

DOI: 10.5433/2317-627X.2017v5n2p129

Análise Ambiental do Ciclo de Vida do Etanol Combustível

Environmental Analysis of Fuel Ethanol Life Cycle

Sidinei Silveiro da Silva¹
Irene Domenes Zapparoli²

RESUMO

As atividades humanas de consumo e produção industrial demandam cada vez mais o consumo de energia, o que tem expandido no Brasil a produção do etanol a partir da cana-de-açúcar, com destaque no âmbito mundial, como matriz energética renovável e alternativa aos combustíveis de origem fóssil. O objetivo é analisar o ciclo de vida do etanol hidratado, a partir da cana-de-açúcar. Na metodologia aplica-se a Avaliação de Ciclo de Vida do Centro de Ciência Ambiental da *Leiden University* (CML) 2000 para do Grupo Santa Terezinha, Paraná, Brasil. Nos resultados a fase agrícola representa o maior impacto ambiental potencial quando confrontada com a etapa industrial e de transporte. As categorias de impacto ficam atreladas às questões de Toxicidade Humana e Ecotoxicidade em Águas Doces. As interferências ambientais da fase agrícola não se manifestam na Depleção da Camada de Ozônio. Os ápices estão na Eutrofização e Depleção da Camada de Ozônio. Conclui-se o etanol hidratado pode ser considerado um combustível renovável, porém, não limpo.

Palavras chave: Avaliação do ciclo de vida. Etanol combustível. Agroindústria Canavieira. Método CML 2000

ABSTRACT

Human activities and industrial production demands more and more energy consumption, which has expanded in Brazil the production of ethanol from sugarcane, especially under such as renewable and alternative energy source fuels fossil. The aim is to analyze environmental management of the production of hydrated ethanol, from cane sugar. The methodological procedures application Life Cycle Analysis from Centre for Environmental Science of Leiden University (CML) in 2000, in the Unit Group St. *Terezinha*. The results show that the environmental aspects of the life cycle of hydrated ethanol produced, the agricultural phase is relatively the greatest potential environmental impact when confronted with the industrial phase of biofuel. The impact categories are related to issues of human toxicity and ecotoxicity in Freshwater. The agricultural phase of environmental interference not only manifested in the depletion of the Ozone Layer. For the other phases of the product occur, in the categories of eutrophication and depletion of the Ozone Layer. The categories of impact, that the hydrous ethanol may be considered a renewable, but not cleared.

Keywords: Cycle Assessment. Ethanol fuel. Sugarcane Industry. Method CML 2000.

JEL Classification: Q56, Q57, Q42

¹ Mestre, Universidade Estadual de Londrina – UEL. Doutorando pela UNICAMP. E-mail: sidineisilva@hotmail.com.

² Doutora, Economia, Universidade Estadual de Londrina, Londrina - UEL, PR, Brasil
E-mail: zapparoli@uel.br

INTRODUÇÃO

Estudar o ciclo de vida do etanol combustível, produzido a partir da cana-de-açúcar, portanto, é relevante na medida em que a busca por novas tecnologias e aumento na produtividade tornam-se necessários no sentido de minimizar o empobrecimento do solo e riscos de ocorrência de surtos de pragas ou doenças, e, mitigar os desequilíbrios nos corpos hídricos, buscando uma maior eficiência ambiental e econômica.

A gestão ambiental a partir da Avaliação do Ciclo de Vida avalia os aspectos ambientais e os impactos potenciais associados ao ciclo de vida de um produto, desde a extração dos recursos naturais até o uso e disposição final do produto. Nesse sentido, as questões de pesquisa do presente estudo são apresentadas a seguir: Qual o perfil econômico-social-ambiental da agroindústria canavieira na produção do etanol combustível no Paraná? Quais são os impactos econômicos, sociais e ambientais durante o ciclo de vida do etanol hidratado produzido pela Unidade Paracity do Grupo Santa Terezinha?

O objetivo é analisar a Avaliação do Ciclo de Vida da produção do etanol combustível, a partir da cana-de-açúcar. A hipótese deste trabalho é que o etanol combustível produzido a partir da cana-de-açúcar trata-se de uma energia renovável, porém, não limpa, em virtude dos impactos gerados no horizonte do seu ciclo de vida.

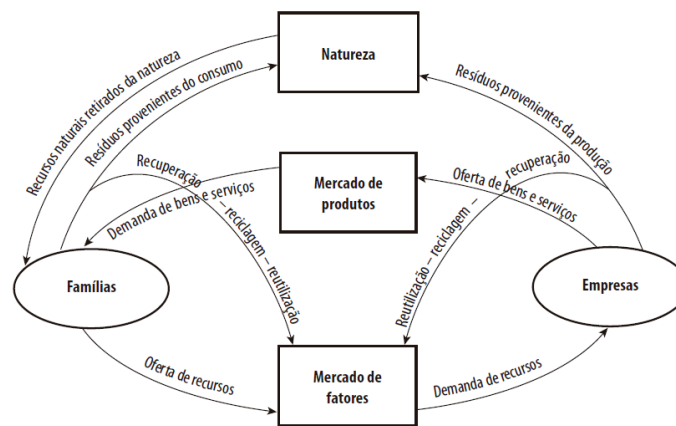
A seleção da região de estudo considerou a importância econômica do Grupo Santa Terezinha para análise de ciclo de vida. Haja vista a mesma ser a maior indústria sucroalcooleira paranaense, bem como a relevância da Unidade Paracity para o município de Paracity-PR.

Este artigo é composto por três partes, além desta introdução. Na primeira parte apresenta-se o referencial teórico abordando a evolução do setor sucroenergético em termos socioeconômico e ambiental. Na segunda parte do estudo apresenta-se a metodologia para Análise do Ciclo de Vida (ACV) e a caracterização da Avaliação de Impacto do Ciclo de Vida (AICV) do etanol hidratado, que consiste na contabilização de todos os impactos ambientais desde o cultivo da matéria-prima até a chegada do etanol combustível ao Porto de Paranaguá-PR. Após a discussão de resultados, apresentam-se as principais conclusões e contribuições da pesquisa, nas considerações finais.

AVALIAÇÃO DO CICLO DE VIDA DO ETANOL COMBUSTÍVEL PARA SETOR SUCROENERGÉTICO

Apesar do etanol figurar como o principal biocombustível substituto dos combustíveis de origem fóssil, segundo Skikida *et al.* (2008), o debate envolvendo biocombustíveis e desenvolvimento sustentável é variado e complexo. Isso ocorre, porque os biocombustíveis apesar de implicarem em maior segurança no suprimento de energia, ganhos econômicos, desenvolvimento de áreas rurais e redução nas emissões dos Gases de Efeito Estufa; também expandem a fronteira agrícola, podendo gerar desmatamento, monoculturas, poluição da água, ameaças à segurança alimentar, condições precárias de trabalho e distribuição injusta dos benefícios ao longo da cadeia de valor. Assim envolve, significativamente, o etanol combustível no Balanço de Materiais. (Figura 1)

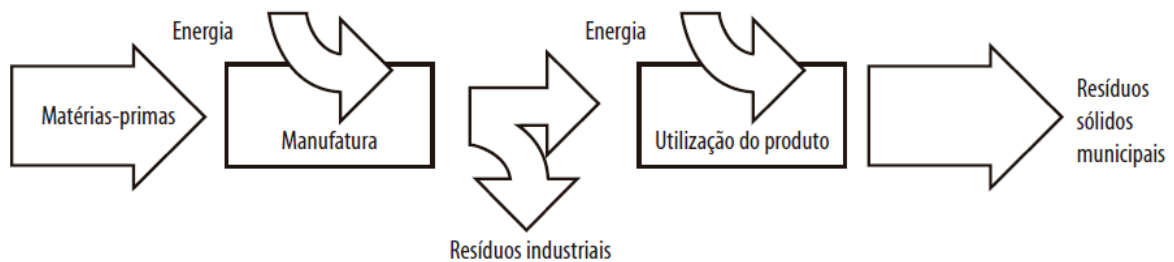
Figura 1 - Modelo de Equilíbrio de Materiais



Fonte: THOMAS; CALLAN (2016)

A Avaliação do Ciclo de Vida (ACV) é uma ferramenta que permite avaliar o impacto potencial associado a um produto ou atividade durante seu ciclo de vida. A ACV também permite identificar quais estágios do ciclo de vida têm contribuição mais significativa para o impacto ambiental do processo ou produto estudado. Empregando a ACV é possível avaliar a implementação de melhorias ou alternativas para produtos, processos ou serviços. (Figura 2)

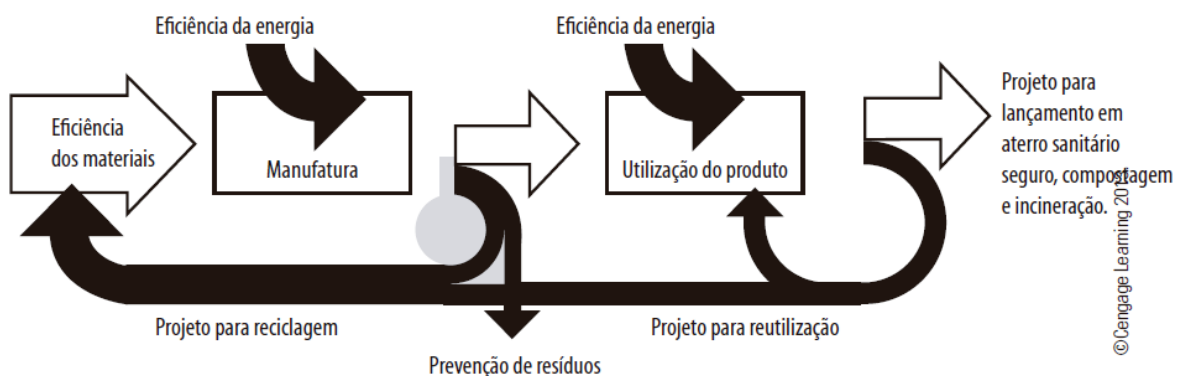
Figura 2 - Ciclo de Vida: Fluxo Linear de Materiais Convencionais



Fonte: THOMAS; CALLAN (2016)

Esse fluxo aberto de materiais "do início ao fim" presume que os materiais seguem em uma direção única, entrando na forma de recursos e saindo como detritos ou resíduos. (Figura 3) O foco deveria ser a diminuição de contaminantes somente no final do fluxo.

Figura 3 – Ciclo de Vida: Sistema Fechado de Fluxo de Materiais.



Fonte: THOMAS; CALLAN (2016)

Um fluxo de do início ao fim pressupõe que os materiais fluem em um padrão circular dentro de um sistema fechado, permitindo que os resíduos sejam devolvidos para o processo de produção.

Segundo Hindle e Oude (1996) *apud* Ferreira (2004), em 1992, foi formada a Sociedade para a Promoção do Desenvolvimento de Ciclo de Vida (SPOLD), com a missão de juntar recursos, para acelerar o desenvolvimento da metodologia ACV como uma abordagem de gestão aceita para ajudar na tomada de decisão. No Brasil, os primeiros estudos de ACV começaram nos anos 2000 e desde essa época várias iniciativas estão sendo realizadas para consolidar essa importante ferramenta de gestão ambiental. (ACV BRASIL, 2010). Dada a relevância da ACV, no Brasil, foi aprovada a Lei n. 12.305, em 02 de agosto de 2010, regulamentando o Plano Nacional de Resíduos Sólidos (PNRS), que foi concebido com base na análise do ciclo de vida do produto e na logística reversa (BRASIL, 2010).

No que se refere às publicações nacionais sobre ACV, destacam-se os trabalhos de Lopes *et al* (2002), Soares; Pereira e Breitenbach (2002), Gatti; Queiroz e Garcia (2007), Jaime (2007), Coltro e Mourad (2007), Lima (2007); Barbieri e Cajazeira (2009); Silva e Zapparoli (2011a) e Silva e Zapparoli (2011b).

No caso dos biocombustíveis, pode-se citar o trabalho de Angarita (2008) que estudou a avaliação do impacto energético e ambiental da co-geração no balanço e no ciclo de vida do biodiesel de óleo de palma africana; e, Ometto (2005), que utilizando-se dos métodos *Environmental Development of Industrial Products* (EDIP), Exergia e Emergia avaliou o ciclo de vida (ACV) do álcool etílico hidratado combustível, demonstrando que a atividade da colheita de cana apresenta o maior potencial de impacto para o consumo de recursos renováveis, o aquecimento global, a formação fotoquímica de ozônio troposférico, a acidificação e a toxicidade humana. O preparo do solo apresenta maior potencial para o consumo de recursos não renováveis e para a ecotoxicidade da água. O trato cultural apresenta maior influência na eutrofização e na ecotoxicidade do solo.

