



Análise ambiental da produção em pequena escala de etanol hidratado no Rio Grande do Sul

Caroline Peyrot ¹, Ronaldo Hoffmann ², Flávio Dias Mayer ³, Paula Brondani Mucellini ⁴, Joceane Azolim ⁵

¹ Universidade Federal de Santa Maria (carollpeyrot@hotmail.com)

² Universidade Federal de Santa Maria (hoffmann@ufsm.br)

³ Universidade Federal de Santa Maria (flavio.mayer@ufsm.br)

⁴ Universidade Federal de Santa Maria (paulabmucellini@gmail.com)

⁵ Universidade Federal de Santa Maria (jo-azolim@hotmail.com)

Resumo

Com a expansão da produção em pequena escala de etanol hidratado no Rio Grande do Sul, a realização de uma avaliação ambiental se faz necessária. A Avaliação do Ciclo de Vida (ACV) vem ao encontro desse objetivo, envolvendo o levantamento de aspectos ambientais de uma fronteira de sistema “do berço ao túmulo” e a avaliação como um indicado numérico de potencial de impacto e de dano ambiental. A comparação entre as etapas demonstrou, nas categorias de impacto, o predomínio da etapa industrial e de uso final do etanol hidratado. A avaliação de dano ambiental apontou o uso final como responsável pela maior influência nos danos de saúde humana e qualidade de ecossistema, e as etapas agrícola, de transporte e industrial com significativo dano sobre recursos. Evidenciando que o ciclo de vida de uma fonte renovável de combustível, além dos benefícios inerentes, também exerce potencial de impacto e dano ambiental significativo no contexto global.

Palavras-chave: Aspectos ambientais. Impacto ambiental. Biocombustível.

Área Temática: Impactos Ambientais.

Environmental analysis of small scale production of hydrous ethanol in Rio Grande do Sul

Abstract

With the expansion of small-scale production of hydrous ethanol in Rio Grande do Sul, an environmental assessment is required. The Life Cycle Assessment (LCA) meets this objective, involving the survey of environmental aspects of a "cradle to grave" system boundary and evaluation as a numerical indication of impact potential and environmental damage. The comparison between the steps showed, in the impact categories, the predominance of the industrial stage and the end use of the hydrated ethanol. Environmental damage assessment pointed to end use as responsible for the greatest influence on human health and ecosystem quality damage, and the agricultural, transportation and industrial stages with significant damage to resources. Evidence that the lifecycle of a renewable fuel source, in addition to the inherent benefits, also has impact potential and significant environmental damage in the global context.

Key words: Environmental aspects. Environmental impact. Biofuel.

Theme Area: Environmental impacts.



1 Introdução

A produção de etanol no Brasil concentra-se na região centro-sul, responsável por 39% da produção, especialmente o estado de São Paulo. Em contraste a esse cenário de agroindústria canavieira extensiva, estados como o Rio Grande do Sul (RS) apresentam uma baixa produção desse biocombustível (ROCHA et al., 2014)., porém uma demanda significativa, ao passo que necessitam importar etanol de outros estados, ocasionando gastos elevados. Diante disso, estimular a cadeia produtiva do álcool combustível no RS passa a ser um fator decisivo para a autossuficiência energética interna, apesar de o estado possuir uma estrutura fundiária na qual predominam as pequenas propriedades, as condições edafoclimáticas para a produção da matéria-prima são favoráveis ao investimento em pequena escala de produção do biocombustível.

Cruz et al. (1980) e Ortega et al. (2008) discutem que em assentamentos rurais com no máximo 4 há, que se caracterizam principalmente pela policultura ecológica como meio de subsistência, o investimento em uma micro destilaria, capaz de produzir até 500 litros de etanol hidratado por dia, pode ser altamente viável, considerando a utilização da cana-de-açúcar como matéria-prima, o agricultor como investidor potencial e o álcool produzido aplicável em seu maquinário, em razão do baixo custo da mão de obra e da simplicidade do processo.

