
13	Cal	0	5,94x10 ⁶	J/ha.a	2,72x10 ⁶	0,00	1,62x10 ¹³	1,62x10 ¹³
14	Sulfato de Cobre	0	6,07x10 ⁰	kg/ha.a	1,68x10 ⁹	0,00	1,02x10 ¹⁰	1,02x10 ¹⁰
15	Outros Insumos	0	4,80x10 ²	US\$/ha.a	3,70x10 ¹²	0,00	1,78x10 ¹⁵	1,78x10 ¹⁵
16	Diesel	0	1,21x10 ¹⁰	J/ha.a	5,50x10 ⁴	0,00	6,63x10 ¹⁴	6,63x10 ¹⁴

17	Implementos (Aço)	0	6,57x10 ⁰	kg/ha.a	1,13x10 ¹⁰	0,00	7,43x10 ¹³	7,43x10 ¹³
18	Energia Elétrica	68	1,99x10 ⁹	J/ha.a	2,77x10 ⁵	3,74x10 ¹⁴	1,76x10 ¹⁴	5,51x10 ¹⁴
19	Investimentos	0	1,49x10 ¹	U\$/ha.a	3,70x10 ¹²	0,00	5,51x10 ¹³	5,51x10 ¹³
Transporte Laranja						0,00	2,72x10¹⁴	2,72x10¹⁴
20	Caminhão	0,	5,26x10 ⁰	kg/ha.a	1,13x10 ¹³	0,00	5,95x10 ¹³	5,95x10 ¹³
21	Pneus	0	2,35x10 ⁰	kg/ha.a	4,30x10 ¹²	0,00	1,01x10 ¹³	1,01x10 ¹³
22	Diesel	0	3,68x10 ⁹	J/ha.a	5,50x10 ⁴	0,00	2,02x10 ¹⁴	2,02x10 ¹⁴
Indústria Brasil						4,39x10¹⁴	1,88x10¹⁵	2,32x10¹⁵
23	Equipamentos (Aço)	0	1,17x10 ⁰	kg/ha.a	1,13x10 ¹³	0,00	1,32x10 ¹³	1,32x10 ¹³
24	Equipamentos (ferro)	0	1,01x10 ⁻¹	kg/ha.a	2,50x10 ⁹	0,00	2,51x10 ⁸	2,51x10 ⁸
25	Insumos Industriais	0	2,68x10 ⁻¹	kg/ha.a	3,80x10 ¹²	0,00	1,02x10 ¹²	1,02x10 ¹²
26	Investimentos	0	6,50x10 ¹	U\$/ha.a	3,70x10 ¹²	0,00	2,41x10 ¹⁴	2,41x10 ¹⁴
27	Diesel	0	2,58x10 ¹⁰	J/ha.a	5,50x10 ⁴	0,00	1,42x10 ¹⁵	1,42x10 ¹⁵
28	Energia Elétrica	68	2,33x10 ⁹	J/ha.a	2,77x10 ⁵	4,39x10 ¹⁴	2,07x10 ¹⁴	6,46x10 ¹⁴
Transporte do SLCC						1,71x10⁸	1,61x10¹⁴	1,61x10¹⁴
29	Equipamentos (Aço)	0	3,67x10 ⁰	kg/ha.a	1,13x10 ¹³	0,00	4,15x10 ¹³	4,15x10 ¹³
30	Pneus	0	1,32x10 ⁰	kg/ha.a	4,30x10 ¹²	0,00	5,66x10 ¹²	5,66x10 ¹²
31	Diesel	0	1,83x10 ⁹	J/ha.a	5,50x10 ⁴	0,00	1,01x10 ¹⁴	1,01x10 ¹⁴
32	Energia Elétrica	68	9,07x10 ²	J/ha.a	2,77x10 ⁵	1,71x10 ⁸	8,04x10 ⁷	2,51x10 ⁸
33	Investimentos BR	0	2,05x10 ⁰	U\$/ha.a	3,70x10 ¹²	0,00	7,59x10 ¹²	7,59x10 ¹²
34	Investimentos Euro	0	7,89x10 ⁰	U\$/ha.a	7,30x10 ¹¹	0,00	5,76x10 ¹²	5,76x10 ¹²
Indústria Europa						0,00	4,63x10¹⁴	4,63x10¹⁵
35	Equipamentos (Aço)	0	1,25x10 ⁻¹	kg/ha.a	1,13x10 ¹³	0,00	1,41x10 ¹²	1,41x10 ¹²
36	Papel	0	3,18x10 ²	kg/ha.a	3,90x10 ¹¹	0,00	1,24x10 ¹⁴	1,24x10 ¹⁴
37	Plástico	0	3,74x10 ¹	kg/ha.a	7,20x10 ¹²	0,00	2,69x10 ¹⁴	2,69x10 ¹⁴
38	Alumínio	0	1,87x10 ¹	kg/ha.a	3,42x10 ¹²	0,00	6,39x10 ¹³	6,39x10 ¹³
39	Investimentos	0	5,56x10 ⁰	U\$/ha.a	7,30x10 ¹¹	0,00	4,06x10 ¹²	4,06x10 ¹²
SERVIÇOS						8,31x10¹⁴	7,61x10¹⁵	8,44x10¹⁵
Fazenda						7,23x10¹⁵	2,19x10¹⁵	2,91x10¹⁵

40	Mão de obra - Fixa	38	2,27x10 ⁸	J/ha.a	2,80x10 ⁶	2,42x10 ¹⁴	2,94x10 ¹⁴	6,36x10 ¹⁴
41	Mão de Obra Temp.	38	4,52x10 ⁸	J/ha.a	2,80x10 ⁶	4,81x10 ¹⁵	7,85x10 ¹⁵	1,27x10 ¹⁵
42	Desp. Administrativas	0	1,59x10 ¹	U\$/ha.a	3,70x10 ¹²	0,00	5,87x10 ¹⁴	5,87x10 ¹⁴
43	Impostos e Taxas	0	2,58x10 ²	U\$/ha.a	3,70x10 ¹²	0,00	9,53x10 ¹⁵	9,53x10 ¹⁵
Transporte da Laranja						1,46x10¹³	2,38x10¹³	3,83x10¹³
44	Mão de Obra	38	1,37x10 ⁷	J/ha.a	2,80x10 ⁶	1,46x10 ¹³	2,39x10 ¹³	3,83x10 ¹³
Indústria Brasil						8,77x10¹³	2,42x10¹⁵	2,51x10¹⁵
45	Mão de obra Fixa	38	4,85x10 ⁷	J/ha.a	2,80x10 ⁶	5,16x10 ¹³	8,42x10 ¹⁴	1,36x10 ¹⁴
46	Mão de Obra Temp.	38	3,39x10 ⁷	J/ha.a	2,80x10 ⁶	3,61x10 ¹³	5,88x10 ¹³	9,49x10 ¹³
47	Impostos e Taxas	0	6,16x10 ²	U\$/ha.a	3,70x10 ¹²	0,00	2,28x10 ¹⁵	2,28x10 ¹⁵
Transporte do SLCC						3,30x10¹²	8,77x10¹⁴	9,10x10¹³
48	Mão de Obra BR	38	2,33x10 ⁶	J/ha.a	2,80x10 ⁶	2,48x10 ¹²	4,04x10 ¹²	6,52x10 ¹²
49	Mão de Obra Euro	4	4,22x10 ⁶	J/ha.a	4,85x10 ⁶	8,18x10 ¹¹	1,96x10 ¹³	2,05x10 ¹³
50	Taxas BR	0	1,44x10 ¹	U\$/ha.a	3,70x10 ¹²	0,00	5,35x10 ¹³	5,35x10 ¹³
51	Taxas Euro	0	1,44x10 ¹	U\$/ha.a	7,30x10 ¹¹	0,00	1,05x10 ¹³	1,05x10 ¹³
Indústria Europa						3,09x10¹²	2,88x10¹⁵	2,88x10¹⁵
52	Mão de Obra	4	1,59x10 ⁷	J/ha.a	2,80x10 ⁶	3,09x10 ¹²	7,42x10 ¹³	7,73x10 ¹³
53	Taxas e impostos	0	3,85x10 ³	U\$/ha.a	7,30x10 ¹¹	0,00	2,81x10 ¹⁵	2,81x10 ¹⁵
TOTAL						5,45x10¹⁵	1,30x10¹⁶	1,95x10¹⁶
Produção								
Suco de Laranja diluído			1,34x10 ⁴	Litro		2,68x10 ¹⁰	J	

2.4.1 Memorial de Cálculo – Suco Orgânico

1 – Sol, J

Idem 1.4.1 (Convencional)

2– Potencial Químico da Chuva, J

Idem 1.4.1 (Convencional)

3 – Água (irrigação e biofertilizantes), J

Consumo 2000 m³ /ha.ano

Energia (J) = (Consumo)*(energia da água)*(densidade) *
(área pomar)/(área total)

$$= (\text{---m}^3) * (5000 \text{ J/kg}) * (1\text{E}3 \text{ kg/m}^3) * (131\text{ha pomar}) / (163 \text{ ha})$$

Odum, 1996

$$= 1,00\text{E}+10\text{J/ha ano}$$

$$= 4,73\text{E}+05 \text{ J/l suco}$$

Transformidade 1,85E+05 sej/J

LEIA, 2006

4 – Nitrogênio Absorvido, g

Produção 32,1t /ha.ano

Conteúdo de N = 1,30% de proteína, 16% de N na proteína.

$$\begin{aligned} \text{exportado pela} &= (32,1 \text{ t/ha.a}) * (1000\text{kg/t}) * (1,30\%) * (16\%) \\ \text{laranja} &= 66,77 \text{ kg de N/ha.a} \end{aligned}$$

Adubação = 390 kg de esterco/ha.a

Conteúdo de N = 0,77%

$$\begin{aligned} \text{adicionado via} &= (390 \text{ kg/ha.a}) * (0,77\%) \\ \text{esterco} &= 3 \text{ kg de N via esterco/ha.a} \end{aligned}$$

Boletim 100

Nitrogênio = [(N da laranja)-(N via esterco)]*(área pomar)/
Absorvido (g) (área total)

$$= [(66,77 \text{ kg N}) - (3 \text{ kg N})] * (140\text{ha pomar}) / (175\text{ha})$$

$$= 5,09\text{E}+04 \text{ g/ha ano}$$

$$= 3,81\text{E}-03 \text{ kg/l suco}$$

Transformidade 6,38E+09 sej/g

Ortega et al, 2005

5 – Fósforo Absorvido, g

Produção 32,1 t /ha.ano

$$\begin{aligned}
 \text{Conteúdo de P} &= 28 \text{ mg/100g} \\
 \text{exportado pela laranja} &= (32,1\text{t}) \cdot (1000 \text{ kg/t}) \cdot (28 \text{ mg/100g}) \cdot \\
 &\quad (1000\text{g/kg}) \cdot (1\text{E-6kg/mg}) \\
 &= 8.99 \text{ kg de P /ha.a}
 \end{aligned}$$

Franco, 2000

Adubação:

$$\begin{aligned}
 \text{(a) esterco} &= 390 \text{ kg de esterco/ha.a} \\
 &= 0,1 \% \text{ de } \text{P}_2\text{O}_5; 44\% \text{ de P em } \text{P}_2\text{O}_5 \\
 &= (390 \text{ kg/ha.a}) \cdot (0.1\%) \cdot (44\%) \\
 &= 0,17 \text{ kg de P/ha.a}
 \end{aligned}$$

Boletim 100

$$\begin{aligned}
 \text{(b) Pó de Rocha} &= 250 \text{ kg/ha.a} \\
 &= 7\% \text{ de } \text{P}_2\text{O}_5, 44\% \text{ de P em } \text{P}_2\text{O}_5 \\
 &= (250 \text{ kg/ha.a}) \cdot (7\%) \cdot (44\%) \\
 &= 7,64 \text{ kg de P via pó de rocha}
 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
 \text{Fósforo Absorvido (g)} &= [\text{P da laranja} - (\text{P via esterco}) - (\text{P via pó de rocha})] \cdot (\text{área pomar}) / (\text{área total}) \\
 &= [(8,99\text{kg de P}) - (0,17 \text{ kg P}) - (7,64 \text{ kg P})] \cdot (1000\text{g/kg}) \cdot (140\text{ha pomar}) / (175\text{ha}) \\
 &= 9,32\text{E}+02 \text{ g/ha ano} \\
 &= 6,98\text{E-05 g/l suco}
 \end{aligned}$$

$$\text{Transformidade} = 2,99\text{E}+10 \text{ sej/g P}$$

Ortega et al, 2005

6 – Potássio Absorvido, g

$$\begin{aligned}
 \text{Produção} &= 32,1 \text{ t /ha.ano} \\
 \text{Conteúdo de K} &= 196 \text{ mg/100g} \\
 \text{exportado pela laranja} &= (32,1\text{t}) \cdot (1000 \text{ kg/t}) \cdot (196 \text{ mg/100g}) \cdot \\
 &\quad (1000\text{g/kg}) \cdot (1\text{E-6kg/mg}) \\
 &= 62,83 \text{ kg de K /ha.a}
 \end{aligned}$$

Franco, 2000

Adubação:

$$\begin{aligned} \text{(a) esterco} &= 390 \text{ kg de esterco/ha.a} \\ &= 0,5 \% \text{ de K}_2\text{O}; 83\% \text{ de K em K}_2\text{O} \\ &= (390 \text{ kg/ha.a}) * (0,5\%) * (83\%) \\ &= 1,62 \text{ kg de K via esterco/ha.a} \end{aligned}$$

Boletim 100

$$\begin{aligned} \text{(b) Pó de Rocha} &= 250 \text{ kg/ha.a} \\ &= 4\% \text{ de K}_2\text{O}, 83\% \text{ de K em K}_2\text{O} \\ &= (250 \text{ kg/ha.a}) * (4\%) * (83\%) \\ &= 8,3 \text{ kg de K via pó de rocha} \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \text{Potássio} &= [\text{P da laranja} - (\text{P via esterco}) - (\text{P via pó de} \\ \text{Absorvido (g)} &\quad \text{rocha})] * (\text{área pomar}) / (\text{área total}) \\ &= [(62,83 \text{ kg de P}) - (1,62 \text{ kg P}) - (8,3 \text{ kg} \\ &\quad \text{P})] * (1000 \text{ g/kg}) * (140 \text{ ha pomar}) / (175 \text{ ha}) \\ &= 4,23 \text{E}+04 \text{ g/ha ano} \\ &= 3,17 \text{E}-03 \text{ g/l suco} \end{aligned}$$

$$\text{Transformidade} \quad 2,99 \text{E}+10 \text{ sej/g K}$$

Ortega et al, 2005

7 – Água, Uso Industrial, Brasil, J

Consumo por tonelada de SLCC é igual ao convencional, porém, devido à diferença em produtividade agrícola, obtém-se:

$$\begin{aligned} \text{Energia (J)} &= 1,59 \text{E}+07 \text{ J/t SLCC} \\ &= 3,77 \text{E}+07 \text{ J/ha.ano} \\ &= 2,82 \text{E}+03 \text{ J/l suco} \end{aligned}$$