O Brasil é considerado um dos países mais avançado do ponto de vista tecnológico, na produção e no uso do etanol combustível, juntamente com os EUA e, em menor escala, seguidos pela Argentina, Quênia, Malawi e outros (GAZZONI, 2006).

Ramão *et al.* (2007) afirmam que o agronegócio canavieiro é responsável pela movimentação de aproximadamente R\$ 40 bilhões por ano, o equivalente a 2,35% do Produto Interno Bruto (PIB) nacional. Dados do Jornal da Cana (2011) apontam que na safra 2009/2010 a agroindústria canavieira gerou cerca de 4,5 milhões de empregos diretos e indiretos; R\$ 14 bilhões em tributos e foi responsável por investimentos na ordem de R\$ 8 bilhões. Em termos da produção mundial de cana-de-açúcar, em milhões de toneladas, o Brasil é o maior produtor (649; 37,23%), seguido por Índia (348; 19,97%), China (125; 7,17%), Tailândia (74; 4,25%) e México (51; 2,93%). Em termos de informações técnicas da cultura da cana-de-açúcar, no Brasil, segundo o Anuário Estatístico de Agroenergia (2011), o ciclo é de 5 anos, com 5 cortes, produtividade média de 85 toneladas por hectare, produção média de 138 kg/toneladas de açúcar e 82 litros/toneladas de álcool (Tabela 1).

Tabela 1 – Informações técnicas da cultura da cana-de-açúcar, Brasil, 2010

| ITEM | DADOS |
|---------------------------------|-----------------------------|
| Ciclo de cana-de-açúcar | 5 anos |
| Número médio de cortes | 5 cortes |
| Produtividade de cana-de-açúcar | 85 ton/ha |
| Rendimento de açúcar | 138 kg/t |
| Rendimento de álcool | 82 l/t |
| Cultivares registrados no Mapa | 119 (<i>Saccharum L.</i>) |

Fonte: Anuário estatístico de agroenergia (Brasil, 2010b)

A cana-de-açúcar processada pelas usinas brasileiras entre as safras 04/05 e 10/11 evoluiu 56%. Do total processado, as regiões Centro-Sul responderam por 89,7%, com destaque para o Estado de São Paulo, que foi o responsável por 57,5% do processamento nacional, seguido pelos Estados de Minas Gerais (8,8%), Goiás (7,7%), o Paraná (7%) e o Mato Grosso do Sul (5,5%), conforme *ranking* 2010/11.

Percebe-se que a expressividade da cultura canavieira no âmbito nacional e regional é capaz de impactar de forma muito significativa na dinâmica econômica. Nessa perspectiva, observa-se que da safra 1991/92 para a safra 2009/10 houve um incremento de 219,22% na área de cultivo; 299,75% na cana moída; 930,08% na produção de açúcar; 242,99% na produção de etanol anidro; 140,95% na produção de etanol hidratado; e 155,77% na produção de etanol total.

Com o objetivo de prestar serviços à agroindústria de bioenergia **Associação de Produtores de Bioenergia do Estado do Paraná** (ALCOPAR, 2011) presta serviços a raio de abrangência de 30 unidades produtoras situadas no Estado do Paraná, entre elas, 28 são associadas à ALCOPAR.

Analisando a produção da cana-de-açúcar e derivados, pela Unidade Paranacity do Grupo Santa Terezinha, percebe-se na Tabela 2, que a produção tem tendência de crescimento até 2007, reduzindo-se em 2008 e 2009, e voltando a crescer em 2010. Na média, 75% da cana processada é destinada à produção de açúcar VHP³ e 25% à produção do etanol hidratado.

Tabela 2 – Informações de produção, Unidade Paranacity do Grupo Santa Terezinha, período 2005 a 2010

| Ano | 2005 | 2006 | 2007 | 2008 | 2009 | 2010 |
|---------------------|-----------|-----------|-----------|-----------|-----------|-----------|
| Cana processada (t) | 1.444.540 | 1.922.111 | 2.171.539 | 2.160.000 | 1.763.063 | 2.749.993 |
| Açúcar VHP | 77,59% | 77,09% | 76,14% | 71% | 71,11% | 73,50% |
| Etanol Hidratado | 22,41% | 22,91% | 23,86% | 29% | 28,89% | 26,50% |
| Colheita Manual | 100% | 100% | 100% | 80% | 80% | 60% |
| Colheita Mecanizada | - | - | - | 20% | 20% | 40% |

Fonte: Usaçucar (2011)

Para atender a legislação, a partir de 2008 introduziu-se a colheita mecanizada, na proporção de 20% do total, cuja tendência natural é de elevação gradativa até que a mesma represente 100% da cana-de-açúcar colhida. Dados da Tabela 4 indicam que cerca de 40% do pessoal ocupado em Paranacity-PR, trabalha na unidade local do Grupo Santa Terezinha, evidenciando o vigor econômico e social dessa unidade agroindustrial na geração de emprego e renda, contribuição para a formação do PIB municipal e para a arrecadação tributária.

³ O *Very High Polarization* (VHP), por ser menos úmido (max 0,10%), é ideal para exportação, pois facilita o transporte. Toda sua produção é destinada ao mercado externo para o refino em outros países devido sua alta polarização (99,0 a 99,5° Z) (USACUCAR, 2011).

Nesse sentido, a inovação é um objetivo relevante da política industrial, na medida em que as empresas que inovam oferecem uma contribuição para o desenvolvimento econômico maior do que as que não inovam. Tanto em outros países como no Brasil, as empresas e setores inovadores crescem mais e são mais bem sucedidos do que os que não inovam [(MASTROSTEFANO; PIANTA , 2004); (ARBACHE, 2005) E DE NEGRI (2005) APUD PROCHNIK; ARAÚJO (2005).

Com as mudanças organizacionais, a Lei n. 11.241, de 2002, foi estipula que a queima da cana-de-açúcar deve encerrar-se gradativamente em território nacional até 2021, visando reduzir os impactos ambientais e os prejuízos à saúde pública ocasionados pela queima que antecede o corte da cana, prática considerada fundamental para a produtividade. Especificamente para as áreas não propícias ao corte mecanizado, assim como as com declive superior a 12%, terrenos pedregosos, entre outras, o prazo para extinção das queimadas é até 2031 (ALCOPAR, 2006).

Estudos realizados pela Escola Superior de Agricultura Luiz de Queiroz (ESALQ) da Universidade de São Paulo (USP), em Piracicaba (SP), e publicado na revista científica *Global Change Biology Bioenergy*, concluíram que a colheita mecanizada da cana-de-açúcar possibilita duplo ganho ambiental, resultando em menor emissão de Gases de Efeito Estufa e na melhoria da qualidade do solo (AGUIAR, 2010).

Szmrecsányi (2002b) aponta que, no segmento industrial, as principais possibilidades, de melhoria da produtividade e de redução de custos de produção, são: nas etapas do processamento do caldo, que é até hoje o derivado mais importante da cana; nas alternativas de aproveitamento do bagaço, que constitui o principal co-produto do referido processamento; nas alternativas de aproveitamento do melaço, quando o principal produto for o açúcar; nas alternativas de aproveitamento da vinhaça, quando o principal produto for o etanol; e, nas alternativas de aproveitamento dos demais resíduos e subprodutos.

No que diz respeito ao pacote tecnológico, novas técnicas estão sendo introduzidas, especialmente na área de correção do solo e fertilização. A ferti-irrigação é uma prática cada vez mais usada e capaz de permitir aumento significativo nos níveis de produtividade da cana-de-açúcar. Essa prática usa a vinhaça, que é fonte de potássio (K), contém cálcio (Ca), magnésio (Mg), fósforo (P), manganês (Mn) e nitrogênio orgânico, e aproveita, também, a torta de filtro, rica em fósforo (P), possui umidade alta e concentração de matéria orgânica, utilizada em substituição completa ou parcial da adubação mineral (GOES *et al*, 2009).

Segundo Tetti (2002), o Brasil é o maior e mais competitivo produtor mundial de cana-de-açúcar e derivados. Dado o bom desempenho de produtividade e das peculiaridades dos agrícolas da cana-de-açúcar no Brasil, cada tonelada de cana-de-açúcar direcionada para a produção de etanol combustível, em termos do CO₂ gerador do efeito estufa, apresenta um saldo positivo médio da ordem de 0,17 tonelada de CO₂. Ou seja, computadas todas as emissões realizadas no processo de produção do etanol (fase agrícola e industrial) e as emissões resultantes da queima final do etanol como combustível nos veículos, a “absorção” realizada pela cana em sua fase de crescimento apresenta um saldo (de eliminação de CO₂ da atmosfera) de 0,17 toneladas por tonelada de cana cultivada. Estimativas sugerem que a produção nacional adicional de 500 milhões de litros de etanol combustível (e seu consumo) resultaria em um ganho de redução de emissões da ordem de 3.500.000 toneladas/ano de CO₂.

PROCEDIMENTOS METODOLÓGICOS

A triangulação dos dados levantados pelo estudo observacional, entrevistas e análise de documentos permitiu a elaboração da base de dados para a ACV do etanol combustível produzido a partir da cana-de-açúcar, na unidade de Paranacity-PR do Grupo Santa Terezinha.

Na busca de informações para o inventário da ACV na produção do etanol a pesquisa se valeu de dados primários e secundários. Os dados secundários foram coletados na biblioteca de inventários *ecoinvent* v2.2 do sistema SimaPro 7. Os dados primários foram obtidos a partir de informações coletadas na Unidade Paranacity do Grupo Santa Terezinha, em levantamentos *in loco*, realizados nos meses de dezembro de 2011 e janeiro de 2012, seguindo os procedimentos da ISO 14040:2006. As variáveis de estudo para as categorias de impacto ambiental, definidas pelo método CML 2000, são descritas a seguir.

1 - Mudança Climática: Utiliza o modelo de caracterização desenvolvido pelo “*Intergovernmental Panel on Climate Change*” (IPCC). Os fatores de caracterização são expressos como potencial de aquecimento global “*Global Warming Potential*” (GWP) em quilogramas (kg) equivalentes de dióxido de carbono / quilogramas (kg) de emissão.

O GWP de uma substância é a relação entre a contribuição para a absorção do calor de radiação resultante da descarga instantânea de 1 kg de um gás com efeito de estufa e uma igual emissão de dióxido de carbono (CO₂) integrada ao longo do tempo. Fórmula:

$$GWP_i = \frac{\int_0^T a_i c_i(t) dt}{\int_0^T a_{co_2} c_{co_2}(t) dt} \quad (\text{em equivalentes CO}_2) \quad (1)$$

onde: GWP_i - representa o potencial de aquecimento global da substância *i* expresso em equivalentes CO₂; T - representa o horizonte de tempo (20, 100, 500 anos); a_i - efeito de uma unidade de massa de substância (*i*); c_i(*t*) – a concentração da substância (*i*) no tempo (*t*); a_{co2} e c_{co2} – são parâmetros correspondentes para a substância de referência (CO₂).

