**CLAUDIA CRISTINA SANCHEZ MOORE**

# Avaliação do desempenho ambiental de alternativas de reaproveitamento de vinhaça decorrente da produção de etanol

**São Paulo**
**2016**

**CLAUDIA CRISTINA SANCHEZ MOORE**

# Avaliação do desempenho ambiental de alternativas de reaproveitamento de vinhaça decorrente da produção de etanol

Dissertação apresentada à Escola Politécnica da Universidade de São Paulo, para obtenção do título de Mestre em Ciências.

**São Paulo**
**2016**

**CLAUDIA CRISTINA SANCHEZ MOORE**

# Avaliação do desempenho ambiental de alternativas de reaproveitamento de vinhaça decorrente da produção de etanol

Dissertação apresentada à Escola Politécnica da Universidade de São Paulo, para obtenção do título de Mestre em Ciências.

Área de Concentração:
Engenharia Química

Orientador:
Prof. Dr. Luiz Kulay

**São Paulo**
**2016**

Este exemplar foi revisado e corrigido em relação à versão original, sob responsabilidade única do autor e com a anuência de seu orientador.

São Paulo, _____ de _____ de _____

Assinatura do autor: _____

Assinatura do orientador: _____

Catalogação-na-publicação

MOORE, CLAUDIA C. S.
Avaliação do desempenho ambiental de alternativas de reaproveitamento de vinhaça decorrente da produção de etanol / C. C. S. MOORE -- versão corr. -- São Paulo, 2016.
126 p.

Dissertação (Mestrado) - Escola Politécnica da Universidade de São Paulo. Departamento de Engenharia Química.

1.Ciclo de Vida (Avaliação) 2.Etanol 3.Vinhaça I.Universidade de São Paulo. Escola Politécnica. Departamento de Engenharia Química II.t.

## DEDICATÓRIA

*Dedico este trabalho aos meus país, que sempre incentivaram o meu crescimento profissional e me apoiaram incondionalmente durante estes dois anos.*

## AGRADECIMENTOS

Aos meus pais, Amparo e Reinaldo, pelo amor, confiança, apoio e por me inspirar cada dia para ser uma melhor pessoa.

Ao Prof. Dr. Luiz Kulay por me permitir desenvolver este projeto como parte de seu grupo de pesquisa, pela disponibilidade para me orientar e resolver meus milhões de dúvidas; pelo apoio, confiança e paciência especialmente em momentos de frustração e falta de autoconfiança.

Ao prof. Dr. Gil Anderi da Silva por me acolher dentro do grupo, pelas valiosas sugestões e discussões, pelas oportunidades e pela disponibilidade para me ajudar em qualquer situação.

Aos meus colegas do GP2, Alex, Letícia, Ana, Rose pelo apoio e ajuda sempre que precisei e por me acolher, sempre fazendo me sentir em casa; aos meus amigos agradeço pelo carinho, amizade, as risadas e discussões que resultaram na melhor medicina em momentos de angustia e frustração.

À CAPES pelo apoio financeiro durante o último ano do meu curso.

Finalmente, agradeço a todos aqueles que de alguma forma contribuíram para a conclusão deste trabalho.

Muito Obrigada!

# RESUMO

A obtenção de etanol a partir de rotas alcoolquímicas consagradas gera resíduos com potencial de aproveitamento, tanto em outros setores produtivos como no ciclo produtivo do próprio combustível. Este é o caso de torta de filtro e vinhaça. A vinhaça em particular costuma ser devolvida ao campo com o intuito de ajustar teores nutricionais do solo no cultivo da cana. No entanto, estudos ambientais destacam que esta alternativa traz efeitos negativos sobre os meios receptores (água e solo), condição que abre a perspectiva para exploração de usos alternativos dessas substâncias.

Este estudo se propôs a contribuir para o tema ao avaliar de forma sistêmica o desempenho ambiental de duas alternativas de reaproveitamento de vinhaça: (i) reuso no campo em processos de fertirrigação, alternativa consolidada no Brasil, e (ii) reuso da fração líquida da vinhaça em etapas diversas do processo industrial de obtenção de etanol. Em qualquer das situações fez-se uso da técnica de Avaliação de Ciclo de Vida – ACV para proceder tal verificação.

A análise ambiental da prática de reuso de vinhaça e torta para fertirrigação foi conduzida a partir da comparação de cenários que consideraram a forma de suprimento de nutrientes para a cana e o método de colheita. A avaliação de impactos ocorreu em dois níveis: quanto ao consumo de recursos, a partir de *Primary Energy Demand (PED)*; e em termos de emissões para o ambiente por meio da elaboração do Perfil Ambiental. Uma Análise de Sensibilidade foi também realizada para verificar o efeito de oscilações dos teores de Nitrogênio (N), Fósforo (P) e Potássio (K) na composição da vinhaça sobre os resultados obtidos, caso da primeira alternativa.

Concluiu-se para esse caso que a substituição parcial de fertilizantes químicos por vinhaça traz aumento da Demanda de Energia Primária global para ambos os métodos de colheita. Em termos de Perfil Ambiental, a comparação entre cenários das mesmas práticas de manejo mostrou que a troca de adubos por vinhaça e torta é positiva para o desempenho ambiental do etanol por reduzir impactos quanto a Mudanças Climáticas (CC), Acidificação Terrestre (TA) e Toxicidade Humana (HT). Por outro lado, o tratamento de vinhaça para reposição de água na etapa industrial resultou em aumento global das contribuições para as

categorias acima mencionadas além de incrementos para Eutrofização de água doce (FEut) e Ecotoxicidade de água doce (FEC), a despeito de ser constatada a redução de 45% quanto a Depleção de água (WD). Os aumentos no impacto se deveram principalmente aos efeitos negativos causados durante a produção do CaO usado no processo de tratamento da vinhaça. No entanto, a substituição deste insumo por NaOH só representou melhora em termos de CC.

Pode-se concluir que a reutilização de vinhaça e de torta de filtro como complemento nutricional para o cultivo de cana-de-açúcar resultou em uma alternativa mais adequada de reaproveitamento do que o se este fluído fosse reutilizado para suprir parte da demanda hídrica de processo, mesmo quando o consumo de água na etapa industrial tenha inexoravelmente se reduzido a partir da implantação dessa medida.

# ABSTRACT

The production of ethanol from consecrated alcohol chemistry routes generates waste materials with reuse potential in other productive sectors as in the alcohol production cycle. This is the case of filter cake and vinasse. Vinasse, in particular, is often returned to the field in order to adjust soil nutrient levels in the cultivation of sugarcane. However, environmental studies highlight that this alternative brings negative effects on the receiving bodies (water and soil), condition that opens the prospect for the exploration of alternative uses of these substances.

This study aimed to contribute to the topic by evaluating systemically the environmental performance of two vinasse recycling alternatives: (i) reuse in the sugarcane fields in fertigation processes, consolidated alternative in Brazil, and (ii) reuse of the vinasse liquid fraction in various stages of the ethanol production process. In either situation the Life Cycle Assessment Technique – LCA was used to carry out such verification.

The environmental analysis of vinasse and filter cake reuse for fertigation was conducted based on the comparison of scenarios that considered the form of nutrient supply for sugarcane crops, and the harvesting methods. Impact Assessment took place on two levels: as for resource consumption from *Primary Energy Demand (PED)*; and in terms of emissions into the environment through the elaboration of the Environmental Profile. A sensitivity analysis was also performed to evaluate the effects of fluctuations of N, P and K contents in the composition of vinasse on the results obtained, case of the first alternative.

It was concluded in this case that the partial substitution of chemical fertilizers by vinasse, led to an increase in the global Primary Energy Demand for both harvesting methods. In terms of the Environmental Profile, the comparison between scenarios with the same management practices showed that replacing chemical fertilizers with vinasse and filter cake is positive for the environmental performance of ethanol since it reduces Climate Change (CC), Terrestrial Acidification (TA) and Human Toxicity (HT) impacts. Moreover, treatment of vinasse for water replacement in the industrial stage resulted in global increases for the mentioned categories as well as increments for Freshwater Eutrophication (FEut) and Freshwater Ecotoxicity (FEC), despite being detected a reduction of 45% for

WD. Impact increases were due primarily to the negative effects caused during the production of CaO used during the vinasse treatment process. However, the replacement of this input by NaOH represented improvement only in terms of CC.

It can be concluded that the use of vinasse and filter cake as a nutritional supplement for sugarcane cultivation resulted in a more adequate alternative for reuse than if the fluid were reused to supply part of the water process demand, even when the water consumption in the industrial stage has inexorably been reduced since the implementation of this measure.

## LISTA DE FIGURAS

Figura 1. Distribuição da cana para produção de etanol e açúcar ..... 24
Figura 2. Projeção do destino da cana-de-açúcar ..... 25
Figura 3. Consumo doméstico de etanol anidro e hidratado ..... 26
Figura 4. Fluxograma da produção de açúcar e etanol, com cogeração ..... 32
Figura 5. Esquema da Análise de Ciclo de vida de um produto ..... 37
Figura 6. Estágios do estudo ACV ..... 37
Figura 7. Sistema de produto para a produção de etanol ..... 59
Figura 8. Tecnologia de tratamento de vinhaça ..... 66
Figura 9a. Sistema de produto para a produção de etanol – cenário 2A (baseline) ..... 70
Figura 9b. Sistema de produto para a produção de etanol – cenário 2B ..... 70
Figura 10. Comparação de desempenhos de PED entre o Cenário V (baseline) e alternativas definidas para Análise de Sensibilidade ..... 84
Figura 11. Comparação de desempenhos de Perfil Ambiental entre Cenário V (baseline) e alternativas definidas para Análise de Sensibilidade ..... 85

## LISTA DE TABELAS

Tabela 1. Participação da colheita mecânica e manual no total da área colhida e da produção - 2011/12 ..... 30
Tabela 2. Cenários para avaliação de impactos ambientais ..... 53
Tabela 3. Caracterizações da vinhaça para diferentes destilarias ..... 55
Tabela 4. Necessidade nutricional da cana e conteúdo de macronutrientes da vinhaça e a torta de filtro ..... 56
Tabela 5. Doses recomendadas de vinhaça e torta de filtro para a cultura da cana-de-açúcar no Estado de São Paulo ..... 56
Tabela 6. Fatores de emissão para cálculo de perdas de Nitrogênio e Fósforo ..... 57
Tabela 7. Quantidade dosada de fertilizante químico para cada cenário (kg/ha) ..... 62
Tabela 8. Primary Energy Demand para a produção de 10,78 t etanol para diferentes taxas de substituição de fertilizantes químicos com vinhaça e torta de filtro ..... 63
Tabela 9. Perfil ambiental da produção de etanol para diferentes taxas de recuperação de vinhaça e torta de filtro ..... 64
Tabela 10. Cenários para avaliação de impactos ambientais ..... 67
Tabela 11. Conteúdo de N, P e K nas cinzas ..... 68
Tabela 12. Dosagens de fertilizantes químicos para produção 81 t/ha de cana (kg/há) ..... 73
Tabela 13. PED para a produção de 10,78 t de etanol com reaproveitamento de vinhaça como água de processo (GJ/FR) ..... 73
Tabela 14. Perfil Ambiental da produção de etanol com reaproveitamento de vinhaça como água de processo – cenário 2B ..... 74
Tabela 15. Variações relativas (%) de PED por adições de vinhaça e torta de filtro ..... 75
Tabela 16. Variações relativas (%) de impacto fornecidas por adições de vinhaça e torta de filtro ..... 77
Tabela 17. Impactos ambientais em termos de CC derivados de emissões de $CO_2$ e $N_2O$ para produção de 10,78t etanol $95\%_{w/w}$ ..... 78
Tabela 18. Impactos ambientais em termos de TA devido a emissões de $NH_3$, $SO_x$ e $NO_x$ para produção de 10,78t etanol $95\%_{w/w}$ ..... 79

Tabela 19. Impactos ambientais em termos de FEut devido a emissões de $PO_4^{3-}$ e P para produção de 10,78t etanol 95%$_{w/w}$ ..... 80
Tabela 20. Impactos ambientais em termos de HT devido a emissões para o solo de Cd e Zn para produção de 10,78t etanol 95%$_{w/w}$ ..... 80
Tabela 21. Impactos ambientais em termos de TEC devido a emissões para o solo de Cu e Zn para produção de 10,78t etanol 95%$_{w/w}$ ..... 81
Tabela 22. Conteúdo de ativos em vinhaça e quantidade de fertilizantes químicos usados para cada cenário de Análise de Sensibilidade ..... 82
Tabela 23. Análise de Sensibilidade de PED para a produção de etanol para diferentes quantidades de fertilizantes químicos ..... 83
Tabela 24. Perfil Ambiental obtido a partir da Análise de Sensibilidade para diferentes composições da vinhaça ..... 85
Tabela 25. Variações relativas de PED (%) para 2B em relação ao cenário 2A ..... 87
Tabela 26. Variações relativas (%) do Perfil Ambiental entre os cenários 2A e 2B ..... 88
Tabela 27. Impactos ambientais em termos de CC para produção de 10,78t de etanol ..... 89
Tabela 28. Impactos ambientais em termos de TA devido a emissões de $NH_3$, $SO_x$ e $NO_x$ para produção de 10,78t etanol 95%$_{w/w}$ ..... 90
Tabela 29. Impactos ambientais em termos de FEut devido a emissões de $PO_4^{3-}$ e P ..... 91
Tabela 30. Impactos ambientais em termos de HT ..... 92
Tabela 31. Impactos ambientais em termos de FEC ..... 93
Tabela 32. Depleção de água para 2A e 2B ..... 95
Tabela 33. Impactos ambientais em termos de CC para o cenário 2B' ..... 96
Tabela 34. Impactos ambientais em termos de TA devido a emissões de $NH_3$, $SO_x$ e $NO_x$ para produção de 10,78t etanol 95%$_{w/w}$ – Cenário 2B' ..... 97
Tabela 35. Impactos ambientais em termos de FEut devido a emissões de $PO_4^{3-}$ e P – cenário 2B' ..... 97
Tabela 36. Impactos ambientais para HT para os cenários 2B e 2B' ..... 98
Tabela 37. Impactos ambientais em termos de FEC para 2B e 2B' ..... 99
Tabela 38. Depleção de água para 2B e 2B' ..... 99

## LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

| | |
|---|---|
| ABNT | Associação Brasileira de Normas Técnicas |
| ACV | Avaliação de Ciclo de Vida |
| AICV | Avaliação do Impacto Ambiental |
| $Al_2(SO_4)_3$ | Sulfato de Alumínio |
| ANP | Agencia Nacional de Petróleo, Gás e Biocombustíveis |
| CaO | Óxido de Cálcio |
| $Ca(OH)_2$ | Hidróxido de Cálcio |
| CAPES | Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior |
| CC | Mudanças Climáticas |
| CED | Cumulative Energy Demand (Demanda de Energia Acumulada) |
| $CH_4$ | Metano |
| $CH_{4,b}$ | Metano, biogênico |
| $CH_{4,f}$ | Metano, fóssil |
| CO | Monóxido de Carbono |
| $CO_2$ | Dióxido de Carbono |
| $CO_{2,f}$ | Dióxido de Carbono, fóssil |
| $CO_{2,LT}$ | Dióxido de Carbono, transformação da terra |
| CONAB | Companhia Nacional de Abastecimento |
| CTBE | Laboratório Nacional de Ciência e Tecnologia em Bioetanol |
| DBO | Demanda Biológica de Oxigênio |
| EPE | Empresa de Pesquisa Energética |
| FAO | Organização das Nações Unidas para Alimentação e Agricultura |
| FAPESP | Fundação de Amparo e Pesquisa do Estado de São Paulo |
| FEC | Ecotoxicidade em Água Doce |
| $FeCl_3$ | Cloreto de Ferro |
| FEut | Eutrofização em Água Doce |
| FIESP | Federação das Indústrias do Estado de São Paulo |
| FR | Fluxo de Referência |
| GEE | Gases de Efeito Estufa |
| GREET | Greenhouse gases, regulated emissions, and energy use in transportation |
| $H_3PO_4$ | Ácido Fosfórico |
| HT | Toxicidade Humana |
| ICV | Inventário de Ciclo de Vida |
| IEA | Instituto de Economia Agrícola |
| IPCC | Intergovernmental Panel on Climate Change |
| ISO | International Standar Organization |
| $K_2O$ | Óxido de Potássio |

| | |
|---|---|
| KCl | Cloreto de Potássio |
| LCA | Life Cycle Assessment |
| MAPA | Ministério da Agricultura e Pecuária |
| MDIC | Ministério do Desenvolvimento e Comércio Exterior |
| MEE | Multi Effect Evaporation (Evaporação de Efeito Múltiplo) |
| MgO | Óxido de Magnésio |
| MINTER | Ministério do Interior |
| Mt | Milhões de Toneladas |
| $N_2O$ | Óxido de Dinitrogênio |
| NaClO | Hipoclorito de Sódio |
| $NH_3$ | Amônia |
| NOx | Óxidos de Nitrogênio |
| NRB | Non Renewable, biomass |
| NRF | Non Renewable, fossil |
| NRN | Non Renewable, nuclear |
| $P_2O_5$ | Pentóxido de Difósforo |
| PED | Primary Energy Demand (Demanda de Energia Primária) |
| PIB | Produto Interno Bruto |
| RB | Renewable, biomass |
| RW | Renewable, wind |
| RWA | Renewable, water |
| SMA | Secretaria do Meio Ambiente |
| $SO_x$ | Óxidos de enxofre |
| SSP | Superfosfato Simples |
| TA | Acidificação Terrestre |
| TEC | Ecotoxicidade Terrestre |
| UF | Unidade Funcional |
| UNICA | União da Indústria de Cana-de-Açúcar |
| WD | Depleção de água |