Odum, 1996

$$\text{Transformidade} \quad 1,85 \text{E}+05 \text{ sej/J}$$

Lanzotti, 2000

8 – Água, Transporte (operações Portuárias), J

Consumo por tonelada de SLCC é igual ao convencional, porém, devido à diferença em produtividade agrícola, obtém-se:

$$\begin{aligned}
 \text{Energia (J)} &= 1,50\text{E}+07 \text{ J/t SLCC} \\
 &= 3,55\text{E}+07 \text{ J/ha.ano} \\
 &= 2,66\text{E}+03 \text{ J/l suco}
 \end{aligned}$$

Odum, 1996

$$\text{Transformidade} \quad 1,85\text{E}+05 \text{ sej/J} \quad \text{Lanzotti, 2000}$$

9 – Água, Uso Industrial, Europa, J

Consumo por tonelada de SLCC é igual ao convencional, porém, devido à diferença em produtividade agrícola, obtém-se:

$$\begin{aligned}
 \text{Energia (J)} &= 2,50\text{E}+07 \text{ J/t SLCC} \\
 &= 5,49\text{E}+07 \text{ J/ha.ano} \\
 &= 4,43\text{E}+03 \text{ J/l suco}
 \end{aligned}$$

Odum, 1996

$$\text{Transformidade} \quad 1,85\text{E}+05 \text{ sej/J} \quad \text{Lanzotti, 2000}$$

10 – Perda de Solo, J

$$\text{Perda de solo} \quad 10,5 \text{ t /ha.ano} \quad \text{Bertoni et al., 1972}$$

$$\text{Matéria Orgânica} \quad 4\%$$

$$\begin{aligned}
 \text{Energia (J)} &= (\text{perda de solo}) * (\% \text{ mat. Org.}) * (\text{Energia da} \\
 &\quad \text{Mat.org.}) * (\text{área pomar}) / (\text{área total}) \\
 &= (__\text{t/ha.ano}) * (10\text{E}3 \text{ kg/t}) * (__\% \text{MO}) * \\
 &\quad (5400\text{kcal/kgMO}) * (4186\text{J/kcal}) * (140\text{ha} \\
 &\quad \text{pomar}) / (175 \text{ ha}) \\
 &= 2,28\text{E}+09 \text{ J/ha ano} \\
 &= 5,68\text{E}+05 \text{ J/l suco}
 \end{aligned}$$

Odum, 1996

$$\text{Transformidade} \quad 1,24\text{E}+05 \text{ sej/J} \quad \text{Brown e Ulgiati, 2004}$$

11 – Esterco, g

$$\text{Consumo} \quad 390 \text{ kg /ha de pomar . ano}$$

$$\begin{aligned}
 \text{Consumo (g)} &= (\text{Consumo}) * (\text{área pomar}) / (\text{área total}) \\
 &= (__\text{kg/ha.ano}) * (1000\text{g/kg}) * (140\text{ha pomar}) / \\
 &\quad (175 \text{ ha})
 \end{aligned}$$

Odum, 1996

$$= 3,12E+05 \text{ g/ha ano}$$

$$= 2,33E+01 \text{ g/l suco}$$

$$\text{Transformidade} \quad 1,21E+08 \text{ sej/J}$$

Bastianoni et al, 2001

12 – Melaço, J

$$\text{Consumo} \quad 2,3 \text{ kg/ha. ano}$$

$$\text{Consumo (g)} = (\text{Consumo}) * (\text{energia melaço}) * (\text{área pomar}) / (\text{área total})$$

$$= (\text{___ kg/ha.ano}) * (290 \text{ kcal/100g}) * (4186 \text{ J/kcal}) * (1E3 \text{ g/kg}) * (140 \text{ ha pomar}) / (175 \text{ ha})$$

FAO, 2005

$$= 2,21E+07 \text{ J/ha ano}$$

$$= 4,24E+04 \text{ J/l suco}$$

$$\text{Transformidade} \quad 6,38E+09 \text{ sej/g}$$

Brown e Ulgiati, 2004

13 – Cal, J

$$\text{Consumo} \quad 12,2 \text{ kg /ha de pomar . ano}$$

$$\text{Consumo (J)} = (\text{Consumo}) * (\text{energia Corretivo}) * (\text{área pomar}) / (\text{área total})$$

$$= (\text{___ kg/ha.ano}) * (1E3 \text{ g/kg}) * (611 \text{ J/g}) * (140 \text{ ha pomar}) / (175 \text{ ha})$$

Odum, 1996

$$= 5,95E+06 \text{ J/ha ano}$$

$$= 2.89E+04 \text{ J/l suco}$$

$$\text{Transformidade} \quad 2,72E+06 \text{ sej/J}$$

Brown e Ulgiati, 2004

14 – Sulfato de Cobre, kg

$$\text{Consumo} \quad 30 \text{ g /ha.a}$$

$$\text{Consumo (kg)} = (\text{Consumo}) * (\% \text{ de Cu}) * (\text{área pomar}) / (\text{área total})$$

$$= (\text{___ kg/pé.ano}) * (25\% \text{ de Cu}) * (140 \text{ ha pomar}) / (170 \text{ ha})$$

Odum, 1996

$$= 6 \text{ g/ha ano}$$

$$= 4,54\text{E-}02 \text{ kg/l suco}$$

$$\text{Transformidade } 2,92\text{E+}12 \text{ sej/kg}$$

Brandt-Williams, 2002

15 – Outros Insumos, U\$

$$\text{Gasto } \text{U\$ } 600 \text{ /ha de pomar.ano}$$

$$\text{Consumo (U\$)} = (\text{Gasto}) * (\text{área pomar}) / (\text{área total})$$

$$= (\text{___ U\$/ha.ano}) * (140\text{ha pomar}) / (175 \text{ ha})$$

Odum, 1996

$$= 4,80\text{E+}02 \text{ U\$/ha ano}$$

$$= 3,59\text{E-}02 \text{ U\$/l suco}$$

$$\text{Transformidade } 3,70\text{E+}12 \text{ sej/U\$}$$

Coelho et al., 2003

16 - Diesel (Agrícola), J

$$\text{Consumo } 60 \text{ 000 l diesel /ano}$$

$$\text{Consumo (J)} = (\text{consumo}) * (\text{densidade}) * (\text{energia do diesel}) / (\text{área total})$$

$$= (\text{___ l/ha.ano}) * (8,40\text{E-}01 \text{ kg/l}) * (1\text{E+}04 \text{ kcal/kg})$$

Odum, 1996

$$* (4186 \text{ J/kcal}) / (175 \text{ ha})$$

$$= 1,21\text{E+}10 \text{ J/ha ano}$$

$$= 9,03\text{E+}05 \text{ J/l suco}$$

$$\text{Transformidade } 5,50\text{E+}04 \text{ sej/J}$$

Bastianoni et al., 2006

17 – Implementos e Equipamentos (Agrícola), kg

$$\text{Peso } 6,57 \text{ kg /ha.ano (inclui implementos, tratores e equipamentos)}$$

$$\text{Consumo (kg)} = 6,57 \text{ kg/ha ano}$$

$$= 4,92\text{E-}04 \text{ kg/l suco}$$

$$\text{Transformidade } 1,13\text{E+}13 \text{ sej/kg}$$

Brown e Ulgiati, 2004

18 – Energia Elétrica (Agrícola), J

$$\text{Consumo } 96,94 \text{ MWh}$$

$$\text{Consumo (J)} = (\text{consumo})/(\text{área})$$

$$= (\text{___ MWh/ano}) * (1\text{E}03 \text{ kWh/MWh}) * (3,60\text{E}+06 \text{ J/kWh}) / (175 \text{ ha})$$

Odum, 1996

$$= 1,99\text{E}+09 \text{ J/ha.a}$$

$$= 1,49\text{E}+05 \text{ J/l suco}$$

$$\text{Transformidade} \quad 2,77\text{E}+05 \text{ sej/J}$$

Brown e Ulgiati, 2004

19 – Infra-estrutura Agrícola, U\$

$$\text{Investimentos} \quad \text{U\$ } 52\,000,00$$

$$\text{Investimentos (U\$)} = ((\text{Investimento})/(\text{vida útil})) / (\text{área})$$

$$= ((\text{___ U\$}) / (20 \text{ anos})) / (175 \text{ ha})$$

$$= 1,49\text{E}+01 \text{ U\$/ha.a}$$

$$= 1,11\text{E}-03 \text{ U\$/l suco}$$

$$\text{Transformidade} \quad 3,70\text{E}+12 \text{ sej/U\$}$$

Coelho et al., 2003

20 – Caminhão para Transporte da Laranja (aço), kg

Consumo por tonelada de laranja é igual ao convencional, porém, devido à diferença em produtividade agrícola, obtém-se:

$$\text{Consumo (kg)} = 2,05\text{E}-01 \text{ kg /t de laranja}$$

$$= 5,26\text{E}-01 \text{ kg/ha.a}$$

$$= 3,94\text{E}-04 \text{ kg/l suco}$$

$$\text{Transformidade} \quad 1,13\text{E}+13 \text{ sej/kg}$$

Brown e Ulgiati, 2004

21 – Pneus (Transporte da laranja), kg

Consumo por tonelada de laranja é igual ao convencional, porém, devido à diferença em produtividade agrícola, obtém-se:

$$\text{Consumo (kg)} = 9,10\text{E}-02 \text{ kg/t laranja}$$

$$= 2,35\text{E}00 \text{ kg/ha.a}$$

$$= 1,76\text{E}-04 \text{ kg/l suco}$$

Transformidade 4,30E+12 sej/kg

LEIA, 2006

22 – Diesel (Transporte da Laranja), J

Consumo por tonelada de laranja é igual ao convencional, porém, devido à diferença em produtividade agrícola, obtém-se:

$$\text{Consumo (J)} = 1,44\text{E}+08 \text{ J/t laranja}$$

$$= 3,68\text{E}+09 \text{ J/ha.a}$$

Odum, 1996

$$= 2,75\text{E}+05 \text{ J/l suco}$$

Transformidade 5,50E+04 sej/J

Bastianoni et al., 2006

23 – Equipamentos Industriais (Aço), Brasil, kg

Consumo por tonelada de SLCC é igual ao convencional, porém, devido à diferença em produtividade agrícola, obtém-se:

$$\text{Consumo (kg)} = 4,93\text{E}-01 \text{ kg/t SLCC}$$

$$= 1,17\text{E}00 \text{ kg/ha.ano}$$

$$= 8,75\text{E}-05 \text{ kg/l suco}$$

Transformidade 1,13E+13 sej/kg

Brown e Ulgiati, 2004

24 – Equipamentos Industriais (Ferro), Brasil, kg

Consumo por tonelada de SLCC é igual ao convencional, porém, devido à diferença em produtividade agrícola, obtém-se:

$$\text{Consumo (kg)} = 4,24\text{E}-02 \text{ kg/t SLCC}$$

$$= 1,01\text{E}-01 \text{ kg/ha.ano}$$

$$= 7,53\text{E}-06 \text{ kg/l suco}$$

Transformidade 2,50E+09 sej/kg

Brown e Ulgiati, 2004

25 – Insumos industriais, Brasil, kg

Consumo por tonelada de SLCC é igual ao convencional, porém, devido à diferença em produtividade agrícola, obtém-se:

$$\text{Consumo (kg)} = 1,13\text{E}-01 \text{ kg /t SLCC}$$

$$= 2,68E-01 \text{ kg/ha.a}$$

$$= 1,01E-05 \text{ kg/l suco}$$

Transformidade $3,80E+12 \text{ sej/kg}$

LEIA, 2006

26 – Infra-estrutura Industrial, Brasil, U\$

Consumo por tonelada de SLCC é igual ao convencional, porém, devido à diferença em produtividade agrícola, obtém-se:

$$\text{Total} = 27,46 \text{ U\$/t SLCC}$$

$$= 6,50E+01 \text{ U\$/ha.ano}$$

$$= 4,87E-03 \text{ U\$/l suco}$$

Transformidade $3,70E+12 \text{ sej/U\$}$

Coelho et al., 2003

27 – Diesel Industrial, Brasil, J

Consumo por tonelada de SLCC é igual ao convencional, porém, devido à diferença em produtividade agrícola, obtém-se:

$$\text{Consumo (J)} = 1,09E+10 \text{ J/t SLCC}$$

$$= 3,26E10 \text{ J/ha.a}$$

$$= 1,93E+06 \text{ J/l suco}$$

Odum, 1996

Transformidade $5,50E+04 \text{ sej/J}$

Bastianoni et al., 2006

28 – Energia Elétrica (Industrial), Brasil, J

Consumo por tonelada de SLCC é igual ao convencional, porém, devido à diferença em produtividade agrícola, obtém-se:

$$\text{Total} = 9,84 \text{ J/t SLCC}$$

$$= 2,33E+09 \text{ J/ha.ano}$$

$$= 1,75E+05 \text{ J/l suco}$$

Transformidade $2,77E+05 \text{ sej/L}$

Brown e Ulgiati, 2004

^aOBS.: Considerando que o suco fica em média 6 meses na estocagem

29 – Equipamentos para Transporte do SLCC (Aço), kg

Consumo por tonelada de SLCC é igual ao convencional, porém, devido à diferença em produtividade agrícola, obtém-se:

$$\begin{aligned}\text{Total} &= 1,57 \text{ kg/t SLCC} \\ &= 3,67 \text{ kg/ha.ano} \\ &= 4,87\text{E-}03 \text{ U\$/l suco}\end{aligned}$$

$$\text{Transformidade} = 1,13\text{E+}13 \text{ sej/U\$}$$

Brown e Ulgiati, 2004

30 – Pneus para Transporte do SLCC, kg

Consumo por tonelada de SLCC é igual ao convencional, porém, devido à diferença em produtividade agrícola, obtém-se:

$$\begin{aligned}\text{Consumo (kg)} &= 0,56 \text{ kg /t SLCC (Brasil e Europa)} \\ &= 1,32\text{E}00 \text{ kg/ha.a} \\ &= 9,86\text{E-}05 \text{ kg/ l suco}\end{aligned}$$

$$\text{Transformidade} = 4,30\text{E+}12 \text{ sej/kg}$$

LEIA, 2006

31 – Diesel para Transporte do SLCC, J

Consumo por tonelada de SLCC é igual ao convencional, porém, devido à diferença em produtividade agrícola, obtém-se:

$$\begin{aligned}\text{Total} &= 7,75\text{E+}08 \text{ J/t SLCC} \\ &= 1,83\text{E+}09 \text{ J/ha.a} \\ &= 1,37\text{E+}05 \text{ J/l suco}\end{aligned}$$