Horizontes de tempo longos (100 e 500 anos) são utilizados para o efeito cumulativo, enquanto horizontes de tempo curtos (20 anos) traduzem uma indicação dos efeitos de curto-prazo das emissões.

$$Aquecimento\ Global = \sum_i GWP_i \cdot m_i \quad (\text{kg de equivalentes CO}_2) \quad (2)$$

2 - Destruição da Camada de Ozônio: Potenciais de depleção do ozônio, *Ozone Depletion Potential* (ODP) têm sido desenvolvidos pela *World Meteorological Organisation* (WMO) para substâncias que podem contribuir para a destruição da camada de ozônio, em termos similares aos GWPs. O ODP é definido como a relação entre a decomposição do ozônio no estado de equilíbrio devido a emissões anuais (fluxo em kg.ano⁻¹) de uma quantidade de substância emitida para a atmosfera e a

decomposição do ozônio no estado de equilíbrio devida a uma quantidade igual de CFC-11:

$$ODP_i = \frac{\delta[O_3]_i}{\delta[O_3]_{CFC-11}} \quad (\text{equivalentes CFC-11}) \quad (3)$$

onde: ODP_i - representa o potencial de depleção do ozônio da substância i expresso em equivalentes CFC-11; $\delta [O_3]_i$ - representa a alteração na coluna de ozônio no estado de equilíbrio devido à emissão anual da substância (i); $\delta [O_3]_{CFC-11}$ - representa a alteração na coluna de ozônio no estado de equilíbrio devido à emissão anual de CFC-11. O efeito de depleção do ozônio pode ser quantificado através do resultado de efeito único: onde: M_i é a emissão da substância i em quilogramas (kg). O resultado do efeito é expresso em quilogramas (kg) de equivalentes CFC-11.

$$Depleção \text{ Ozônio} = \sum_i ODP_i . m_i \quad (\text{kg de equivalentes CFC-11}) \quad (4)$$

3 – Acidificação: O potencial de acidificação (*Acidification Potential*) (AP) é expresso como quilogramas (kg) equivalentes de SO_2 /quilogramas (kg) de emissão. Os poluentes acidificantes têm uma grande variedade de impactos no solo, água subterrânea, águas superficiais, organismos biológicos, ecossistemas e materiais (edifícios). Exemplos disto são: a mortalidade de peixes, o declínio da floresta e o esfumar dos materiais dos edifícios. As substâncias que mais contribuem para a acidificação são o SO_2 , NO_x e NH_x . O potencial de acidificação é dado pela seguinte expressão:

$$AP_{x,r} = \frac{\sum_{Ae \in j} A_{e \in j} \times \frac{t_{r,x,j}}{CL_{e \in j}}}{\sum_{Ae \in j} A_{e \in j} \times \frac{t_{r,ref,j}}{CL_{e \in j}}} \quad (5)$$

onde: $AP_{x,r}$ – potencial de acidificação regional da substância x na região r ; $A_{e \in j}$ – ecossistema e na célula de grelha j ; $CL_{e \in j}$ – carga crítica para ecossistema e na célula de grelha j ; $t_{r,x,j}$ – fator transporte – fração de $E_{r,x}$ depositada em j ; $E_{r,x}$ – emissão da substância x na região r .

As substâncias acidificantes podem ser agregadas através do AP aplicando a equação: onde: AP_i - representa o potencial de acidificação da substância i ; M_i - massa da substância i quilogramas (kg).

$$Acidificação = \sum_i AP_i . m_i \quad (6)$$

4 – Eutrofização: A eutrofização é o enriquecimento da água ou solo em nutrientes, azoto (N) e fósforo (P), que podem causar uma indesejável mudança na composição de espécies nos ecossistemas e uma redução na diversidade ecológica. Nas águas superficiais a mudança na gama de espécies é geralmente evidente pelo rápido crescimento das algas, o que pode levar a um *déficit* de oxigênio, com os consequentes efeitos na flora e fauna. O potencial de eutrofização (EP) é definido pela expressão:

$$EP_i = \frac{vi / Mi}{v_{PO_4^{3-}} / M_{PO_4^{3-}}} \quad (\text{equivalentes } PO_4^{3-}) \quad (7)$$

A fórmula acima trata da relação entre o potencial de biomassa em equivalentes de azoto (N) (v_i) por quantidade emitida de substância (M_i) e o potencial de biomassa em equivalentes N (v_{ref}) por quantidade emitida de uma substância de referência (M_{ref}). A substância de referência é o PO_4^{3-} . O EP é utilizado para agregar emissões de substâncias potencialmente eutrofizantes, de acordo com a seguinte equação: onde: m_i - representa a emissão da substância i quilogramas (kg). O resultado vem expresso em quilogramas (kg) de equivalentes.

$$\text{Eutrofização} = \sum_i EP_i \cdot m_i \quad (\text{kg de equivalentes}) \quad (8)$$

5 - Ecotoxicidade de Águas Doces: Os potenciais de ecotoxicidade (FAETP) são calculados com o USES-LCA, descrevendo o destino, exposição e efeitos das substâncias tóxicas. Fatores de caracterização são expressos como equivalentes 1,4 diclorobenzeno/ quilogramas (kg) de emissão. Para calcular a ecotoxicidade aquática de água doce a fórmula é:

$$FAETP_{i,ecomp} = \frac{PEC_{i,ecomp, \acute{a}guadoce} \times E_{i, \acute{a}guadoce}}{PEC_{1,4\text{-diclorobenzeno}, \acute{a}guadoce} \times E_{1,4\text{-diclorobenzeno}, \acute{a}guadoce}} \quad (9)$$

onde: $FAETP_{i,ecomp}$ – potencial de ecotoxicidade aquática na água doce da substância i emitida para o compartimento de emissão $ecomp$ (adimensional); $PEC_{i,ecomp, \acute{a}guadoce}$ – concentração ambiental prevista na água doce da substância i devido à sua emissão para o compartimento de emissão $ecomp$ ($kg \cdot m^{-3}$); $PEC_{1,4\text{-diclorobenzeno}, \acute{a}guadoce}$ – é a mesma concentração prevista que a anterior mas para o 1,4 diclorobenzeno ($kg \cdot m^{-3}$); $E_{i, \acute{a}guadoce}$ – fator efeito, representando o impacto tóxico da substância i no ecossistema água doce ($m^3 \cdot kg^{-1}$); $E_{1,4\text{-diclorobenzeno}, \acute{a}guadoce}$ – é o mesmo fator efeito que o anterior mas para o 1,4 diclorobenzeno ($m^3 \cdot kg^{-1}$).

6 - Toxicidade Humana: Os fatores de caracterização, expressos como potenciais de toxicidade humana “*Human Toxicity Potential*” (HTP), são calculados com o *Uniform System for the Evaluation of Substances in Life Cycle Assessment* (USES-LCA), descrevendo o destino, exposição e efeitos das substâncias tóxicas para um horizonte de tempo infinito. Para cada substância tóxica, HTP's são expressos como equivalentes 1,4 diclorobenzeno/kg de emissão.

$$HTP_{i,ecomp} = \frac{\sum_{fcomp} \sum_r F_{i,ecomp, fcomp} \times T_{i, fcomp, r} \times I_r \times E_{i, r}}{\sum_{fcomp} \sum_r F_{refi, refcomp, fcomp} \times T_{refi, fcomp, r} \times I_r \times E_{refi, r}} \quad (10)$$

onde: $HTP_{i,ecomp}$ – potencial de toxicidade humana (*Human Toxicity Potential*), o fator de caracterização para toxicidade humana da substância i emitida para o compartimento de emissão $ecomp$; $F_{i,ecomp, fcomp}$ – “fator destino” - representando o transporte intermediário da substância i do compartimento de emissão $ecomp$ para

o compartimento final f_{comp} e degradação dentro do compartimento $ecom_p$; $T_{i,f_{comp},r}$ – “fator de transferência” - a fração de substância i transferida de f_{comp} para o modo de exposição r (ar, água de beber, peixe, plantas, carne, leite, etc.); I_r – “fator dose” – representando a dose humana via modo de exposição r , assim, uma função da dose diária de ar, água de beber, peixe, etc.; $E_{i,r}$ – “fator efeito” - representando o efeito tóxico da dose de substância i via modo de exposição r .

A Avaliação do Ciclo de Vida (ACV) - *Life Cycle Assessment (LCA)* - é uma técnica de avaliação de impacto ambiental associado a um produto ou serviço, durante o seu ciclo de vida (GOEDKOOOP, 1998; HUNT; FRANKLIN, 1996). As avaliações do ciclo de vida de produtos, processos e serviços avaliam os aspectos ambientais e os impactos potenciais associados, desde a extração dos recursos naturais até o uso e disposição final do produto.

Um estudo de ACV é dividido em quatro fases. Na primeira fase, Definição e Escopo, o propósito do estudo e sua amplitude são definidos, envolvendo decisões importantes sobre as fronteiras e a unidade funcional. Na fase de Análise e Inventário, informações sobre o sistema do produto são levantadas e as entradas e as saídas consideradas relevantes para o sistema são quantificadas. Na fase de Avaliação de Impacto, os dados e as informações gerados da Análise de Inventário são associados a impactos ambientais específicos, de modo que o significado destes impactos potenciais possa ser avaliado. E, na fase de Interpretação, os resultados obtidos nas fases de Análise de Inventário e de Avaliação de Impacto são combinados e interpretados de acordo com os objetivos definidos previamente no estudo.

De acordo com a *U.S. Environmental Protection Agency and Science Applications International Corporation – USEPA (2001) apud Ferreira (2004)*, na elaboração de um estudo de ACV, os pesquisadores podem: desenvolver uma sistemática avaliação das consequências ambientais associadas com um dado produto; analisar os balanços (ganhos/perdas) ambientais associados com um ou mais produtos/processos específicos de modo a que os *stakeholders* aceitem uma ação planejada; quantificar as descargas ambientais para o ar, água, e solo relativamente a cada estágio do ciclo de vida e/ou processos que mais contribuem. avaliar os efeitos humanos e ecológicos do consumo de materiais e descargas ambientais para a comunidade local, região e o mundo; e comparar os impactos ecológicos e na saúde humana entre dois ou mais produtos/processos rivais ou identificar os impactos de um produto ou processo específico;

O estudo foi conduzido de acordo com a norma ISO 14040 (2006) – *Environmental Management – Life Cycle Assessment – Principles and Framework*, objetivando identificar os pontos críticos no ciclo de vida do etanol combustível e propor melhorias no produto, propiciando otimização e elaboração de políticas.

Os dados coletados referem-se à produção de 1m^3 de etanol hidratado destinado à exportação, que foi a unidade funcional adotada, cuja cana-de-açúcar foi cultivada numa área de 38.678 ha, na localidade de Paranacity-PR e municípios circunvizinhos. Foram contabilizados todos os insumos necessários para a produção do etanol hidratado em termos de uso de fertilizantes, corretivos, defensivos agrícolas, água, óleo diesel e energia, bem como a disposição de resíduos.

O sistema avaliado incluiu o cultivo agrícola da cana-de-açúcar, a colheita, o beneficiamento, a estocagem e o transporte por caminhões até o porto para exportação. Somente as entradas e saídas associadas ao cultivo da cana-de-açúcar foram consideradas nas fronteiras deste estudo. A produção de fertilizantes, corretivos e pesticidas não foi incluída, mas somente seu consumo. A abrangência temporal

deste estudo foi a safra de 2011, iniciada em 28 de março e concluída em 10 de novembro de 2011.

A análise da produção do etanol considerou os principais processos da cadeia produtiva. O ciclo industrial se dá da seguinte forma: a matéria-prima é recebida na Usina e a cana classificada para análise passa pelo laboratório de Pagamento de Cana por Teor de Sacarose, onde é amostrada por sonda nos pontos específicos determinados para a carga.

Vale destacar que a partir da cana-de-açúcar é possível a produção de três tipos de álcool: i) o anidro, utilizado como combustível diluído na gasolina e na indústria de transformação; ii) o hidratado, utilizado como combustível, e, iii) o neutro, utilizado na indústria de alimentos, cosméticos, química e farmacêutica.

Dentre as ferramentas de Avaliação de Ciclo de Vida, destacam-se: o *Ecoindicator 95*; o *Ecoindicator 99*; o EDIP; o TRACI e o CML 2000. Nesse estudo é utilizado o Método CML 2000, considerado um método "multi-fase", sendo um dos primeiros métodos de avaliação, desenvolvido e utilizado em vários países. (FERREIRA, 2004) Com o CML 2000 serão avaliadas as seguintes categorias de impacto: mudança climática; destruição da camada de ozônio; acidificação; eutrofização; ecotoxicidade de águas doces; toxicidade humana.

O software utilizado será o SimaPro 7, desenvolvido pela empresa *Pré Consultants*, e que se trata de uma ferramenta profissional para coletar, analisar e monitorar o desempenho ambiental de produtos, processos e serviços. Ele permite modelar e analisar dos mais complexos aos mais simples ciclos de vida de uma forma sistemática e transparente, seguindo as recomendações da série ISO 14040 (PRÉ, 2011).

Para verificar a qualidade dos dados utilizou-se a matriz *pedigree* e o *material inventariado* é classificado com base em seis critérios. Nesta matriz, os dados são interpretados de acordo com as características dispostas nas linhas e, posteriormente, recebem pontuações de acordo com a confiabilidade dos dados coletados (dispostos nas colunas) – 1,0 mais confiáveis e 2,0 menos confiáveis.. Em seguida, determinou-se um vetor *pedigree*, representados pelos números de 1 a 5. para cada um dos requisitos confiança, integralidade, correlação temporal, correlação geográfica, correlação tecnológica e tamanho da amostra.

Definido este vetor *pedigree*, o vetor resultado ($U_1 - U_6$), e identificado a incerteza básica para cada tipo de emissão (U_b), calcula-se a variância, em que o valor da variância encontrado foi incluído no *software* para fazer o estudo de sensibilidade dos resultados. Esta etapa permitiu avaliar a incerteza dos resultados no final do estudo, ou seja, o quanto os resultados poderiam variar.