Um aspecto pertinente em relação a essa produção são seus impactos socioambientais. Ao descentralizar a produção das grandes usinas paulistas para o estado do RS, a tecnologia entra como um vetor da inclusão social de agricultores em novos empreendimentos no campo (SANTOS et al., 2016). Além disso, a utilização e processamento de matérias-primas em uma mesma região reduzem custos de transporte, traz flexibilidade operacional e garante ao produtor e à comunidade local uma autossuficiência energética (MAYER et al., 2015). De fato, a produção desse biocombustível conta com subprodutos reutilizáveis no próprio ciclo, como o bagaço e o vinhoto, que são utilizados na queima e como fertilizante no solo, respectivamente, contribuindo com a não geração de resíduos.

Entretanto, diante da possível expansão da produção de etanol no RS, suscitam preocupações sobre a sua sustentabilidade, uma vez que as etapas envolvidas no processo, como extração das matérias-primas, as reações químicas, o processamento, o transporte, a distribuição e o uso final, não estão isentas de causar impactos ambientais (BLENGINI & SHIELDS, 2011). Sendo esse o objetivo do presente trabalho, o levantamento do potencial de impacto ambiental a partir do desenvolvimento de uma Avaliação do Ciclo de Vida (ACV) da produção de etanol hidratado em pequena escala por uma destilaria do Rio Grande do Sul.

2 Metodologia

Para uma elaboração adequada de uma Avaliação do Ciclo de Vida do etanol hidratado (95% v/v de etanol e 5% v/v de água) foram aplicados os pressupostos regulamentados pela norma ISO 14.040, sendo os dados necessários alocados no software SIMAPRO[®] 7.3.0 *PhD* para tratamento, análise de inventário e interpretação dos resultados.

O processo de produção do etanol combustível em análise compreende a abordagem *well-to-wheel* (“do berço ao túmulo”) (BRONDANI, 2014). O levantamento das informações de fluxos de entrada e de saída pertinentes ao sistema de fronteira delimitado foi obtido em base teórica (referências bibliográficas) e vista técnica a micro destilaria.

As principais considerações metodológicas aplicadas no estudo são descritas a seguir de forma sucinta:

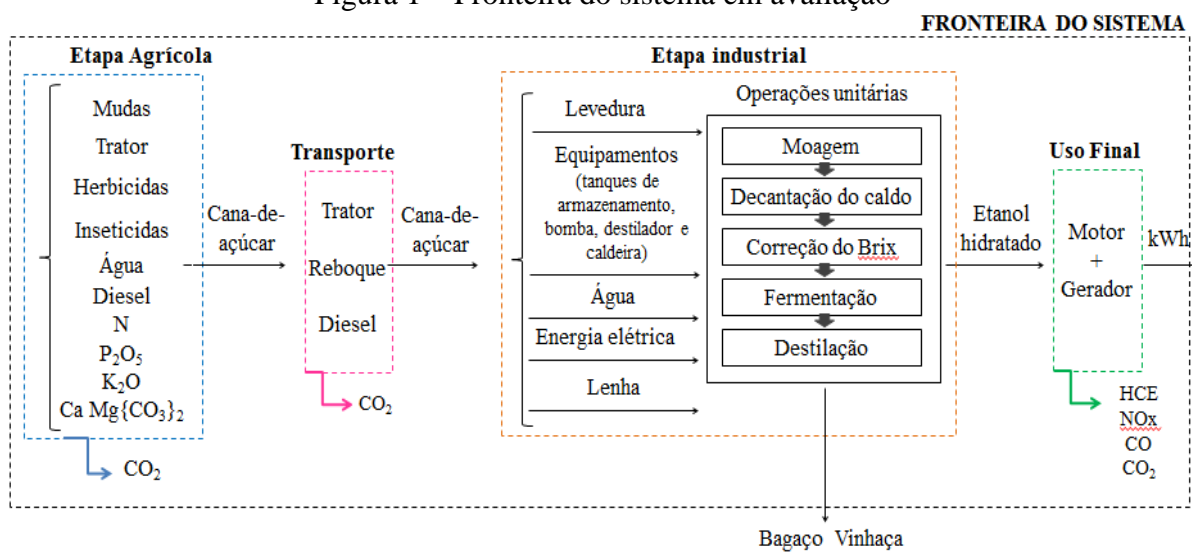
1. *Definição dos objetivos*: o principal objetivo da pesquisa foi comparar cada etapa do ciclo de vida do etanol hidratado para avaliar a distribuição da carga ambiental



em avaliação de potencial de impacto ambiental (*midpoint*) e dano ambiental (*endpoint*);