**SUMÁRIO**

1. INTRODUÇÃO ..... 17
2. OBJETIVO ..... 21
3. MÉTODO DE TRABALHO ..... 22
4. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA ..... 23
4.1. Descrição e caracterização do sistema ..... 23
*4.1.1 Mercado da cana-de-açúcar, do etanol e do açúcar* ..... 23
*4.1.2. Tecnologia de produção de cana-de-açúcar* ..... 27
*4.1.3. Tecnologia de produção de etanol e açúcar com cogeração energética* ..... 31
*4.1.4. Aspectos Ambientais associados ao processo de produção de bioetanol* ..... 34
4.2. Avaliação de Ciclo de Vida – ACV ..... 36
*4.2.1. Estudos de ACV relacionados ao reaproveitamento de vinhaça* ..... 40
5. TECNOLOGIAS DE REAPROVEITAMENTO DE VINHAÇA SELECIONADAS ..... 43
5.1. Uso da vinhaça no campo em processo de fertirrigação ..... 43
5.2. Uso da vinhaça como provedor água de processo ..... 44
5.3. Uso da vinhaça na produção de biogás ..... 45
5.4. Uso de vinhaça na produção de hidrogênio ..... 47
5.5. Uso de vinhaça na produção de etanol 2G ..... 48
5.6. Concentração da vinhaça ..... 48
5.7. Incineração da vinhaça ..... 49
6. SELEÇÃO DAS ROTAS DE REAPROVEITAMENTO DE VINHAÇA ..... 51
7. RESULTADOS ..... 52
7.1 Uso da vinhaça no campo em processo de fertirrigação ..... 52
*7.1.1. Condições de análise* ..... 52
*7.1.2. Modelagem do Ciclo de Vida* ..... 58
*7.1.3. Resultados* ..... 61
7.2. Reaproveitamento de fração liquida de vinhaça como água de processo ..... 65
*7.2.1. Descrição da tecnologia de reaproveitamento de fração líquida de vinhaça* ..... 65
66
*7.2.2. Condições de análise* ..... 67

*7.2.3 Modelagem do Ciclo de Vida* ..... 69
*7.2.4. Resultados* ..... 72
8. DISCUSSÃO ..... 75
8.1 Uso da vinhaça no campo em processo de fertirrigação ..... 75
8.2 Reaproveitamento de fração líquida de vinhaça como água de processo ..... 86
*8.2.1. Mudanças Climáticas (CC)* ..... 88
*8.2.2 Acidificação Terrestre (TA)* ..... 90
*8.2.3 Eutrofização Terrestre (FEut)* ..... 91
*8.2.4 Toxicidade Humana (HT)* ..... 91
*8.2.5 Ecotoxicidade de água doce (FEC)* ..... 92
*8.2.6. Depleção de água (WD)* ..... 94
*8.2.7. Avaliação do desempenho ambiental da produção de etanol com substituição de CaO* ..... 95
9. CONCLUSÕES ..... 100
10. RECOMENDAÇÕES DE TRABALHOS FUTUROS ..... 102
11. REFERÊNCIAS ..... 103

# 1. INTRODUÇÃO

Há algumas décadas a sociedade moderna tem buscado alternativas que reduzam a influência de derivados de recursos fósseis sobre a matriz energética mundial. A quase totalidade da energia que o planeta consome é suprida por fontes fósseis: petróleo, carvão e gás natural (Sydney et al., 2014). No caso particular do Brasil, a representatividade destas fontes na matriz energética local para o ano 2014 foi respectivamente de 6,9%, 3,2% e 13% (EPE, 2015).

Neste mesmo período, o setor de transportes foi o segundo maior consumidor de energia –32% do consumo final–, sendo superado apenas pelo setor industrial que representou 33%. O transporte rodoviário atingiu 30% do consumo final, sendo 47% proveniente de fontes derivadas de petróleo. Quanto ao setor de veículos leves, o consumo de gasolina automotiva representou 30% do consumo final (EPE, 2015).

Em termos ambientais, as preocupações relacionadas à utilização de tais fontes se associam ao aumento da concentração de carbono na atmosfera – principal causa do aquecimento global – e das consequências deste efeito em termos de mudanças climáticas (Sydney et al., 2014). Além disso, o esgotamento de recursos naturais não traria 'apenas' reflexos ambientais, mas talvez – e muito antes – problemas graves de ordem econômica e social, que também resultariam em desdobramentos ambientais imprevisíveis, ao menos no médio prazo. A magnitude desses problemas e suas potenciais consequências futuras levaram a sociedade a discutir novas condutas coletivas na sua relação com o meio ambiente. A partir disso a mesma sociedade passou a questionar de maneira mais insistente seus padrões de consumo, e a estimular a proposição e o desenvolvimento de rotas tecnológicas e processuais mais eficientes e assim, menos agressivas ao entorno.

Os biocombustíveis, em particular o etanol gerado a partir de fontes agrícolas como cana-de-açúcar, milho, mandioca e sorgo entre outros (também chamado de bioetanol), surgem nesse cenário como alternativas bastante auspiciosas pelo fato de serem provedores de energia de origem renovável, cujo balanço de carbono pode ser considerado neutro, ao menos em termos ao comportamento fisiológico da cultura.

No caso do processamento da cana-de-açúcar, os principais produtos obtidos são etanol anidro, utilizado na mistura com gasolina; etanol hidratado utilizado de forma pura nos veículos automotores; e açúcar.

O Brasil ganhou notoriedade quanto à produção de etanol de origem renovável ao criar em 1975 o Programa Proálcool, cujo objetivo maior era reduzir a dependência nacional de petróleo importado e seus derivados. Ações como o apoio governamental e a criação de uma estrutura institucional própria para consolidar e gerir o segmento – estabelecida tanto na forma de cooperativas de produtores de etanol, como entre estas e o segmento automotivo – viabilizaram a produção de automóveis movidos por este combustível. Como resultado de tais intervenções, entre 1978 e 1985 a produção de etanol elevou-se de 2800 milhões de litros para 11000 milhões de litros (Rico e Sauer, 2015).

O fato de terem a mesma origem faz com que etanol e açúcar estivessem sempre ligados. Assim, quando entre 1975 e 1985 os preços do açúcar sofreram flutuações significantes no mercado externo – junto ao qual a boa aceitação do produto se reverte em fonte importante de divisas para o Brasil – o processamento de etanol passou a ser a via natural de escoamento da produção de cana-de-açúcar preservando os produtores de um revés econômico sem precedentes para a época (Rico et al., 2010).

Atualmente no Brasil já não existem veículos movidos apenas com gasolina, sendo obrigatória sua mistura com etanol. Esta situação motivou o desenvolvimento da tecnologia *flex-fuel*, a partir da qual os motores que operam segundo Ciclo Otto podem utilizar ambos os tipos de combustível em quaisquer proporções, inclusive a totalidade de etanol hidratado (Orrego, 2014). A Portaria MAPA nº 105 de 28 de fevereiro de 2013 fixou o valor de $25\%_{v/v}$ de etanol anidro a ser misturado na gasolina (Brasil, 2013).

O avanço da tecnologia *flex-fuel* foi outro fator decisivo para consolidar a posição do etanol de cana junto ao segmento de veículos leves (Moraes, 2014). Segundo registros da Agência Nacional de Petróleo, Gás e Biocombustíveis (ANP), esta frota – que em 2012 superava os 17 milhões de veículos – já era abastecida majoritariamente por etanol (ANP, 2013). Por outro lado, a vinculação de um mercado expressivo como o automotivo ao etanol traz associadas vulnerabilidades e riscos intrínsecos à sua cadeia produtiva, como a sazonalidade do cultivo de cana-de-açúcar e a concorrência, por esta matéria-prima, com o

setor alimentício. Para atenuar tais efeitos encontram-se atualmente em desenvolvimento no país dois grandes eixos de ação não mutuamente exclusivos, estabelecidos com o objetivo de reduzir a pressão existente sobre o processamento de etanol. O primeiro deles consiste do estudo de fontes alternativas de produção, que considera tanto insumos já consagrados – como a mandioca –, como possibilidades que ainda podem ser melhor exploradas – caso das matérias-primas lignocelulósicas.

O segundo eixo de ação busca aumentar a eficiência do processamento de etanol de cana em si. São exemplos de ações neste segmento: a engenharia de cultivares modificados geneticamente que detenham maior concentração de açúcar associado; a elevação da taxa de conversão de açúcar a álcool dos processos biotecnológicos, ou mesmo, a proposição de rotas alternativas de processamento; e a revalorização de resíduos que decorrem do processamento atual (Cortez, 2010).

No entanto, para que possa despertar o interesse de usineiros e investidores ligados ao setor sucroalcooleiro, ademais de competitivo em termos tecnológicos e econômicos, qualquer dos desenvolvimentos supracitados deverá demonstrar bons resultados em termos de desempenho ambiental.

A obtenção de etanol a partir de rotas alcoolquímicas consagradas resulta na geração de resíduos com potencial para serem reaproveitados em outros setores produtivos. São exemplos disso a torta de filtro, para os segmentos de fertilizantes e de produção de rações, as leveduras secas no setor alimentício e de fármacos, e até o dióxido de carbono ($CO_2$) decorrente da fermentação, usado para a produção de bebidas ou comercializado como ativo no mercado de carbono.

A vinhaça, rejeito líquido obtido durante a destilação do etanol, é um dos integrantes mais proeminentes dessa categoria. As restrições legais estabelecidas quanto ao seu lançamento '*in natura'* em corpos hídricos – Portarias MINTER $n^0$ 323 – 29.11.1978 e $n^0$ 158 – 03.11.1980 – baseiam-se em propriedades fisico-químicas e características composicionais como: elevado teor de nitrogênio, fósforo, potássio, cálcio, magnésio e enxofre; presença expressiva de matéria-orgânica; conteúdos quali e quantitativos variados de metais pesados; baixo pH; e significativo grau de corrosividade (Ortegón et al, 2016).

Por outro lado, essas mesmas propriedades fazem da vinhaça objeto cada vez mais frequente de estudos e desenvolvimentos científicos e tecnológicos voltados a seu aproveitamento, por exemplo, como meio na produção de leveduras e ração animal, intermediário na fermentação do caldo-de-cana, insumo para a fertirrigação da lavoura, e até, na produção de energia (Christofoletti, et al., 2013).

Dado o baixo investimento de implantação, a fertirrigação de cana-de-açúcar com vinhaça é prática agrícola regular do setor sucroalcooleiro brasileiro. Algumas das alternativas antes enunciadas têm sido testadas quanto a viabilidade técnica, e outras, encontram-se ainda em fase de consolidação. No entanto, as implicações ambientais derivadas desses reaproveitamentos não foram ainda verificadas mais a fundo em qualquer desses casos. Esse quadro de incerteza é corroborado pela pouca disponibilidade de estudos acadêmicos específicos sobre o tema.

As formas mais modernas de gestão consideram quase que obrigatoriamente elementos associados à sustentabilidade de produtos, processos e serviços. Assim sendo, torna-se fundamental avaliar efeitos ambientais de rotas de reaproveitamento de vinhaça também com vistas a subsidiar processos de tomada de decisão que ocorram tanto no segmento de açúcar e álcool, como naqueles que se proponham a fazer uso desse insumo para suas transformações.

## 2. OBJETIVO

Este estudo acadêmico-científico se propõe a auxiliar no preenchimento de algumas das lacunas destacadas no capítulo anterior. Para tanto, definiu-se como objetivo geral da presente iniciativa proceder à avaliação do desempenho ambiental de ações voltadas ao reaproveitamento de vinhaça decorrente da produção de bioetanol.

Com dividendos acessórios, mas nem por isso menos importantes do que o propósito antes enunciado, a presente investigação busca também atender aos seguintes objetivos complementares:

- Identificar os principais focos de impacto associados às tecnologias em estudo, abrindo a perspectiva para que ações de redução e mitigação de tais efeitos possam ser implementadas ainda durante a fase de concepção das mesmas rotas processuais;
- Fornecer subsídios para que a variável ambiental venha a ser incorporada a estudos de viabilidade necessários à implementação de tecnologias de reaproveitamento de vinhaça.

# 3. MÉTODO DE TRABALHO

No intuito de atender de maneira consistente e criteriosa aos objetivos antes enunciados no Capítulo 2, o presente estudo acadêmico-científico foi estruturado em termos de Método de Trabalho, na forma das seguintes ações:

a) Revisão de literatura: identificação junto a fontes consistentes e referenciáveis de dados e informações relacionadas as práticas de reaproveitamento de vinhaça em sistemas antrópicos;
b) Seleção das alternativas de reaproveitamento de vinhaça a serem avaliadas a partir da aplicação de critérios objetivos;
c) Caracterização dos processos identificados na etapa anterior. Essa ação ocorre por intermédio do detalhamento de rotas tecnológicas e de condições regulares de operação das mesmas práticas. Além disso, são também objeto deste detalhamento a quantificação de insumos, matérias-primas, aditivos de processo e utilidades, e ações de transporte associadas aos processamentos. Por fim a caracterização inclui a mensuração de perdas para o ambiente, ocupação e transformação do solo, e geração de coprodutos.
d) Construção de modelos lógicos que representassem os processos em análise.
e) Avaliação do desempenho ambiental das rotas selecionadas a partir do uso da técnica de ACV a fim de determinar perfis de impacto ambiental associados aos referidos processamentos.
f) Análise dos resultados obtidos e proposição, ainda que em nível conceitual, de ações de potencias melhoria de desempenho ambiental para os referidos arranjos processuais.

# 4. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

## 4.1. Descrição e caracterização do sistema

### *4.1.1 Mercado da cana-de-açúcar, do etanol e do açúcar*

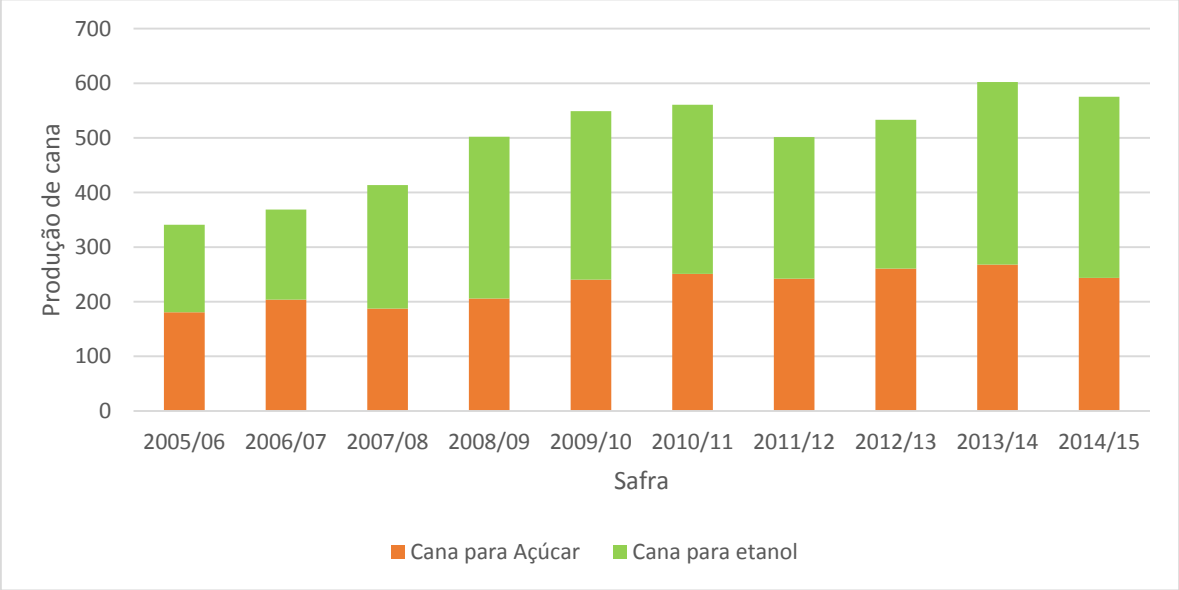
Levantamentos realizados pela Organização das Nações Unidas para Alimentação e Agricultura – FAO no ano de 2013 colocam o Brasil no primeiro posto no ranking mundial dos países produtores de cana-de-açúcar. O desempenho em questão, de cerca de 768 milhões de toneladas (Mt), é tão expressivo que supera em 64% a produção agregada da Índia (341 Mt) e China (129 Mt) – que ocupam, respectivamente, os segundo e terceiro lugares na mesma classificação.