Após o objetivo e âmbito do estudo estarem claramente definidos, a fase seguinte da metodologia ACV é a análise de inventário que identifica e quantifica as entradas e saídas do sistema de produto investigado. O processo de condução de uma análise de inventário é dinâmico, pois à medida que os dados são conhecidos e mais informação acerca do sistema é adquirida, novos requisitos de dados ou limitações podem ser identificados, requerendo uma alteração nos procedimentos de coleta de dados, para que os objetivos do estudo ainda sejam satisfeitos (FERREIRA, 2004).

Para análise do inventário e de acordo com a norma ISO 14040, devem ser recolhidos os dados qualitativos e quantitativos para cada processo unitário que esteja incluído dentro dos limites do sistema. A Avaliação de Impactos do Ciclo de Vida (AICV) é definido como sendo um processo técnico, quantitativo e/ou qualitativo, para

Análise ambiental do Ciclo de Vida do Etanol Combustível

caracterizar e avaliar os efeitos das cargas ambientais identificadas no componente inventário (CONSOLI *et al*, 1993 *apud* FERREIRA, 2004).

Para uma AICV, os impactos são definidos como as consequências causadas pelos fluxos de entrada e de saída de um sistema na saúde humana, plantas e animais, ou a disponibilidade futura dos recursos. Os procedimentos podem ser distinguidos entre procedimentos “fase-única” e procedimentos “multi-fase” (HAES, 1996 *apud* FERREIRA, 2004). A principal razão para uma abordagem “fase-única” é a simplicidade de aplicação, mas sobretudo à sua maior transparência, o procedimento “multi-fase” tem sido preferido.

Quadro 1 – Lista de categorias de impacto para AICV

| Categorias de Impacto | Áreas Gerais para Proteção | | |
|---|----------------------------|--------------|-----------------|
| | Recurso | Saúde Humana | Saúde Ecológica |
| A) Depleção de Recursos | | | |
| Recursos Abióticos | + | | |
| Recursos Bióticos | + | | |
| B) Poluição | | | |
| Aquecimento Global | | (+) | + |
| Depleção do Ozônio | | (+) | (+) |
| Formação de Oxidantes Fotoquímicos | | + | + |
| Acidificação | | (+) | + |
| Eutrofização (ou Nitrificação) | | | + |
| Toxicidade Humana | | + | |
| Ecotoxicidade | | (+) | + |
| C) Degradação de Ecossistemas e Paisagem | | | |
| Utilização do solo | | | + |

Fonte: ISO 14047 *apud* Ferreira (2004)

De acordo com a ISO 14040 os pontos de partida relevantes para a definição das categorias de impacto e indicadores de categoria e para os correspondentes fatores de equivalência são sintetizados no Quadro 2, de forma que os símbolos + significa impacto potencial direto; e (+) significa impacto potencial indireto. Como evidenciado no Quadro 2, os impactos ambientais podem ser diretos e indiretos.

RESULTADOS E DISCUSSÃO

A unidade Paranacity iniciou suas atividades em março de 1987 e tem seu *mix* de produção voltado para o açúcar *Very High Polarization* (VHP) e pode chegar a moer 9.000 toneladas/*mix* por dia, e produzir simultaneamente 1.000 toneladas de açúcar *vhp* e 180.000 litros de etanol hidratado. Na safra 2011 a usina possuía 3.500 funcionários, distribuídos da seguinte forma: i) 82 na área administrativa; ii) 426 na área industrial e, iii) 2.992 na área agrícola.

Nessa unidade, além da área destinada à produção da cana-de-açúcar que em 2011 foi 38.678 ha, são destinados 1.500 ha para formação de mudas e 3.500 ha para realizar novos plantios. A análise descritiva a seguir é baseada na safra 2011, iniciada em 28 de março e concluída em 10 de novembro de 2011. Foram processadas nesse período, 2.231.286 toneladas de cana, sendo 60% colhidas de forma manual (1.338.772 toneladas) e 40% de forma mecanizada (892.514 toneladas). A produtividade média foi 57,69 toneladas/ha, bem abaixo da média nacional (85 toneladas/ha), que pode ser explicada pela idade dos canaviais (7,98 cortes). Do total

de cana processada, 75,20% foram destinados à produção de açúcar VHP e 24,80% para a produção de etanol hidratado.

No que se refere a produção de açúcar e álcool, foram produzidas 4.448.704 sacas (50 kg cada) de açúcar VHP e 48.891.480 litros de etanol hidratado, ambos destinados a exportação para Europa e Ásia. Em termos de produtividade média, produziu-se 88,37 litros de etanol hidratado/tonelada e 100 kg de açúcar VHP/tonelada, comparativamente a 82 litros de álcool/tonelada e 138 kg de açúcar/tonelada da média nacional.

Em termos de uso de água no processamento de 2.231.286 toneladas de cana, foram utilizados 6.693.858 m³ de água, equivalente a 3 m³/tonelada, em média. A água é reaproveitada em circuito fechado, sendo a água residual destinada à decantação e posteriormente à compostagem.

A produção de 48.891.480 litros de etanol hidratado resultou na geração de 488.914.800 litros de vinhaça, que foi 100% utilizada na ferti-irrigação. Na média, cada 1 litro de etanol hidratado gerou 10 litros de vinhaça.

A unidade funcional escolhida foi a produção de 1 m³ de etanol hidratado destinado à exportação via Porto de Paranaguá - PR. A Tabela 3 sintetiza os dados de produção, consumo de recursos e geração de resíduos, considerando essa unidade funcional.

Tabela 3 – Dados de produção, consumo de recursos e geração de resíduos, considerando a unidade funcional de Santa Terezinha - 2011

| Descrição | Quantidade | Unidade |
|----------------------------|------------|----------------|
| Cana processada | 11,32 | toneladas |
| Água consumida | 33,95 | m ³ |
| Energia elétrica consumida | 1.008 | Kw |
| Óleo diesel | 950 | litros |
| Vinhaça | 10.000 | litros |
| Bagaço gerado | 2.943,2 | kg |
| Torta de filtro | 412,24 | kg |

Fonte: Elaboração a partir de dados da pesquisa

O consumo teórico de bagaço utilizado na produção de vapor foi 11.571.173 toneladas, gerando 279.188.840 KW de energia elétrica, dos quais 198.697.160 KW foram consumidos pela Unidade Paracity e 80.491.680 KW foram exportados para a Companhia Paranaense de Energia (COPEL).

A produção de açúcar e etanol hidratado gerou 81.271.750 kg de torta de filtro, que foi utilizada 100% como adubo orgânico. Na média foram produzidos 36,43 kg de torta de filtro/tonelada de cana, acima do ideal que é 30 kg/tonelada. O montante médio de terra retirada da cana no processo industrial foi 19,97 kg/tonelada.

Em termos de distribuição varietal, em 2011, a Unidade Paracity utilizou 27 variedades de cana, das 119 possíveis de serem utilizadas no Brasil. Dados pluviométricos da Usina apontam que no ano a precipitação média foi 1.213 mm e na safra 2011, 610 mm. A indústria processou 542.467 toneladas/hora. Sendo que das 5.358,75 horas possíveis de serem utilizadas na moagem, na safra 2011, houve perda de 1.245,53 horas, distribuídas da seguinte forma: chuva: 953,67 horas; causa agrícola: 66,16 horas; e, causa industrial: 225,7 horas.

Na safra 2011 trabalhou-se com os seguintes custos-padrão: R\$ 19,50/tonelada no corte manual e R\$ 20,50 no corte mecanizado. No manejo agrícola e no transporte da cana e do etanol hidratado até o Porto de Paranaguá, consumiu-se 111.564 litros de óleo diesel. Na fase agrícola, o consumo de herbicidas, inseticidas, nematicidas, formicidas e o controle da broca da cana está retratado na

Análise ambiental do Ciclo de Vida do Etanol Combustível

Tabela 4. Os herbicidas representam a classe de agrotóxicos mais empregada na cultura da cana-de-açúcar, sendo importante o seu monitoramento nos corpos hídricos. A Avaliação do Impacto do Ciclo de Vida (AICV) do etanol hidratado produzido pela Unidade Paranacity do Grupo Santa Terezinha levou em consideração a coleta primária de dados. Para elementos faltantes e aos processos secundários, foi empregada a biblioteca de inventários *ecoinvent* v2.2, a qual inclui inventários para a cana-de-açúcar, etanol hidratado e matriz energética nacionais.

Tabela 4 – Consumo de agrotóxicos na cana, safra 2011

| Produtos | Quantidade | Unidade |
|-----------------|-------------------|----------------|
| Herbicidas | | |
| Tebuthiuron | 77.356 | litros |
| Ametrina | 232.068 | litros |
| Diuran | 77.356 | kg |
| Hexazinona | 13,5373 | kg |
| Trifluralina | 96.695 | litros |
| Sulfentrazone | 46.413,60 | litros |
| Metolacoloro | 77.356 | litros |
| Clomazona | 46.413,60 | litros |
| Isoxaflutole | 4.254,58 | kg |
| Imazapic | 7.735,60 | Kg |
| Inseticida | | |
| Imidacloprid | 65,76 | kg |
| Broca da Cana | | |
| Certero | 30,94 | litros |
| Nematicida | | |
| Carbofuran | 193.390 | litros |
| Formicida | | |
| Mirex S | 1.933 | kg |

Fonte: Elaborado a partir de dados da pesquisa (2011)

Quanto à análise dos resultados, utilizou-se o método CML 2000, sendo empregada a Análise de Incerteza e a Análise de Sensibilidade para as seguintes características: inclusão da produção de defensivos químicos; comparação com inventários disponíveis no *ecoinvent*; e exclusão dos processos de infraestrutura.

No Quadro 2 apresenta-se a correlação de produtos químicos que foram escolhidos para os defensivos utilizados pela Unidade Paranacity, na safra 2011.

Quadro 2 – Correlação de defensivos agrícolas utilizados

| Produtos | Produto Químico Escolhido no Ecoinvent |
|---------------------------|---|
| Herbicidas | |
| Tebuthiuron | <i>Urea, as N, at regional storehouse/RER U</i> |
| Ametrina | <i>Triazine-compounds, at regional storehouse/RER U</i> |
| Diuran | <i>Diuron, at regional storehouse/RER U</i> |
| Hexazinona | <i>Triazine-compounds, at regional storehouse/RER U</i> |
| Trifluralina | <i>Dinitroaniline-compounds, at regional storehouse/RER U</i> |
| Sulfentrazone | <i>Herbicides, at regional storehouse/RER U</i> |
| Metolacoloro | <i>Metolachlor, at regional storehouse/RER U</i> |
| Clomazona | <i>Herbicides, at regional storehouse/RER U</i> |
| Isoxaflutole | <i>Herbicides, at regional storehouse/RER U</i> |
| Imazapic | <i>Herbicides, at regional storehouse/RER U</i> |
| Inseticida - Imidacloprid | <i>Insecticides, at regional storehouse/RER U</i> |
| Broca da Cana - Certero | <i>Insecticides, at regional storehouse/RER U</i> |
| Nematicida - Carbofuran | <i>Carbofuran, at regional storehouse/RER U</i> |
| Formicida - Mirex S | <i>Pesticide unspecified, at regional storehouse/RER U</i> |

Fonte: Elaborado a partir de dados da pesquisa

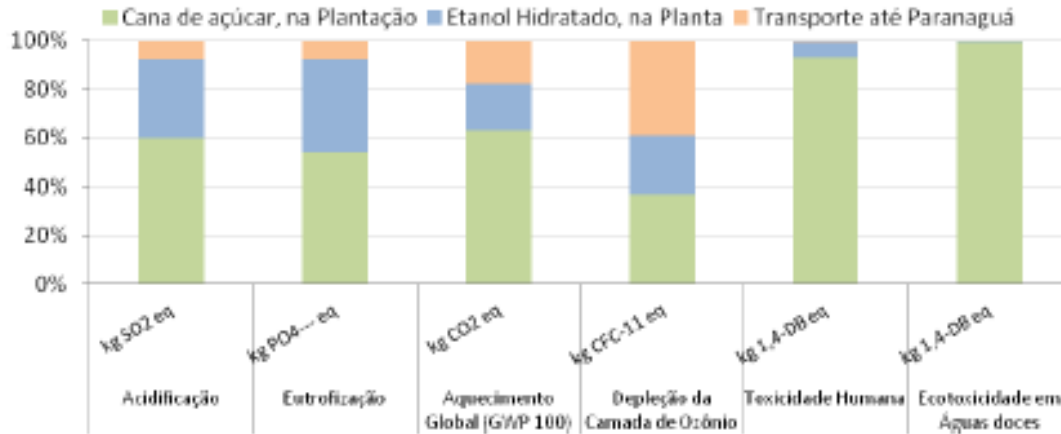
A unidade funcional escolhida foi a produção de 1 m³ de etanol hidratado destinado à exportação via Porto de Paranaguá - PR. Todos os resultados apresentados na avaliação das categorias de impacto ambiental referem-se à produção de 1m³ de etanol hidratado, com o reuso de água, aproveitamento da vinhaça na ferti-irrigação, da torta de filtro como adubo orgânico e do bagaço na co-geração de energia elétrica.