$$\text{Transformidade} = 5,50\text{E+}04 \text{ sej/J}$$

Bastianoni et al., 2006

32 – Energia Elétrica Transporte do SLCC, J

Consumo por tonelada de SLCC é igual ao convencional, porém, devido à diferença em produtividade agrícola, obtém-se:

$$\begin{aligned}\text{Consumo} &= 3,84\text{E+}02 \text{ J/t SLCC} \\ \text{Consumo (J)} &= 9,07\text{E+}02 \text{ J/ha.a} \\ &= 6,8\text{E-}02 \text{ J/l suco}\end{aligned}$$

$$\text{Transformidade} = 2,77\text{E+}05 \text{ sej/J}$$

Brown e Ulgiati, 2004

33 – Infra-estrutura Portuária, Brasil, U\$

Consumo por tonelada de SLCC é igual ao convencional, porém, devido à diferença em produtividade agrícola, obtém-se:

$$\begin{aligned}\text{Consumo (U\$)} &= 8,67\text{E-}01 \text{ U\$ / t SLCC} \\ &= 2,05\text{E}00 \text{ U\$/ha.a} \\ &= 1,54\text{E-}04 \text{ U\$/l suco}\end{aligned}$$

$$\text{Transformidade} \quad 3,70\text{E+}12 \text{ sej/U\$}$$

Coelho et al., 2003

34 – Infra-estrutura Portuária, Europa, U\$

Consumo por tonelada de SLCC é igual ao convencional, porém, devido à diferença em produtividade agrícola, obtém-se:

$$\begin{aligned}\text{Consumo} &= 3,33 \text{ U\$ / t SLCC} \\ &= 7,89\text{E+}00 \text{ U\$/ha.ano} \\ &= 5,91\text{E-}04 \text{ U\$/l suco}\end{aligned}$$

$$\text{Transformidade} \quad 7,30\text{E+}11 \text{ sej/U\$}$$

Brown e Ulgiati, 2004

35 – Equipamentos Industriais (Aço), Europa, kg

Consumo por litro de suco diluído é igual ao convencional, porém, devido à diferença em produtividade agrícola, obtém-se:

$$\begin{aligned}\text{Consumo (kg)} &= 9,38\text{E-}06 \text{ kg / l suco} \\ &= 1,25\text{E-}01 \text{ kg/ha.ano}\end{aligned}$$

$$\text{Transformidade} \quad 1,13\text{E+}13 \text{ sej/kg}$$

Brown e Ulgiati, 2004

36 – Papel , kg

Consumo por litro de suco diluído é igual ao convencional, porém, devido à diferença em produtividade agrícola, obtém-se:

$$\text{Consumo (kg)} \quad = 2,40\text{E-}02 \text{ kg / l suco}$$

$$= 3,18E+02 \text{ kg/ha.ano}$$

Transformidade 3,90E+11 sej/kg

Cialani, Russi, Ulgiati, 2005

37 – Plástico , kg

Consumo por litro de suco diluído é igual ao convencional, porém, devido à diferença em produtividade agrícola, obtém-se:

$$\begin{aligned} \text{Consumo (kg)} &= 3,0E-03 \text{ kg/ l suco} \\ &= 3,74E+01 \text{ kg/ha.ano} \end{aligned}$$

Transformidade 7,20E+12 sej/kg

LEIA, 2006

38 – Alumínio, kg

Consumo por litro de suco diluído é igual ao convencional, porém, devido à diferença em produtividade agrícola, obtém-se:

$$\begin{aligned} \text{Consumo (kg)} &= 1,50E-03 \text{ kg/ l suco} \\ &= 1,87E01 \text{ kg/ha.ano} \end{aligned}$$

Transformidade 3,42E+12 sej/kg

Odum 19963

39 – Investimentos Industrial, Europa, U\$

Consumo por litro de suco diluído é igual ao convencional, porém, devido à diferença em produtividade agrícola, obtém-se:

$$\begin{aligned} &= 9,37E-03 \text{ U$/l suco} \\ &= 5,56E+01 \text{ U$/ha.ano} \end{aligned}$$

Transformidade 7,30E+11 sej/U\$

Brown e Ulgiati, 2004

40 – Mão-de-Obra Fixa no pomar, J

Funcionários 10

Área 175 ha

Consumo energético 2500 kcal/dia

$$\text{Consumo (J)} = (n^{\circ} \text{ Funcionários}) * (\text{Consumo energético/dia})$$

$$\begin{aligned}
 & \text{*(n}^\circ \text{ dias/ano)/(área)} \\
 & = (\text{___funcionários}) \cdot (2,5\text{E}+03 \text{ kcal/dia}) \cdot \\
 & \quad (365 \text{ dias/ano}) \cdot (4186 \text{ J/kcal}) / (175 \text{ ha}) \\
 & = 2,27\text{E}+08 \text{ J/ha.ano} \\
 & = 1,70\text{E}+04 \text{ J/l suco}
 \end{aligned}$$

Transformidade 2,80E+06 sej/J

Brown, 2003

41 – Mão-de-Obra Temporária (Colheita), J

Funcionários 35

Agrianual, 2007

Safra 180 dias

Área 163 ha

Consumo energético 3000 kcal/dia

$$\begin{aligned}
 \text{Consumo (J)} &= (\text{n}^\circ \text{ Funcionários}) \cdot (\text{Consumo energético/dia}) \cdot \\
 & \quad \text{*(n}^\circ \text{ dias/ano)/(área)} \\
 &= (\text{___funcionários}) \cdot (3,0\text{E}+03 \text{ kcal/dia}) \cdot \\
 & \quad (180 \text{ dias/ano}) \cdot (4186 \text{ J/kcal}) / (175) \\
 &= 4,52\text{E}+08 \text{ J/ha.ano} \\
 &= 3,38\text{E}+04 \text{ J/l suco}
 \end{aligned}$$

Transformidade 2,80E+06 sej/J

Brown, 2003

42 – Despesas Administrativas (Agrícola), U\$

Despesas U\$ 2800,00/ano

Área 175 ha

$$\begin{aligned}
 \text{Despesas (J)} &= (\text{Despesas}) / (\text{área}) \\
 &= (\text{___U\$/ano}) / (175 \text{ ha}) \\
 &= 1,59\text{E}+01 \text{ U\$/ha.ano} \\
 &= 1,19\text{E}-03 \text{ U\$/l suco}
 \end{aligned}$$

Transformidade 3,7E+12 sej/U\$

Coelho et al., 2003

43 – Impostos e Taxas (Agrícola), U\$

Total U\$ 45 000,00 /ano

Área 175 ha

$$\begin{aligned}\text{Despesas (U\$)} &= (\text{Despesas})/(\text{área}) \\ &= (\text{U\$}/\text{ano})/(175 \text{ ha}) \\ &= 2,58\text{E}+02 \text{ U\$}/\text{ha.ano} \\ &= 1,93\text{E}-02 \text{ U\$}/\text{l suco}\end{aligned}$$

Transformidade 3,70E+12 sej/U\$

Coelho et al., 2003

44 – Mão-de-Obra transporte Laranja, J

Consumo por tonelada de laranja é igual ao convencional, porém, devido à diferença em produtividade agrícola, obtém-se:

$$\begin{aligned}\text{Consumo (J)} &= 5,34\text{E}+05 \text{ J/t laranja} \\ &= 1,37\text{E}+07 \text{ J/ha.a} \\ &= 1,02\text{E}+03 \text{ J/l suco}\end{aligned}$$

Transformidade 2,80E+06 sej/J

Brown, 2003

45 – Mão-de-Obra Fixa Industrial, Brasil, J

Consumo por tonelada de SLCC é igual ao convencional, porém, devido à diferença em produtividade agrícola, obtém-se:

$$\begin{aligned}\text{Consumo (J)} &= 2,05\text{E}+05 \text{ J/t SLCC} \\ &= 4,85\text{E}+07 \text{ J/ha.a} \\ &= 3,63\text{E}+03 \text{ J/l suco}\end{aligned}$$

Transformidade 2,80E+06 sej/J

Brown, 2003

46 – Mão-de-Obra Temporária Industrial, Brasil, J

Consumo por tonelada de SLCC é igual ao convencional, porém, devido à diferença em produtividade agrícola, obtém-se:

$$\begin{aligned}\text{Consumo (J)} &= 1,46\text{E}+07 \text{ J/t SLCC} \\ &= 3,39\text{E}+07 \text{ J/ha.a}\end{aligned}$$

$$= 2,54E+03 \text{ J/l suco}$$

Transformidade 2,80E+06 sej/J

Brown, 2003

47 – Impostos e Taxas, Industrial, Brasil, U\$

Consumo por tonelada de SLCC é igual ao convencional, porém, devido à diferença em produtividade agrícola, obtém-se:

$$\begin{aligned} \text{Despesas (U\$)} &= 6,16E+02 \text{ U\$/ha.a} \\ &= 4,62E-02 \text{ U\$/l suco} \end{aligned}$$

Transformidade 3,70E+12 sej/U\$

Coelho et al., 2003

48 – Mão-de-Obra Transporte SLCC, Brasil, J

Consumo por tonelada de SLCC é igual ao convencional, porém, devido à diferença em produtividade agrícola, obtém-se:

$$\begin{aligned} \text{Total} &= 9,83E+05 \text{ J/t SLCC} \\ &= 2,33E+06 \text{ J/ha.a} \\ &= 1,74E+02 \text{ J/l suco} \end{aligned}$$

Transformidade 2,80E+06 sej/J

Brown, 2003

49 – Mão-de-Obra Transporte SLCC, Internacional, J

Consumo por tonelada de SLCC é igual ao convencional, porém, devido à diferença em produtividade agrícola, obtém-se:

$$\begin{aligned} \text{Total} &= 1,78E+06 \text{ J/t SLCC} \\ &= 4,22E+06 \text{ J/ha.a} \\ &= 3,16E+02 \text{ J/l suco} \end{aligned}$$

Transformidade 4,85E+06 sej/J

Brown, 2003

50 – Impostos e Taxas Transporte SLCC, Brasil, U\$

Consumo por tonelada de SLCC é igual ao convencional, porém, devido à diferença em produtividade agrícola, obtém-se:

$$\text{Despesas (U\$)} = 1,44E+01 \text{ U\$/ha.a}$$

Odum, 1996

$$= 1,08\text{E-}03 \text{ U\$/l suco}$$

Transformidade 3,70E+12 sej/U\$

Coelho et al., 2003

51 – Impostos e Taxas Transporte SLCC, Europa, U\$

Consumo por tonelada de SLCC é igual ao convencional, porém, devido à diferença em produtividade agrícola, obtém-se:

$$\begin{aligned} \text{Despesas (U\$)} &= 1,44\text{E}01 \text{ U\$/ha.a} \\ &= 1,08\text{E-}03 \text{ U\$/l suco} \end{aligned}$$

Odum, 1996

Transformidade 7,30E+12 sej/U\$

Brown e Ulgiati, 2004

52 – Mão-de-Obra Industria, Europa, J

Consumo por litro de suco diluído é igual ao convencional, porém, devido à diferença em produtividade agrícola, obtém-se:

$$\begin{aligned} \text{Consumo (J)} &= 1,19\text{E+}03 \text{ J/l suco} \\ &= 1,59\text{E+}07 \text{ J/ha.a} \end{aligned}$$

Transformidade 4,85E+06 sej/J

Brown, 2003

53 – Impostos e Taxas Industria, Europa, U\$

$$\text{Custo (U\$)} = 0,28 \text{ U\$/l suco}$$

$$\text{Despesas (U\$)} = 3,85\text{E+}03 \text{ U\$/ha.a}$$

Transformidade 7,30E+12 sej/U\$

Brown e Ulgiati, 2004

3.2.2 – Resumo da Análise Emergética

Tabela 7: Resumo dos Fluxos emergéticos – Suco de Laranja Orgânico

Fluxos emergéticos		
I = Total da Natureza	$4,07 \times 10^{15}$ seJ/ ha.a	21,46%
R = Renováveis da Natureza	$3,78 \times 10^{15}$ seJ/ ha.a	19,97%
N = Não Renováveis da Natureza	$2,83 \times 10^{14}$ seJ/ ha.a	1,49%
F = Totais da Economia	$1,49 \times 10^{16}$ seJ/ ha.a	78,54%
M = Materiais	$6,44 \times 10^{15}$ seJ/ ha.a	34,01%
S = Serviços	$8,44 \times 10^{15}$ seJ/ ha.a	44,53%
Y = Totais = (I+F)	$1,85 \times 10^{16}$ seJ/ ha.a	100,00%

Tabela 8: Índices emergéticos – Suco de Laranja Orgânico

Índices emergéticos		
Índice - Tradicionais	valor	unidade
$Tr = Y/O =$	$7,06 \times 10^5$	seJ/J
$Tr = Y/O =$	$1,42 \times 10^{12}$	seJ/l
$\%R = 100(R)/Y =$	20,0%	
$EYR = Y/F =$	1,27	
$EIR = F/I =$	3,66	
$ELR = (F+N)/R =$	4,01	
$SI = EYR/ELR =$	0,32	
$EER = Y/[(\$)(seJ/\$)] =$	1,01	
Índice - Modificados	Valor	
$\%R = 100(R+Mr+Sr)/Y =$	28,7%	
$ELR = (N+Mn+Sn)/(R+Mr+Sr) =$	2,48	
$SI = EYR/ELR =$	0,58	

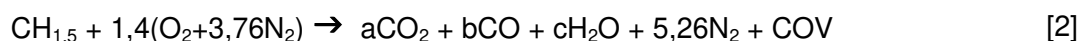
3 EMISSÕES ASSOCIADAS AO SISTEMA

3.1 Emissões por queima direta de Combustível Fóssil

Os cálculos de emissões de gases devido à queima direta de combustíveis foram baseados na equação de combustão completa de hidrocarboneto.



E na equação de combustão considerando os outros compostos formados durante este processo:



Os valores de “b”, “c” e COV foram determinados utilizando-se os dados do “CORINAIR Emission Inventory Guidebook” (Manual de Inventário de emissões CORINAR) (CORINAR, 2002), conforme apresentado na tabela abaixo:

Tabela 9: Resumo das emissões de poluentes

Poluentes		Emissões	
CO	9,33x10 ⁻³ kg CO/kg comb.	3,33x10 ⁻⁴	kmol/kg comb.
NO _x (as NO _{1,5})	2,52x10 ⁻² kg NO _x /kg comb.	6,64x10 ⁻⁴	kmol/kg comb.
SO ₂	--- kg SO ₂ /kg comb.	----	kmol/kg comb.
VOC (as CH _{1,5})	5,33x10 ⁻³ kg COC/kg comb.	3,95x10 ⁻⁴	kmol/kg comb.
Particulados	1,83x10 ⁻³ kg part/kg comb.		

Os valores de “a” foram determinados pela relação estequiométrica da equação 2. Para este cálculo conteúdo de hidrocarbonetos do combustível foi considerada igual à diferença entre o peso do combustível o peso das emissões de partículas, 0,998 kg CH_{1,5}/kg de combustível.