Em termos de repartição geográfica interna, o estado de São Paulo apresenta-se, já há quase duas décadas, como o maior produtor de cana do país com 52% do total da área plantada (4,7 milhões de hectares). A este se seguem os estados de Goiás com 9,5%, Minas Gerais (8,8%), Mato Grosso do Sul (7,4%), Paraná (7,1%), Alagoas (4,3%) e Pernambuco (2,9%) (Companhia Nacional de Abastecimento – CONAB, 2014).

Quanto aos destinos da produção observa-se uma equidade em termos do uso da cana colhida para suprimento de demandas dos segmentos de álcool e de açúcar. No entanto, a cada safra esse proporcionamento mostra-se cada vez mais condicionado a fatores de ordem mercadológica como custos de produção, oferta e demanda (Teixeira, 2013). O gráfico que aparece indicado na Figura 1, construído a partir de dados disponibilizados pela CONAB, apresenta tal relação para as safras entre 2005/06 e 2012/13 de produção de cana-de-açúcar na região Centro-Sul do Brasil. Naquele caso, os valores de produção foram expressos em Milhões de Toneladas (Mt).

Até a instalação da tecnologia *flex-fuel*, a destinação da cana-de-açúcar produzida na região Centro-Sul do Brasil atendia essencialmente o setor açucareiro. Essa tendência aparece na Figura 1 para os períodos 2005/06 e 2006/07, nos quais os consumos de cana para produção de açúcar corresponderam respectivamente a 181 e 204 Mt. A partir da safra 2007/08, nota-se uma inversão de perfil em favor do setor alcooleiro, que já na safra 2008/09 passou a absorver 296 Mt (59% do total produzido no período).

Figura 1. Distribuição da cana para produção de etanol e açúcar

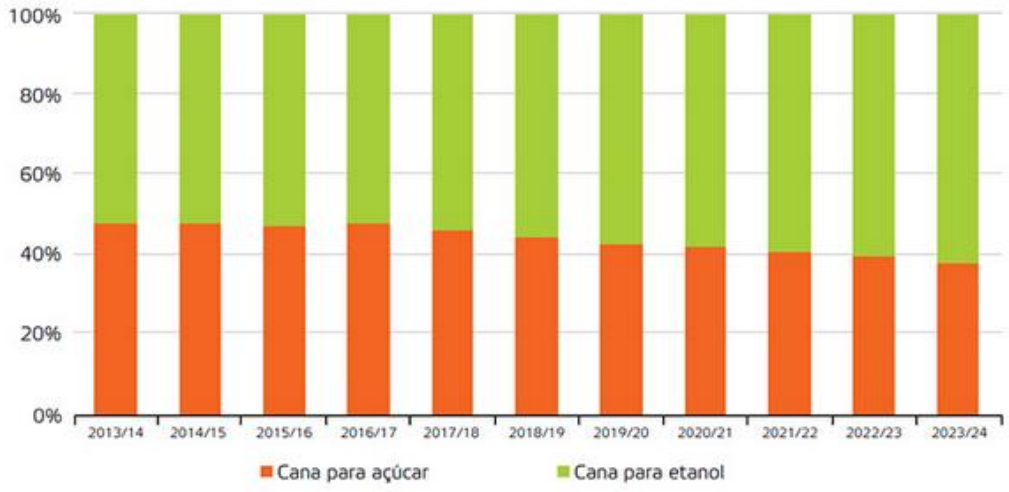



Fonte: CONAB (2005-2015)

Com a quebra da produção da Índia em 2009/10 e a baixa rentabilidade do etanol no mercado interno em razão da política de preços de combustíveis vigente no país à época, a atividade voltou-se gradativamente para a produção de açúcar que consumiu 240 Mt da oferta de cana nesse período (FIESP, 2013). No entanto, as projeções quanto ao destino da cana-de-açúcar para a próxima década, baseadas nas safras 2013/14 e 2014/15 indicam que o setor alcooleiro retomará a supremacia. A Figura 2 apresenta a projeção relativa do destino da cana processada no Brasil para este horizonte temporal, estabelecido a partir da safra 2013/14.

As tendências verificadas nos dois anos anteriores devem em princípio se manter na safra 2015/16. Para as sete safras seguintes, porém, a produção de cana deve voltar a sustentar a obtenção de etanol dado o crescimento da frota de veículos *flex-fuel* do país. Para que essa tendência de fato se confirme Teixeira (2013) coloca como condição mandatória a disponibilização de etanol no mercado consumidor com preços competitivos com os praticados para a gasolina.

Figura 2. Projeção do destino da cana-de-açúcar




Fonte: FIESP (2013)

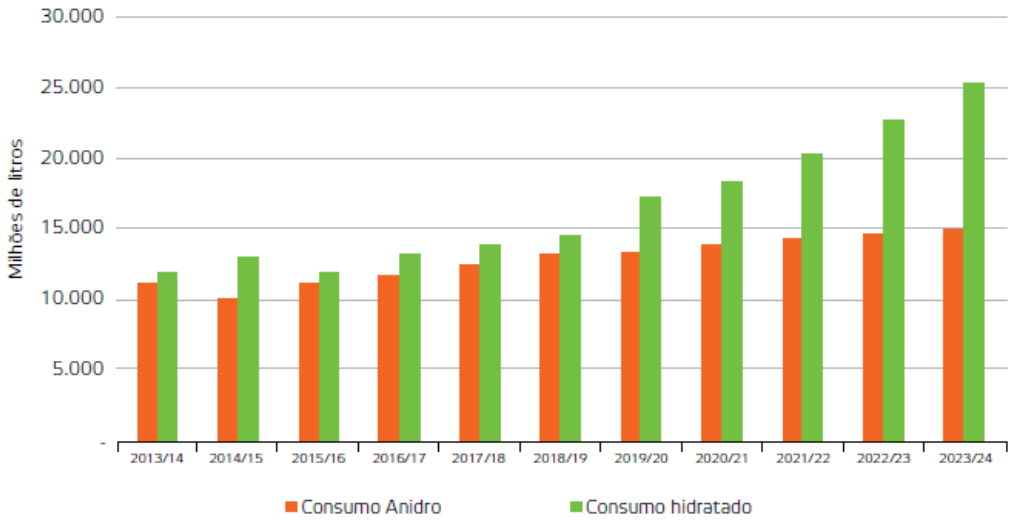
Nas condições atuais, cerca de 2/3 do açúcar produzido no país é exportado. Apenas na safra 2013/14 cerca de 27 Mt de açúcar foram remetidas para o exterior, gerando uma receita de US$11 bilhões. A título de comparação, no mesmo período 2,6 bilhões de litros de etanol foram exportados e se reverteram em US$ 1,7 bilhões em divisas para o Brasil (UNICA, 2014). Esses desempenhos elevaram o Produto Interno Bruto (PIB) do setor sucroenergético na safra 2013/14 ao patamar de US$ 43,3 bilhões. O açúcar respondeu por 57% desse total, ao passo que ao etanol hidratado pode-se atribuir a maior contribuição relativa em termos de mercado interno, que representou pouco menos de 95% da receita conseguida com o ativo.

Além disso, a produção de etanol teve participação expressiva na geração de postos de trabalho no mesmo período, com a criação de pouco menos de 1 milhão de empregos diretos, além de outros 2,

6 milhões de empregos indiretos e informais (ÚNICA, 2014). Para a safra 2015/16 estima-se a produção de 29 bilhões de litros de etanol, cerca de 0,5% maior que o obtido na safra anterior. Pouco mais de 41% deste total seriam gerados na forma de etanol anidro (99,7% $_{w/w}$) utilizado na mistura com gasolina; o restante, na forma hidratada (95% $_{w/w}$), serve a veículos *flex fuel*.

Caso o prognóstico se confirme, a produção de etanol anidro experimentará um acréscimo de volume de produção de 3,0% e o homólogo hidratado, decréscimo de 1,2%. Tais desempenhos são comparados com relação àqueles alcançados pela safra anterior (CONAB, 2015).

Figura 3. Consumo doméstico de etanol anidro e hidratado




Fonte: FIESP (2013)

A Figura 3 mostra a tendência quanto à produção de etanol anidro e hidratado para um período de dez anos. Esse perfil de evolução, traçado pela Federação das Indústrias do Estado de São Paulo (FIESP), leva em conta a inversão da política praticada atualmente pelo Governo Federal com relação aos preços da gasolina, que resultaria em maior convergência destes valores com os praticados em outras partes do mundo. A adequação criaria condições para que o etanol voltasse a ser competitivo nos mercados interno e externo, sustentando assim uma elevação do consumo médio do produto hidratado já a partir da próxima safra. Para projetar o comportamento futuro do etanol anidro a FIESP adotou a hipótese de que haverá manutenção da contribuição de $25\%_{w/w}$ de etanol para a mistura. Assim, espera-se que a demanda siga com taxas ligeiramente crescentes, já tendo em conta, mais uma vez, o uso de gasolina na frota *flex-fuel*.

Em relação à produção de açúcar, estimativas realizadas pela CONAB para a safra 2015/16 indicam processamentos da ordem de 36 Mt, ou seja, uma redução de 4,0% de produção em relação ao total obtido em 2013/14 (CONAB, 2014). Esse cenário fundamenta-se: (i) na expectativa de redução da demanda de açúcar; (ii) necessidade de liquidez das unidades produtoras com problemas financeiros; e (iii) na receita obtida com a venda de açúcar, que é inferior àquela gerada pelo etanol (UNICA, 2014).

### *4.1.2. Tecnologia de produção de cana-de-açúcar*

O cultivo da cana ocorre em dois ciclos. O primeiro ciclo é chamado de cana-planta, e se estende até o primeiro corte. O período da cana-planta pode ser de 12 ou 18 meses, conforme a variedade. Após o primeiro corte se inicia o ciclo da cana-soca, que passa a ser de 12 meses independentemente do tipo de cultivar plantado. Por permitir vários cortes – em geral até cinco - sem a necessidade de replantio a cultura da cana caracteriza-se pela semiperenidade. No entanto, a cada safra há necessidade de aplicação de insumos agrícolas de forma que a cultura continue com patamares de produtividade vantajosos (CONAB, 2014).

De maneira geral o processo de produção da cana se divide em três etapas: plantio; tratos culturais e colheita. Existem três formas de preparo do solo, na fase de plantio: Sistema Convencional, Sistema de Cultivo Mínimo e Sistema de Plantio Direto, todos eles com o objetivo deixar o solo nas melhores condições possíveis para o crescimento e o desenvolvimento da cana.

No Sistema Convencional de preparo do solo são executadas operações de aração, gradagem (para a eliminação dos torrões, e o preenchimento de lacunas do solo), subsolagem (rompimento de camadas muito compactas do solo), e calagem (adição de calcário), todas elas realizadas durante o primeiro ciclo da cana.

No Sistema de Cultivo Mínimo as etapas convencionais de preparo do solo são substituídas por uma operação de subsolagem, tendo-se assim redução na erosão, no uso de máquinas e implementos agrícolas. No Plantio Direto, restos vegetais são deixados sobre a superfície do solo; este é revolvido apenas no sulco onde são depositadas as mudas e fertilizantes e as plantas infestadas são controladas por herbicidas. No Brasil o Sistema de

Plantio Direto é cada vez mais frequente por proporcionar uma produção agrícola mais sustentável, com menores mínimos impactos ambientais e sem degradação do solo (Paraízo, 2013).

A nutrição do solo será completada mais adiante no processo, por meio de aplicação de formulações fertilizantes compostas de Nitrogênio (N), Fósforo (P) e Potássio (K) além de vinhaça, torta de filtro e cinzas (via fertirrigação) que, como já mencionado, são resíduos da etapa industrial de produção de etanol. Os tratos culturais visam proteger a plantação contra o ataque de ervas daninhas e pragas, e evitar doenças. Esses males são combatidos com pulverização de herbicidas e agroquímicos (Sugawara, 2012).

Após um período de cultivo de 180-210 dias dá-se então início à colheita. Esta é a fase do processo que mais mudanças tecnológicas tem sofrido nos últimos anos em função de continuadas exigências socio-ambientais, e da necessidade de redução de custos de produção (CONAB, 2013). O tipo de colheita pode influenciar a produção e a longevidade da cultura, os atributos físicos, químicos e biológicos do solo, o meio ambiente e a saúde pública (Ronquim, 2010).

Antes da implantação da colheita por sistema manual efetua-se a queima de biomassa com o objetivo de eliminar matéria seca existente na lavoura (esta pode ser reduzida em até cerca de 30%) e de abrir vias de circulação internas à área de plantio para que os cortadores de cana possam retirar as plantas. Além de impactos ambientais, essa ação reduz o teor de matéria-orgânica do solo (Cortez, 2010).

A colheita mecanizada da cana-de-açúcar é cada vez mais frequente entre os sistemas de produção exercitados no Sul-Sudeste do Brasil, e em particular no estado de São Paulo. A Lei Estadual n$^{o}$ 11.241/2002 dispõe sobre a eliminação gradativa da queima de biomassa na região. Além disso, o dispositivo regulamenta a implantação definitiva da colheita mecanizada em áreas mecanizáveis até o ano 2021, e em áreas não mecanizáveis até 2031 (BRASIL, 2002). Muito embora bastante clara com relação a seus propósitos a Lei n$^{o}$ 11.241 não foi capaz de alcançar os objetivos a que se propunha.

Em 2007 o governo do Estado de São Paulo e a União da Agroindústria de Cana-de-Açúcar (UNICA) firmaram o chamado Protocolo Agroambiental. O acordo, criado com objetivo de implantar e desenvolver ações de sustentabilidade na cadeia produtiva de

açúcar, bioetanol e bioenergia, tem como uma de suas principais metas antecipar a eliminação da queima na região. Assim, os prazos para a extinção da queima de biomassa foram antecipados: o ano de 2014 tornou-se limite para suspensão de tais práticas em terrenos cuja declividade ($\varphi$) variasse entre $0 \leq \varphi\ (\%) \leq 12$; enquanto 2017 foi definido como termo para suspensão de queimadas que ocorressem em áreas nas quais $\varphi > 12\%$ (SMA/SP, 2015).

No sistema de colheita mecanizada as folhas, bainhas, ponteiro, além de quantidades variáveis de pedaços de colmo são cortados, triturados e lançados sobre a superfície do solo, formando uma cobertura de resíduo vegetal denominada palha ou palhada. No entanto, há um aspecto prático importante a ser destacado: não é regra geral que a colheita mecanizada de cana extraia sempre cana crua, ou seja, sem que haja queima da palha. Ao contrário do que pode parecer, chega a ser usual proceder-se a combustão de palha nos canaviais previamente à entrada das colheitadeiras com o intuito de melhorar o rendimento do processo (CONAB, 2013).

Cabe ressaltar alguns fatores sociais relacionados ao tipo de colheita de cana-de-açúcar. Verificou-se que as atividades de colheita manual envolvem altos riscos de saúde para os trabalhadores e as comunidades locais. A mecanização da indústria da cana deve melhorar também as condições de trabalho e a renda dos trabalhadores canavieiros. No entanto, a perda de emprego em consequência de modificação de procedimento – uma colheitadeira substitui entre 80 e 100 cortadores de cana – coloca um grande desafio para o setor sucroenergético brasileiro, bem como para os Governos Estaduais e o Governo Federal (Du et al., 2015).

A escolha do método de colheita depende de fatores diversos, como: disponibilidade de mão-de-obra, aspectos socioeconômicos, configuração do terreno onde está implantado o canavial, sistema de carregamento a ser utilizado, entre outros. A Tabela 1 apresenta dados relativizados sobre o tipo de colheita utilizada em diferentes regiões do Brasil.

Tabela 1. Participação da colheita mecânica e manual no total da área colhida e da produção - 2011/12

| **Estado** | **Colheita manual (%)** | **Colheita Mecanizada (%)** | **Total de cana colhida (Mt)** |
|---|---|---|---|
| São Paulo | 27,8 | 72,2 | 305 |
| Paraná | 51,7 | 48,3 | 40 |
| Minas Gerais | 26,8 | 73,2 | 50 |
| Goiás | 20,4 | 79,6 | 45 |
| **Total: Região Centro-Sul** | **28,4** | **71,6** | **495** |
| Alagoas | 84,9 | 15,1 | 28 |
| Pernambuco | 98,4 | 1,56 | 17 |
| **Total: Região Norte-Nordeste** | **86,5** | **13,5** | **66** |
| **Total Brasil** | **36,1** | **63,9** | **561** |

Fonte: CONAB (2013)

O perfil apresentado na Tabela 1 indica ser a colheita manual uma prática mais usual na região Norte-Nordeste do Brasil onde o cultivo de cana é realizado por produtores que não possuem capital suficiente para adquirirem maquinário específico para cumprir a função. Segundo Du et al (2015) a produção nesta zona ocorre em menor escala do que a do Centro-Sul, podendo chegar a ser considerada inclusive como apenas de subsistência.