Avaliação das Categorias de Impacto

A Figura 4 demonstra uma visão global da caracterização dos impactos relacionados ao ciclo de vida, do berço ao porto, do etanol hidratado fermentado em Paranaity. Conclui-se, que a fase agrícola deste produto representa, relativamente, o maior impacto ambiental potencial quando confrontada com a etapa industrial e de transporte do biocombustível ao Porto de Paranaguá.

Percebe-se que o destaque para as Categorias de Impacto fica por conta das categorias atreladas às questões de Toxicidade Humana e Ecotoxicidade em Águas Doces, em que a relevância do plantio de cana supera a contribuição de 90%. A preponderância das interferências ambientais da fase agrícola somente não se manifesta na Depleção da Camada de Ozônio. Para as demais fases deste ciclo de vida, os ápices de relevância para a fermentação do etanol e do transporte do produto ocorrem, respectivamente, nas categorias de Eutrofização e Depleção da Camada de Ozônio.(Figura 4)

Figura 4 – Etapa de caracterização do impacto do ciclo de vida do etanol hidratado – do berço ao porto de Paranaguá – PR, BR

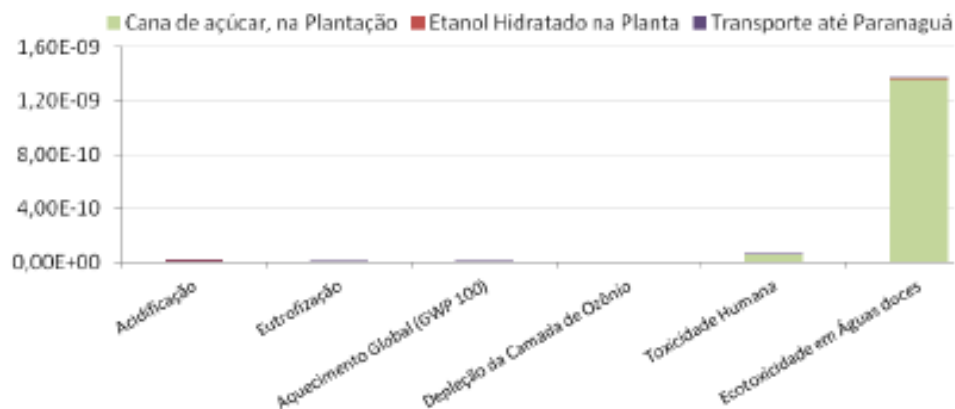


Fonte: Elaborado a partir de dados da pesquisa (2011)

Por se tratarem de resultados do tipo “ponto médio” é a partir da análise da Figura 5 que se aumenta a certeza de que a fase agrícola seja aquela que deva receber a atenção para eventuais melhorias e ações mitigadoras do impacto ambiental.

Análise ambiental do Ciclo de Vida do Etanol Combustível

Figura 5 – Normalização dos impactos ambientais, considerando o impacto médio de um cidadão, sob perspectiva global de 1995



Fonte: Elaborado a partir de dados da pesquisa

Embora não seja uma fase obrigatória da AICV, segundo a série de Normas ISO 14040, até pela inexistência de fatores de normalização nacionais, na sequência do Relatório, será respeitada uma ordem decrescente de relevância dos resultados relatados na Normalização. Desta forma, realizam-se análises de contribuição acerca das categorias de impacto expostas.

Inicialmente, porém, cumpre definir alguns conceitos a serem utilizados na interpretação de resultados:

- Limite de Corte de Relevância: serão disponibilizados apenas os processos cuja contribuição seja maior ou igual ao limite estabelecido (0,3% para ecotoxicidade em águas doces, por exemplo) do total de impacto ambiental em questão. Ou seja, trata-se de um critério de corte para facilitar a interpretação e visualização de uma rede ou árvore.
- Diagramas de Sankey: são um tipo específico de diagrama de fluxo, em que a largura das setas é proporcional à quantidade de fluxo. As setas que ligam um processo ao outro são representativas do fluxo existente entre estes processos e esta forma de visualização facilita a interpretação em rede;
- Análise em Rede: auxilia na interpretação dos impactos ambientais e na identificação de quais processos ou etapas do ciclo de vida são mais contribuintes aos resultados sob avaliação. Tem-se informações da quantidade utilizada deste processo, do nome do processo e da contribuição que exerce nos diferentes níveis horizontais. Mas tais níveis não necessariamente somarão 100%, em decorrência do limite de corte estabelecido. Assim, quando se estuda a Rede de Ecotoxicidade em Águas Doces (cujo limite de corte é 0,3%), por exemplo, conclui-se que a fase agrícola tem uma participação de 99,2% no impacto ambiental desta categoria para o ciclo de vida do etanol hidratado do berço ao porto;
- Total de Todos os Processos: é o somatório de todos os impactos ao longo do ciclo de vida inteiro (fases agrícola, industrial e de transportes); e,
- Processos Restantes: são representados por aqueles que foram excluídos em decorrência do limite de corte estabelecido.

Análise de Contribuição – Ecotoxicidade em Águas Doces

A análise aprofundada desta categoria de impacto revela que a utilização de defensivos agrícolas é o principal fator à contribuição da etapa de plantio para o resultado encontrado. Uma avaliação da Tabela 5 e da Figura 3 pode fazer crer que

os processos de fim de vida atrelados à infraestrutura, à produção de energia elétrica e à produção dos maquinários agrícolas são as etapas do ciclo de vida mais contribuintes à Ecotoxicidade em Águas doces.

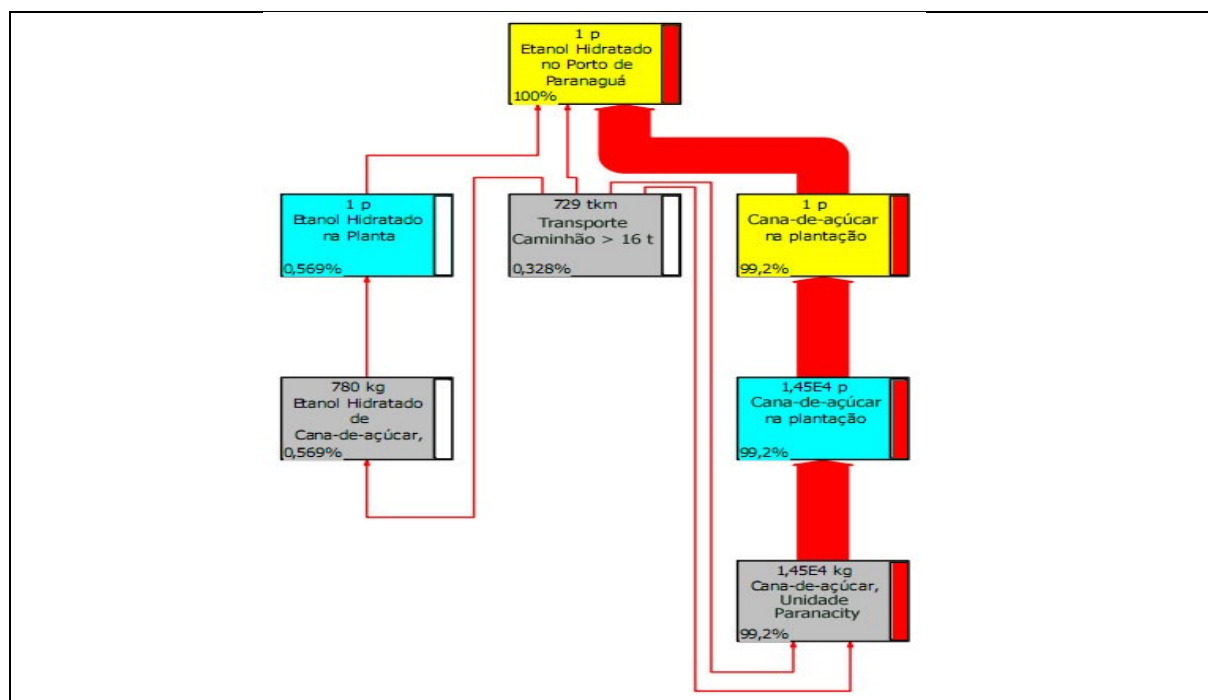
Entretanto, identifica-se a massiva contribuição das substâncias *Metolacoloro*, *Carbofuran*, *Atrazina* e *Diuron* para este impacto, em especial, quando da confrontação do inventário da cana-de-açúcar com os fatores de caracterização do método CML 2000.

Tabela 5 – Relação dos processos mais relevantes à Ecotoxicidade em Águas Doces

| Processo - Etanol Hidratado (Berço ao Porto) | Total (kg 1,4-DB eq) | Porcentagem |
|--|----------------------|-------------|
| Total de todos os processos | 2789,8881 | 100 |
| Processos restantes | 2760,85483 | 99 |
| Destinação, cinzas de madeira | 7,0428178 | 0,252 |
| Destinação, resíduo sulfídrico | 5,2578636 | 0,188 |
| Destinação, escória de fundição de níquel | 4,9806339 | 0,179 |
| Destinação, resíduo de mineiração de lignita | 4,9228621 | 0,176 |
| Destinação, resíduo de mineiração de carvão | 3,1240555 | 0,112 |
| Destinação, lodo de bauxita | 1,9045189 | 0,0683 |
| Destinação, escória de aço | 1,8004872 | 0,0645 |

Fonte: Elaborado a partir de dados da pesquisa (2011)

Figura 6 - Relação da contribuição de cada etapa à Ecotoxicidade em Águas Doces, segundo Rede, considerando limite de corte de relevância de 0,3%.



Fonte: Elaborado a partir de dados da pesquisa

Os resultados da Figura 6 indicam que os impactos à Ecotoxicidade em Águas Doces da fase agrícola são 174 vezes maiores que aqueles oriundos da fase industrial. Caso fertilizantes fossem utilizados no plantio, seria possível verificar ainda a respectiva contribuição destas substâncias à Ecotoxicidade em Águas Doces, fato comum segundo a literatura disponível. A não contabilização da produção de pesticidas e demais químicos, influi igualmente sobre estes resultados. Os resultados corroboram a conclusão de Ometto (2005), dado que a ecotoxicidade hídrica pode ser causada principalmente, pelas atividades de preparo do solo e tratos culturais, devido

ao uso intensivo de agrotóxicos no solo, que apresentam a possibilidade de percolação ou lixiviação para os recursos hídricos.

Segundo Bortoluzzi *et al* (2006), a transferência de moléculas de agrotóxicos dos ecossistemas terrestres aos aquáticos é uma constante, sobretudo em áreas agrícolas devido ao uso de quantidades elevadas e de tipos diferentes de princípios ativos por área e às altas taxas de erosão do solo. A poluição oriunda da atividade agrícola é considerada do tipo difusa, de difícil identificação, monitoramento e, conseqüentemente, controle.

Análise de Contribuição – Toxicidade Humana

Em decorrência da similaridade desta categoria de impacto com a Ecotoxicidade em Águas doces e como pode ser observado nos gráficos anteriores, novamente têm-se processos ligados ao plantio como os mais contribuintes aos resultados. Assim, o emprego de produtos químicos como *Carbofuran* e *Diuron* desempenha expressiva participação para os resultados.

A infraestrutura necessária ao ciclo de vida em análise também exerce um importante papel à Toxicidade Humana, já que a produção do maquinário e da planta se faz presente. O diferencial, nesta situação, é a perda de relevância dos resíduos de fontes energéticas, aparentemente substituídos pela destinação de cinzas. Confirmando Ometto (2005), os resultados dos potenciais de Toxicidade Humana das atividades do ciclo de vida do etanol hidratado, indicam a via aérea a de maior contribuição, devido, principalmente, à atividade de colheita da cana, pelos gases tóxicos emitidos na queimada de cana, incluindo o material particulado emitido, e pelo uso de diesel nos caminhões, nas máquinas agrícolas e nos ônibus.