Assim, o estudo considerou em 3,22 kg CO₂/kg combustível as emissões por queima de diesel. As emissões de CO₂ devido à queima direta de combustível fóssil foram calculadas em:

Tabela 10: Emissões diretas de CO₂ por etapa da Cadeia.

Etapa	Consumo direto		Emissões diretas	
	Combustível Fóssil		(kg CO ₂ /l suco)	
	(l/ l suco)			
	Convencional	Orgânico	Convencional	Orgânico
Agrícola	0,029	0,021	0,078	0,057
Transporte laranja	0,0001	0,0001	0,0003	0,0003
Industrial	0,055	0,055	0,148	0,148
Transporte SLCC	0,004	0,004	0,011	0,011
Total	0,088	0,080	0,237	0,216

3.2 Emissões por queima indireta de Combustível Fóssil

3.2.5 Suco de Laranja Convencional

Tabela 11: Emissões indiretas por etapa da cadeia - Convencional

Fluxos	Unid	Fluxo por litro de suco	Óleo eq. * (kg óleo/unid)	Óleo eq. por litro de suco (kg óleo eq.)	Demanda Energética (J)	Emissão de CO ₂ (kg CO ₂)
Fazenda				6,48x10⁻²	2,71x10⁶	2,09x10⁻¹
Corretivos	kg	5,91x10 ⁻²	0,15	8,90x10 ⁻³	3,73x10 ⁵	2,87x10 ⁻²
Nitrogênio	kg	6,53x10 ⁻³	0,32	2,09x10 ⁻⁴	8,75x10 ⁴	6,73x10 ⁻³
Fósforo	kg	8,19x10 ⁻⁴	0,22	1,80x10 ⁻⁴	7,53x10 ³	5,80x10 ⁻⁴
Potássio	kg	6,13x10 ⁻⁴	1,43	8,77x10 ⁻⁴	3,67x10 ⁵	2,82x10 ⁻³
Herbicidas	kg	4,55x10 ⁻⁴	1,43	6,51x10 ⁻⁴	2,72x10 ⁵	2,10x10 ⁻³
Diesel Agrícola	kg	3,62x10 ⁻²	1,23	4,45x10 ⁻²	1,86x10 ⁶	1,43x10 ⁻¹
Aço Agrícola	kg	4,19x10 ⁻⁴	1,91	8,01x10 ⁻⁴	3,35x10 ⁴	2,58x10 ⁻³
Energia Elétrica	J	9,51x10 ⁴	7,17x10 ⁻⁸	6,81x10 ⁻³	2,85x10 ⁵	2,19x10 ⁻²
Transporte Laranja				9,21x10⁻³	3,85x10⁵	2,92x10⁻²
Caminhão	kg	3,94x10 ⁻⁴	1,91	7,53x10 ⁻⁴	3,15x10 ⁴	2,42x10 ⁻³
Pneu	kg	1,76x10 ⁻⁴	2,04	3,59x10 ⁻⁴	1,50x10 ⁴	1,16x10 ⁻³
Diesel	kg	6,58x10 ⁻³	1,23	8,09x10 ⁻³	3,39x10 ⁵	2,61x10 ⁻²
Indústria Brasil				6,94x10⁻²	2,91x10⁶	2,24x10⁻¹
Equip. - Aço	kg	8,75x10 ⁻⁵	1,91	1,67x10 ⁻⁴	7,00x10 ³	5,38x10 ⁻⁴
Equip. - Ferro	kg	7,53x10 ⁻⁶	0,86	6,45x10 ⁻⁶	2,70x10 ²	2,08x10 ⁻⁵
Diesel	kg	4,61x10 ⁻²	1,23	5,67x10 ⁻²	2,37x10 ⁶	1,83x10 ⁻¹
Energia Elétrica	J	1,75x10 ⁵	7,17x10 ⁻⁸	1,25x10 ⁻²	5,24x10 ⁵	4,03x10 ⁻²
Transporte de SLCC				4,76x10⁻³	1,99x10⁵	1,53x10⁻²
Equip. - Aço	kg	2,75x10 ⁻⁴	1,91	5,25x10 ⁻⁴	2,20x10 ⁴	1,69x10 ⁻³
Pneus	kg	9,86x10 ⁻⁴	2,04	2,01x10 ⁻⁴	8,43x10 ³	6,49x10 ⁻⁴
Diesel	kg	3,28x10 ⁻³	1,23	4,03x10 ⁻³	1,69x10 ⁵	1,30x10 ⁻²
Energia Elétrica	J	6,79x10 ⁻²	7,17x10 ⁻⁸	4,87x10 ⁻⁹	2,04x10 ⁻¹	1,57x10 ⁻⁸
Indústria Europa				4,02x10⁻²	1,68x10⁶	1,30x10⁻²
Equip. - Aço	kg	9,38x10 ⁻⁶	1,91	1,79x10 ⁻⁵	7,50x10 ²	5,77x10 ⁻⁵
Papel	Kg	2,40x10 ⁻²	0,95	2,27x10 ⁻²	9,52x10 ⁵	7,33x10 ⁻²
Plástico	Kg	3,00x10 ⁻³	2,66	7,97x10 ⁻³	3,33x10 ⁵	2,57x10 ⁻²
Alumínio	Kg	1,50x10 ⁻³	6,33	9,50x10 ⁻³	3,98x10 ⁵	3,06x10 ⁻²
TOTAL				1,88x10⁻¹	7,89x10⁶	6,07x10⁻¹

* - Referência - Boustead and Hancock, 1979.

3.2.6 Suco de Laranja Orgânico

Tabela 12: Emissões indiretas por etapa da cadeia - Orgânico

Fluxos	Unid	Fluxo por litro de suco	Óleo eq. * (kg óleo/unid)	Óleo eq. por litro de suco (kg óleo eq.)	Demanda Energética (J)	Emissão de CO ₂ (kg CO ₂)
Fazenda				4,33x10⁻²	1,81x10⁶	1,39x10⁻¹
Cal	kg	7,28x10 ⁻⁴	0,15	1,09x10 ⁻⁴	4,57x10 ³	3,53x10 ⁻⁴
Sulfato de Cobre	kg	9,28x10 ⁻¹³	0,50	4,64x10 ⁻¹³	1,94x10 ⁻⁵	1,50x10 ⁻¹²
Diesel Agrícola	kg	2,57x10 ⁻²	1,23	3,16x10 ⁻²	1,32x10 ⁶	1,02x10 ⁻¹
Aço Agrícola	kg	4,92x10 ⁻⁴	1,91	9,40x10 ⁻⁴	3,93x10 ⁴	3,03x10 ⁻³
Energia Elétrica	J	1,49x10 ⁵	7,17x10 ⁻⁸	1,07x10 ⁻²	4,47x10 ⁵	3,44x10 ⁻²
Transporte Laranja				9,21x10⁻³	3,85x10⁵	2,92x10⁻²
Caminhão	kg	3,94x10 ⁻⁴	1,91	7,53x10 ⁻⁴	3,15x10 ⁴	2,42x10 ⁻³
Pneu	kg	1,76x10 ⁻⁴	2,04	3,59x10 ⁻⁴	1,50x10 ⁴	1,16x10 ⁻³
Diesel	kg	6,58x10 ⁻³	1,23	8,09x10 ⁻³	3,39x10 ⁵	2,61x10 ⁻²
Indústria Brasil				6,94x10⁻²	2,91x10⁶	2,24x10⁻¹
Equip. - Aço	kg	8,75x10 ⁻⁵	1,91	1,67x10 ⁻⁴	7,00x10 ³	5,38x10 ⁻⁴
Equip. - Ferro	kg	7,53x10 ⁻⁶	0,86	6,45x10 ⁻⁶	2,70x10 ²	2,08x10 ⁻⁵
Diesel	kg	4,61x10 ⁻²	1,23	5,67x10 ⁻²	2,37x10 ⁶	1,83x10 ⁻¹
Energia Elétrica	J	1,75x10 ⁵	7,17x10 ⁻⁸	1,25x10 ⁻²	5,24x10 ⁵	4,03x10 ⁻²
Transporte de SLCC				4,76x10⁻³	1,99x10⁵	1,53x10⁻²
Equip. - Aço	kg	2,75x10 ⁻⁴	1,91	5,25x10 ⁻⁴	2,20x10 ⁴	1,69x10 ⁻³
Pneus	kg	9,86x10 ⁻⁴	2,04	2,01x10 ⁻⁴	8,43x10 ³	6,49x10 ⁻⁴
Diesel	kg	3,28x10 ⁻³	1,23	4,03x10 ⁻³	1,69x10 ⁵	1,30x10 ⁻²
Energia Elétrica	J	6,79x10 ⁻²	7,17x10 ⁻⁸	4,87x10 ⁻⁹	2,04x10 ⁻¹	1,57x10 ⁻⁸
Indústria Europa				4,02x10⁻²	1,68x10⁶	1,30x10⁻²
Equip. - Aço	kg	9,38x10 ⁻⁶	1,91	1,79x10 ⁻⁵	7,50x10 ²	5,77x10 ⁻⁵
Papel	Kg	2,40x10 ⁻²	0,95	2,27x10 ⁻²	9,52x10 ⁵	7,33x10 ⁻²
Plástico	Kg	3,00x10 ⁻³	2,66	7,97x10 ⁻³	3,33x10 ⁵	2,57x10 ⁻²
Alumínio	Kg	1,50x10 ⁻³	6,33	9,50x10 ⁻³	3,98x10 ⁵	3,06x10 ⁻²
TOTAL				9,14x10⁻²	6,93x10⁶	5,33x10⁻¹

* - Referência - Boustead and Hancock, 1979.

3.3 Emissões por oxidação do solo erodido

3.3.1 Laranja convencional

Assumindo que :

Perda de solo	11200 kg solo/ha.ano	ECOAGRI, 2007
Quantidade de matéria orgânica solo	0,04 kg m.o./kg solo	
Umidade da matéria orgânica	0,7 %	
Oxidação de M O produz	3 g CO ₂ /g de material orgânico	Ulgiati, 2001
Emissão de CO ₂ = (Perda de solo)*(MO)*(1-Umidade) * (emissão MO)		
0,403 t de CO ₂ /ha.a		
403 kg CO ₂ /ha.a		

3.3.2 Laranja Orgânico

Assumindo que :

Perda de solo	10500 kg solo/ha.ano	Bertoni et al., 1972
Quantidade de matéria orgânica solo	0,04 kg m.o./kg solo	
Umidade da matéria orgânica	0,7 %	
Oxidação de M O produz	3 g CO ₂ /g de material orgânico	Ulgiati, 2001
Emissão de CO ₂ = (Perda de solo)*(MO)*(1-Umidade) * (emissão MO)		
0,378 t de CO ₂ /ha.a		
378 kg CO ₂ /ha.a		

APÊNDICE 2- Avaliação da Cadeia Produtiva do Alcool

2. DADOS GERAIS

2.1. Dados da Propriedade Agrícola

Os dados utilizados foram coletados na visita à campo, em entrevistas e obtidos em literatura.

Resumo dos dados utilizados:

- Localizada em município da região produtora de Cana no estado de São Paulo
- Produção: 80 t/ ha.a.
- Área total do canavial: 21300 hectares; área para a produção de 1 tonelada de cana: 0,0125 ha.
- Manejo Convencional
- Número de Funcionário para área total: 315 fixos e 975 temporários
- Safra: 210 dias de colheita
- Utiliza fertirrigação
- Fertilização feita com os resíduos da usina (vinhaça, torta de filtro, cinzas, etc.). A utilização de fertilizantes químicos é no primeiro ano, para formação de canavial e complementando os subprodutos da usina.
- Transporte dos trabalhadores feito em ônibus com 50 lugares e a uma distância média de 20 km.

1.2 Dados de Transporte da cana

- Cana transportada a granel em caminhões com capacidade de 60 toneladas.
- Distância média da fazenda até a fábrica de 35 km
- Vinhaça e torta de filtro transportada da usina até a área agrícola, distância de 35 km, por caminhões com capacidade de 30 m³ e 8 toneladas, respectivamente.

1.3 Dados da etapa industrial

Uma usina autônoma, produzindo somente álcool, foi considerada nos cálculos e os dados utilizados foram obtidos em visita à unidade fabril, entrevista com técnicos e em dados de literatura.

Esmagamento diário– 8100 TC/ dia

Produção: 100% álcool

- Álcool - 82 l / t cana
- Sub-produtos:
 - o Bagaço – 270 kg / t cana esmagada
 - o Torta de filtro - 35 kg/ TC
 - o Vinhaça - 10 l / l de álcool
 - o Outros subprodutos (lodo, cinzas, palha, etc.) - 190 kg/ TC
 - o Águas residuárias – 1,5 m³/TC

Equipamentos:

Tabela 1: Lista de equipamentos presentes na fábrica

Equipamento	Peso (kg)
Guindaste de descarregamento	4.000
Conjunto de Lavador, picador e desfibrador	45.000
Moendas e peneiras	240.000
Trocadores de calor	4.000
Centrífugas	18.000
Conjunto de Destilação	
Colunas	160.000
Estrutura e dornas (8)	320.000
Esteiras	250.000
Caldeiras	300.000
Turbogeradores	60.000

Insumos:

Tabela 2: Lista de insumos utilizados na Usina Alcooleira

Insumo	Dado Bruto	kg/TC esmagada
bactericida (moenda)	$4,35 \times 10^3$ kg/TC	$4,35 \times 10^{-3}$
Soda Cáustica	$2,16 \times 10^3$ kg/TC	$2,16 \times 10^3$
Ácido Sulfúrico (fermentação)	$3,29 \times 10^3$ kg/L álcool	$1,31 \times 10^{-1}$
Cal	$8,00 \times 10^{-1}$ kg/ TC	$8,00 \times 10^{-1}$
Carbonato de sódio (ETA)	$8,84 \times 10^{-4}$ kg/ TC	$8,84 \times 10^{-4}$
Hipoclorito de sódio (ETA)	$1,18 \times 10^{-4}$ kg/ TC	$1,18 \times 10^{-4}$
Sulfato de alumínio (ETA)	$2,25 \times 10^3$ kg/ TC	$2,25 \times 10^3$
Polímero	$8,00 \times 10^{-5}$ kg/l álcool	$3,20 \times 10^3$
Fermento	$1,00 \times 10^{-4}$ kg/l álcool	$4,00 \times 10^3$
Antibiótico (fermentação)	$5,46 \times 10^{-6}$ kg/l álcool	$2,18 \times 10^{-4}$
Antiespumante (fermentação)	$2,90 \times 10^{-4}$ kg/l álcool	$1,16 \times 10^{-2}$
Dispersante quaternário (fermentação)	$8,46 \times 10^{-5}$ kg/l álcool	$3,38 \times 10^3$
Anti-incrustante (destilaria)	$3,38 \times 10^{-4}$ kg/l álcool	$1,35 \times 10^{-2}$
Ciclo-hexano	$2,31 \times 10^{-4}$ kg/l álcool	$1,90 \times 10^{-2}$
Bactericida (torre)	$9,55 \times 10^{-6}$ kg/l álcool	$1,53 \times 10^{-4}$
Dispersante (torre)	$3,90 \times 10^{-5}$ kg/l álcool	$6,24 \times 10^{-4}$
Hipoclorito (torre)	$2,79 \times 10^3$ kg/l álcool	$2,79 \times 10^3$