Por outro lado, seu grau de empregabilidade é mais elevada que o alcançado pelos cultivos extrativistas; o mesmo ocorre com a forma de distribuição de renda. A predominância de colheita manual é determinada também por fatores externos. Em Alagoas e Pernambuco, em que se registram as maiores produções de cana do Norte-Nordeste, a declividade do solo simplesmente inviabiliza a implementação da colheita mecanizada. Por conta disso, a disponibilidade de áreas de cultivo com potencial de mecanização nesses estados não vai além, respectivamente, de 48% e 50% (Moreno, 2011).

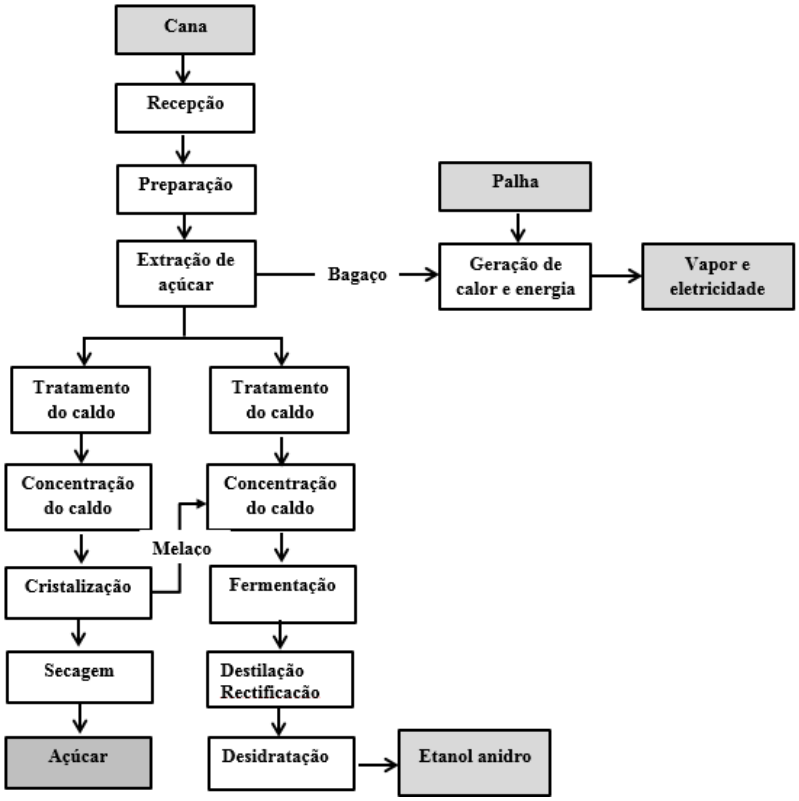
### *4.1.3. Tecnologia de produção de etanol e açúcar com cogeração energética*

Os processos de produção de etanol e açúcar com cogeração energética a partir do bagaço de cana-de-açúcar aparecem descritos de forma sumarizada na Figura 4. A ação se inicia com a remoção a seco de parte (~ 70%) dos resíduos – terra, pedras e lixo – que aderem à cana que é trazida do campo (Dias et al., 2009). Concluída essa operação a cana é levada para a etapa de extração do caldo, a ser realizada por prensagem em tandens de moagem. O processo, que ocorre por via úmida e denomina-se imbibição, consome cerca de 280 kg água /t cana alimentada. A eficiência da extração está condicionada ao número de estágios de moagem, mas em linhas gerais, varia entre 94-97% com relação à quantidade de açúcar disponível na cana. Deste processo originam-se dois produtos: o bagaço e o caldo misto. O primeiro, tal como já foi mencionado, será utilizado como combustível no sistema de cogeração, enquanto o segundo segue para o próximo estágio de processo (Dias et al., 2009).

Algumas impurezas, dissolvidas e em suspensão, são separadas do caldo pela adição de reagentes químicos, como óxido de cálcio (CaO) e ácido fosfórico ($H_3PO_4$) (Dias et al., 2009). É prática regular fazer uso de aquecimento para elevar as taxas de eficiência de purificação do caldo. Depois disso, o caldo passa por um separador *flash* antes de alimentar a unidade de clarificação que será responsável pela separação entre precipitado e fração de clarificado. Esta última passa por uma etapa de filtração da qual a fração liquida retorna ao processo para ser misturada à corrente principal de caldo. A fração sólida recolhida da filtração consiste da torta de filtro (Palacios-Bereche et al., 2014).

Neste momento do processo o caldo clarificado contem cerca de 15% $_{w/w}$ de sólidos diluídos. Esse total deverá ser elevado com o objetivo de proporcionar taxas adequadas de conversão de sacarose em etanol durante a fermentação, e de manter dentro de limites aceitáveis os consumos energéticos despendidos com a purificação do produto. A concentração do caldo se dá em evaporadores de efeito múltiplo (MEE) cujas condições de pressão e temperatura estão ajustadas para que o teor final de sacarose seja de 65% $_{w/w}$ (Dias et al., 2009).

Figura 4. Fluxograma da produção de açúcar e etanol, com cogeração




Fonte: Dias et al (2015)

Os açúcares se convertem em etanol por meio de fermentação alcoólica por ação de leveduras sob condições controladas de pH e temperatura. O produto desta etapa é um substrato açucarado, conhecido como vinho. A fermentação alcoólica gera ainda $CO_2$ que deve ser escoado das dornas de fermentação para coibir problemas de elevação de pressão do meio, alteração de acidez, além de evitar que o tempo de residência da massa reacional dentro do vaso se reduza (Cortez, 2010).

Após a fermentação, o vinho – então contendo cerca de 8% $_{w/w}$ de etanol – é levado para o sistema de destilação para remoção de água. Este processo de separação gera etanol hidratado – 92,8% e 95% $_{w/w}$ $C_2H_6O$ – além de uma grande quantidade de vinhaça (10-12 L/L produto). Para a produção de etanol anidro, uma etapa adicional de desidratação deve ser adicionada ao final do processo com vistas a obter-se um produto com até 99,7% $_{w/w}$ em etanol (Palacios-Bereche et al., 2014).

No processo de produção de açúcar, a concentração do caldo em sistema de MME gera o xarope, cujo excesso de água é removido em tanques de vácuo. Dentro desses vasos forma-se uma mistura de cristais de açúcar e xarope, que será transferida para cristalizadores. Nestes equipamentos a sacarose irá cristalizar, para então ser separada por processo de centrifugação. Água e vapor são usados para lavar os cristais (Dias et al., 2015).

Na moagem da cana são produzidos cerca de 140 kg bagaço / t cana (base seca) (Dias et al., 2011). Dado seu conteúdo energético – 7600 kJ/kg (50% umidade) – essa forma de biomassa serve de combustível para caldeiras, das quais emana vapor de média pressão (~20 bar). O vapor sofrerá sucessivas expansões até atingir condições termodinâmicas necessárias para ser usado em processos de aquecimento que ocorrem nas plantas de processamento de açúcar e de etanol.

Antes disso, porém, e com o intuito de melhor aproveitar a energia a ele associado, o vapor circula por turbina isentrópica cuja eficiência energética é da ordem $\eta \sim 70\%$. Esta unidade integra o ciclo Rankine de cogeração, que se compõe ainda de válvula de expansão, condensador e bomba para produzir eletricidade para o processo (Nogueira et al., 2014).

Durante os últimos anos, desenvolvimentos tecnológicos têm sido realizados em caldeiras e turbinas com o objetivo de tornar os ciclos de cogeração não apenas mais eficientes, mas também, de permitir que esses operem com pressões de partida mais elevadas de até 200 bar (Guerra, 2014). O arranjo permite a geração de eletricidade excedente em relação àquela demandada por usinas e destilarias. Esse adicional de energia elétrica é exportado para a rede concessionária gerando receita para os produtores particularmente durante os períodos de entressafra em que a instalação permaneceria, naturalmente, em condição ociosa. Dado o aumento dos custos de energia elétrica e de petróleo no Brasil e no mundo, o uso de bagaço em sistemas de cogeração tem-se tornado uma alternativa bastante atraente em termos de produção dessa utilidade (Dias et al., 2011).

A quantidade de eletricidade produzida pelo processamento de cana pode ser significativamente aumentada quando outras fontes de biomassa com conteúdo energético

elevado – casos de palha e ponteira – são coletadas no campo para também servirem de combustíveis nos ciclos de cogeração.

Grandes quantidades de palha ficarão disponíveis à medida que a queima que ocorre antes da colheita manual for proibida. A tendência natural é que este material passe a ser uma opção de negócio atraente para as destilarias, sempre respeitando limites de incorporação do material. Dado os teores médios de sílica e cloretos existentes na palha, seu limite de utilização para esse uso é da ordem de 50% $_{w/w}$ do total gerado (Seabra e Macedo, 2011). A despeito disso, Seabra et al registram experiências bem-sucedidas de consumo de palha para cogeração de eletricidade em unidades da região Centro-Sul há mais de meia década (Seabra et al., 2010).

A cogeração com bagaço e palha proporciona não apenas maior oferta de eletricidade à rede concessionária nacional, como também amplia as possibilidades da oferta de energia elétrica durante o período de seca, quando a capacidade de geração das hidrelétricas costuma ser seriamente afetada (Hofsetz e Silva, 2012).

#### *4.1.4. Aspectos Ambientais associados ao processo de produção de bioetanol*

*Aspecto Ambiental* é definido pela ABNT NBR ISO14001 (ABNT 2004) como "(…) *elementos das atividades, produtos e serviços de uma organização que podem interagir com o meio ambiente (...)*". Em outras palavras, aspectos ambientais correspondem aos recursos materiais e energéticos obtidos junto ao meio ambiente, ou rejeitos – também na forma de matéria e energia – que nele forem lançados, em decorrência de qualquer atividade antrópica. Uma terceira forma de apresentação dos aspectos ambientais está associada a transformações do meio físico, também como desdobramento de um processo realizado pelo ser humano.

Os aspectos ambientais associados à produção de bioetanol podem ser analisados de maneira compartimentalizada, ou seja, dentro de cada uma das etapas que constituem o sistema de produto, denominação dada ao conjunto de transformações antrópicas necessárias para o atendimento de uma função, sobre a qual será aplicada a técnica de ACV.

Durante a produção de cana-de-açúcar – primeiro estágio daquela cadeia de produção – os aspectos ambientais estão associados tanto ao consumo de recursos e geração de rejeitos, como às alterações do meio físico. O consumo de recursos se dá de maneira indireta, a partir das fontes naturais empregadas para a produção de fertilizantes, pesticidas, aditivos químicos, combustíveis e mesmo, de bens de capital como máquinas agrícolas e locais de estocagem. Em termos de rejeitos destacam-se emissões de óxido de dinitrogênio ($N_2O$) derivadas do uso de adubos nitrogenados; $CO_2$ fóssil, decorrente da queima de combustíveis em máquinas agrícolas; e emissões de $CO_2$ e $CH_4$, ambos biogênicos, a partir da limpeza do terreno para colheita da cana, principalmente quando esta ocorre previamente à colheita manual (Garcia e Sperling, 2010). A etapa de colheita pela modalidade mecanizada também emite $CO_2$ de origem fóssil, pelo fato de nela se fazer uso de máquinas agrícolas (Capaz et al., 2013).

A transformação do meio físico ocorre em todas as situações de expansão de colheita sobre áreas em que anteriormente não havia ação humana. Não há registro dessa prática no estado de São Paulo há mais de duas décadas; porém, caso o avanço da cultura de cana se dê sobre regiões em que existam outros cultivos agrícolas, ou mesmo, atividade pecuária, as mudanças nos estoques de carbono orgânico originárias desta substituição devem ser avaliadas (Walter, 2011).

O segundo estágio de interferência antrópica é a etapa industrial, na qual se produz o etanol. As transformações associadas à síntese consomem recursos e geram rejeitos materiais – nas formas sólida, líquida e gasosa –, e energéticos – calor, vibração e ruído. Em termos de consumo de recursos hídricos, destaca-se a grande quantidade de água usada na lavagem da cana – cerca de 20% do total de água usada no processo – e água de refrigeração – 12% da demanda total (Chaves-Rodrigues et al., 2013). Já as emissões atmosféricas compreendem perdas de $CO_2$, monóxido de carbono (CO), e óxidos de nitrogênio ($NO_x$) - originados da queima do bagaço no sistema de cogeração - material particulado, e cinzas.

Na fermentação são emitidos $CO_2$ e compostos orgânicos como aldeídos, álcoois e até hidrocarbonetos lineares e cíclicos (Vilela, 2013). Grandes quantidades de torta de filtro e

vinhaça são também geradas na destilaria. Finalmente, é importante mencionar perdas de calor, que ocorrem nas chaminés das caldeiras do ciclo de cogeração (Nascimento, 2010).

## 4.2. Avaliação de Ciclo de Vida – ACV

O conceito de Ciclo de Vida compreende o conjunto de estágios de um sistema antrópico que são necessários para que um produto ou serviço atenda com a eficiência que dele se espera, às funções para as quais foi concebido. Em linhas gerais, tais estágios são classificados em extração dos recursos, manufatura, uso e descarte final do produto. A conexão entre eles ocorre por meio de ações de transporte (Silva et al., 2010). A Figura 5 descreve de maneira esquemática os estágios que compõem o Ciclo de Vida de um produto.

Por analogia Avaliação do Ciclo de Vida (ACV) pode então ser entendida como uma técnica de gestão desenvolvida com o intuito de fornecer um diagnóstico quantitativo do desempenho ambiental do conjunto de etapas antrópicas que devem ser cumpridas para que um produto, processo, ou serviço cumpra os propósitos para os quais foi produzido (ou exercitado) (Silva, 2012).

Partindo-se da abordagem descrita na norma ABNT NBR ISO 14040 (ABNT, 2009) a técnica de ACV compreende quatro etapas estruturais: *Definição de Objetivo e Escopo; Análise do Inventário; Avaliação de Impactos Ambientais*, e *Interpretação*.

A representação esquemática indicada na Figura 6 leva a perceber que todas as etapas da ACV não apenas são interdependentes, como também iterativas. Isso quer dizer que as decisões metodológicas tomadas em certa etapa do método poderão provocar revisões de outras que a ela estão interligadas. Essa lógica proporciona homogeneidade metodológica além de induzir readequações que se façam necessárias durante o avanço do estudo (Silva e Kulay, 2010).

Figura 5. Esquema da Análise de Ciclo de vida de um produto

Fonte: Cervantes (2015)

Na *Definição de Objetivos* devem ser descritos de maneira clara e inequívoca os objetivos do estudo, aplicações para as quais este será desenvolvido e o público-alvo a que seus resultados se destinam.

Figura 6. Estágios do estudo ACV

Fonte: ABNT NBR ISO 14040 (2009)

Na *Definição de Escopo* são estabelecidas premissas, condicionantes e orientações de caráter geral para o estudo como, por exemplo, a função a ser exercitada pelo objeto da análise, bem como uma quantificação de seu exercício (Unidade Funcional, UF); as fronteiras do sistema de produto (com o meio ambiente e com outros sistemas); diretrizes orientativas para o processo de coleta de dados; tipo e qualidade dos dados; procedimentos de alocação; critérios de exclusão de dados; métodos e categorias de impacto ambiental; tratamento de incertezas; e tipo e formato do relatório (ABNT, 2009a e 2009b).

Na *Análise de Inventário*, dados correspondentes a aspectos ambientais, ou seja, correntes de materiais e de energia que circulam pelas fronteiras entre o processo em análise e o meio ambiente são coletados. É usual que sejam quantificados ainda bens de consumo e subprodutos, fluxos intermediários – que interligam dois estágios do sistema de produto em análise -, e fluxos de produto que são também utilizados no sistema mas procedem de outros processos antrópicos (Gunady et al. 2012). Os dados a serem utilizados para composição do inventário podem ser obtidos em campo (dados primários) ou por consulta a registros de processo ou à literatura (dados secundários).

A coleta de dados gera um conjunto de informações que deve ser tratado para compor o Inventário de Ciclo de Vida (ICV). Cabe ao executor da ACV verificar se os requisitos de qualidade de dados foram atendidos, aplicar balanços de massa e energia para verificar a consistência desses valores, e correlacionar os dados à UF (ou fluxo de referência: FR).

Dados quantitativos utilizados na comparação de materiais ou processos e dados qualitativos empregados para descrição de aspectos ambientais ou etapas não quantificáveis, podem ser selecionados a partir da aplicação dos critérios de exclusão (ou *'cut-off'*). Tais critérios permitem identificar quais aspectos ambientais serão considerados em cada processo elementar, menor nível de um sistema de produto para o qual é possível quantificar correntes de matéria e energia de entrada e saída (ABNT, 2009b).