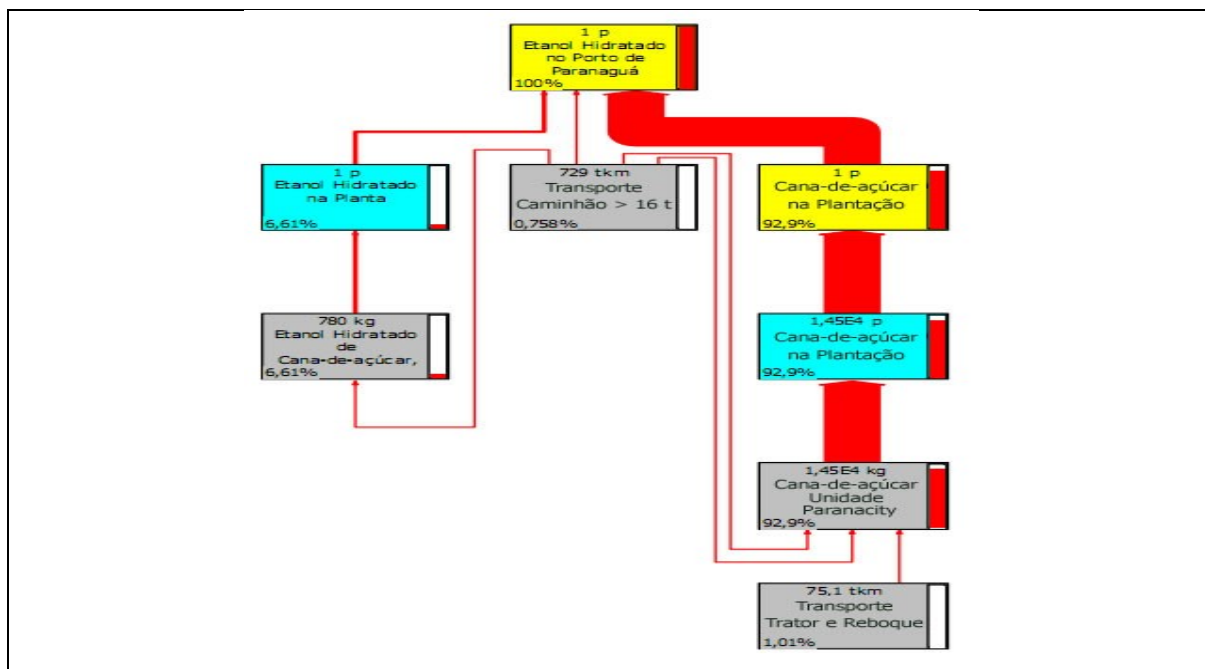
No entanto, agora nota-se uma maior influência da etapa industrial, já que na listagem de contribuição dos processos observa-se, com maior influência, a infraestrutura da planta de fermentação, conforme aponta a Tabela 6.

Tabela 6 - Relação dos processos mais relevantes à Toxicidade Humana

| Processo - Etanol Hidratado (Berço ao Porto) | Total (kg 1,4-DB eq.) | Porcentagem |
|--|-----------------------|-------------|
| Total de todos os processos | 3262,0318 | 100,000 |
| Processos restantes | 3189,4832 | 97,776 |
| Ferro Cromo Alto Carbono | 21,2570 | 0,652 |
| Alumínio, primário | 9,5026 | 0,291 |
| Ânodo, eletrólise de alumínio | 9,2513 | 0,284 |
| Destinação, cinzas de madeira | 7,7688 | 0,238 |
| Destinação, resíduo sulfídrico | 7,4539 | 0,229 |
| Cobre, primário | 6,9332 | 0,213 |
| Transporte, trator e trailer | 6,5113 | 0,200 |
| Descarga de água após tratamento | 3,8706 | 0,119 |

Fonte: Elaborado a partir de dados da pesquisa (2011).

Figura 7 - Considerando limite de corte de relevância de 0,69%



Fonte: Elaborado a partir de dados da pesquisa (2011)

A Figura 7 apresenta a relação das etapas do ciclo de vida do etanol hidratado com esta categoria. Segundo Trapé (2010), os agrotóxicos podem determinar efeitos sobre a saúde humana, dependendo da forma e tempo de exposição e do tipo de produto por sua toxicidade específica. De acordo com o tempo de exposição, podem determinar três tipos de intoxicação: aguda, sobreaguda e crônica. O maior número de casos de intoxicação se concentra entre 20 e 40 anos, sendo que as doenças causadas pelos agrotóxicos representam um grave problema de saúde pública.

Análise de Contribuição – Acidificação

O consumo de combustíveis fósseis pesados é dominante para os impactos ambientais observados nesta categoria de impacto. Razão pela qual se visualiza os processos ligados ao transporte e à queima de diesel e gás natural, além da utilização de ácido sulfúrico na planta de fermentação, conforme Tabela 7.

Tabela 7 – Relação dos Processos mais relevantes à Acidificação

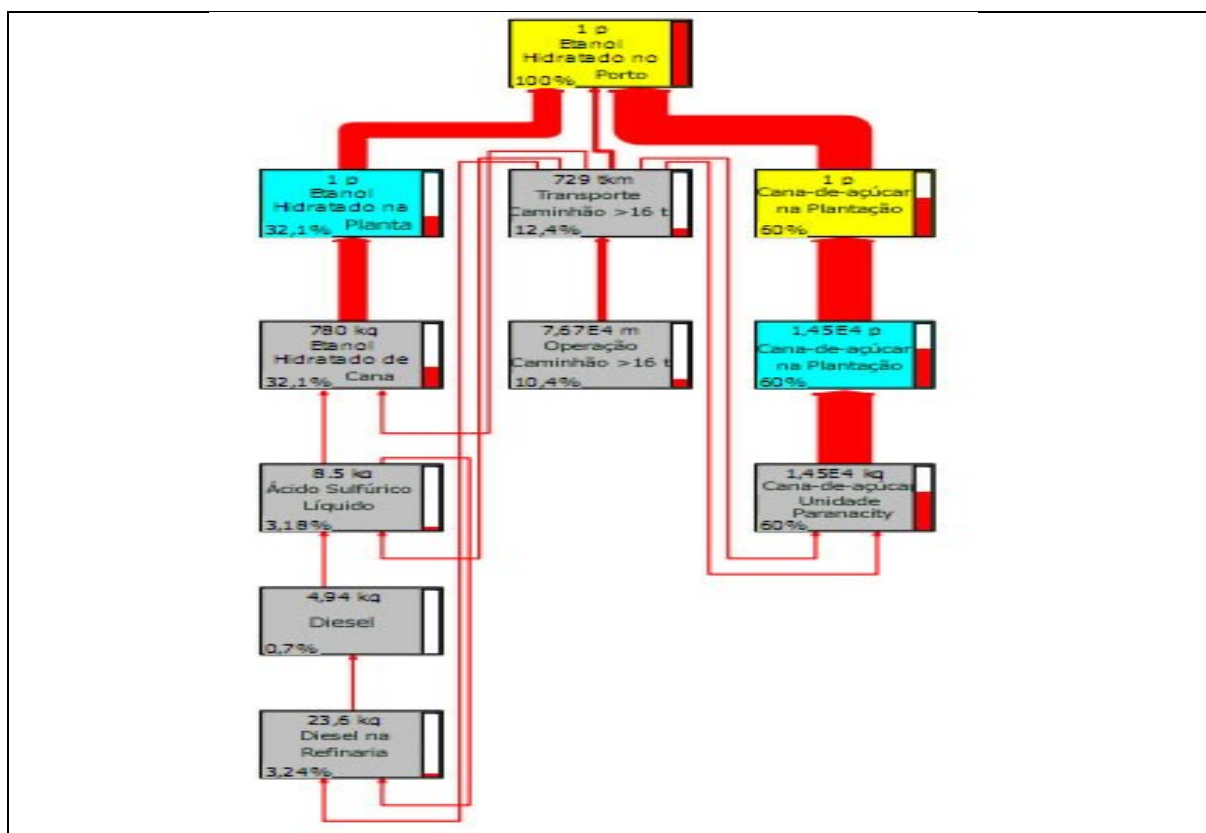
| Processo - Etanol Hidratado (Berço ao Porto) | Total (kg SO ₂ eq) | Porcentagem |
|--|-------------------------------|-------------|
| Total de todos os processos | 4,2428 | 100 |
| Processos restantes | 3,5435 | 83,518 |
| Operação de caminhão >16t | 0,3431 | 8,086 |
| Gás natural rico em Enxofre, queimado em flare | 0,0703 | 1,657 |
| Transporte, trator e trailer | 0,0679 | 1,600 |
| Enxofre secundário, na refinaria | 0,0662 | 1,561 |
| Ácido Sulfúrico, Líquido | 0,0622 | 1,467 |
| Operação de caminhão 3,5-16t | 0,0328 | 0,774 |
| Operação, petroleiro transoceânico | 0,0291 | 0,685 |
| Diesel, queimado em máquina | 0,0277 | 0,652 |

Fonte: Elaborado a partir de dados da pesquisa (2011).

Análise ambiental do Ciclo de Vida do Etanol Combustível

A amônia, outra substância vital para este fenômeno, provém, sobretudo, dos processos iniciais para a extração do minério de ferro, sendo, especificamente a substância com maior impacto ambiental à Acidificação. A Figura 5, considerando um limite de corte de relevância de 3,15%, ilustra a Rede do ciclo de vida deste produto para a Acidificação e ratifica as análises feitas, estando também e acordo com o gráfico de caracterização. Corroborando os resultados de Ometto (2005), observa-se que a fase agrícola responde por 60% de contribuição aos impactos desta categoria, com destaque para a colheita da cana, que apresenta o maior potencial de impacto para a acidificação, devido principalmente aos óxidos de nitrogênio (NOx) emitidos durante a queimada da cana (Figura 8).

Figura 8 – Relação da contribuição de cada etapa à Acidificação, segundo Rede, considerando limite de corte de relevância de 3,15%



Fonte: Elaborado a partir de dados da pesquisa (2011)

Análise de Contribuição – Eutrofização

A eutrofização afeta sistemas aquáticos e a qualidade destes ecossistemas, em virtude do excesso de nutrientes e matéria orgânica, tem origem bastante diversificada no ciclo de vida em estudo. A Tabela 8 elenca os processos mais representativos.

Tabela 8 – Relação dos Processos mais relevantes à Eutrofização

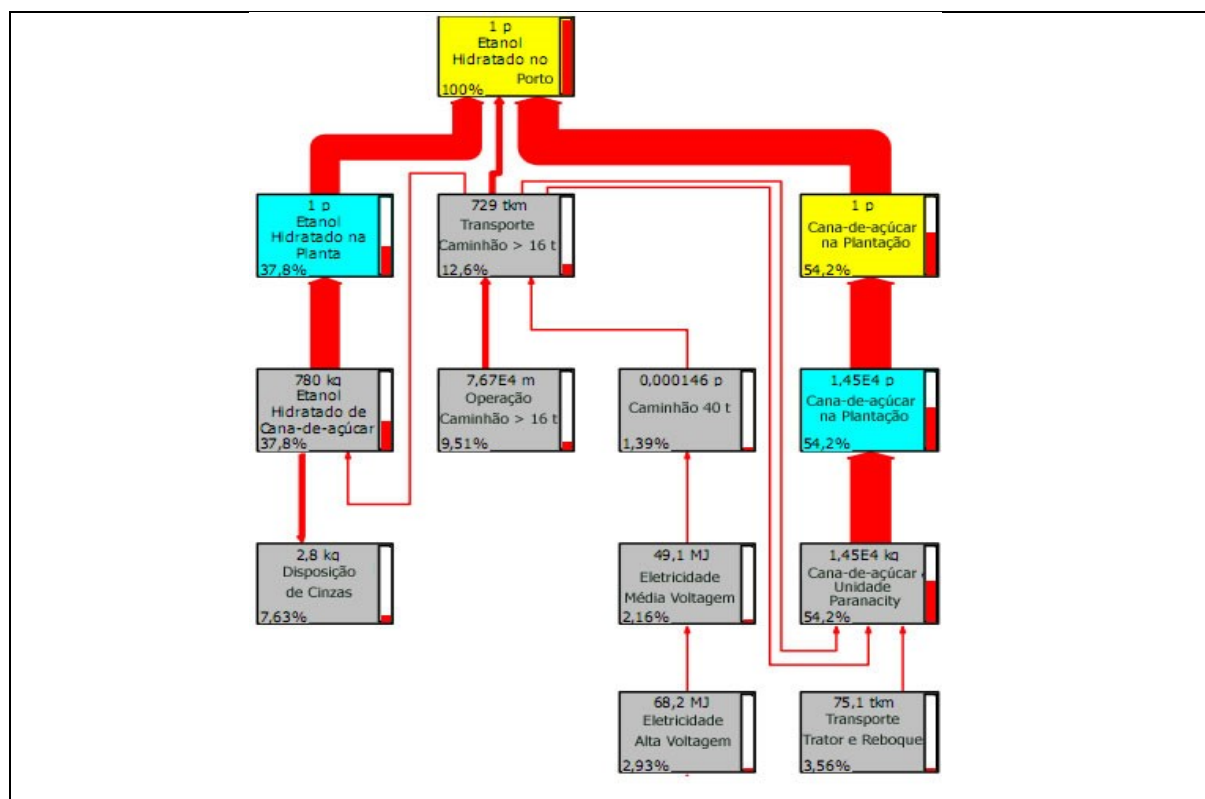
| Processo - Etanol Hidratado (Berço ao Porto) | Total (kg PO4--- eq) | Porcentagem |
|--|----------------------|-------------|
| Total de todos os processos | 1,1023 | 100 |
| Processos restantes | 0,82366 | 74,721 |
| Operação de caminhão >16t | 0,088529 | 8,031 |
| Destinação, cinzas de madeira | 0,084071 | 7,627 |
| Destinação, resíduo de mineiração de lignita | 0,033391 | 3,029 |
| Destinação, resíduo sulfídrico | 0,020474 | 1,857 |
| Destinação, resíduo de mineiração de carvão | 0,019987 | 1,813 |
| Transporte, trator e trailer | 0,016613 | 1,507 |
| Operação de caminhão 3,5-16t | 0,0084707 | 0,768 |
| Óleo cru, produção onshore | 0,0071187 | 0,646 |