1.4 Dados de Distribuição

1.4.1 Transporte até base primária da distribuidora

- Tipo de transporte: terrestre
- Distância: 150 km
- Caminhão tanque com capacidade de 35.000 l

1.4.2 Dados de Transporte até Posto de gasolina

Nesta etapa foram consideradas duas possibilidades:

1.4.2.1 - Distribuição no Estado de São Paulo – somente etapa de transporte até posto de gasolina, quando foram utilizados os seguintes parâmetros:

- Tipo de transporte: terrestre
- Distância média: 100 km
- Caminhão tanque com capacidade de 26.000 l

1.4.2.2 - Distribuição no Estado de Mato Grosso – formado por duas etapas

Transporte até base Secundária

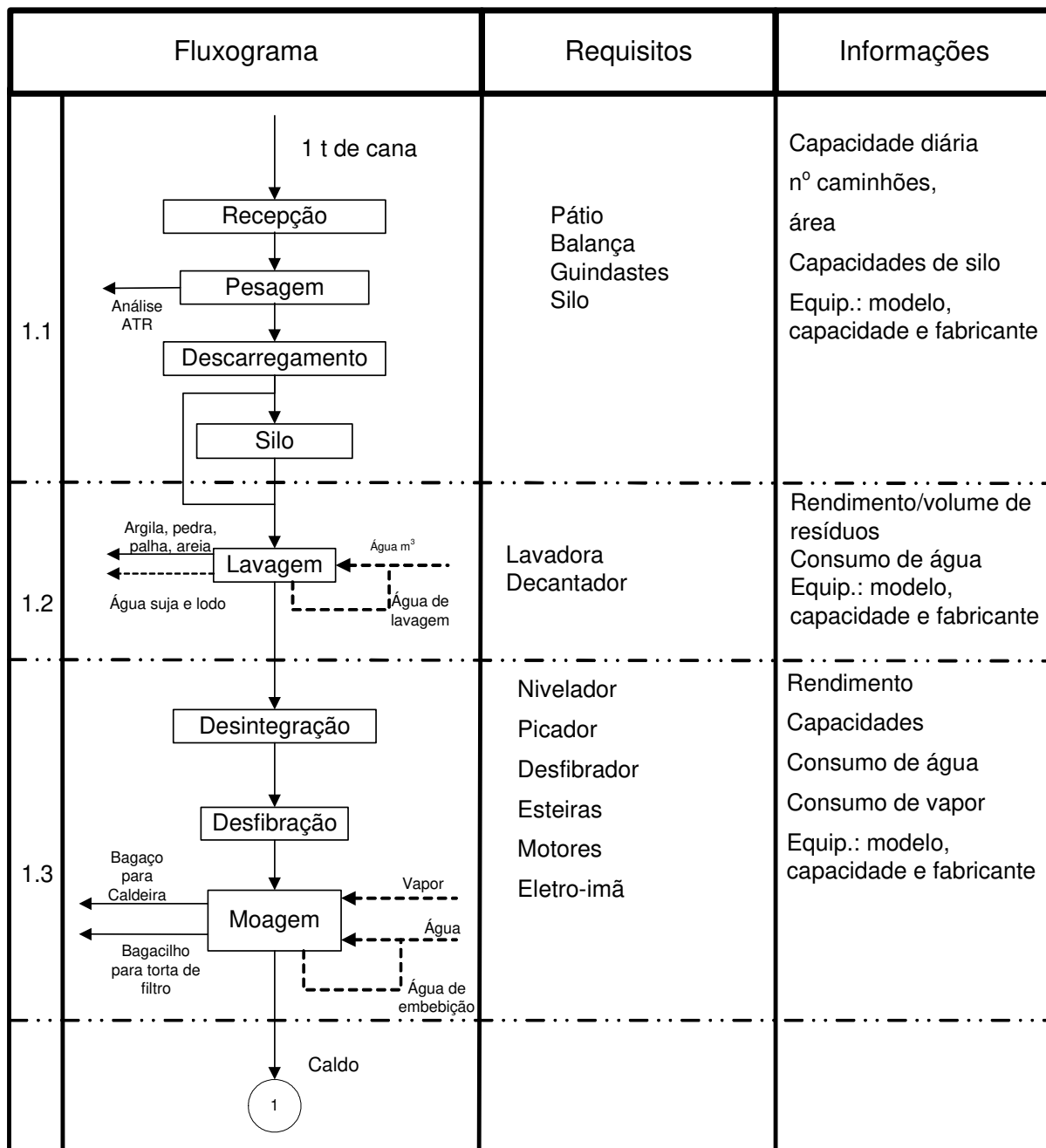
- Tipo de transporte: terrestre
- Distância: 15000 km
- Caminhão tanque com capacidade de 60.000 l

Transporte até posto de gasolina

- Tipo de transporte: terrestre
- Distância média: 100 km
- Caminhão tanque com capacidade de 26.000 l

3. FLUXOGRAMA DA USINA

1 - Extração do Caldo



2 – Fabricação de Álcool

	Fluxograma	Requisitos	Informações
2.1	<pre> graph TD 1((1)) -- Caldo --> Filtragem[Filtragem] Filtragem --> Torta[Torta de Filtro] </pre>	Decanter Flotador Filtro Tubulações e bombas	Capacidades Equip.: modelo, capacidade e fabricante
2.2	<pre> graph TD Filtragem --> Preparo[Preparo do mosto] Mel -.-> Preparo Preparo --> PrepFer[Preparação Fermento] Insumos -.-> PrepFer Fermento -.-> PrepFer PrepFer -- Levedo --> Fermentacao[Fermentação] AguaQuente[Água Quente] -.-> Fermentacao Agua -.-> Fermentacao Fermentacao -- Vinho Bruto --> Centrifugacao[Centrifugação] </pre>	Trocador de calor Tanques e dornas Tubulações e bombas	Consumo de água e de insumos Capacidades Equip.: modelo, capacidade e fabricante
2.3	<pre> graph TD VinhoBruto[Vinho Bruto] --> Centrifugacao[Centrifugação] Centrifugacao -- Levedo --> PrepFer Centrifugacao -- Vinho Delevarado --> Evaporacao[Evaporação] Vinhaça -.-> Evaporacao Evaporacao -- Vinhaça --> Vinhaça Evaporacao --> Alcool[ÁLCOOL] </pre>	Centrífuga Evaporadores Tubulações e bombas	Consumo de água e de insumos Rendimentos Capacidades Equip.: modelo, capacidade e fabricante

4. AVALIAÇÃO EMERGÉTICA

4.1. - Distribuição no Estado de São Paulo

Tabela 3: Análise Emergética do etanol distribuído no Estado de São Paulo

Fluxos	% R.	Dado	Unida de	Transf. (sej/unit)	Energia Solar (seJ/ha.a)		
					Porção Ren	Porção Não Ren	Total
RENOVÁVEIS					2.23x10 ¹⁵	0,00	2,23x10 ¹⁵
Fazenda					2.12x10 ¹⁵	0,00	2,12x10 ¹⁵
1 Sol	100	5,22x10 ¹³	J/ha.a	1	5.22x10 ¹³	0,00	5,22x10 ¹³
2 Chuva	100	6,77x10 ¹⁰	J/ha.a	3,06x10 ⁴	2.07x10 ¹⁵	0,00	2,07x10 ¹⁵
3 Água (fertilirrigação)	100	2,50x10 ⁶	J/ha.a	1,85x10 ⁵	4.63x10 ¹¹	0,00	4,63x10 ¹¹
Usina					1.11x10 ¹⁴	0,00	1,11x10 ¹⁴
4 Água (rio)	100	6,00x10 ⁸	J/ha.a	1,85x10 ⁵	1.11x10 ¹⁴	0,00	1,11x10 ¹⁴
NÃO RENOVÁVEIS					0.00	4,00x10 ¹⁴	4,00x10 ¹⁴
Fazenda					0.00	4,00x10 ¹⁴	4,00x10 ¹⁴
5 Perda de solo	0	3,23x10 ⁹	J/ha.a	1,24x10 ⁵	0.00	4,00x10 ¹⁴	4,00x10 ¹⁴
MATERIAIS					7.46x10 ¹³	2,70x10 ¹⁵	2,78x10 ¹⁵
Fazenda					7.46x10 ¹³	1,96x10 ¹⁵	2,03x10 ¹⁵
6 Mudas	40	2,80x10 ³	kg/ha.a	7,50x10 ¹⁰	7.46x10 ¹³	1,35x10 ¹⁴	2,10 x10 ¹⁴
7 Corretivos	0	2,44x10 ⁸	J/ha.a	7,72x10 ⁶	0.00	6,65x10 ¹⁴	6,65x10 ¹⁴
8 Nitrogênio	0	1,58x10 ⁴	g/ha.a	6,38x10 ⁹	0.00	1,01x10 ¹⁴	1,01x10 ¹⁴
9 Fósforo	0	9,87x10 ¹	kg/ha.a	6,55x10 ¹²	0.00	6,46x10 ¹⁴	6,46x10 ¹⁴
10 Potássio	0	2,16x10 ¹	kg/ha.a	2,92x10 ¹²	0.00	6,31x10 ¹³	6,31x10 ¹³
11 Herbicidas	0	4,45x10 ¹	kg/ha.a	2,48x10 ¹⁰	0.00	1,10x10 ¹²	1,10x10 ¹²
12 Diesel	0	5,28x10 ⁹	J/ha.a	5,50x10 ⁴	0.00	2,90x10 ¹⁴	2,90x10 ¹⁴
13 Implementos (Aço)	0	4,33x10 ⁰	g/ha.a	1,13x10 ¹⁰	0.00	4,89x10 ¹³	4,89x10 ¹³
14 Pneus	0	1,18x10 ⁰	kg/ha.a	4,30x10 ¹²	0.00	5,06x10 ¹²	5,06x10 ¹²
Transporte cana					0.00	1,49x10 ¹⁴	1,49x10 ¹⁴
15 Caminhão	0,	5,17x10 ⁰	kg/ha.a	1,13x10 ¹³	0.00	5,84x10 ¹³	5,84x10 ¹³

16	Pneus	0	1,97x10 ⁰	kg/ha.a	4,30x10 ¹²	0.00	8,46x10 ¹²	8,46x10 ¹²
17	Diesel	0	1,49x10 ⁹	J/ha.a	5,50x10 ⁴	0.00	8,20x10 ¹³	8,20x10 ¹³
Usina						0.00	4,69x10¹⁴	4,69x10¹⁴
18	Equipamentos	0	4,05x10 ⁰	kg/ha.a	1,13x10 ¹³	0.00	4,58x10 ¹³	4,58x10 ¹³
19	Insumos Industriais	0	9,32x10 ¹	g/ha.a	3,80x10 ¹²	0.00	3,54x10 ¹⁴	3,54x10 ¹⁴
20	Infra-estrutura	0	1,85x10 ¹	U\$/ha.a	3,70x10 ¹²	0.00	6,86x10 ¹³	6,86x10 ¹¹³
Transporte do Álcool						0.00	1,30x10¹⁴	1,30x10¹⁴
21	Caminhão	0	2,41x10 ⁰	kg/ha.a	1,13x10 ¹³	0.00	2,72x10 ¹³	2,72x10 ¹³
22	Pneus	0	7,94x10 ¹	kg/ha.a	4,30x10 ¹²	0.00	3,41x10 ¹²	3,41x10 ¹²
23	Diesel	0	1,80x10 ⁹	J/ha.a	5,50x10 ⁴	0.00	9,93x10 ¹³	9,93x10 ¹³
SERVIÇOS						2.54x10¹⁴	1,80x10¹⁵	2,05x10¹⁵
Fazenda						2.22x10¹⁴	1,23x10¹⁵	1,45x10¹⁵
24	Mão de obra - Fixa	38	5,66x10 ⁷	J/ha.a	2,80x10 ⁶	6.02x10 ¹³	9,82x10 ¹³	1,58x10 ¹⁴
25	MO Temporária	38	1,52x10 ⁸	J/ha.a	2,80x10 ⁶	1.61x10 ¹⁴	2,63x10 ¹⁴	2,25x10 ¹⁴
26	Desp. Administrativas	0	1,95x10 ²	U\$	3,70x10 ¹²	0.00	7,23x10 ¹⁴	7,23x10 ¹⁴
27	Impostos e Taxas	0	3,85x10 ¹	U\$	3,70x10 ¹²	0.00	1,42x10 ¹⁴	1,42x10 ¹⁴
Transporte Cana						4.95x10¹²	8,07x10¹²	1,30x10¹³
28	Mão de Obra	38	4,65x10 ⁶	J/ha.a	2,80x10 ⁶	4.95x10 ¹²	8,07x10 ¹²	1,30x10 ¹³
Usina						2.25x10¹³	4,56x10¹⁴	4,79x10¹⁴
29	Mão de obra Fixa	38	1,37x10 ⁷	J/ha.a	2,80x10 ⁶	1.45x10 ¹³	2,37x10 ¹³	3,83x10 ¹³
30	Mão de Obra Temp.	38	7,45x10 ⁶	J/ha.a	2,80x10 ⁶	7.93x10 ¹²	1,29x10 ¹³	2,09x10 ¹³
31	Impostos e Taxas	0	1,13x10 ²	U\$	3,70x10 ¹²	0.00	4,19x10 ¹⁴	4,19x10 ¹⁴
Transporte álcool						4.90x10¹²	1,05x10¹⁴	1,09x10¹⁴
32	Mão de Obra	38	4,60x10 ⁶	J/ha.a	2,80x10 ⁶	4.90x10 ¹²	7,99x10 ¹²	1,29x10 ¹³
33	Taxas	0	2,61x10 ¹	U\$	3,70x10 ¹²	0.00	9,66x10 ¹³	9,66x10 ¹³
TOTAL						2.56x10¹⁵	4,90x10¹⁵	7,46x10¹⁵
Produção								
Álcool		6560	Litro		1,48x10 ¹¹	J		

3.1.1 Memorial de Cálculo – SP

1 – Sol, J

	REFERÊNCIA
Insolação 1727 kWh/m ² .ano	NASA, 2006
Albedo = 16 %	NASA, 2006
Energia (J) = (insolação média)*(1-albedo) = (kWh/m ² .ano)*(3.6E6J/kWh)*(1E04 m ² /ha)*(1-albedo) = 5,22E+13 J/ha ano = 7,96E+09 J/l álcool	Odum, 1996
Transformidade 1 sej/J	Definição