Nesse instante, devem também ser incorporados os critérios de alocação a fim de proceder a uma ponderação minimamente coerente de aspectos ambientais entre os distintos produtos gerados em determinado processo inscrito no sistema de produto (Martinho, 2014).

A alocação consiste na divisão adequada das cargas ambientais geradas a montante no ciclo de vida entre o produto principal e os subprodutos do sistema. O uso desse recurso é necessário em situações de multifuncionalidade para as quais a ACV será empregada com enfoque atribucional (Ferreira, 2012). Os critérios de alocação mais comumente empregados em estudos de ACV baseiam-se em propriedades ou características físicas (massa, ou conteúdo energético), ou no valor comercial dos produtos gerados (Sugawara, 2012). O uso de procedimentos de alocação é uma questão controversa. A ABNT NBR ISO 14040 (2009a) recomenda evitar a alocação sempre que possível, quer pela discretização do processo em que ocorre a multifuncionalidade até que se observe uma separação física entre os produtos gerados; quer expandindo os limites do sistema para incluir as funções adicionais a ele relacionadas (van der Voet, 2009).

A etapa de *Avaliação do Impacto do Ciclo de Vida (AICV)* analisa as magnitudes e significâncias dos efeitos potenciais causados pelo ciclo de vida do produto sobre o meio ambiente e sobre o ser humano (Martinho, 2014). De acordo com a ABNT NBR ISO 14044 (2009b) a AICV é composta tanto por elementos obrigatórios, como pelos ditos opcionais. Como elementos obrigatórios têm-se: Seleção de categorias de impactos e de seus respectivos indicadores; Classificação; Caracterização; e, Definição do Perfil de Impacto Ambiental.

A Seleção das Categorias de Impacto Ambiental baseia-se nos resultados do ICV, particularmente nos aspectos ambientais de maior relevância para o estudo. São categorias de impactos de uso frequentes em estudo desta natureza: Mudança Climática; Depleção da Camada de Ozônio; Acidificação; Depleção de Recursos Abióticos; Eutrofização, Formação de Foto-oxidantes, Depleção de Recursos Hídricos e Fósseis, Transformação e Ocupação do Solo, Toxicidade Humana e Ecotoxicidade, entre outros. As categorias de impacto devem ser correlacionadas com resultados gerados pelo ICV. Esta ação ocorre em duas etapas: primeiramente em termos qualitativos – segundo procedimento de Classificação –; e, depois, por meio de uma interação quantitativa – a qual se denomina Caracterização (Martinho, 2014). O cumprimento dos procedimentos obrigatórios de AICV permite gerar o chamado Perfil de Impacto Ambiental associado à função em análise.

A ABNT NBR ISO 14044 (2009b) define como sendo elementos opcionais da AICV os procedimentos de Normalização e Ponderação. A Normalização consiste da conversão dos resultados da caracterização para uma mesma base de referência. A Normalização está condicionada à existência de fatores confiáveis que reflitam, ou se aproximem, das condições gerais da avaliação (Sugawara, 2012).

A Ponderação trata de atribuir pesos às diferentes categorias de impacto, com base na percepção de profissionais ligados direta ou indiretamente à análise em realização (Silva, 2012). Deste procedimento origina-se o chamado Indicador Único de desempenho ambiental associado ao atendimento da função em análise. Dadas as suas características a Ponderação é tratada como elemento opcional de AICV, por conta da subjetividade que lhe é inerente (Sugawara, 2012).

Por fim, a etapa de *Interpretação* compreende uma avaliação dos resultados do estudo com vistas ao estabelecimento de recomendações e conclusões. Esta análise crítica tem como objetivo combinar, resumir e discutir as constatações da análise de inventário e da avaliação de impacto, de maneira iterativa aos objetivos e escopo da ACV, bem como da natureza e da qualidade dos dados coletados (Martinho, 2014). As conclusões e recomendações geradas por qualquer estudo de ACV devem refletir objetivamente os resultados de suas três fases executivas (Análise de inventário, Avaliação de impacto e Interpretação). Para tanto não devem fugir ao objetivo e escopo, e não podem ser baseadas em interpretações pessoais, dado que estas podem influenciar ações futuras de tomada de decisão para as quais a ACV poderá fornecer subsídios (Sugawara, 2012).

#### *4.2.1. Estudos de ACV relacionados ao reaproveitamento de vinhaça*

No levantamento efetuado junto à literatura, ocorrido entre Abril de 2014 e Dezembro de 2015, não foram identificados estudos que tivessem como tema central a avaliação de desempenho ambiental de ações de reaproveitamento de vinhaça derivada de bioetanol por meio de ACV. Diante dessa constatação, foram consideradas nesta sessão quaisquer produções acadêmicas que efetuassem uma avaliação ambiental do mesmo rejeito de processo mesmo que de maneira indireta, ou como tema adjacente à pesquisa em questão.

Esta revisão da literatura foi conduzida a partir de consultas realizadas junto a portais de pesquisa – Science Direct, ISI Web of Knowledge, Scielo: Scientific Electronic Library Online – e na biblioteca virtual de Teses e Dissertações da Universidade de São Paulo. Foram também consultadas as bibliotecas virtuais que são mantidas por Agências de Fomento, casos específicos de CAPES e FAPESP. Na consulta, priorizaram-se produções geradas no período de 2010-2014.

Estudos realizados no México e na Colômbia, como os desenvolvidos por Zuñiga et al. (2000), e Ceron e Ayerbe (2013), concluíram que a vinhaça não tratada representa risco de salinização do solo, contaminação por zinco (Zn) e manganês (Mn), além de afetar a qualidade da água.

Christofoletti et al. (2013) e Ahmed et al. (2013) apontam que a vinhaça tem grande potencial poluente para sistemas aquáticos caso seja lançada sem qualquer tratamento prévio nesses meios, devido ao elevado conteúdo de matéria orgânica. Esse contaminante pode causar depleção de oxigênio, redução do pH e altos níveis de demanda biológica de oxigênio (DBO), afetando a vida de espécies aquáticas e tornando mais difícil a purificação de corpos hídricos com vistas ao atendimento de necessidades de consumo humano.

Poveda (2014) apresenta informações relacionadas a impactos ambientais decorrentes de ações de reuso da vinhaça. Foram consideradas na análise cenários como fertirrigação, bem como concentração, biodigestão e incineração, sempre com vistas ao seu aproveitamento para produção de energia.

O autor conclui que todas as alternativas melhoram o desempenho ambiental da gestão da vinhaça. A investigação ressalta por fim que a distribuição da vinhaça a partir de canais abertos com vistas à fertirrigação pode elevar a taxa de emissões de Gases de Efeito Estufa (GEE) em comparação às das demais alternativas, devido à decomposição anaeróbia da matéria orgânica presente na vinhaça.

Oliveira et al. (2013) corroboram a opinião de Poveda ao concluírem também que a vinhaça pode contribuir para a emissão de GEE, principalmente $CO_2$ e $N_2O$, durante os estágios de armazenamento, transporte e aplicação no solo durante a fertirrigação.

Carmo et al. (2013) observaram que a aplicação de vinhaça na cultura de cana no Brasil não aumentou as emissões de $CH_4$, exceto quando as condições anaeróbicas no solo

foram prolongadas por várias horas. Por outro lado, Silva et al. (2007) alertaram sobre o comprometimento da qualidade da cana para a produção de açúcar, a salinização do solo e a poluição do lençol freático quando se faz uso de elevadas doses (cerca de 1000 $m^3$ $ha^{-1}$) desse ativo.

Rocha (2009) verificou por meio da ACV, o desempenho ambiental de quatro alternativas de reuso da vinhaça. As possibilidades consideradas nesta situação foram: fertirrigação convencional com vinhaça *in natura*; concentração da vinhaça até o limite de $40\%_{w/w}$ também para adubação do solo; concentração até $65\%_{w/w}$ para geração de energia em caldeiras com combustível auxiliar, usando a disposição das cinzas remanescentes para adubação da lavoura; e biodigestão anaeróbica visando ao aproveitamento energético do biogás. Os resultados obtidos levaram o autor a concluir a biodigestão apresentou melhor desempenho somente em relação ao Potencial de Depleção Abiótica (ADP); por outro lado, a combustão da vinhaça teve melhor desempenho ambiental em quatro das dez categorias de impacto analisadas: Potencial de Degradação da Camada de Ozônio (ODP), Potencial de Ecotoxicidade Terrestre (TEP), Potencial de Ecotoxicidade Marinha (MEP) e Potencial de Ecotoxicidade (ETP).

# 5. TECNOLOGIAS DE REAPROVEITAMENTO DE VINHAÇA SELECIONADAS

Na atualidade, diferentes técnicas para o reaproveitamento de vinhaça vêm sendo estudadas com intuito não apenas de reduzir impactos ambientais, mas antes talvez, de elevar seu potencial como produto, e assim, proporcionar benefícios para usinas e destilarias. Aerobiose, reciclagem para fermentação, e fertirrigação já são consideradas alternativas consagradas e de larga escala para o reaproveitamento da vinhaça. Por outro lado, desenvolvimentos como combustão da vinhaça para a produção de fertilizantes potássicos; sua aplicação na produção de leveduras, ou na formulação de suplementos para nutrição animal; ou ainda, junto ao segmento de construção civil quando adicionada à massa de cimento; e na digestão anaeróbia para produção de energia, se encontram ainda em fase de investigação e consolidação de variados graus de evolução (Laime et al., 2011). Algumas dessas tecnologias são descritas a seguir.

## 5.1. Uso da vinhaça no campo em processo de fertirrigação

O uso de vinhaça na fertirrigação surgiu como uma alternativa à sua descarga em corpos hídricos, (Christofoletti et al., 2013). Dado seus conteúdos de nutrientes, matéria orgânica e água, a vinhaça é utilizada no campo para complementar teores nutricionais na cultura da cana-de-açúcar, com o objetivo de elevar a produtividade agrícola do processo. Destacam-se nesse caso substâncias que compreendem N, P, K, Cálcio (Ca), Magnésio (Mg) entre outros. No entanto, a quantidade de vinhaça aplicada nas lavouras deve seguir as orientações adequadas, que variam de acordo com as características físicas, químicas e biológicas do solo, para evitar efeitos indesejáveis como o comprometimento da qualidade da cana, salinização do solo e poluição do lençol freático (Laime et al 2011; Silva et al 2007).

Além da restrição na taxa de aplicação da vinhaça no campo, existem outras limitações relacionadas a esta prática. Enquanto as destilarias expandem suas produções, a vinhaça deve ser transportada por distâncias cada vez mais longas para evitar esta saturação, gerando com isso aumento no custo desta operação (Carthery, Jr. et al., 2014). Existe variação quanto ao método de aplicação da vinhaça de acordo as particularidades da área irrigada, espaçamento e localização dos talhões, etc.

Os métodos de fertirrigação mais importantes são: inundação, infiltração, aplicação por meio de caminhões-tanque e aspersão (Poveda, 2014). No método por *inundação*, a vinhaça diluída tem entrada pela parte mais elevada do talhão e daí é distribuída, inundando o terreno de forma heterogénea. Neste caso não há controle da quantidade de vinhaça aplicada e sua distribuição sobre a área é totalmente irregular (Silva, 2009). No caso da aplicação de vinhaça por *infiltração*, é necessária uma preparação prévia do terreno com canais e sulcos com uma rigorosa sistematização, que depende da topografia e do tipo de solo (Poveda, 2014).

Os *caminhões-tanque transportam* a vinhaça pura (sem diluir) desde as destilarias até os talhões, onde realizam a aplicação por gravidade, por meio de chuveiros ou por bombeamento; este método permite uma distribuição da vinhaça consideravelmente uniforme (Silva, 2009). O método tem baixo custo de implantação, mas requer estradas em bom estado, frota de veículos, e planejamento rigoroso de corte de cana de modo que permita a aplicação de vinhaça 24 horas por dia (Poveda, 2014).

Por fim, no método de fertirrigação por *aspersão* são necessários canais, dutos, ou mesmo o uso de rodotrem para o transporte da vinhaça até os talhões. Há duas alternativas de aplicação: *Sistema de montagem direta* e *carretel enrolador (hydroroll).* Ambos os sistemas se compõem de um conjunto de motobomba com aspersor tipo canhão, que distribui vinhaça succionada diretamente desde um canal (Poveda, 2014).

Atualmente no Brasil os sistemas mais frequentes para aplicação de vinhaça nos canaviais consistem de distribuições com *caminhão-tanque* e por *aspersão*, que mostram ter menores limitações operativas em comparação a outros métodos de operação, além de permitir uma aplicação mais homogênea e controlada da vinhaça (de Souza et al., 2015).

## 5.2. Uso da vinhaça como provedor água de processo

Outra possibilidade de aproveitamento de vinhaça consiste da remoção de contaminantes até níveis suficientes para que a fração líquida desta solução possa suprir demandas do próprio processo de produção de etanol. A rota processual, que se baseia em fermentação microbiana, mostra-se economicamente viável e poderia reduzir a DBO da vinhaça, gerar biomassa, e atender a necessidades hídricas em operações como: lavagem de

cana e torta de filtro, retenção de material particulado, diluição de fermento, refrigeração e make-up de água na caldeira.

O processo proposto por Campos et al. (2014) compreende a realização de oito etapas operativas envolvendo transformações físicas (decantação e filtração), químicas (floculação, neutralização, desinfecção), e biológicas (via fermentação por ação microbiana). O elevado teor de matéria orgânica, atua nesta situação como agente facilitador da tecnologia.

Os autores concluíram que o tratamento é satisfatório para reduzir a carga poluente e a microbiota naturalmente presente na vinhaça. No entanto, a qualidade da água obtida não é ainda suficiente para atender aos parâmetros físico-químicos requeridos em outros processos da produção de etanol, principalmente em torres de esfriamento, que consiste em um dos principais consumidores do processamento de etanol. Ainda em termos de custos, Campos et al. (2014) argumentam que o sistema teria os custos da implementação da unidade de tratamento compensados a médio prazo pela economia com tratamento da água bruta.

## 5.3. Uso da vinhaça na produção de biogás

A crise ambiental e o rápido desenvolvimento econômico dos últimos anos, bem como o aumento contínuo do preço dos combustíveis convencionais, justificam avanços científicos e investimentos na produção de energia a partir de fontes alternativas que sejam ao mesmo tempo economicamente atraentes (Salomon e Lora, 2009).

Neste campo, há um grande potencial para a geração de energia elétrica a partir de subprodutos da indústria de açúcar e álcool. Dentre as possibilidades em estudo, a digestão anaeróbia da vinhaça mostra ser das mais auspiciosas, por gerar metano ($CH_4$) em condições de ser utilizado em unidades termelétricas (Nogueira et al., 2015). Como subproduto deste processo é possível obter-se também lodo com alto teor de nutrientes, com potencial aproveitamento como fertilizante.

Atualmente no Brasil a Usina São Martinho, que está localizada no Estado de São Paulo, produz biogás a partir da biodigestão da vinhaça, alcançando teores de até 50% $_{v/v}$ de

$CH_4$, (Poveda, 2014). No entanto, o aumento da produção de álcool e os impactos advindos da fertirrigação tendem a elevar o interesse por esta tecnologia.

O processo de digestão anaeróbia ocorre em duas fases: acidogênica e metanogênica. Na fase acidogênica, compostos orgânicos de cadeias complexas, como lipídios, carboidratos e proteínas, são hidrolisados até que sejam formados hidrocarbonetos de cadeias curtas. Estes compostos serão depois oxidados por ação microbiológica e convertidos em ácidos orgânicos como ácidos acético ($CH_3COOH$) e propiônico ($CH_3CH_2COOH$). A redução efetiva da carga orgânica da vinhaça ocorre nesta fase.

Na etapa seguinte, metanogênica, os ácidos orgânicos são convertidos em $CH_4$, $CO_2$ e outros ácidos orgânicos. O $CO_2$ pode ainda ser reduzido até a formação de $CH_4$ pelos microrganismos anaeróbios (Christofoletti, et al., 2013). No setor sucroalcooleiro o biogás serve a diversos fins. Dentre estes se destaca a operação de turbinas a gás combinado com gerador elétrico; substituição, ainda que em parte, de combustíveis frequentes na etapa agrícola durante a época de colheita; ou uso em caldeiras para gerar vapor (Christofoletti, et al., 2013). Ao ser queimado o biogás serve como meio de geração de energia para produção de etanol de segunda geração (2G), e assim, disponibilizar o bagaço usado atualmente no processo de cogeração, para servir de matéria-prima para o mesmo processamento (Moares, et al., 2014).

Existem variações de biodigestores disponíveis no mercado. Em sua maioria, esses se dividem quanto ao regime de operação, entre sistemas de batelada e de fluxo contínuo. Para a indústria do etanol são mais adequados reatores de fluxo contínuo devido ao grande volume de vinhaça que deve ser tratado. Há também a possibilidade de tratamento em lagoas anaeróbias, revestidas com geomembranas e dispositivos coletores de biogás (Poveda, 2014).