2. *Definição do escopo*: a análise tem caráter de estudo de caso, aplicada a planta piloto de destilação da Universidade Federal de Santa Maria (UFSM) com capacidade de produção diária de 320 a 360 litros de etanol de cana-de-açúcar, com sistema operacional em batelada.
 - a. Sistema de produto: as etapas contempladas na avaliação são: a etapa agrícola, etapa de transporte, etapa industrial e uso final. A etapa de distribuição do produto industrializado (etanol hidratado) não foi considerada devido o uso ser local e interno (UFSM). O uso final considerado foi em motor SI estacionário com finalidade de geração de energia elétrica (kWh);
 - b. Unidade funcional: considerando a produção diária e para a operação de 10.000 horas do motor, a unidade funcional adotada foi de 81.053,09 kWh;
 - c. Fronteira de sistema de produto: a fronteira geográfica do sistema estudo abrange a produção local na UFSM, no estado do Rio Grande do Sul. A fronteira temporal adotada foi de um ano. A fronteira física do sistema em avaliação e os fluxos pertinentes a cada etapa individual são expostos na Figura 1;
 - d. Método de avaliação e interpretação: a metodologia de avaliação foi voltada a problemas e efeito global, para isso o método de avaliação empregado foi o Eco indicador 99 – perspectiva hierárquica, que engloba as duas análises escolhidas, no nível de onze categorias de impacto e três de dano ambiental;

Figura 1 – Fronteira do sistema em avaliação



3. *Análise de inventário (AICV)*: a modelagem da fronteira de sistema exigiu a coleta de dados específicos de cada processo interno da etapa em levantamento, totalizando quatro inventários de ciclo de vida individuais. Para cada etapa os dados foram quantificados em índices mássicos (Kg), área (há e m²) e energia elétrica (kWh);
4. *Avaliação de impactos e danos ambientais*: os dados obtidos na fase anterior foram agrupados e classificados de acordo com a(s) categoria(s) de influência, fase conhecida como caracterização nos estudos de ACV, que fornece como resultado a contribuição numérica de cada etapa do ciclo de vida nas categorias selecionadas de impacto e dano ambiental.



3 Resultados

Os resultados da comparação entre as quatro etapas do sistema de produção de etanol, em pequena escala, são discutidos individualmente de maneira a identificar qual etapa implica em maior representação por categoria de impacto apresentadas na Figura 2, e de dano ambiental na Figura 3, a partir da alocação dos fluxos mássicos e de energia da fronteira global de sistema escolhida dentro do software SIMAPRO[®] 7.3.0.0 *PhD*, descritos na Tabela 1.

Tabela 1 – Inventário por etapa do ciclo de vida do etanol hidratado

Etapa agrícola			Etapa industrial		
Dado	Unidade	Valor	Dado	Unidade	Valor
Área	ha	10,08	Construção	m ²	102,84
Mudas	Kg	120.998,2	Moenda	Kg	2.500,0
Trator	Kg	3.200,0	Tanque de decantação	Kg	30,0
Nitrogênio (N)	Kg	1.209,98	Bomba	Kg	30,0
Herbicida	Kg	32,77	Levedura	Kg	547,0
Inseticida	Kg	3,03	Tanque de fermentação	Kg	135,0
Calcário (Ca Mg{CO ₃ } ₂)	Kg	28.905,17	Destilador	Kg	280,0
Potássio (K ₂ O)	Kg	2.293,93	Tanque de armazenamento	Kg	306,0
Fósforo (P ₂ O ₅)	Kg	1.588,10	Caldeira	Kg	2.000,0
Água	Kg	549,02	Água	Kg	22.1069,0
Diesel	Kg	201,66	Lenha	Kg	41.659,0
Dióxido de carbono ³	Kg	584,42	Energia elétrica	kWh	740.150,0
Cana-de-açúcar ¹	Kg	806.655,0	Etanol ¹	Kg	36.973,08
			Bagaço ²	Kg	350.895,0
			Vinhaça ²	L	592.488,0
Etapa de transporte			Uso final		
Dado	Unidade	Valor	Dado	Unidade	Valor
Trator	Kg	3.018,0	Motor + gerador	Kg	152,0
Reboque	Kg	1.750,0	Monóxido de carbono ³	Kg	1.379.324,0
Diesel	Kg	483,99	Dióxido de carbono ³	Kg	47.272.798,0
Dióxido de carbono ³	Kg	1.669,78	Hidrocarbonetos ³	Kg	209.024,6
Transporte	Kg.Km	3000	Óxidos de nitrogênio ³	Kg	656.018,1