2 – Potencial Químico da Chuva, J

Precipitação anual 1660 mm	INMET, 2005
Evapotranspiração 82%	EMBRAPA, 2006
Energia (J) = (precipitação)*(evapotranspiração)* (energia da chuva)*(densidade) = (___mm)*(evapotranspiração)*(1E-3 m ³ /mm)* (5000 J/kg)*(1E04 m ² /ha)* (1E3 kg/m ³) = 6,77E+10 J/ha ano = 1,03E+07 J/l álcool	Odum, 1996
Transformidade 3,06E+10 sej/J	Brown e Ulgiati, 2004

3 – Água (Fertirrigação), J

Consumo 500 l /ha.ano	
Energia (J) = (Consumo)*(energia da água)*(densidade) = (___m ³)*(5000 J/kg)*(1E3 kg/m ³) = 2,50E+06J/ha ano = 3,81E+02 J/l álcool	Odum, 1996
Transformidade 1,85E+05 sej/J	LEIA, 2006

4 – Água (Uso Industrial),

Consumo	1,5 m ³ /TC	
Energia (J)	$= (\text{Consumo}) * (\text{energia da água}) * (\text{densidade})$ $= (\text{___ m}^3) * (5000 \text{ J/kg}) * (1\text{E}3 \text{ kg/m}^3)$ $= 7,50\text{E}+06\text{J/TC}$ $= 3,60\text{E}+08 \text{ J/ha.ano}$ $= 9,14\text{E}+04 \text{ J/l álcool}$	Odum, 1996
Transformidade	1,85E+05 sej/J	Lanzotti, 2000

5 – Perda de Solo, J

Perda de solo	11,9 t/ha.ano	ECOAGRI, 2007
Matéria Orgânica	4%	
Energia (J)	$= (\text{perda de solo}) * (\% \text{ mat. Org.}) * (\text{Energia da Mat.org.})$ $= (\text{___ t /ha.ano}) * (10\text{E}3 \text{ kg/t}) * (\text{___ \%MO}) * (5400 \text{ kcal/kgMO}) * (4186 \text{ J/kcal})$ $= 3,23\text{E}+09 \text{ J/ha ano}$ $= 4,92\text{E}+05 \text{ J/l álcool}$	Odum, 1996
Transformidade	1,24E+05sej/J	Brown e Ulgiati, 2004

6 – Mudas, kg

Consumo	14 t /ha.ano	
Reforma do Canavial	20%	
Consumo (kg)	$= (\text{Consumo}) * (\% \text{ reforma.})$ $= (\text{___ t /ha.ano}) * (\text{___ \%Reforma}) * (1\text{E}3\text{kg/t})$ $= 2,8\text{E}+03 \text{ kg/ha ano}$ $= 4,27\text{E}-01 \text{ kg/l álcool}$	Odum, 1996
Transformidade	7,50E+10 sej/kg	Calculado

7 – Corretivos, J

Consumo	400 kg /ha no plantio	
Reforma do Canavial	20%	
Consumo (kg)	$= (\text{Consumo}) * (\% \text{ reforma.}) * (\text{energia Corretivo})$ $= (__\text{kg/ha.ano}) * (__\% \text{Reforma}) * (1\text{E}3 \text{ g/kg})$ $* (611 \text{ J/g})$ $= 2,44\text{E}+08 \text{ J/ha ano}$ $= 3,73\text{E}+04 \text{ J/l álcool}$	Odum, 1996
Transformidade	$2,72\text{E}+06 \text{ sej/J}$	Brown e Ulgiati, 2004

8 – Nitrogênio, g

Consumo	16 kg /ha (complementando a fertilização feita com sub-produtos da Usina)	
Consumo (kg)	$= (\text{Consumo})$ $= (__\text{kg/ha.ano}) * (1\text{E}3 \text{ g/kg}) *$ $= 1,60\text{E}+04 \text{ g/ha ano}$ $= 2,41\text{E}00 \text{ g/l álcool}$	Odum, 1996
Transformidade	$6,38\text{E}+09 \text{ sej/g}$	Brown e Ulgiati, 2004

9 – Fósforo, kg

Consumo	98 kg /ha (complementando a fertilização feita com sub-produtos da Usina)	
Consumo (kg)	$= (\text{Consumo})$ $= (__\text{kg/ha.ano})$ $= 98 \text{ kg/ha ano}$ $= 1,50\text{E}-02 \text{ kg/l álcool}$	Odum, 1996
Transformidade	$6,55\text{E}+12 \text{ sej/kg}$	Brown e Ulgiati, 2004

10 – Potássio, kg

Consumo	21 kg /ha (complementando a fertilização feita com sub-produtos da Usina)	
Consumo (kg)	$= (\text{Consumo})$ $= (__\text{kg/ha.ano})$	Odum, 1996

$= 21 \text{ kg/ha ano}$
 $= 3,30\text{E-}03 \text{ kg/l álcool}$
 Transformidade $2,92\text{E+}12 \text{ sej/kg}$ Brandt-Williams, 2002

11 – Herbicidas, kg

Consumo 45 kg /ha.ano
 Consumo (kg) $= (\text{Consumo})$
 $= (\text{___ kg/ha.ano})$
 $= 45 \text{ kg/ha ano}$ Odum, 1996
 $= 6,79\text{E-}03 \text{ kg/l álcool}$
 Transformidade $2,482\text{E+}10 \text{ sej/kg}$ Brown e Ulgiati, 2004

12 – Diesel (Agrícola), J

Consumo $150 \text{ l diesel /ha.ano}$
 Consumo (litros) $= (\text{consumo}) * (\text{densidade}) * (\text{energia do diesel})$
 $= (\text{___ l/ha.ano}) * (8.40\text{E-}01 \text{ kg/l}) * (1\text{E+}04 \text{ kcal/kg})$
 $* (4186 \text{ J/kcal})$ Odum, 1996
 $= 5,28\text{E+}09 \text{ J/ha ano}$
 $= 8,04\text{E+}05 \text{ J/l álcool}$
 Transformidade $5,50\text{E+}04 \text{ sej/L}$ Bastianoni et al., 2006

13 – Implementos e Equipamentos (Agrícola), kg

Peso $4,33 \text{ kg /ha.ano}$ (inclui implementos, tratores e transporte de insumos e de trabalhadores)
 Consumo (kg) $= 4,33 \text{ kg/ha ano}$
 $= 6,60\text{E-}04 \text{ kg/l álcool}$
 Transformidade $1,13\text{E+}13 \text{ sej/kg}$ Brown e Ulgiati, 2004

14 – Pneus (Agrícola), kg

Peso $1,18 \text{ kg /ha.ano}$ (inclui implementos, tratores e transporte de insumos e de trabalhadores)
 Consumo (kg) $= 1,18 \text{ kg/ha ano}$
 $= 6,60\text{E-}04 \text{ kg/l álcool}$

Transformidade 1,79E+13 sej/kg

LEIA, 2006

15 – Caminhão para Transporte da Cana (aço), kg

Peso 6,46E-02 kg /TC

Consumo (kg) = 5,17E00 J/ha.a

= 7,88E-04 kg/l álcool

Transformidade 1,13E+13 sej/kg

Brown e Ulgiati, 2004

16 – Pneus (Transporte da Cana), kg

Peso 2,46E-02 kg /TC

Consumo (kg) = 1,97E00 J/ha.a

= 3,00E-04 kg/l álcool

Transformidade 1,79E+13 sej/kg

LEIA, 2006

17 – Diesel (Transporte da Cana), J

Consumo 0,53 l diesel /TC

Consumo (kg) = (consumo)* (densidade)*(energia do diesel)

= (___l/TC)*(8,40E-01kg/l)*(1E+04kcal/kg)

*(4186J/kcal)

= 1,88E+07 J/TC

= 1,49E09 J/ha.a

= 2,27E+05 J/l álcool

Transformidade 5,50E+04 sej/L

Odum, 1996

Bastianoni et al., 2006

18 – Equipamentos (Industriais), kg

Peso 5,06E-02 kg /TC

Consumo (kg) = 4,05E00 kg/ha.a

= 6,17E-04 kg/l álcool

Transformidade 1,13E+13 sej/kg

Brown e Ulgiati, 2004

19 – Insumos (industriais), kg

Peso 1,17 kg /TC

Consumo (kg) = 9,32E01 kg/ha.a

$$= 1,42\text{E-}02 \text{ kg/l álcool}$$

Transformidade 3,80E+12 sej/kg

LEIA, 2006

20 – Infra-estrutura Industrial, U\$

Investimentos 2,31E-01 U\$/TC

Investimentos (U\$) = 2,32E-01 U\$/ha.a

$$= 2,83\text{E-}03 \text{ U$/l álcool}$$

Transformidade 3,70E+12 sej/U\$

Coelho et al., 2003

21 – Caminhão para Distribuição do Álcool(aço), kg

Peso 3,67E-04 kg /l álcool

Consumo (kg) = 2,41E00 kg/ha.a

$$= 3,67\text{E-}04 \text{ kg/l álcool}$$

Transformidade 1,13E+13 sej/kg

Brown e Ulgiati, 2004

22 – Pneus para Distribuição do Álcool, kg

Peso 1,21E-04 kg /l de álcool

Consumo (kg) = 7,94E-01kg/ha.a

$$= 1,21\text{E-}04\text{kg/ l álcool}$$

Transformidade 1,79E+13 sej/kg

LEIA, 2006

23 – Diesel para Distribuição do Álcool, J

Consumo 2,76E-02 l diesel /l de álcool

Consumo (J) = (consumo)* (densidade)*(energia do diesel)

$$= (\text{___ l/TC}) * (8,40\text{E-}01\text{kg/l}) * (1\text{E+}04\text{kcal/kg})$$

$$*(4186\text{J/kcal})$$

Odum, 1996

$$= 2,75\text{E+}05 \text{ J/l álcool}$$

$$= 1,80\text{E}09 \text{ J/ha.a}$$

Transformidade 5,50E+04 sej/J

Bastianoni et al., 2006

24 – Mão-de-Obra Fixa no Canavial, J

Funcionários	315	
Área Cultivada	21300	
Consumo energético	2500 kcal/dia	
Consumo (J)	$= (n^{\circ} \text{ Funcionários}) * (\text{Consumo energético/dia}) * (n^{\circ} \text{ dias/ano}) / (\text{área})$ $= (315 \text{ funcionários}) * (2,5E+03 \text{ kcal/dia}) * (365 \text{ dias/ano}) * (4186 \text{ J/kcal})$ $= 5,66E+07 \text{ J/ha.ano}$ $= 8,63E+03 \text{ J/l álcool}$	
Transformidade	2,80E+06 sej/J	Brown, 2003

25 – Mão-de-Obra Temporária (Colheita), J

Produtividade	8 toneladas/dia/homem	Agrianual, 2007
Produção	80 toneladas/ha	
Consumo energético	3000 kcal/dia	
Consumo (J)	$= ((\text{Produção}) / (\text{produtividade})) * (\text{Consumo energético/dia})$ $= ((80 \text{ t/ha}) / (10 \text{ t/dia/ano})) * (3,0E+03 \text{ kcal/dia}) * (4186 \text{ J/kcal})$ $= 1,52E+08 \text{ J/ha.ano}$ $= 2,31E+04 \text{ J/l álcool}$	
Transformidade	2,80E+06 sej/J	Brown, 2003

26 – Despesas Administrativas (Agrícola), U\$

Despesas	195 U\$/ha.ano	
Despesas (J)	$= 1,95E+02 \text{ U$/ha.ano}$ $= 2,44E+00 \text{ U$/TC}$ $= 1,95E02 \text{ U$/ha.a}$ $= 2,98E-02 \text{ U$/l álcool}$	
Transformidade	3,7E+12 sej/U\$	Coelho et al., 2003

27 – Impostos e Taxas (Agrícola), U\$

Total 38,50 U\$/ha.ano

$$\begin{aligned}
 \text{Despesas (J)} &= 3,85\text{E}+01 \text{ U\$/ha.ano} \\
 &= 4,81\text{E}-01 \text{ U\$/TC} \\
 &= 3,85\text{E}01 \text{ U\$/ha.a} \\
 &= 5,86\text{E}-03 \text{ U\$/l álcool}
 \end{aligned}$$

$$\text{Transformidade} \quad 3,70\text{E}+12 \text{ sej/U\$}$$

Coelho et al., 2003

28 – Mão-de-Obra transporte Cana, J

$$\begin{aligned}
 \text{Média Viagens} & 3 \text{ viagens/dia} \\
 \text{Consumo energético} & 2500 \text{ kcal/dia} \\
 \text{Peso transportado} & 60 \text{ t/viagem} \\
 \text{Consumo (J)} &= (\text{gasto energético}) \cdot (4186 \text{ J/kcal}) / \\
 & \quad ((\text{viagens/dia}) \cdot (\text{peso transportado/viagem})) \\
 &= (2.5\text{E}+03 \text{ kcal/dia}) \cdot (4186 \text{ J/kcal}) / \\
 & \quad ((\text{__vg/dia}) \cdot (\text{__t/vg})) \\
 &= 5,81\text{E}+04 \text{ J/TC} \\
 &= 4,65\text{E}06 \text{ J/ha.a} \\
 &= 7,09\text{E}+02 \text{ J/l álcool}
 \end{aligned}$$

$$\text{Transformidade} \quad 2,80\text{E}+06 \text{ sej/J}$$

Brown, 2003

29 – Mão-de-Obra Fixa Industrial, J

$$\begin{aligned}
 \text{Funcionários} & 88 \\
 \text{Cana esmagada} & 8200 \text{ toneladas/dia} \\
 \text{Consumo energético} & 2500 \text{ kcal/dia} \\
 \text{Consumo (J)} &= (\text{funcionários}) \cdot (\text{gasto energético}) / (\text{cana} \\
 & \quad \text{esmagada}) \\
 &= (\text{__ fucionários}) \cdot (2,5\text{E}+03 \text{ kcal/dia}) \cdot \\
 & \quad \cdot (4186 \text{ J/kcal}) / (\text{__t/dia}) \\
 &= 1,71\text{E}+05 \text{ J/TC} \\
 &= 1,37\text{E}07 \text{ J/ha.a} \\
 &= 2,08\text{E}+03 \text{ J/l álcool}
 \end{aligned}$$

$$\text{Transformidade} \quad 2,80\text{E}+06 \text{ sej/J}$$

Brown, 2003

30 – Mão-de-Obra Temporária (Industrial), J

$$\text{Funcionários} \quad 62 \text{ funcionários}$$

Cana esmagada	8200 toneladas/dia	
Safra	210 dias	
Consumo energético	2500 kcal/dia	
Consumo (J)	$= (\text{funcionários}) * (\text{safra}) * (\text{gasto energético}) * (4186 \text{ J/kcal}) / (\text{cana esmagada})$ $= ((\text{--- t/ha}) / (\text{--- t/dia/ano})) * (3.0\text{E}+03 \text{ kcal/dia}) * (4186 \text{ J/kcal})$ $= 9,32\text{E}+04 \text{ J/TC}$ $= 7,45\text{E}06 \text{ J/ha.a}$ $= 1,14\text{E}+03 \text{ J/l álcool}$	
Transformidade	2,80E+06 sej/J	Brown, 2003