Além da obtenção do biogás, o tratamento de vinhaça em biodigestores e reatores tem por vantagens baixo consumo de energia elétrica, pouca produção de lodo biológico a ser eliminado, e baixo potencial poluente, devido principalmente à redução da carga orgânica da vinhaça, convertida em biogás (Christofoletti, et al., 2013). No entanto, Cortez et al. (2007) descreveram o tempo de detenção mais longo, em comparação ao dos sistemas aeróbios, e a produção de gases corrosivos com odor desagradável como os inconvenientes

desta rota processual.

## 5.4. Uso de vinhaça na produção de hidrogênio

O hidrogênio ($H_2$) tem densidade de energia gravimétrica – ou seja, a relação entre a quantidade de energia contida em um sistema e a sua massa - mais elevada do que a de qualquer outro combustível. A densidade de energia, tanto gravimétrica como volumétrica, é parâmetro fundamental quando se comparam eficiências de combustíveis, como por exemplo, $H_2$ e gasolina (143 e 49 MJ/Kg respectivamente).

Por outro lado, o hidrogênio é compatível com processos eletroquímicos e de combustão para conversão dessa mesma energia sem, no entanto, produzir emissões de carbono (Sydney et al., 2014). Sua obtenção pode ocorrer por meio de diferentes rotas como reforma catalítica de gás natural, pirólise ou gaseificação de biomassa, e eletrólise da água, sendo a primeira a via mais frequente de produção atualmente.

Outra tecnologia viável para a produção de $H_2$ consiste de fermentação em condições ambiente (Intanoo, et al., 2012). As modalidades desse processo de produção se dividem em duas classes: fermentação escura e foto-fermentação. O processo de fermentação escura é mais favorável devido ao potencial quase que constante de produção de $H_2$ sem dispor de luz. A rota passa a ser viável em termos econômicos quando resíduos com elevadas concentrações de matéria orgânica são por ela utilizados (Intanoo, et al., 2012).

Neste processo, a vinhaça pode ser aproveitada como substrato, usando reatores de leito fluidizado sob condições controladas de temperatura e pH (Santos et al., 2014).

A foto-fermentação é realizada por bactérias púrpuras não sulfurosas que utilizam a energia luminosa para transformar ácidos orgânicos em $H_2$ e $CO_2$ (de Sá et al., 2014). Além da iluminação, outro fator que afeta decisivamente o processo é a necessidade de uma atmosfera inerte e anaeróbia. No processo microbiológico para a produção de hidrogênio, a nitrogenasse é a principal enzima associada. Neste caso, é importante que o meio de fermentação não contenha altas concentrações de compostos nitrogenados. Uma conduta adotada frequentemente para resguardar esta condição consiste em manter uma razão mássica [C/N > 1,0] (Bessa et al., 2013).

Muito embora ambas as alternativas estejam em fase de experimentação, as vantagens identificadas para a fermentação escura fazem dela uma possibilidade auspiciosa para um futuro de médio prazo. Dentre estas podem ser citadas: necessidades energéticas mais baixas que as da foto-fermentação; simplicidade de operação; taxas de produção de $H_2$ elevadas em comparação às da congênere; e possibilidade de uso de resíduos de baixo valor agregado como fonte de matéria-prima (Sydney et al., 2014).

## 5.5. Uso de vinhaça na produção de etanol 2G

A produção de etanol a partir de materiais lignocelulósicos (também chamado de etanol de 2ª Geração, ou 2G) é apresentada como uma alternativa com grande potencial para aumentar a produção de bioetanol (Dias et al., 2012). O processo consiste do pré-tratamento do material lignocelulósico (particularmente, do bagaço excedente) com vapor, seguido de deslignificação alcalina, e hidrólise enzimática (Dias et al., 2013). A vinhaça pode ser usada como agente tamponante, com o objetivo de manter o pH dentro de uma faixa desejada de trabalho, proporcionando assim um ambiente favorável para as enzimas que geram açúcares fermentáveis a partir da biomassa utilizada.

O uso de vinhaça apresenta algumas vantagens, sendo a mais destacável a economia no consumo de água na etapa de hidrólise enzimática de biomassa, uma vez que, dado o grau de diluição do ativo, ele será capaz de atender integralmente à demanda hídrica do processo. Como o efeito tampão se dá a partir da reação química entre compostos naturalmente existentes na vinhaça seu uso evitaria também a produção industrial de soluções que fizessem o mesmo papel no processo, o que representa outro ponto positivo (Galvão, 2012).

## 5.6. Concentração da vinhaça

A concentração da vinhaça por meio de evaporação é outra possibilidade factível para seu reaproveitamento. Neste processo a remoção de água se dá sem perda do material sólido dissolvido; assim, a vinhaça concentrada ampliaria em tese sua gama de possibilidades de utilização. A mais frequente delas consiste no seu aproveitamento para

produção de ração animal, exatamente em função do elevado conteúdo de nutrientes, particularmente K, presentes em solução (Christofoletti, et al., 2013). Porém, a administração de vinhaça está condicionada à espécie a ser alimentada. Em ruminantes, esta não pode ultrapassar 10%$_{w/w}$ da dieta diária recomendada; em suínos, sua adição restringe-se a 2-3%$_{w/w}$ (Laime et al., 2011). Outro dividendo positivo da concentração ocorre na fertirrigação, para a qual soluções com alto grau de concentração de N, P, K, Ca e Mg reduziriam custos de transporte, tornando-a disponível para ser aproveitada em áreas inviáveis de serem alcançadas por canaletas de distribuição (Christofoletti, et al., 2013).

A concentração da vinhaça pode ser realizada em sistemas *Multi Efect Evaporation* (MME), tendo como alternativas a recompressão mecânica de vapor, centrifugação e osmose reversa. Para atingir graus de concentração adequados devem ser empregados evaporadores de 4 a 7 efeitos os quais são arranjados em série, de forma que a vinhaça seja concentrada gradativamente após sofrer extrações sucessivas de vapor, o qual será empregado como meio de aquecimento do efeito seguinte (Rocha, 2009).

Fontes residuais de calor podem também ser usadas para a concentração. Nesse caso há duas possibilidades convencionais: acoplar o evaporador à coluna de destilação de forma que os vapores que dela emanam atuem como fonte de calor e assim, a coluna de destilação funcionaria como o primeiro efeito do sistema de evaporação; ou utilizar os gases da caldeira derivados da combustão do bagaço como provedores de energia térmica (Poveda, 2014).

No Brasil, algumas unidades do Grupo Cerradinho (atual NG Bioenergia) instalaram há alguns anos sistemas de concentração de vinhaça. Hoje em dia essa tecnologia mostra-se bem aceita pelo setor sucroalcooleiro. As usinas empregam vinhaça concentrada para fertirrigação pelo fato desta forma de aplicação ser mais eficiente quando comparada aos sistemas de aspersão convencionais (Poveda, 2014).

### 5.7. Incineração da vinhaça

A combustão, da vinhaça é uma tecnologia que permite reduzir os potenciais impactos negativos da fertirrigação por, em tese, eliminar toda sua matéria orgânica, além de reduzir o volume total de solução (Rocha, 2009). As cinzas geradas em decorrência desse processo

contêm elevado teor de K – da ordem $15\%_{w/w}$ – e outros componentes como CaO e MgO, que servem para fins de fertilização do solo (Silva, 2012). A queima da matéria orgânica gera vapor usado tanto nos processamentos de açúcar e álcool como provedor de energia térmica para produção de eletricidade (Rocha, 2009).

Para que a vinhaça passe a ter teores de umidade que a credenciem a ser incinerada esta deve ser concentrada até 60-70% $_{w/w}$. O processamento tem início com a queima de um combustível (em geral de origem fóssil) de alto poder calorífico. A prática proporciona a criação de uma atmosfera favorável à combustão completa da vinhaça que, depois de concentrada, será injetada na câmara de combustão. As vazões de combustível auxiliar e vinhaça são ajustadas até que do primeiro reste apenas uma contribuição suficiente para manter a estabilidade da chama, enquanto a administração do segundo atinja condições plenas (Poveda, 2014).

O vapor saturado que deixa a caldeira pode retornar, em ciclo fechado, para a unidade de concentração da vinhaça. Outra possibilidade seria empregá-lo em processos de pré-aquecimento que ocorrem na destilaria, ou até na destilação em si. Ao incorporar-se um superaquecedor ao sistema, o vapor poderia ainda soprado em uma turbina de contrapressão para gerar eletricidade (Poveda, 2014).

No Brasil existem em operação atualmente dois sistemas de combustão de vinhaça concentrada, sendo que ambos são de propriedade da empresa IMCOPA, e estão localizados no Estado de Paraná. A vinhaça que os alimenta, é produzida durante a destilação do etanol obtido a partir de soja (Poveda, 2014).

# 6. SELEÇÃO DAS ROTAS DE REAPROVEITAMENTO DE VINHAÇA

Assim como descrito no Capítulo 3 – Método de Trabalho deste documento, foram consideradas no desenvolvimento da investigação apenas algumas das rotas de reaproveitamento da vinhaça descritas sucintamente no Capítulo 5. O processo de seleção das alternativas tratou de identificar situações para as quais a avaliação de desempenho ambiental fosse de fato conclusiva. Nesses termos, sempre que foi possível obter dados, foram empregados os seguintes critérios:

a) *Disponibilidade de dados e informações*: o sucesso de análises de desempenho ambiental está condicionado à robustez dos modelos que devem ser construídos para representar a realidade sob verificação. Já os modelos são de sua parte, intrinsecamente dependentes de dados. Assim sendo, decidiu-se que estariam credenciadas a tomar parte da presente verificação apenas as alternativas para as quais fosse possível identificar, junto à literatura técnica, valores consistentes de parâmetros operacionais, variáveis de controle e aspectos ambientais;

b) *Viabilidade operacional:* esta pesquisa concentrou esforços em tecnologias que mostram grau de viabilidade operacional suficiente para que no futuro, ainda que de médio prazo, venham a ser implementadas pelo segmento sucroalcooleiro. Isso fez com que ações que se encontrem ainda em fase de concepção, projeto, e teste – ou mesmo, aquelas para as quais o desenvolvimento tecnológico se mostrasse em estágio incipiente de avanço – fossem desconsideradas.

c) *Viabilidade econômica:* o critério de viabilidade econômica pode ser entendido como um corolário da viabilidade técnica. Tecnologias que não se mostraram atrativas para efeito de retorno de investimentos, mesmo que para horizontes temporais mais longevos (superiores a 25 anos), foram descartadas para efeito desta seleção.

Concluído o processo de aplicação dos critérios supramencionados, foram assim selecionadas para seguir no estudo as rotas de reaproveitamento de vinhaça:

a) Em processo de fertirrigação; e

b) Como provedor água de processo.

# 7. RESULTADOS

## 7.1 Uso da vinhaça no campo em processo de fertirrigação

### *7.1.1. Condições de análise*

A validade ambiental do uso de vinhaça como fonte de nutrientes para a cultura de cana-de-açúcar foi avaliada quanto aos efeitos ambientais que essa ação proporciona ao reduzir demandas de fertilizantes químicos. Quando isso ocorre, diminuem também consumos e gerações de matéria e energia do (e para o) meio ambiente ao longo dos ciclos de vida daqueles mesmos bens de consumo.

A avaliação de desempenho ambiental desta alternativa foi verificada por comparação. Para tanto, foram construídos cenários de aplicação de vinhaça como substituto parcial de adubos químicos. Tais cenários de aplicação de vinhaça se estruturaram a partir da composição de duas variáveis de controle: (i) tipo de técnica de cultivo de cana-de-açúcar; e (ii) fontes de fornecimento de nutrientes. A variável de controle relativa ao 'tipo de técnica de cultivo' aglutina práticas, matérias-primas, e insumos envolvidos no processo de cultivo em si. Segundo Silva e Garcia (2009) e Cortez (2010) a quantidade e o uso destes recursos recebem maior influência do método de colheita da cana do que dos elementos externos como clima, tipo de solo, índice pluviométrico, grau de insolação, e inclinação de terreno. Por isso, as técnicas de cultivo foram classificadas de forma geral segundo o método de colheita: Manual e Mecanizado.

A variável de controle referente as 'fontes de fornecimento de nutrientes' considera as formas convencionais de administração de nutrientes para o cultivo de cana-de-açúcar. Além da vinhaça, a torta de filtro aparece também como alternativa de complementação ao uso de fertilizantes químicos (Santos et al., 2010).

Os dados para composição do modelo agrícola foram obtidos a partir de uma parceria de pesquisa técnico-científica estabelecida com o Laboratório Nacional de Ciência e Tecnologia em Bioetanol (CTBE). A Tabela 2 descreve os cenários que foram avaliados em cada situação possível de verificação da presente alternativa.

Tabela 2. Cenários para avaliação de impactos ambientais

| Cenários | Descrição | |
|---|---|---|
| | **Método de colheita** | **Fonte de nutrientes** |
| I | Manual (com queima de biomassa) | Fertilizante químico |
| II | | Fertilizante químico + vinhaça |
| III | | Fertilizante químico + vinhaça + torta de filtro |
| IV | Mecanizada (sem queima de biomassa) | Fertilizante químico |
| V | | Fertilizante químico + vinhaça |
| VI | | Fertilizante químico + vinhaça + torta de filtro |

Foram considerados para efeito desta avaliação apenas conteúdos de N, P e K. Nos cenários I e IV, definidos como cenários de referência (baseline), admitiu-se que tais nutrientes fossem fornecidos apenas por fertilizantes químicos.

Como hipótese simplificadora para definição dos cenários baseline admitiu-se que as quantidades de vinhaça e torta geradas no processo não influenciam o desempenho ambiental do processamento de etanol ao serem encaminhados para outros usos, sem, no entanto, serem tratados como subprodutos. Em termos metodológicos, esta simplificação baseou-se no método *Surplus* adotado para lidar com casos de multifuncionalidade em ACV (Heijungs e Suh, 2002). Isso é feito para evitar imprecisões nas estimativas do desempenho ambiental do etanol, que seriam introduzidas pelos métodos de alocação, considerando por premissas e condicionantes: a) a indisponibilidade de dados para aplicação de critérios econômicos de alocação, já que, no Brasil, não existe um mercado formal de comercialização de vinhaça e torta de filtro; e b) os efeitos de distorção sobre os resultados finais causadas por atributos físicos (por exemplo, massa, volume) por causa das grandes quantidades de vinhaça e torta de filtro produzidas, em comparação com o volume de etanol. Para todos os demais cenários em análise considerou-se haver substituição parcial de fertilizantes químicos por vinhaça (II, V) e por vinhaça juntamente com torta de filtro (III, VI).

As dosagens de fertilizantes químicos foram determinadas a partir do *Princípio de Conservação de Massa* (também chamada de Lei de Lavoisier) cuja expressão mais geral considera as seguintes parcelas:

[Acúmulo] = [∑ Correntes de Entrada] – [∑Correntes de Saída] + [Geração de matéria] – [Consumo de matéria].

Considerando como premissas que o sistema em estado estacionário e que não há reações químicas no processo, o consumo específico de cada fertilizantes é determinado a partir da Eq. 1.

$$F_i = \left\{\left[\dot{SC}_i + \left(L_i^W + L_i^A\right)\right] - \left[V \cdot \left(\frac{x_i^V}{100}\right) + C \cdot \left(\frac{x_i^C}{100}\right)\right]\right\} / \left(\frac{x_i^F}{100}\right) \qquad \text{(Eq. 1)}$$

Onde:

$F_i$: Quantidade consumida do fertilizante que fornece o nutriente *(i)* (t/ha);

$\dot{SC}_i$: Consumo do nutriente *(i)* por parte da cultura da cana-de-açúcar (t/ha);

$L_i^W$: Perdas do nutriente *(i)* para a água (t/ha);

$L_i^A$: Perdas do nutriente *(i)* para o ar por volatilização (t/ha);

$V$: Quantidade consumida de vinhaça (t/ha);

$C$: Quantidade consumida de torta de filtro (t/ha);

$x_i^V$: Concentração do nutriente *(i)* na vinhaça (kg/t);

$x_i^C$, : Concentração do nutriente *(i)* na torta de filtro (kg/t);

$x_i^F$: Concentração do nutriente *(i)* no fertilizante (%).

O valor de $L_i^W$ para cada nutriente foi determinada a partir da somatória das perdas da substância por conta de arraste, erosão e lixiviação. Essa totalização está indicada na Equação Eq. 2:

$$L_i^W = (L_i^W)_a + (L_i^W)_e + (L_i^W)_{lx} \qquad \text{(Eq. 2)}$$

Onde:

$(L_i^W)_a$: perdas do nutriente *(i)* para a água por arrasto (t/ha);

$(L_i^W)_e$: perdas do nutriente *(i)* para a água por erosão (t/ha);

$(L_i^W)_{lx}$: perdas do nutriente *(i)* para a água por lixiviação (t/ha);

$F_i$ corresponde à somatória dos consumos de fertilizantes que ocorrem tanto no cultivo propriamente dito como durante a reforma da área para um novo ciclo, após cinco colheitas sucessivas estabelecidas para efeito desta análise. Outra simplificação para balizamento do modelo predispõe haver igualdade de consumo de nutrientes em todos os cultivos, após o primeiro corte, que ocorrem no mesmo ciclo.