Fonte: Elaborado a partir de dados da pesquisa (2011)

Denota-se a presença de processos de infraestrutura, de transporte e relacionadas à queima do bagaço e respectivas cinzas.

A ausência de fertilizantes químicos no plantio da cana representa um grande alívio para os impactos desta categoria, visto que esses produtos são compostos essencialmente por substâncias, como Fósforo e Nitrogênio, que ao serem lixiviadas, limitam a quantidade de oxigênio disponível. A notável representatividade dos processos de transporte e infraestrutura diz respeito à destinação dos resíduos de exploração dos recursos energéticos necessários à produção de combustíveis fósseis pesados, conforme pode ser analisado a partir da Figura 9.

Figura 9 – Relação da contribuição de cada etapa à Eutrofização, segundo Rede, considerando limite de corte de relevância de 3,05%



Fonte: Elaborado a partir de dados da pesquisa (2011).

Análise de Contribuição – Aquecimento Global

Como esperado, os processos de transporte são responsáveis por mais de 25% dos impactos ao Aquecimento Global. Também se observa que a cal virgem, utilizada tanto na planta de fermentação quanto na produção de *clinker* (cimento numa fase básica de fabrico), e o próprio *clinker* estão presentes dentre os itens mais representativos, conforme Tabela 9. Tanto o *clinker*, quanto o ferro gusa, estão ligados à infraestrutura necessária a este ciclo de vida, representado na Figura 7 para a categoria de impacto de aquecimento global. Confirmando estudos de Ometto (2005), a atividade de colheita da cana-de-açúcar é a atividade de maior potencial para o efeito estufa, devido, principalmente, aos gases hidrocarbonetos, metano e monóxido de carbono, emitidos durante a queimada, e ao dióxido de carbono (CO₂), emitido pelo uso de diesel nos equipamentos agrícolas, nos ônibus e nos caminhões (Figura 10).

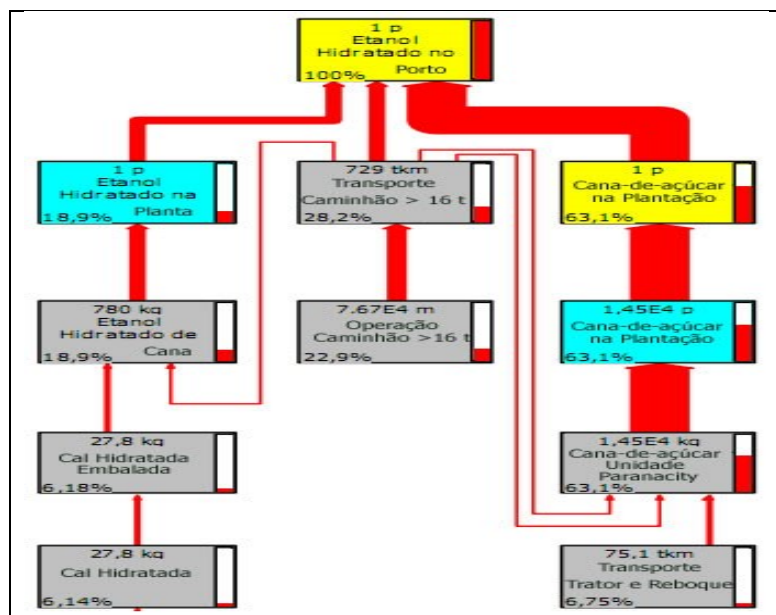
Tabela 9 – Relação dos Processos mais relevantes ao Aquecimento Global

| Processo - Etanol Hidratado (Berço ao Porto) | Total (kg CO ₂ eq) | Porcentagem |
|---|-------------------------------|-------------|
| Total de todos os processos | 343,2811 | 100 |
| Processos restantes | 221,67683 | 64,576 |
| Operação de caminhão >16t | 66,300663 | 19,314 |
| Cal Virgem | 20,298965 | 5,913 |
| Transporte, trator e trailer | 10,365577 | 3,020 |
| Operação de caminhão 3,5-16t | 6,639749 | 1,934 |
| Ferro gusa | 5,239086 | 1,526 |
| Gás natural pobre em Enxofre, queimado em flare | 4,514208 | 1,315 |
| Clinker | 4,4650015 | 1,301 |
| Diesel, queimado em máquina | 3,7810470 | 1,101 |

Fonte: Elaborado a partir de dados da pesquisa (2011).

A transformação no uso da terra também costuma ser um fator de impacto para essa categoria. É importante ressaltar que as áreas de cana-de-açúcar já foram utilizadas por outras culturas e que não são responsáveis pela transformação de floresta nativa em cultivo. De acordo com estudos do Laboratório de Poluição Atmosférica Experimental da Universidade de São Paulo (USP), referentes às regiões metropolitanas de Belo Horizonte, Curitiba, Porto Alegre, Recife, Rio de Janeiro e São Paulo, estimou-se que os gases tóxicos emitidos na atmosfera provocando a má qualidade do ar custa em torno de US\$ 1 bilhão a.a. aos cofres públicos brasileiros, devido a mortes ou tratamento de doenças associadas direta ou indiretamente à poluição. (OLIVEIRA, 2008).

Figura 10 – Relação da contribuição de cada etapa ao Aquecimento Global, segundo Rede, considerando limite de corte de relevância de 5%



Fonte: Elaborado a partir de dados da pesquisa (2011).

Análise de Contribuição – Depleção da Camada de Ozônio

É na categoria de impacto da depleção da camada de Ozônio que o consumo de combustíveis fósseis exprime a maior contribuição, conforme pode ser depreendido da Figura 11. No entanto, a diferença de contribuição de tais substâncias para o consumo de óleo cru é significativa, como exposto na Tabela 8.

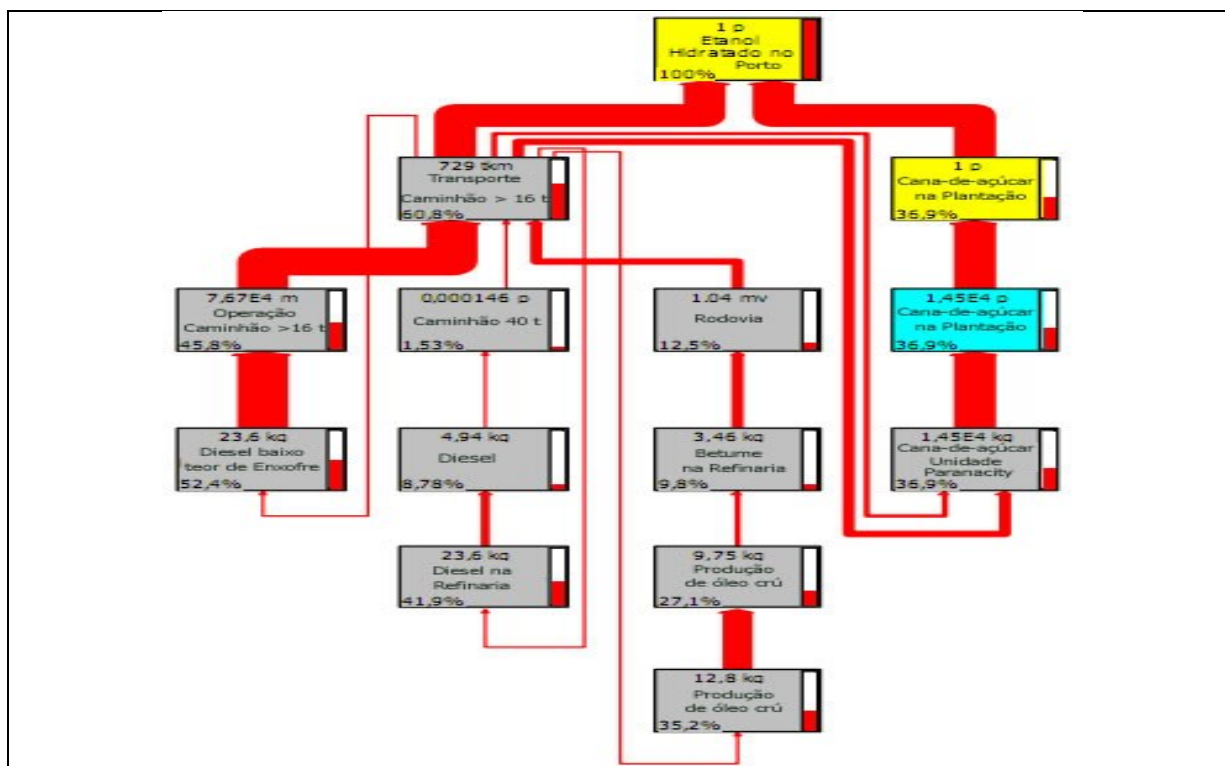
Tabela 8 – Relação dos Processos mais relevantes à Depleção da Camada de Ozônio

| Processo - Etanol Hidratado (Berço ao Porto) | Total (kg CFC-11 eq) | Porcentagem |
|--|----------------------|-------------|
| Total de todos os processos | 2,56E-05 | 100 |
| Processos restantes | 3,08E-07 | 1,203 |
| Óleo cru, produção onshore | 2,43E-05 | 95,088 |
| Transporte de gás natural, gasoduto | 6,30E-07 | 2,461 |
| Urânio enriquecido | 2,44E-07 | 0,953 |
| Cloro gasoso, célula de mercúrio | 7,56E-08 | 0,295 |

Fonte: Elaborado a partir de dados da pesquisa (2011)

O consumo de óleo cru, pertencente ao ciclo de vida das operações de caminhões, representa mais de 95% ao potencial de depleção da camada de Ozônio. Na sequência, encontram-se o transporte de gás natural, via gasoduto, a utilização de urânio, na matriz energética européia, em virtude do emprego da biblioteca de inventários ecoinvent, e do cloro gasoso, usado na fermentação do etanol. A Figura 11 demonstra a representatividade dos processos de transporte (60,8%) ao total de impactos ambientais que afetam a Camada de Ozônio.

Figura 11 – Relação da contribuição de cada etapa à Depleção da Camada de Ozônio, segundo Rede, considerando limite de corte de relevância de 35%



Fonte: Elaborado a partir de dados da pesquisa (2011)

Além dos processos de transporte, a fase agrícola representa 36,9% do total de impactos ambientais que afetam a Camada de Ozônio, com destaque para a colheita da cana, principalmente, por causa dos hidrocarbonetos e ao monóxido de carbono emitidos durante as queimadas.