31 – Impostos e Taxas (Industrial), U\$

Total	1,42 U\$/TC	
Despesas (J)	$= 1,42 \text{ U$/TC}$ $= 1,42\text{E}00 \text{ U$/ha.a}$ $= 1,73\text{E}-02 \text{ U$/l álcool}$	
Transformidade	3,70E+12 sej/U\$	Coelho et al., 2003

32 – Mão-de-Obra Distribuição, J

(a) Até Base Primária

Viagens	1 viagem/dia	
Volume transportado	35 000 litros	
Consumo energético	2500 kcal/dia	
Consumo (J)	$= (\text{gasto energético}) / ((\text{viagens/dia}) * (\text{volume transportado/viagem}))$ $= (2,5\text{E}+03 \text{ kcal/dia}) * (4186 \text{ J/kcal}) /$ $(\text{--- vc/dia}) * (\text{--- l/vg})$ $= 2,99\text{E}+02 \text{ J/l álcool}$ $= 1,96\text{E}06 \text{ J/ha.a}$	

(b) Até Posto Distribuidor

Viagens	1 viagem/dia	
Volume transportado	26 000 litros	

Consumo energético 2500 kcal/dia

Consumo (J) $= (\text{gasto energético}) / ((\text{viagens/dia}) * (\text{volume transportado/viagem}))$

$= (2,5\text{E}+03\text{kcal/dia}) * (4186\text{J/kcal}) /$
 $(\text{__vc/dia}) * (\text{__l/vg})$

$= 4,03\text{E}+02 \text{ J/l álcool}$

$= 4,60\text{E}06 \text{ J/ha.a}$

Total (a)+(b) $= 7,02\text{E}+02 \text{ J/ l álcool}$

Transformidade $2,80\text{E}+06 \text{ sej/J}$

Brown, 2003

33 – Impostos e Taxas (Distribuição), U\$

Total $3,98\text{E}-03 \text{ U$/l álcool}$

Despesas (J) $= 4,60\text{E}06 \text{ U$/ha.a}$

Odum, 1996

Transformidade $3,70\text{E}+12 \text{ sej/U$}$

Coelho et al., 2003

3.1.2 – Resumo da Análise Emergética

Tabela 4: Resumo dos Fluxos emergéticos – Distribuição no Estado de São Paulo

Fluxos emergéticos		
I = Total da Natureza	$2,63 \times 10^{15} \text{ seJ/ ha.a}$	35,3%
R = Renováveis da Natureza	$2,23 \times 10^{15} \text{ seJ/ ha.a}$	29,9%
N = Não Renováveis da Natureza	$4,00 \times 10^{14} \text{ seJ/ ha.a}$	5,4%
F = Totais da Economia	$4,83 \times 10^{15} \text{ seJ/ ha.a}$	64,7%
M = Materiais	$2,78 \times 10^{15} \text{ seJ/ ha.a}$	37,2%
S = Serviços	$2,05 \times 10^{15} \text{ seJ/ ha.a}$	27,5%
Y = Totais = (I+F)	$7,46 \times 10^{15} \text{ seJ/ ha.a}$	100,0%

Tabela 5: Índices energéticos – Distribuição no Estado de São Paulo

Índices energéticos		
Índice - Tradicionais	Valor	Unidade
$Tr = Y/O =$	5,03E+04	seJ/J
$Tr = Y/O =$	1,14E+12	seJ/L álcool
$\%R = 100(R)/Y =$	29,9%	
$EYR = Y/F =$	1,55	
$EIR = F/I =$	1,83	
$ELR = (F+N)/R =$	2,34	
$SI = EYR/ELR =$	0,66	
$EER = Y/[(\$)(seJ/\$)] =$	0,55	
Índice - Modificados	Valor	
$\%R = 100(R+Mr+Sr)/Y =$	34,4%	
$ELR^* = (N+Mn+Sn)/(R+Mr+Sr) =$	1,91	
$SI^* = EYR/ELR =$	0,87	

4.2. - Distribuição no Estado de Mato Grosso

Tabela 6: Avaliação Emergética do Etanol Distribuído no Estado do Mato Grosso

Fluxos	% R.	Dado	Unida de	Transf. (sej/unit)	Energia Solar (seJ/l de álcool)		
					Porção Ren	Porção Não Ren	Total
RENOVÁVEIS					2.23x10 ¹⁵	0.00	2,23x10 ¹⁵
Fazenda					2.12x10 ¹⁵	0,00	2,12x10 ¹⁵
1 Sol	100	5,22x10 ¹³	J/ha.a	1	5.22x10 ¹³	0,00	5,22x10 ¹³
2 Chuva	100	6,77x10 ¹⁰	J/ha.a	3,06x10 ⁴	2.07x10 ¹⁵	0,00	2,07x10 ¹⁵
3 Água (fertilirrigação)	100	2,50x10 ⁶	J/ha.a	1,85x10 ⁵	4.63x10 ¹¹	0,00	4,63x10 ¹¹
Usina					1.11x10 ¹⁴	0,00	1,11x10 ¹⁴
4 Água (rio)	100	6,00x10 ⁸	J/ha.a	1,85x10 ⁵	1.11x10 ¹⁴	0,00	1,11x10 ¹⁴
NÃO RENOVÁVEIS					0.00	4,00x10 ¹⁴	4,00x10 ¹⁴
Fazenda					0.00	4,00x10 ¹⁴	4,00x10 ¹⁴
5 Perda de solo	0	3,23x10 ⁹	J/ha.a	1,24x10 ⁵	0.00	4,00x10 ¹⁴	4,00x10 ¹⁴
MATERIAIS					7.46x10 ¹³	2,70x10 ¹⁵	2,78x10 ¹⁵
Fazenda					7.46x10 ¹³	1,96x10 ¹⁵	2,03x10 ¹⁵
6 Mudas	40	2,80x10 ³	kg/ha.a	7,50x10 ¹⁰	7.46x10 ¹³	1,35x10 ¹⁴	2,10 x10 ¹⁴
7 Corretivos	0	2,44x10 ⁸	J/ha.a	7,72x10 ⁶	0.00	6,65x10 ¹⁴	6,65x10 ¹⁴
8 Nitrogênio	0	1,58x10 ⁴	g/ha.a	6,38x10 ⁹	0.00	1,01x10 ¹⁴	1,01x10 ¹⁴
9 Fósforo	0	9,87x10 ¹	kg/ha.a	6,55x10 ¹²	0.00	6,46x10 ¹⁴	6,46x10 ¹⁴
10 Potássio	0	2,16x10 ¹	kg/ha.a	2,92x10 ¹²	0.00	6,31x10 ¹³	6,31x10 ¹³
11 Herbicidas	0	4,45x10 ¹	kg/ha.a	2,48x10 ¹⁰	0.00	1,10x10 ¹²	1,10x10 ¹²
12 Diesel	0	5,28x10 ⁹	J/ha.a	5,50x10 ⁴	0.00	2,90x10 ¹⁴	2,90x10 ¹⁴
13 Implementos (Aço)	0	4,33x10 ⁰	g/ha.a	1,13x10 ¹⁰	0.00	4,89x10 ¹³	4,89x10 ¹³
14 Pneus	0	1,18x10 ⁰	kg/ha.a	4,30x10 ¹²	0.00	5,06x10 ¹²	5,06x10 ¹²
Transporte cana					0.00	1,49x10 ¹⁴	1,49x10 ¹⁴
15 Caminhão	0,	5,17x10 ⁰	kg/ha.a	1,13x10 ¹³	0.00	5,84x10 ¹³	5,84x10 ¹³
16 Pneus	0	1,97x10 ⁰	kg/ha.a	4,30x10 ¹²	0.00	8,46x10 ¹²	8,46x10 ¹²
17 Diesel	0	1,49x10 ⁹	J/ha.a	5,50x10 ⁴	0.00	8,20x10 ¹³	8,20x10 ¹³
Usina					0.00	4,69x10 ¹⁴	4,69x10 ¹⁴

18	Equipamentos	0	4,05x10 ⁰	kg/ha.a	1,13x10 ¹³	0.00	4,58x10 ¹³	4,58x10 ¹³
19	Insumos Industriais	0	9,32x10 ¹	g/ha.a	3,80x10 ¹²	0.00	3,54x10 ¹⁴	3,54x10 ¹⁴
20	Infra-estrutura	0	1,85x10 ¹	U\$/ha.a	3,70x10 ¹²	0.00	6,86x10 ¹³	6,86x10 ¹³
Transporte do Álcool						0.00	5,62x10¹⁴	5,62x10¹⁴
21	Caminhão	0	9,97x10 ⁰	kg/ha.a	1,13x10 ¹³	0.00	1,13x10 ¹⁴	1,13x10 ¹⁴
22	Pneus	0	7,71x10 ¹	kg/ha.a	4,30x10 ¹²	0.00	3,31x10 ¹³	3,31x10 ¹³
23	Diesel	0	1,80x10 ⁹	J/ha.a	5,50x10 ⁴	0.00	4,16x10 ¹⁴	4,16x10 ¹⁴
SERVIÇOS						2.64x10¹⁴	1,91x10¹⁵	2,17x10¹⁵
Fazenda						2.22x10¹⁴	1,23x10¹⁵	1,45x10¹⁵
24	Mão de obra - Fixa	38	5,66x10 ⁷	J/ha.a	2,80x10 ⁶	6.02x10 ¹³	9,82x10 ¹³	1,58x10 ¹⁴
25	MO Temporária	38	1,52x10 ⁸	J/ha.a	2,80x10 ⁶	1.61x10 ¹⁴	2,63x10 ¹⁴	2,25x10 ¹⁴
26	Desp. Administrativas	0	1,95x10 ²	U\$	3,70x10 ¹²	0.00	7,23x10 ¹⁴	7,23x10 ¹⁴
27	Impostos e Taxas	0	3,85x10 ¹	U\$	3,70x10 ¹²	0.00	1,42x10 ¹⁴	1,42x10 ¹⁴
Transporte Cana						4.95x10¹²	8,07x10¹²	1,30x10¹³
28	Mão de Obra	38	4,65x10 ⁶	J/ha.a	2,80x10 ⁶	4.95x10 ¹²	8,07x10 ¹²	1,30x10 ¹³
Usina						2.25x10¹³	4,56x10¹⁴	4,79x10¹⁴
29	Mão de obra Fixa	38	1,37x10 ⁷	J/ha.a	2,80x10 ⁶	1.45x10 ¹³	2,37x10 ¹³	3,83x10 ¹³
30	Mão de Obra Temp.	38	7,45x10 ⁶	J/ha.a	2,80x10 ⁶	7.93x10 ¹²	1,29x10 ¹³	2,09x10 ¹³
31	Impostos e Taxas	0	1,13x10 ²	U\$	3,70x10 ¹²	0.00	4,19x10 ¹⁴	4,19x10 ¹⁴
Transporte álcool						1.46x10¹³	2,14x10¹⁴	2,29x10¹⁴
32	Mão de Obra	38	1,38x10 ⁷	J/ha.a	2,80x10 ⁶	1.46x10 ¹³	2,39x10 ¹³	3,85x10 ¹³
33	Taxas	0	5,15x10 ¹	U\$	3,70x10 ¹²	0.00	1,90x10 ¹⁴	1,90x10 ¹⁴
TOTAL						2.57x10¹⁵	5,44x10¹⁵	8,01x10¹⁵
Produção								
Álcool		6560	Litro		1,48x10 ¹¹	J		

4.2.1 Memorial de Cálculo – MT

1 – Sol, J

Idem 3.1 (SP)

2 – Potencial Químico da Chuva, J

Idem 3.1 (SP)

3 – Água (Fertirrigação), J

Idem 3.1 (SP)

4 – Água (Uso Industrial), J

Idem 3.1 (SP)

5 – Perda de Solo, J

Idem 3.1 (SP)

6 – Mudas, kg

Idem 3.1 (SP)

7 – Corretivos, J

Idem 3.1 (SP)

8 – Nitrogênio, g

Idem 3.1 (SP)

9 – Fósforo, kg

Idem 3.1 (SP)

10 – Potássio, kg

Idem 3.1 (SP)

11 – Herbicidas, kg

Idem 3.1 (SP)

12 – Diesel (Agrícola), J

Idem 3.1 (SP)

13 – Implementos e Equipamentos (Agrícola), kg

Idem 3.1 (SP)

14 – Pneus (Agrícola), kg

Idem 3.1 (SP)

15 – Caminhão para Transporte da Cana (aço), kg

Idem 3.1 (SP)

16 – Pneus (Transporte da Cana), kg

Idem 3.1 (SP)

17 – Diesel (Transporte da Cana), J

Idem 3.1 (SP)

18 – Equipamentos (Industriais), kg

Idem 3.1 (SP)

19 – Insumos (industriais), kg

Idem 3.1 (SP)

20 – Infra-estrutura Industrial, U\$

Idem 3.1 (SP)

21 – Caminhão para Distribuição do Álcool(aço), kg

Peso $1,52 \times 10^{-3}$ kg /l álcool

Consumo (kg) = $9,97 \times 10^0$ kg/ ha.a

Transformidade $1,13 \times 10^{13}$ sej/kg

Brown e Ulgiati, 2004

22 – Pneus para Distribuição do Álcool, kg

Peso $1,18 \times 10^{-3}$ kg /l de álcool

Consumo (kg) = $7,71 \times 10^0$ kg/ ha.a

Transformidade $1,79 \times 10^{13}$ sej/kg

LEIA, 2006

23 – Diesel para Distribuição do Álcool, J

$$\begin{aligned}\text{Consumo} & 3,28 \times 10^{-2} \text{ l diesel / l de álcool} \\ \text{Consumo (J)} &= (\text{consumo}) * (\text{densidade}) * (\text{energia do diesel}) \\ &= (\text{___ l/TC}) * (8,40 \times 10^{-1} \text{ kg/l}) * (1,00 \times 10^4 \text{ kcal/kg}) \\ &\quad * (4186 \text{ J/kcal}) \\ &= 1.15 \times 10^6 \text{ J/l álcool} \\ &= 7.57 \times 10^9 \text{ J/}.a\end{aligned}$$

Odum, 1996

Transformidade $5,50 \times 10^4$ sej/J

Bastianoni et al., 2006

24 – Mão-de-Obra Fixa no Canavial, J

Idem 3.1 (SP)

25 – Mão-de-Obra Temporária (Colheita), J

Idem 3.1 (SP)

26 – Despesas Administrativas (Agrícola), U\$

Idem 3.1 (SP)