Os adubos químicos considerados no estudo foram aqueles de utilização mais frequente para produção de cana no estado de São Paulo: Ureia (como fonte de N), Superfosfato Simples (SSP, para suprimento de P e expresso na forma de $P_2O_5$), e Cloreto de Potássio (KCl, para suplementação de K e expresso como $K_2O$) (Franco, 2008; Seabra et al, 2011; Rodrigues Jr et al, 2013). As produtividades agrícolas de cana-de-açúcar foram de 82,6 t/ha para colheita manual, e 81,0 t/ha para colheita mecanizada (CTBE, 2012).

A estimativa para determinação da concentração de $x_i^V$ que consta da Tabela 4 procede da média ponderada de caracterizações da vinhaça para diferentes destilarias, localizadas em São Paulo (Costa et al, 1986; Wilkie et al. 2000; Christofoletti et al, 2013; Santos et al, 2014; Sydney et al, 2014). Tais caracterizações são apresentadas a seguir na Tabela 3.

Tabela 3. Caracterizações da vinhaça para diferentes destilarias

| **Nutriente** | **Costa et al (1986)** | **Wilkie et al (2000)** | **Christofoletti et al (2013)** | **Santos et al (2014)** | **Sydney et al (2014)** |
|---|---|---|---|---|---|
| | | | **(mg/L)** | | |
| N | 700 | 425 | 340 | 1486 | 2.20 |
| P | 1740 | 155 | 1.30 | 222 | 105 |
| K | 760 | 1650 | 2056 | 4500 | 2386 |

No caso dos valores de $x_i^C$ foi considerada a caracterização apresentada por Santos et al (2010) e cujos teores de N, P e K constam da Tabela 4.

As exigências nutricionais da cana ($\dot{S}C_i$) em termos de N-P-K foram estabelecidas a partir de dados apresentados por van Raij (1997), e atualizados por Vitti et al (2007), Santos et al (2011), e Cavalcante et al (2015).

Tabela 4. Necessidade nutricional da cana e conteúdo de macronutrientes da vinhaça e a torta de filtro

| **Nutriente** | **Cana-de-açúcar (kg/ha) [ $\dot{S}C_i$]*** | **Vinhaça (kg/t), [$x_i^V$]** | **Torta de filtro (kg/t), [ $x_i^C$]** |
|---|---|---|---|
| N | 130 | 0,38 | 9,5 |
| $P_2O_5$ | 60 | 0,12 | 3,3 |
| $K_2O$ | 210 | 2,00 | 4,6 |

Fonte: Raij, (1996); Costa et al (1986); Wilkie et al (2000); Christofoletti et al (2013); Santos et al (2014); Sydney et al (2014)

Os valores de $V$ e $C$ (Tabela 5) foram determinados por estimativas realizadas pelo CTBE, as quais foram validadas por comparação de resultados com valores descritos em Chistofoletti et al. (2013), Oliveira et al. (2014), Soobadar (2014) e Pina et al. (2015).

Tabela 5. Doses recomendadas de vinhaça e torta de filtro para a cultura da cana-de-açúcar no Estado de São Paulo

| **Fonte de nutrientes** | **Método de colheita** | |
|---|---|---|
| | **Manual** | **Mecanizada** |
| $V$ ($m^3$/ha) | 72,7 | 71,3 |
| $C$ (t/ha) | 0,66 | 0,64 |

Fonte: CTBE

Percebe-se que os valores para V e C são menores no caso do método de colheita mecanizado devido principalmente a que a palha gerada após a colheita passa a cobrir o solo protegendo-o contra intempéries e melhorando suas condições. No processo de decomposição, parte da palha é incorporada ao solo fazendo com que funcione como um compartimento sequestrador de C atmosférico uma vez que a palha foi produzida no

processo fotossintético de assimilação de $CO_2$ do ar. Assim, o sistema de colheita mecanizado aumenta o teor de agua e matéria orgânica no solo pelo que a incorporação desses materiais a través de torta de filtro e vinhaça deve ser reduzida (Cardin, 2014).

A Tabela 6 apresenta os fatores de emissão usados para calcular as perdas de N e P para a água e o ar. Emissões atmosféricas de N, na forma de amônia ($NH_3$) e monóxido de dinitrogênio ($N_2O$), foram obtidos por Bonomi et al. (2012) que, de sua parte, baseou seus cálculos no método do IPCC, publicado no Guia para Inventários Nacionais de Gases de Efeito Estufa, Vol. 4, seção 11.2.2, (IPCC, 2006).

As emissões de $NO_3^-$ , resultado da lixiviação para aguas subterrâneas do nitrogênio aplicado como ureia, também se originam de dados típicos para o estado de São Paulo (Bonomi et al. 2012). Admitiu-se que as emissões de P para água ocorressem apenas por arrasto. As perdas por lixiviação e escoamento foram descartadas por causa das propriedades do solo brasileiro, em que P é capaz de estabelecer mecanismos de fixação para assumir uma forma não-lixiviável com irreversibilidade restrita (Novais e Smyth, 1999). Os valores que correspondem a estas perdas, foram determinados por Martins et al. (2009), em ensaios nos quais condições de pluviosidade extrema eram simuladas por tempos previamente estabelecidos sobre solos aráveis, com grau variável de cobertura de palha.

Tabela 6. Fatores de emissão para cálculo de perdas de Nitrogênio e Fósforo

| | | | |
|---|---|---|---|
| **Emissões para o ar** | Nitrogênio (N) | $NH_3$ (g /kg ureia) | 170 |
| | | $N_2O$ (g /kg ureia) | 9.8 |
| **Emissões para a água subterrânea** | Nitrogênio (N) | $NO_3^-$ (% da ureia consumida) | 5.0 |
| | Fósforo (P) | P (kg/ha, 0% palha no solo) | 0.44 |
| | | P (kg/ha 100% palha no solo) | 0.020 |

Fonte: Bonomi et al, (2012); IPCC (2006)

### *7.1.2 Modelagem do Ciclo de Vida*

Este estudo seguiu as orientações e requisitos descritos na norma NBR ISO 14044 (ABNT, 2009b). A técnica de ACV foi aplicada com abordagem atribucional e escopo "*berço-ao-portão*" para um fluxo de referência (FR) de 10,8 t etanol hidratado (95% $_{w/w}$) obtido a partir da moagem de 177 t de cana-de-açúcar. A dimensão geográfica para o estudo foi o estado de São Paulo. A coleta de dados levou em conta o padrão tecnológico encontrado na área para o período 2011-2014, e baseou-se no funcionamento de uma unidade industrial de 2,2Mt de capacidade de moagem para 180 dias.

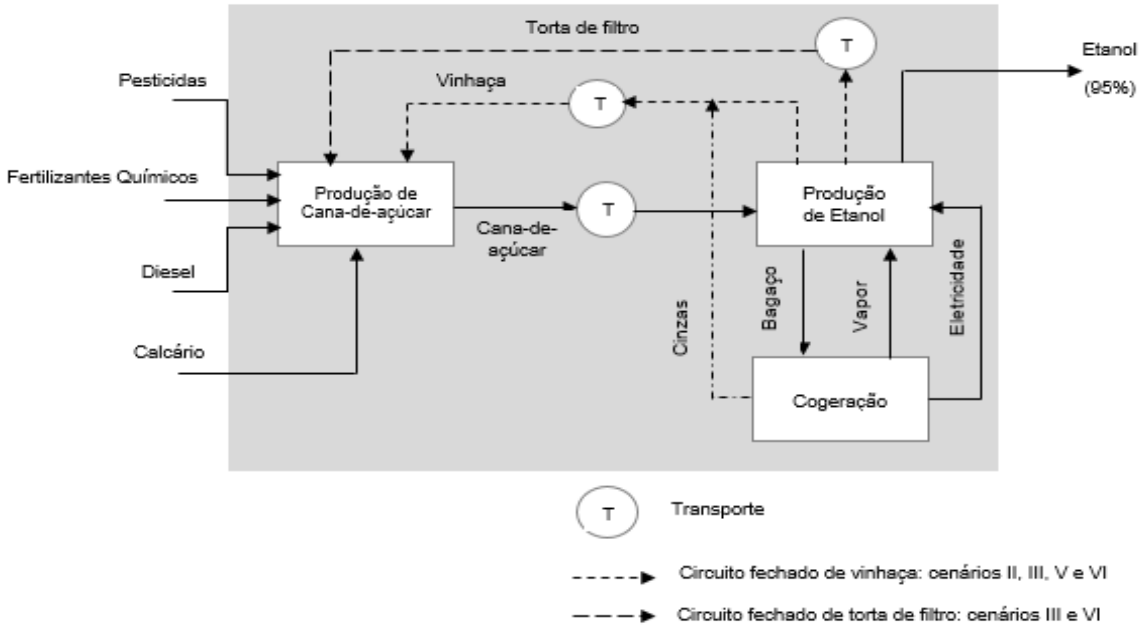
O sistema de produto descrito na Figura 7 compreende os estágios de produção de cana-de-açúcar e etanol, cogeração de energia a partir da queima do bagaço da cana, e transporte. A análise também considerou as produções de fertilizantes químicos, pesticidas, calcário, diesel utilizados no processo agrícola, e de ácido sulfúrico e cal consumidos na etapa industrial. Estabeleceu-se por premissa do estudo que o estágio agrícola tem na cana-de-açúcar seu único produto e assim, a biomassa produzida no campo passou a ser tratada como rejeito.

Quanto a etapa industrial do processo, admitiu-se para efeito de modelagem que a destilaria fosse autossuficiente em termos de energias elétrica e térmica (calor). Além disso, considerou-se também que o bagaço gerado na moagem da cana seria integralmente tratado como insumo de processo. Dessa forma, a fração que não foi utilizada para atender às demandas elétrica e térmica da planta industrial (ou seja, o bagaço excedente) passou a integrar a categoria de coprodutos gerados por esta cadeia produtiva. Por outro lado, dadas as características operacionais da destilaria, em que as cinzas geradas na cogeração são misturadas com a vinhaça antes de esta ser retornada para o campo, optou-se por considerar uma única entrada (vinhaça + torta) na modelagem da etapa agrícola.

A modelagem da etapa industrial baseou-se em dados primários coletados junto a uma destilaria cujas práticas técnico-operacionais representam de forma adequada e suficiente a tecnologia praticada em processos homólogos que ocorrem no Estado de São Paulo. A compatibilidade destes dados foi verificada por comparação com parâmetros típicos do setor, obtidos a partir de Bonomi et al. (2012), Cavalett et al (2012, 2013) e Guerra et al (2014). Além disso, efetuou-se levantamento junto à literatura (IPCC, 2006; Nemecek and

Kägi 2007; CGEE 2008; Ometto et al. 2009; GREET 2010; Nemecek and Schnetzer 2011; Seabra et al. 2011) para modelagem das emissões geradas na etapa agrícola. Segundo Sugawara (2012), a distância média entre áreas de cultivo e destilarias em São Paulo é de 32 km. Esse parâmetro foi utilizado na modelagem de transportes rodoviários de cana-de-açúcar, vinhaça, torta de filtro, e cinzas que ocorrem dentro do sistema.

Figura 7. Sistema de produto para a produção de etanol




Fonte: Moore & Kulay (2015)

No que se refere aos critérios de exclusão (critérios de *cut-off*), foram desconsideradas correntes cujas contribuições cumulativas em termos de matéria e energia para cada estágio de processo fossem inferiores a 2,0%. Essa decisão foi tomada com base nas orientações da ABNT NBR ISO 14044 (2009b) relativas a critérios de exclusão de dados. Algumas exceções a este critério – como as dosagens de agroquímicos no cultivo – foram toleradas em virtude do grau de relevância ambiental das mesmas substâncias. Tal procedimento está igualmente previsto na ABNT NBR 14044.

As duas situações de multifuncionalidade identificadas ao longo do sistema de produto foram tratadas a partir da aplicação do procedimento de Alocação. A primeira delas ocorre

na etapa extração de petróleo para produzir diesel, e para a qual optou-se por alocação por critério de energia. Dessa forma, atribuiu-se ao óleo diesel 22% das cargas ambientais daquele ciclo de vida.

A segunda situação de multifuncionalidade ocorreu na moagem de cana de açúcar, entre caldo e bagaço usado pelo sistema de cogeração (que permanecem no processo), e o excedente de bagaço que ultrapassa as fronteiras seguindo para outro sistema de produto. Aplicou-se nesse caso alocação por critério de massa, cabendo ao bagaço excedente um total de 2,9% das cargas ambientais geradas à montante daquela operação.

Os inventários para a produção de Ureia e SSP foram elaborados a partir de adaptações para as condições brasileiras dos respectivos inventários '*Urea, as N, at regional storehouse/RER U'* e '*Single superphosphate, as P2O5, at regional storehouse/RER U'* disponíveis na base de dados de Ecoinvent. Quanto aos agroquímicos, foram considerados para efeito desta análise: glifosato: *Glyphosate, at regional storehouse/RER U';* diuron: *'Diuron, at regional storehouse/RER U';* carbofuran: *'Carbofuran, at regional storehouse/RER U'* também selecionados na base de dados de Ecoinvent (Nemecek and Kägi 2007). As produções de hexazinona e tebuthiuron foram modeladas a partir do inventário *'Pesticides unspecified, at regional storehouse/RER U'*.

Além disso, os inventários *'Limestone, milled, loose, at plant/CH U'* (Ecoinvent) e *'Diesel, at refinery/I/US'* – este último, obtido da base de dados USLCI - foram considerados para efeito de elaboração do Inventário de Ciclo de Vida. As adaptações para esses inventários consistiram na substituição dos dados associados à rede elétrica por dados típicos da condição brasileira.

Outra premissa formulada para efeito de concepção de modelo foi de que as demandas de N e $P_2O_5$ do cultivo de cana eram supridas por ativos produzidos no Brasil. Por outro lado, dado que mais de 90% da demanda brasileira de $K_2O$ é suprida por meio de importação, o inventário *'Potassium chloride, as K2O, at regional storehouse/RER U'* foi replicado com o cuidado de ajustar-se a matriz elétrica do conjunto original àquelas dos principais exportadores de $K_2O$ para o Brasil em 2011: Alemanha, Bielo-Rússia, Canadá, Israel e Rússia (MDIC, 2013).

Os transportes de fertilizantes químicos e outros insumos foram modelados a partir de

distâncias médias de circulação. No caso de deslocamentos transoceânicos, empregaram-se dados da base Searates© (SeaRates, 2013). Já a modelagem da geração e transporte de eletricidade considerou dados de Hansen et al. (2015), ajustando-se para a rede brasileira 2013 (EPE, 2014).

A Avaliação do Impacto do Ciclo de Vida foi realizada em dois níveis. No primeiro nível calculou-se o consumo de recursos, utilizando o método *Cumulative Energy Demand (CED)* versão 1.08, abordagem que permite estimativas em termos de Demanda de Energia Primária ou *Primary Energy Demand (PED).* As categorias de impacto analisadas foram: Non Renewable, fossil (NRF); Non Renewable, nuclear (NRN); Non Renewable, biomass (NRB); Renewable, wind (RW); e Renewable, water (RWA). A categoria Renewable, biomass (RB) foi descartada já que suas contribuições estão limitadas ao poder calorífico da biomassa (cana-de-açúcar, neste caso), um parâmetro invariável para todos os cenários analisados.

No segundo nível de análise foram magnificados efeitos ambientais advindos das emissões geradas no sistema de produto. O método ReCiPe - Midpoint (H) – v 1.11 foi usado neste caso para constituir Perfis de Impacto que, de sua parte, compreenderam as categorias de impacto de: Mudança Climática (CC), Acidificação Terrestre (TA), Eutrofização em Água Doce (FEut), Toxicidade Humana (HT), e Ecotoxicidade Terrestre (TEC).

### *7.1.3. Resultados*

A Tabela 7 apresenta as quantidades de fertilizantes químicos consumidas em cada um dos cenários de análise definidos na Tabela 2. Esses totais foram estabelecidos a partir de premissas e dados descritos anteriormente.