¹ Produto de saída da etapa; ² Coprodutos de saída da etapa; ³ Fluxos de emissões de saída da etapa.
Fonte: Autores.

3.1 Avaliação do ciclo de vida do etanol hidratado

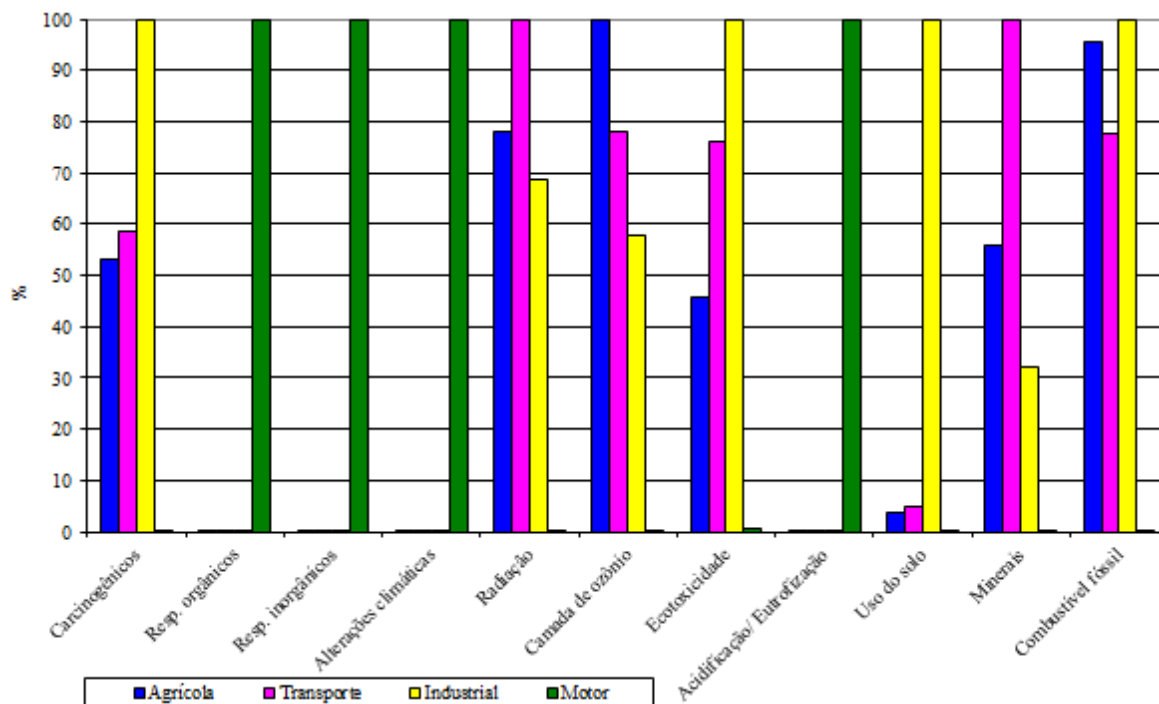
Os resultados da comparação das etapas do ciclo de vida do etanol hidratado nas categorias ambientais de avaliação são discutidos individualmente a seguir:

- 1. Carcinogênicos:** A categoria de impacto quantifica em anos de vida ajustados por incapacidade (DALY) por Kg de emissões de substâncias cancerígenas para o solo, o ar e a água (SIMAPRO, 2010). A análise aponta a etapa industrial com o maior potencial de impacto ambiental na categoria, esse comportamento advém do ciclo de vida dos materiais que constituem os equipamentos empregados nessa etapa principalmente a moenda, caldeira e coluna de destilação. Nas etapas agrícola e de transporte a representação na ACV é em função de insumos químicos (herbicidas, pesticidas e inseticidas) e também do maquinário utilizado (BRONDANI, 2014; ROCHA et al., 2014);
- 2. Respiratórios orgânicos:** A observação dos resultados de emissões de produtos orgânicos na categoria que estima o impacto a partir dos efeitos respiratórios causados pelo processo de *smog* fotoquímico (SIMAPRO, 2010), indica a etapa de



queima do combustível etanol no motor como a única responsável. Essa representação era esperada, uma vez que as emissões de gases específicos, principalmente hidrocarbonetos, são predominantes na fase de combustão do etanol quando comparada com as demais etapas no ciclo de vida global analisado;

Figura 2 – Avaliação do ciclo de vida do etanol por categoria de impacto ambiental



- 3. Respiratórios inorgânicos:** O potencial de impacto ambiental da categoria está vinculado aos efeitos respiratórios de *smog* de inverno, como óxidos de enxofre (SO_x), amônia (NH₃), poeira e óxidos de nitrogênio (NO_x) (SIMAPRO, 2010). A comparação das etapas demonstra que o processo de utilização do etanol no motor com a representação absoluta, devido as emissões de NO_x que são mais elevadas nessa etapa do ciclo de vida considerado;
- 4. Mudança climática:** O impacto ambiental de mudança climática é atribuído ao aumento de doenças e mortes relacionadas as modificações de qualidade nos ecossistemas (SIMAPRO, 2010). A etapa com maior destaque na avaliação realizada demonstra a fase final do processo, queima do combustível, como responsável na categoria, uma vez que as principais emissões de gases de aquecimento global (CO₂, CO, NO_x e HCE) são emitidas em elevada proporção no uso do combustível quando comparadas as demais.
- 5. Radiação:** A análise dessa categoria de impacto considera a exposição a substâncias com emissões de radiação ionizante no meio ambiente (SIMAPRO, 2010). A comparação entre as etapas destaca três fases com contribuições significativas no contexto de avaliação, e esse comportamento resulta dos processos vinculados a parte aos materiais que foram classificados no software como representantes principalmente de equipamentos, maquinários e edificação da destilaria;
- 6. Camada de ozônio:** Essa categoria classifica o potencial de impacto através do levantamento de informações pertinentes a emissões de substancias degradantes da



camada de ozônio (CFC, HCFC) (SIMAPRO, 2010). A observação dos resultados aponta uma distribuição de potencial de impacto nas três primeiras etapas ciclo de vida avaliado, sendo que o aporte em cada fase advém de processos a parte na produção/fabricação dos insumos (etapa agrícola), maquinário (etapa agrícola e de transporte), edificação e equipamentos (etapa industrial) escolhidos e quantificados no ICV;