CONSIDERAÇÕES FINAIS

Esta pesquisa procurou realizar a análise da gestão ambiental por meio da Avaliação do Ciclo de Vida (ACV) da produção do etanol combustível, a partir da cana-de-açúcar, na Unidade Paracity do Grupo Santa Terezinha-PR. Do ponto de vista econômico foi possível constatar uma expressiva expansão da agroindústria canavieira, com aumentos significativos desde os anos 1970, para a área plantada, cana-de-açúcar processada, produtividade (toneladas/ha), produção de açúcar e etanol, geração de emprego e renda, arrecadação tributária, geração de divisas e investimentos em P&D.

A Unidade Paracity do Grupo Santa Terezinha emprega diretamente cerca de 40% do pessoal ocupado residente em Paracity-PR, evidenciando a importância econômica e social dessa unidade agroindustrial na geração de emprego e renda, contribuição para a formação do Produto Interno Bruto (PIB) municipal e para a arrecadação tributária.

Os resultados indicam que o destaque para as categorias de impacto fica por conta das categorias atreladas às questões de Toxicidade Humana e Ecotoxicidade em Águas Doces, em que a relevância do plantio da cana-de-açúcar supera a

contribuição de 90%. As interferências ambientais da fase agrícola somente não se manifestam na Depleção da Camada de Ozônio. Para as demais fases deste ciclo de vida, os ápices de relevância para a fermentação do etanol e do transporte do produto ocorrem, respectivamente, nas categorias de Eutrofização e Depleção da Camada de Ozônio.

Para a categoria de impacto Ecotoxicidade em Águas Doces, os resultados indicaram que os impactos da fase agrícola são 174 vezes maior que os oriundos da fase industrial, sendo o principal fator para tal desempenho a utilização massiva de defensivos agrícolas.

A categoria de impacto Toxicidade Humana, em decorrência da similaridade com a categoria Ecotoxicidade em Águas doces, tem os processos ligados ao plantio da cana-de-açúcar como os maiores contribuintes aos resultados de impacto, sofrendo também uma influência da etapa industrial, pela infraestrutura da planta de fermentação.

Em relação a categoria de impacto Acidificação, observou-se que o consumo de combustíveis fósseis é dominante para os resultados apresentados, destacando-se os processos ligados ao transporte e à queima de diesel e gás natural, além da utilização de ácido sulfúrico na planta de fermentação.

A categoria de impacto Eutrofização que afeta sistemas aquáticos e a qualidade destes ecossistemas, revelou-se impactante nos processos de infraestrutura, de transporte e relacionados à queima do bagaço e respectivas cinzas. A ausência de fertilizantes químicos no plantio da cana-de-açúcar, na safra 2011, pela Unidade Paranacity do Grupo Santa Terezinha representou um alívio para os impactos desta categoria.

Em se tratando da categoria de impacto Aquecimento Global, os processos de transporte foram responsáveis por mais de 25% dos impactos, com destaque também para o uso da cal virgem na planta de fermentação e na produção de clínquer, sendo os mais impactantes.

A categoria de impacto Depleção da Camada de Ozônio tem nos processos de transporte a maior representatividade, tendo em vista o consumo de combustíveis fósseis. Em última análise, pelos resultados apresentados nas categorias de impacto, o estudo permite concluir que o etanol hidratado pode ser considerado um combustível renovável, porém, não limpo.

REFERÊNCIAS

- ACV BRASIL. 2010. Avaliação do Ciclo de Vida com SimaPro. **Treinamento** realizado em outubro de 2010, Curitiba-PR.
- AGUIAR, A. N. **Colheita mecanizada de cana resulta em ganho ambiental**. 2010. Disponível em: <<http://zip.net/bbf2M>>. Acesso em: 12 mar. 2011.
- ANGARITA, E. E. Y. Avaliação do impacto energético e ambiental da cogeração no balanço energético e no ciclo de vida do biodiesel de óleo de palma africana. Dissertação de Mestrado. UNIFEI/Engenharia Mecânica. 2008.
- ALCOPAR. **Histórico da produção no Paraná**. 2011. Disponível em: <http://www.alcopar.org.br/histprod_pr/index.htm>. Acesso em: 15 ago. 2011.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR ISO 14040**: gestão ambiental: avaliação do ciclo de vida – princípios e estrutura. Rio de Janeiro, 2001, 10 p.

- BRASIL. MCT. Ministério da Ciência e Tecnologia. **Efeito Estufa e a Convenção Sobre Mudança do Clima**. Rio de Janeiro: BNDES, Departamento de Relações Institucionais, 1999. 38p.
- BRASIL. MDIC. Ministério do Desenvolvimento, Indústria e Comércio Exterior. **Álcool Combustível**. Disponível em: <<http://zip.net/bffxbX>>. Acesso em: 15 out. 2009a.
- BRASIL. MRE. Ministério das Relações Exteriores. **A História Política e o Uso de Etanol como Combustível**. Disponível em: <<http://www.h2brasil.com/parte-2/2-3-2>>. Acesso em: 15 out. 2009b.
- BRASIL. Lei n. **12.305, de 2 de agosto de 2010**. Institui a Política Nacional de Resíduos Sólidos. Diário Oficial [da] República Federativa do Brasil, Brasília, 3 ago. 2010a.
- BRASIL. MAPA. Ministério da Agricultura Pecuária e Abastecimento. **Anuário de Agroenergia 2010b**. Disponível em: <<http://zip.net/byfB07>>. Acesso em: 12 nov. 2011.
- BRASIL. MME. Ministério das Minas e Energia. **Balanco Energético Nacional (BEN) 2011**. Disponível em: <<http://zip.net/bffxbY>>. Acesso em: 15 jan. 2011.
- DIAS, G. L. S.; et. al. Modelo de Intervenção Mínima para o Setor Canavieiro. In: MORAES, M. A. F. D.; SHIKIDA, P. F. A. (Org.) **Agroindústria Canavieira no Brasil: Evolução, Desenvolvimento e Desafios**. São Paulo: Atlas, 2002.
- FERREIRA, José Vicente Rodrigues. **Análise de Ciclo de Vida dos Produtos**. Gestão Ambiental. Instituto Politécnico de Viseu, 2004.
- GAZZONI, D. L. **Álcool – Etanol Brasileiro**. 2006. Disponível em: <<http://www.biodieselbr.com/energia/alcool/etanol.htm>>. Acesso em: 10 dez. 2011.
- GATTI, J. B. *et al.* Reciclagem de Embalagem em Termos de ACV – Estudo de Caso. In: GOEDKOOP, M. **The Ecoindicator 95 Final Report**. Pré Consultants, Amersfoort, The Netherlands, 1998.
- ISO 14040: Environmental management - **Life cycle assessment**: Principles and framework. Switzerland: International Organization for Standardization, 2006.
- ISO 14044: Environmental management - **Life cycle assessment**: Requirements and guidelines. Switzerland: International Organization for Standardization, 2006.
- JORNAL CANA. **Dados**. Disponível em: <<http://www.jornalcana.com.br>>. Acesso em 23 nov. 2011.
- LIMA, A. M. F. **Avaliação do ciclo de vida no Brasil – inserção e perspectivas**. Dissertação de Mestrado. UFBA/Mestrado Profissional em Gerenciamento e Tecnologias Ambientais no Processo Produtivo – Escola Politécnica, 2007.
- LOPES, J. F. *et al.* **Análise do ciclo de vida de produtos como técnica de apoio a gestão ambiental e industrial**. UTFPR – Universidade Tecnológica Federal do Paraná, 2002.
- MORAES, M. A. F. D.; SHIKIDA, P. F. A. (Org.) **Agroindústria Canavieira no Brasil: Evolução, Desenvolvimento e Desafios**. São Paulo: Atlas, 2002.
- OLIVEIRA, J. **Poluição custa US\$ 1 bilhão por ano no país**. São Paulo: USP, 2008. Disponível em: <<http://www.drclas.harvard.edu/print/3583>>. Acesso em: 12 jun. 2012.
- OMETTO, A. R. Avaliação do Ciclo de Vida do Álcool Etílico Hidratado Combustível pelos Métodos EDIP, Exergia e Emergia. Tese de Doutorado Escola de Engenharia - USP, São Carlos, 2005.
- PEREIRA, M. B. G. ; GUTIERREZ, S. O Mecanismo de Desenvolvimento Sustentável Brasileiro. **Texto para Discussão n. 1443**. IPEA. Brasília, dez. 2009.
- PRé. **User Manual**. Introduction into LCA methodology and practice with SimaPro 7. PRé Consultantes, Amersfoort, Netherlands, 2011.

- RAMÃO, F. P.; SCHNEIDER, I. E.; SHIKIDA, P. F. A. Padrão tecnológico no corte de cana-de-açúcar: um estudo de caso no Estado do Paraná. **Revista de Economia Agrícola**, São Paulo (SP), v.54, n.1, p.21-32, jan./jun., 2007.
- SÃO PAULO. **Lei nº 11.241**: dispõe sobre a eliminação gradativa da queima da palha da cana-de-açúcar. São Paulo, 2002.
- SHIKIDA, P. F. A. *et al.* Impactos das transformações institucionais e do progresso técnico nos fornecedores de cana do Paraná. In: _____; STADUTO, J. A. R. (Orgs.) **Agroindústria canavieira no Paraná: análises, discussões e tendências**. Cascavel: Coluna do Saber, 2005. 168 p.
- _____. Etanol combustível e biodiesel no Brasil: quo vadis? **Revista de Economia e Sociologia Rural**, Brasília, v.45, n.03. p.531-565, Jul./Set., 2007.
- _____. Um estudo das deliberações da câmara setorial do açúcar e do etanol usando análise de correspondência. **Revista de Economia e Sociologia Rural**, Brasília, v.47 n.01 p.183-210, Jan./Mar., 2009.
- _____. AZEVEDO, P. F.; VIAN, C. E. F. . Uma análise das capacidades tecnológicas da agroindústria canavieira em Minas Gerais. **Revista de Economia e Agronegócio**, v. 8, p. 251-277, 2010.
- _____. **A agroindústria canavieira no Paraná: perdendo posição relativa**. Boletim do Conselho Regional de Economia do Paraná, abril de 2012.
- SILVA, M. A. R. Economia dos recursos naturais. In: MAY, P. H.; LUSTOSA, M. C.; VINHA, V. (Org.) **Economia do meio ambiente: teoria e prática**. Rio de Janeiro: Elsevier, 2010.
- SOARES, S. R.; *et al.* Análise do ciclo de vida de produtos cerâmicos da indústria de construção civil. **Anais do XXVIII Congresso Interamericano de Ingeniería Sanitaria y Ambiental**. Cancún, México, 2002.
- SZMRECSÁNYI, T. Efeitos e Desafios das Novas Tecnologias na Agroindústria Canavieira. MORAES, M. A. F. Dias de; SHIKIDA, P. F. A. (Org.) **Agroindústria Canavieira no Brasil: Evolução, Desenvolvimento e Desafios**. São Paulo: Atlas, 2002b, 367 p.
- TETTI, L. M. R. Protocolo de Kyoto: oportunidades para o Brasil com base em seu setor sucroalcooleiro: um pouco da história da questão “mudanças climáticas e efeito estufa”. In: MORAES, M. A. F. Dias de; SHIKIDA, P. F. A. (Org.) **Agroindústria Canavieira no Brasil: Evolução, Desenvolvimento e Desafios**. São Paulo: Atlas, 2002, 367 p.
- THOMAS, Janet M.; CALLAN, Scott J. **Economia Ambiental: aplicações, políticas e teoria**. São Paulo: Cengage Learning, 2016
- TRAPÉ, A. Z. **Efeitos Toxicológicos e Registro de Intoxicações por Agrotóxicos**. Departamento de Medicina Preventiva e Social. Faculdade de Ciências Médicas, Universidade Estadual de Campinas – UNICAMP, 2010. Disponível em: <<http://www.feagri.unicamp.br/tomates/pdfs/eftoxic.pdf>>. Acesso em 15 jun. 2012.
- ÚNICA. UNIÃO DA AGROINDÚSTRIA CANAVIEIRA DE SÃO PAULO 2011. **Dados agregados**. Disponível em: <<http://zip.net/btfBSN>>. Acesso em: 1 out. 2011.
- USACUCAR. USINA SANTA TEREZINHA. 2011. **Dados**. Disponível em: <<http://www.usacucar.com.br>>. Acesso em 15 out. 2011.
- VIEIRA, G.; SIMON, E. Possíveis impactos da mecanização no corte de cana-de-açúcar em consequência da eliminação da queima da palha. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE ECONOMIA E SOCIOLOGIA RURAL, 43., Ribeirão Preto, 2005. **Anais**. Ribeirão Preto: SOBER, 2005.