27 – Impostos e Taxas (Agrícola), U\$

Idem 3.1 (SP)

28 – Mão-de-Obra transporte Cana, J

Idem 3.1 (SP)

29 – Mão-de-Obra Fixa Industrial, J

Idem 3.1 (SP)

30 – Mão-de-Obra Temporária (Industrial), J

Idem 3.1 (SP)

31 – Impostos e Taxas (Industrial), U\$

Idem 3.1 (SP)

32 – Mão-de-Obra Distribuição, J

(a) Até Base Primária

Viagens	1 viagem/dia
Volume transportado	35 000 litros
Consumo energético	2500 kcal/dia
Consumo (J)	$= (\text{gasto energético}) / ((\text{viagens/dia}) * (\text{volume transportado/viagem}))$ $= (2,5 \times 10^3 \text{ kcal/dia}) * (4186 \text{ J/kcal}) /$ $(\text{__vc/dia}) * (\text{__l/vg})$ $= 2,99 \times 10^2 \text{ J/l álcool}$ $= 1,96 \text{E}06 \text{ J/}^\circ\text{a}$

(b) Até Base Secundária

Duração da viagem	8 dias (ida e volta)
Volume transportado	60 000 litros
Consumo energético	2500 kcal/dia
Consumo (J)	$= (\text{gasto energético}) * (\text{dias/vg}) /$ $(\text{volume transportado} / \text{vg})$ $= (2,5 \times 10^3 \text{ kcal/dia}) * (4186 \text{ J/kcal}) * (\text{__dias/vg})$ $/ (\text{__l} / \text{vg})$ $= 1,40 \times 10^3 \text{ J/l álcool}$ $= 9,15 \times 10^6 \text{ J/}^\circ\text{a}$

Odum, 1996

(c) Até Posto Distribuidor

Viagens	1 viagem/dia
Volume transportado	26 000 litros
Consumo energético	2500 kcal/dia
Consumo (J)	$= (\text{gasto energético}) / ((\text{viagens/dia}) * (\text{volume transportado/viagem}))$ $= (2,5 \times 10^3 \text{ kcal/dia}) * (4186 \text{ J/kcal}) /$ $(\text{__vc/dia}) * (\text{__l/vg})$ $= 4,03 \times 10^2 \text{ J/l álcool}$ $= 2,64 \times 10^6 \text{ J/ha.a}$
Total (a)+(b)+(c)	$= 1,38 \times 10^7 \text{ J/}^\circ\text{a}$
Transformidade	$2,80 \times 10^6 \text{ sej/J}$

Brown, 2003

33 – Impostos e Taxas (Distribuição), U\$

Total	$7,84 \times 10^{-3}$ U\$/l álcool	
Despesas (J)	$= 5,15 \times 10^1$ U\$/ha.a	Odum, 1996
Transformidade	$3,70 \times 10^{12}$ sej/U\$	Coelho et al., 2003

4.2.2 – Resumo da Análise Emergética

Tabela 7: Resumo dos Fluxos emergéticos – Distribuição no Estado do Mato Grosso

Fluxos emergéticos		
I = Total da Natureza	$2,63 \times 10^{15}$ seJ/ ha.a	32,9%
R = Renováveis da Natureza	$2,23 \times 10^{15}$ seJ/ ha.a	27,9%
N = Não Renováveis da Natureza	$4,00 \times 10^{14}$ seJ/ ha.a	5,0%
F = Totais da Economia	$5,38 \times 10^{15}$ seJ/ ha.a	67,1%
M = Materiais	$3,21 \times 10^{15}$ seJ/ ha.a	40,1%
S = Serviços	$2,17 \times 10^{15}$ seJ/ ha.a	27,1%
Y = Totais = (I+F)	$8,01 \times 10^{15}$ seJ/ ha.a	100,0%

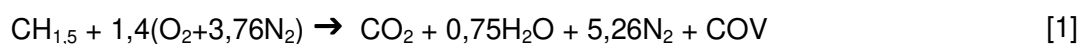
Tabela 8: Índices emergéticos – Distribuição no Estado de Mato Grosso

índices emergéticos		
Índice – Tradicionais	valor	unidade
$Tr = Y/O =$	$5,41 \times 10^4$	seJ/J
$Tr = Y/O =$	$1,22 \times 10^{12}$	seJ/L
$\%R = 100O/Y =$	27,9%	
$EYR = Y/F =$	1,49	
$EIR = F/I =$	2,04	
$ELR = (F+N)/R =$	2,59	
$SI = EYR/ELR =$	0,58	
$EER = Y/[(\$)(seJ/\$)] =$	0,79	
Índice – Modificados	Valor	
$\%R = 100(R+Mr+Sr)/Y =$	32,1%	
$ELR = (N+Mn+Sn)/(R+Mr+Sr) =$	2,11	
$SI = EYR/ELR =$	0,75	

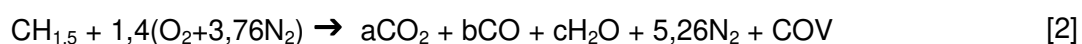
5. EMISSÕES ASSOCIADAS AO SISTEMA

5.1 Emissões por queima direta de Combustível Fóssil

Os cálculos de emissões de gases devido à queima direta de combustíveis foram baseados na equação de combustão completa de hidrocarboneto.



E na equação de combustão considerando os outros compostos formados durante este processo:



Os valores de “b”, “c” e COV foram determinados utilizando-se os dados do “CORINAIR Emission Inventory Guidebook” (Manual de Inventário de emissões CORINAR) (CORINAR, 2002), conforme apresentado na tabela abaixo:

Tabela 9: Resumo das emissões de poluentes

Poluentes		Emissões	
CO	$9,33 \times 10^{-3}$ kg CO/kg comb.	$3,33 \times 10^{-4}$	kmol/kg comb.
NO _x (as NO _{1.5})	$2,52 \times 10^{-2}$ kg NO _x /kg comb.	$6,64 \times 10^{-4}$	kmol/kg comb.
SO ₂	--- kg SO ₂ /kg comb.	----	kmol/kg comb.
VOC (as CH _{1.5})	$5,33 \times 10^{-3}$ kg COV/kg comb.	$3,95 \times 10^{-4}$	kmol/kg comb.
Particulados	$1,83 \times 10^{-3}$ kg part/kg comb.		

Os valores de “a” foram determinados pela relação estequiométrica da equação 2. Para este cálculo conteúdo de hidrocarbonetos do combustível foi considerada igual à diferença entre o peso do combustível o peso das emissões de partículas, 0.998 kg CH_{1.5}/kg de combustível.

Assim, o estudo considerou em 3,22 kg CO₂/kg combustível as emissões por queima de diesel. As emissões de CO₂ devido à queima direta de combustível fóssil foram calculadas em:

Tabela 10: Emissões diretas de CO₂ por etapa da Cadeia.

Etapa	Consumo direto			Emissões		
	Combustível Fóssil			(kg CO ₂ /l etanol)		
	(l / l etanol)					
	Usina	SP	MT	Usina	SP	MT
Agrícola	0,023	0,023	0,023	0,074	0,074	0,074
Transporte cana	0,006	0,006	0,006	0,019	0,019	0,019
Industrial	-----	-----	-----	-----	-----	-----
Distribuição	-----	0,008	0,033	-----	0,026	0,106
Total	0,029	0,037	0,062	0,093	0,119	0,199

5.2 Emissões por queima indireta de Combustível Fóssil

5.2.1 Distribuição em São Paulo

Tabela 11: Emissões indiretas por etapa da cadeia – SP

Fluxos	Unid	Fluxo por litro de álcool	Óleo eq. * (kg óleo/unid)	Óleo eq. Por litro de álcool (kg óleo eq.)	Demanda Energética (J)	Emissão de CO ₂ (kg CO ₂)
Fazenda				2,95x10⁻²	1.23x10⁶	9,49x10⁻²
Corretivos	kg	6,10x10 ⁻²	0,15	9,18x10 ⁻³	3,84x10 ⁵	2,96x10 ⁻²
Nitrogênio	kg	2,41x10 ⁻³	0,32	7,73x10 ⁻⁴	3,24x10 ⁴	2,49x10 ⁻³
Fósforo	kg	1,50x10 ⁻²	0,22	3,31x10 ⁻³	1,38x10 ⁵	1,06x10 ⁻²
Potássio	kg	3,30x10 ⁻³	1,43	4,71x10 ⁻³	1,97x10 ⁵	1,52x10 ⁻²
Herbicidas	kg	6,79x10 ⁻³	1,43	9,70x10 ⁻³	4,06x10 ⁵	3,13x10 ⁻²
Diesel Agrícola	kg	1,28x10 ⁻⁴	1,23	1,58x10 ⁻⁴	6,59x10 ³	5,07x10 ⁻⁴
Aço Agrícola	kg	6,60x10 ⁻⁴	1,91	1,26x10 ⁻³	5,27x10 ⁴	4,06x10 ⁻³
Pneus Agrícola	kg	1,79x10 ⁻⁴	2,04	3,66x10 ⁻⁴	1,53x10 ⁴	1,18x10 ⁻³
Transporte cana				8,80x10⁻³	3,68x10⁵	2,83x10⁻²
Caminhão	kg	7,88x10 ⁻⁴	1,91	1,51x10 ⁻³	6,30x10 ⁴	4,85x10 ⁻³
Pneu	kg	3,00x10 ⁻⁴	2,04	6,12x10 ⁻⁴	2,56x10 ⁴	1,97x10 ⁻³
Diesel	kg	5,43x10 ⁻³	1,23	6,68x10 ⁻³	2,80x10 ⁵	2,15x10 ⁻²
Indústria				3,21x10⁻³	1,34x10⁵	1,03x10⁻²
Equip. – Aço	kg	5,27x10 ⁻⁴	1,91	1,01x10 ⁻³	4,21x10 ⁴	3,24x10 ⁻³
Equip. – Inox	kg	9,06x10 ⁻⁵	1,91	1,73x10 ⁻⁴	7,25x10 ³	5,58x10 ⁻⁴
Insumos Indus.	Kg	1,24x10 ⁻⁴	0,14	2,03x10 ⁻³	8,50x10 ⁴	6,54x10 ⁻³
Distribuição				9,03x10⁻³	3,78x10⁵	2,91x10⁻²
Equip.Aço	kg	3,67x10 ⁻⁴	1,91	7,01x10 ⁻⁴	2,94x10 ⁴	2,26x10 ⁻³
Pneus	kg	1,21x10 ⁻⁴	2,04	2,47x10 ⁻⁴	1,03x10 ⁴	7,96x10 ⁻⁴
Diesel	kg	6,57x10 ⁻³	1,23	8,08x10 ⁻³	3,38x10 ⁵	2,60x10 ⁻²
TOTAL				5,05x10⁻²	2,11x10⁶	1,63x10⁻¹

*- Referência – Boustead and Hancock, 1979.

5.2.2 Distribuição em Mato Grosso

Tabela 12: Emissões indiretas por etapa da cadeia – MG

Fluxos	Unid	Fluxo por litro de álcool	Óleo eq. * (kg óleo/unid)	Óleo eq. Por litro de álcool (kg óleo eq.)	Demanda Energética (J)	Emissão de CO ₂ (kg CO ₂)
Fazenda				2,95x10⁻²	1,23x10⁶	9,49x10⁻²
Corretivos	kg	6,10x10 ⁻²	0,15	9,18x10 ⁻³	3,84x10 ⁵	2,96x10 ⁻²
Nitrogênio	kg	2,41x10 ⁻³	0,32	7,73x10 ⁻⁴	3,24x10 ⁴	2,49x10 ⁻³
Fósforo	kg	1,50x10 ⁻²	0,22	3,31x10 ⁻³	1,38x10 ⁵	1,06x10 ⁻²
Potássio	kg	3,30x10 ⁻³	1,43	4,71x10 ⁻³	1,97x10 ⁵	1,52x10 ⁻²
Herbicidas	kg	6,79x10 ⁻³	1,43	9,70x10 ⁻³	4,06x10 ⁵	3,13x10 ⁻²
Diesel Agrícola	kg	1,28x10 ⁻⁴	1,23	1,58x10 ⁻⁴	6,59x10 ³	5,07x10 ⁻⁴
Aço Agrícola	kg	6,60x10 ⁻⁴	1,91	1,26x10 ⁻³	5,27x10 ⁴	4,06x10 ⁻³
Pneus Agrícola	kg	1,79x10 ⁻⁴	2,04	3,66x10 ⁻⁴	1,53x10 ⁴	1,18x10 ⁻³
Transporte cana				8,80x10⁻³	3,68x10⁵	2,83x10⁻²
Caminhão	kg	7,88x10 ⁻⁴	1,91	1,51x10 ⁻³	6,30x10 ⁴	4,85x10 ⁻³
Pneu	kg	3,00x10 ⁻⁴	2,04	6,12x10 ⁻⁴	2,56x10 ⁴	1,97x10 ⁻³
Diesel	kg	5,43x10 ⁻³	1,23	6,68x10 ⁻³	2,80x10 ⁵	2,15x10 ⁻²
Indústria				3,21x10⁻³	1,34x10⁵	1,03x10⁻²
Equip. – Aço	kg	5,27x10 ⁻⁴	1,91	1,01x10 ⁻³	4,21x10 ⁴	3,24x10 ⁻³
Equip. – Inox	kg	9,06x10 ⁻⁵	1,91	1,73x10 ⁻⁴	7,25x10 ³	5,58x10 ⁻⁴
Insumos Indust.	Kg	1,42x10 ⁻²	0,14	2,03x10 ⁻³	8,50x10 ⁴	6,54x10 ⁻³
Transporte até Posto Distribuidor				3,92x10⁻²	1,64x10⁶	1,26x10⁻¹
Caminhão	kg	1,52x10 ⁻³	1,91	2,90x10 ⁻³	1,21x10 ⁵	9,35x10 ⁻³
Pneu	kg	1,18x10 ⁻³	2,04	2,40x10 ⁻³	1,00x10 ⁵	7,73x10 ⁻³
Diesel	kg	2,76x10 ⁻²	1,23	3,39x10 ⁻²	1,42x10 ⁶	1,09x10 ⁻¹
TOTAL				8,07x10⁻²	3,38x10⁶	2,60x10⁻¹

* - Referência – Boustead and Hancock, 1979.

5.3 Emissões por oxidação do solo erodido

Assumindo que :

Perda de solo	11900 kg solo/ha.ano	ECOAGRI, 2007
Quantidade de matéria orgânica solo	0,04 kg m.o./kg solo	
Umidade da matéria orgânica	0,7 %	
Oxidação de M O produz	3 g CO ₂ /g de material orgânico	Ulgiati, 2001
Emissão de CO ₂ = (Perda de solo)*(MO)*(1-Umidade) *		
(emissão MO)		
	0,4284 t de CO ₂ /ha.a	
	428,4 kg CO ₂ /ha.a	