7. **Ecotoxicidade:** O critério de avaliação agrupa e classifica os fluxos do ICV relacionados a emissões tóxicas ao meio ambiente e suas consequências ligadas a alterações de qualidade no ecossistema (SIMAPRO, 2010). A diferença observada na comparação procede dos limites de fronteira de sistema e aportes mássicos e de energia dos fluxos quantificados, em especial insumos (etapa agrícola e industrial), equipamentos (todas as etapas), edificação e eletricidade (etapa industrial), água e lenha (etapa agrícola e industrial);
8. **Acidificação e eutrofização:** A categoria quantifica as emissões de substâncias acidificantes para o meio ambiente (SIMAPRO, 2010). A partir da avaliação dos fluxos de entrada e saídas quantificados no ICV, a etapa com predomínio de representação na categoria foi a de uso do combustível na fase final do ciclo de vida abordado, esse percentual de impacto é consequência do aporte mássico das emissões de CO₂ e NO_x;
9. **Uso do solo:** A avaliação nesse grupo de impacto ambiental compreende a transformação e a ocupação do solo vinculado ao esgotamento de recursos (SIMAPRO, 2010). A comparação entre as etapas identifica o processamento da cana-de-açúcar com maior percentual de contribuição, em virtude do comprometimento do solo pela edificação, que envolve a compactação, redução da aplicação produtiva agrícola e a diminuição da biodiversidade;
10. **Minerais:** O impacto dessa categoria leva em conta o excedente de energia por Kg de minério e a redução das classes de minérios (SIMAPRO, 2010). O potencial de impacto final da comparação do ciclo de vida do etanol hidratado demonstrou uma distribuição de representação entre as etapas agrícola, de transporte e industrial, nas duas primeiras o percentual de impacto vincula o requisito de minerais incorporados na produção/constituição dos maquinários utilizados (trator e trator + trailer), e para a fase industrial o critério de impacto foi atribuído principalmente a energia elétrica e edificação da destilaria;
11. **Combustível fóssil:** O foco da categoria de impacto deriva da demanda de energia fóssil no sistema, avaliando o excedente de energia por energia fóssil extraída (SIMAPRO, 2010). A representação das etapas com contribuição significativa provém da energia vinculada ao ciclo de vida dos materiais em que os equipamentos, maquinários e edificação foram descritos no ICV. Sendo o aporte mais elevado para a etapa industrial, visto que os processos envolvem basicamente equipamentos e a construção predial.

3.2 Avaliação de dano ambiental

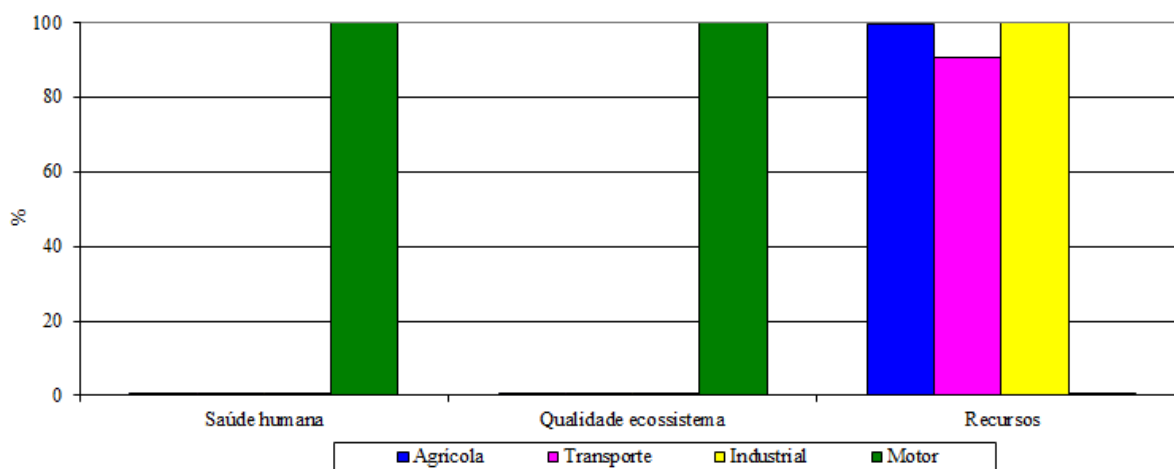
A análise de dano ambiental aponta que em saúde humana e qualidade do ecossistema o problema global do ciclo de vida do etanol hidratado está ligado a etapa de uso final do combustível, esse comportamento advém das categorias de impacto com representação na categoria de dano, sendo que ambas englobam as categorias de impacto de carcinogênicos, respiratórios orgânicos e inorgânicos, mudanças climáticas, radiação, camada de ozônio, eco



toxicidade, acidificação e eutrofização, e uso do solo. Essa ordem de magnitude do uso final do etanol hidratado provém das emissões específicas da combustão, em especial de hidrocarbonetos, óxidos de nitrogênio e enxofre, monóxido e dióxido de carbono que causam impactos diretos a qualidade de ambiente, aumentam os riscos à saúde humana e a fauna e flora.

Em relação aos danos sobre recursos a avaliação demonstra a etapa agrícola, de transporte e processamento industrial como as origens do dano na categoria, uma vez que as representações das categorias de minerais e combustível fóssil compreenderam distribuição percentual de influência significativa nas três etapas, em função dos equipamentos, maquinários, diesel e edificação.

Figura 3 – Avaliação nas categorias de dano ambiental



Conclusão

A comparação da avaliação do ciclo de vida entre as etapas de produção agrícola, transporte, processo industrial e uso final do etanol hidratado na planta piloto da UFSM, resultou em um perfil ambiental em que as duas últimas etapas apresentaram o maior potencial de impacto ambiental. Demonstrando que a maior parte da carga ambiental do ciclo de vida do etanol hidratado está relacionada aos materiais de estrutura física das operações unitárias e não ao produto, uma vez que o impacto ambiental ligado à etapa industrial está relacionado principalmente aos dados de edificação e energia elétrica, o que também ocorre na fase de uso do combustível, onde o conjunto moto-gerador predomina na representação.

Ao nível de dano ambiental a saúde humana e qualidade do ecossistema a etapa de uso final do combustível predomina em potencial devido às emissões específicas de gases de efeito estufa do processo de combustão do etanol hidratado. Enquanto, o perfil ambiental das demais etapas exercem apenas danos sobre recursos, visto que a carga ambiental vinculada aos fluxos de estrutura física sobressai na avaliação de caracterização.

Referências

BLENGINI, G.A.; SHIELDS, D.J.” *Integrating Life Cycle Assessment and Other Tools for Ex Ante Integrated Sustainability Assessment in the Minerals Industry*”. **American Journal of Applied Sciences**, v. 8 n. 11, Outubro de 2011, pg. 1214-1227.



BRONDANI, M. **Avaliação do Ciclo de Vida (ACV) da produção de Bioetanol hidratado em pequena escala: abrangência agrícola e industrial**. Dissertação de Mestrado em Engenharia Química, Universidade de Santa Maria, Santa Maria, 2014.

CRUZ, E. et al. Rentabilidade potencial de micro usinas de álcool a partir de cana-de-açúcar: Um estudo preliminar. revista pesquisa agropecuária brasileira, v. 15, n. 4, pg. 365-378, Abr. 1980. **In:** SANTOS, G.R; CALDEIRA, V.C; DUMONT, L.E.; PIANKOWSKI, T. Pequena escala e micro destilarias de etanol: Iniciativas, viabilidade econômica e condicionantes. Quarenta Anos de Etanol em Larga Escala no Brasil: desafios, crises e perspectivas, Cap. 8, Brasília, 2016.

ORTEGA, E.; WATANABE, M.; CAVALETT, O. **A produção de etanol em micro e mini destilarias**. Universidade Estadual de Campinas, Campinas, 2008.

ROCHA, M.; CAPAZ, R.; LORA, E.E.S.; NOGUEIRA, L.A.; LEME, M.M.; RENÓ, M.L.G.; ALMAZÁN, O. “*Life Cycle Assessment (LCA) for biofuels in Brazilian conditions: A meta-analysis*”. **Renewable and Sustainable Energy Reviews**, n. 37, Maio de 2014, pg. 435-459. MAYER, F.D.; BRONDANI, M.; AITA, B.C; HOFFMANN, R.; LORA, E.E.S. “*Environmental and Energy Assessment of Small Scale Ethanol Fuel Production*”. **Energy & Fuels**, v. 29, n. 10, Setembro de 2015, pg. 6704-6716.

SANTOS, G.R; CALDEIRA, V.C; DUMONT, L.E.; PIANKOWSKI, T. Pequena escala e micro destilarias de etanol: Iniciativas, viabilidade econômica e condicionantes. **In:** QUARENTA ANOS DE ETANOL EM LARGA ESCALA NO BRASIL: DESAFIOS, CRISES E PERSPECTIVAS, Cap. 8, Brasília, 2016.

SIMAPRO. “*Database manual: methods library*”. **PRé Consultants**. v 2.4, Outubro de 2010, pg. 06-09.