Tabela 7. Quantidade dosada de fertilizante químico para cada cenário (kg/ha)

| **Fertilizante Químico** | **Cenários** | | | | | |
|---|---|---|---|---|---|---|
| | I | II | III | IV | V | VI |
| Ureia (45% N) | 444 | 325 | 306 | 444 | 327 | 306 |
| SSP (20% $P_2O_5$) | 305 | 251 | 240 | 300 | 247 | 237 |
| KCl (60% $K_2O$) | 350 | 41,5 | 36,5 | 350 | 47,5 | 42,5 |

Pode-se notar que a substituição dos fertilizantes químicos por vinhaça leva a diminuições dos consumos de ureia, SSP, e KCl, respectivamente de 27%, 18% e 86%, em comparação com cenários de referência (I→II and IV→V). Os ganhos expressivos em termos de KCI são atribuídos aos elevados níveis de $K_2O$ presentes na vinhaça (Tabela 3), associados ao volume de resíduo gerado no processo industrial (Tabela 4).

O uso de torta de filtro leva a reduções adicionais na demanda de fertilizantes químicos nas passagens II→III e V→VI, de 6,0% e 4,0% respectivamente para ureia e SSP. Para o KCl, as reduções chegaram a 20% para colheita manual e 10% para colheita mecanizada. Contribuições a partir da torta de filtro são menos significativas comparadas com a vinhaça, apesar de apresentarem valores médios mais elevados de N, $P_2O_5$ e $K_2O$, já que menos quantidade deste resíduo é gerada na destilaria.

A Tabela 8 apresenta os resultados associados à análise de PED. Nesse âmbito, as contribuições mais expressivas (97%) ocorrem sob a forma de depleção de NRF, ao que se segue alguma participação discreta em termos de RWA (2,0 – 2,4%). Como já se poderia prever de antemão, manejos com colheita mecanizada demonstram valores de PED mais elevados do que os acumulados pelos de colheita manual. Esses acréscimos variam entre 7,5% (entre cenários VI e III) e 8,1% (entre IV e I).

Tabela 8. Primary Energy Demand para a produção de 10,78 t etanol para diferentes taxas de substituição de fertilizantes químicos com vinhaça e torta de filtro

| Categoria de Impacto | Método de Colheita | | | | | |
|---|---|---|---|---|---|---|
| | Manual (GJ / FR) | | | Mecanizada (GJ / FR) | | |
| | I | II | III | IV | V | VI |
| NRF | 64,8 | 69,4 | 68,2 | 70,6 | 75,3 | 73,9 |
| NRN | 6,86E-01 | 6,75E-01 | 6,58E-01 | 6,99E-01 | 6,87E-01 | 6,70E-01 |
| NRB | 2,27E-03 | 1,87E-03 | 1,79E-03 | 2,28E-03 | 1,88E-03 | 1,80E-03 |
| RW | 3,31E-02 | 3,12E-02 | 3,02E-02 | 3,38E-02 | 3,19E-02 | 3,08E-02 |
| RWA | 1,60 | 1,52 | 1,47 | 1,64 | 1,55 | 1,50 |
| Total | 67,1 | 71,7 | 70,4 | 70,6 | 77,6 | 76,1 |

A substituição parcial de adubos químicos por vinhaça trouxe aumento do consumo energético total para ambos os métodos de manejo (cenários I→II e IV→V). Isso se deve ao fato de os acréscimos em termos de NRF superarem as reduções, apenas sutis, que se verificam em termos de RWA. A inclusão de torta de filtro no sistema (cenários III e VI) atenua em cerca de 1,8% o efeito ocasionado pela vinhaça para ambos os manejos. Esses mesmos ganhos não foram, porém, intensos o suficiente para superar os resultados obtidos pelos cenários baseline.

A Tabela 9 descreve os perfis ambientais dos cenários analisados. Uma comparação entre cenários de mesma classe mostra que a substituição de adubos químicos por vinhaça e torta de filtro é benéfica para o desempenho ambiental da produção do etanol, em termos de CC, TA e HT, categorias nas quais foram registradas reduções de impacto. Para FEut e TEC, essas incorporações parecem, no entanto, não surtir efeito, dado que seus perfis se mantiveram inalterados com relação àqueles obtidos para os cenários baseline. É possível notar ainda que o reaproveitamento da vinhaça traz aportes mais efetivos para o desempenho global do sistema do que as decorrentes do reuso de torta de filtro.

Tabela 9. Perfil ambiental da produção de etanol para diferentes taxas de recuperação de vinhaça e torta de filtro

| Categoria de Impacto | Unidades | Método de colheita | | | | | |
|---|---|---|---|---|---|---|---|
| | | Manual | | | Mecanizada | | |
| | | I | II | III | IV | V | VI |
| CC | kg $CO_{2\,eq}$ | 8141 | 7912 | 7784 | 8421 | 8193 | 8037 |
| TA | kg $SO_{2\,eq}$ | 429 | 327 | 310 | 438 | 337 | 318 |
| FEut | kg $P_{eq}$ | 1,20 | 1,16 | 1,15 | 0,319 | 0,288 | 0,279 |
| HT | kg 1,4-$DB_{eq}$ | 1840 | 1681 | 1649 | 1924 | 1764 | 1733 |
| TEC | kg 1,4-$DB_{eq}$ | 9,17E-01 | 8,59E-01 | 8,38E-01 | 7,56 | 7,50 | 7,48 |

Por outro lado, vale notar que a colheita mecanizada contribui para incrementos em quase todas as categorias de impacto. A exceção ocorreu para FEut, dado que as perdas de P para a água, principal precursor da categoria, se reduzem com o método mecanizado.

Três fatores foram determinantes para a obtenção desse resultado, sendo o primeiro deles de ordem metodológica. A avaliação de impactos em termos de CC levou em conta apenas emissões de carbono (C) de origem fóssil. Assim, tanto o sequestro de C do ambiente – que ocorre principalmente por conta da fixação de $CO_2$ do ar e, em escala bastante mais reduzida, de C do solo –, como as emissões de $CO_2$ de origem biogênica – provenientes da queima de biomassa que ocorre previamente à colheita, ou mesmo, por conta da cogeração de energia – não foram consideradas.

O segundo aspecto está ligado ao fato de o sistema com colheita mecanizada atingir índices médios de produtividade agrícola (81 t/ha) ligeiramente mais baixos do que aqueles alcançados por meio de colheita manual (82,6 t/ha). Isso se deve em grande parte à forma de distribuição dos colmos durante o plantio estar condicionada às dimensões da colheitadeira, para que suas rodas não esmaguem as soqueiras, prejudicando assim a realização do corte seguinte. Essa condição se traduz no aumento do espaçamento entre linhas de plantio, o que resulta no uso de maior área de cultivo para obter-se a mesma quantidade de cana que seria produzida pelo sistema que culmina com a colheita manual

(Capaz, 2013). Além disso, o uso de máquinas colhedoras, cujo tráfego repetido durante vários ciclos da cultura provoca a compactação superficial do solo, restringe o desenvolvimento radicular das culturas afetando assim a produtividade agrícola (Cardin, 2014).

Exatamente desta circunstância decorre o terceiro fator que justifica a preponderância dos impactos ambientais do cultivo mecanizado sobre os do sistema manual; ou seja, de aquele apresentar maiores consumos de fertilizantes e de óleo diesel. Uma área maior de cultivo irá fatalmente predispor mais adubo e tratos culturais, que no modelo mecanizado são providos por maquinaria agrícola – afora ainda, e logicamente, a ação de colheita em si. Por outro lado, a área em que ocorre a colheita mecanizada é menos beneficiada pela inclusão da vinhaça e a torta já que a dosagem destes materiais é menor, pelas características apresentadas no item 7.1.1.

## 7.2. Reaproveitamento de fração liquida de vinhaça como água de processo

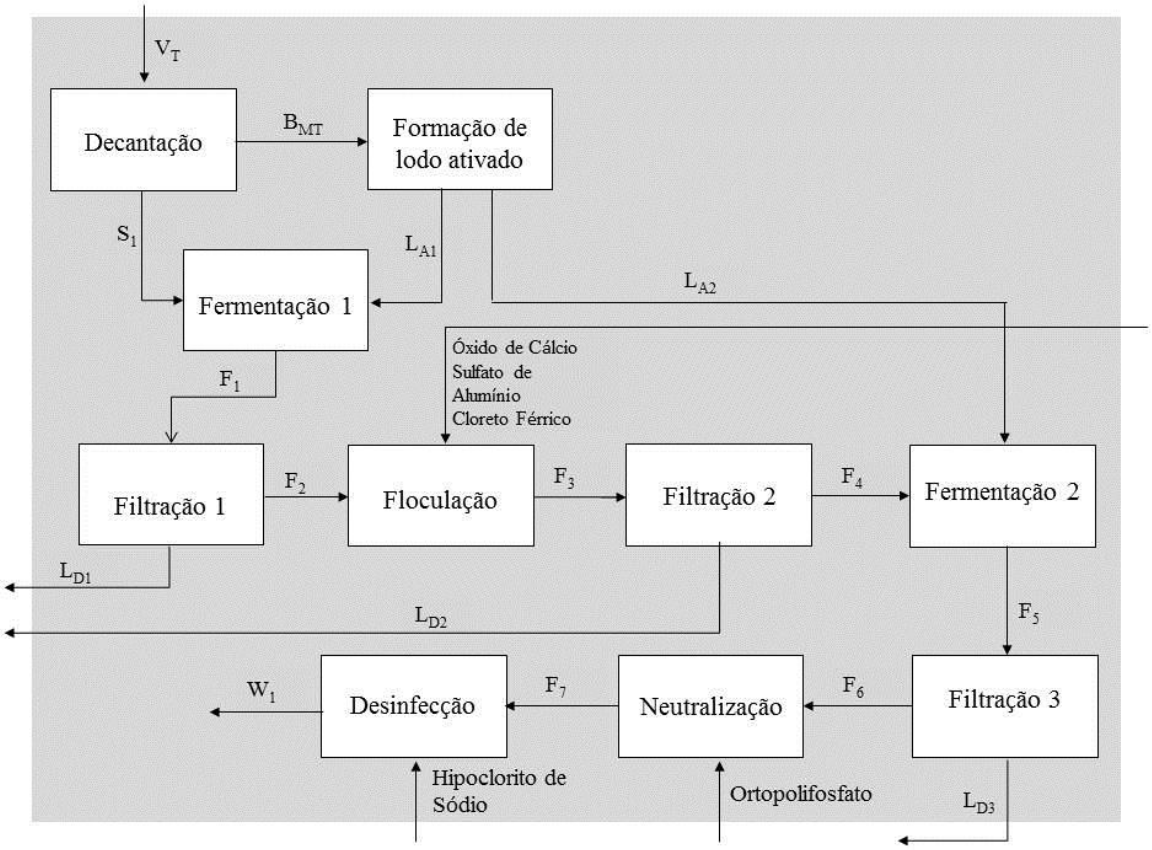
### *7.2.1. Descrição da tecnologia de reaproveitamento de fração líquida de vinhaça*

A análise da alternativa de tratamento de vinhaça está baseada nos avanços efetuados por Campos et al. (2014) e compreende os estágios indicados na Figura 8.

A primeira etapa deste processo consiste de uma decantação cujo objetivo é retirar os sólidos suspensos que irão compor, em parte, o lodo ativado que será usado nos processos fermentativos que ocorrem mais adiante no mesmo arranjo.

O primeiro estágio de fermentação opera segundo regime de batelada semi-contínua com elevada vazão de alimentação (*Fed-Batch High Flow*) e serve para reduzir níveis de cor e turbidez da vinhaça. O efluente resultante dessa transformação passa por uma filtração para que dele sejam removidos sólidos suspensos residuais. Nessas condições, o fluido irá receber aditivos – CaO (30 kg/m$^3$), $Al_2(SO_4)_3$ (5,0 kg/m$^3$) e $FeCl_3$ (0,3 kg/m$^3$) – para remoção de sólidos dissolvidos por floculação.

Figura 8. Tecnologia de tratamento de vinhaça




Fonte: adaptado de Campos et al (2014)

A corrente líquida resultante passa pelo segundo estágio de fermentação – também semi-contínuo, mas de baixa alimentação (*Fed-Batch Low Flow*) com a adição de lodo ativado refrigerado – e por outra etapa de filtração na qual se remove material residual da digestão biológica. Nesse momento a corrente líquida apresenta elevado índice de acidez. A fim de neutralizar esse efeito, adiciona-se ortopolifosfato de sódio [$Na_xH_{(3-x)}PO_4$] à razão de 5,0 g/m$^3$. Essa ação visa também reduzir o poder corrosivo do efluente tratado. A última etapa de tratamento refere-se à desinfecção da corrente que emana do segundo estágio biológico. Para tanto administra-se hipoclorito de sódio (NaClO) a 4%$_{w/w}$. O sistema antes descrito foi concebido para operar a temperatura ambiente e por gravidade, o que o faz não dispender de energia térmica ou elétrica para efeito de funcionamento.

### *7.2.2. Condições de análise*

O desempenho ambiental dessa rota de reaproveitamento de vinhaça foi verificado tendo-se em conta simultaneamente impactos gerados durante o tratamento da vinhaça, e sua capacidade de substituir a água captada do meio ambiente pelas usinas para suprir demandas do processamento de etanol.

Após confrontar teores de contaminação residual da vinhaça tratada com padrões disponíveis na literatura (Carthery Jr, 2014; Marcucci e Tognotti, 2002) decidiu-se pelo seu reaproveitamento apenas nos processos de lavagem da cana e torta de filtro; abatimento de material particulado, e diluição de fermento. Ao serem somados, esses usos totalizam exatos 204,5 t água para uma unidade que produz 10,78t $C_2H_6O$ ($95\%_{w/w}$) a partir da moagem de 177 t de cana-de-açúcar; ou seja, para condições de produção idênticas àquelas estabelecidas para a alternativa anteriormente estudada de reaproveitamento de vinhaça para fertirrigação.

Também como já ocorrera no caso anterior, a efetividade ambiental desta ação foi verificada por meio de comparação entre cenários. A caracterização de cada qual dessas abordagens baseou-se na forma como são atendidas as necessidades hídricas da planta de processamento de etanol. Os cenários em questão estão apresentados a seguir na Tabela 10.

Tabela 10. Cenários para avaliação de impactos ambientais

| **Cenários** | **Fonte de fornecimento de água** |
|---|---|
| 2A | Água bruta captada do meio ambiente |
| 2B | Fração líquida extraída do tratamento de vinhaça |

Para ambos os cenários de análise considerou-se como método de colheita o Sistema Mecanizado, uma vez que – assim como apresentado já anteriormente no item 3.1.2 deste documento – esta prática se encontra em fase final de consolidação no Estado de São Paulo.

Além disso, em quaisquer das situações em análise o fornecimento de nutrientes para cana-de-açúcar considerou além de adubos químicos, também rejeitos do processamento

industrial de etanol na forma de vinhaça, torta de filtro e cinzas, caracterizando, portanto, processo de fertirrigação. Também neste caso, os dados para composição do modelo agrícola foram obtidos a partir de informações fornecidas pelo CTBE.

As dosagens de fertilizantes químicos para os cenários 2A e 2B foram determinadas a partir da Eq. 3, considerando requisitos nutricionais da cana apresentados na Tabela 4, as dosagens e composição da vinhaça e da torta de filtro mostradas na Tabela 5, e os fatores de emissão da Tabela 6. Também foram consideradas as dosagens de cinzas, cujos conteúdos de N, P e K são apresentados na Tabela 11.

Tabela 11. Conteúdo de N, P e K nas cinzas

| **Nutriente** | **Cinzas (kg/t cinzas) - [ $x_i^{CI}$ ]** |
|---|---|
| N | 0,00 |
| $P_2O_5$ | 8,34 |
| $K_2O$ | 9,02 |

Fonte: Cordeiro et al. (2009)

$$F_i = \left\{\left[\dot{SC}_i + \left(L_i^W + L_i^A\right)\right] - \left[V \cdot \left(\frac{x_i^V}{100}\right) + CI \cdot \left(\frac{x_i^{CI}}{100}\right) + C \cdot \left(\frac{x_i^C}{100}\right)\right]\right\} / \left(\frac{x_i^F}{100}\right) \qquad \text{(Eq. 3)}$$

Onde:

$F_i$: Quantidade do fertilizante que fornece o nutriente *(i)* (t/ha);

$\dot{SC}_i$: Consumo do nutriente *(i)* por parte da cana-de-açúcar (t/ha);

$L_i^W$: Perdas do nutriente *(i)* para a água (t/ha);

$L_i^A$: Perdas do nutriente *(i)* para o ar por volatilização (t/ha);

$CI$ , $C$: Quantidade de cinzas (t/ha) e torta de filtro (t/ha), respectivamente;

$x_i^V, x_i^{CI}, x_i^C$: Concentração do nutriente *(i)* na vinhaça, nas cinzas e na torta de filtro (kg/t);

$x_i^F$: Concentração do nutriente *(i)* no fertilizante (%).

Também para esta situação, os valores das perdas de nutrientes para a água relativas a cada nutriente foram determinadas a partir da Equação Eq. 2 descrita no item 7.1.

### *7.2.3 Modelagem do Ciclo de Vida*

Este estudo foi realizado em consonância com os termos estabelecidos pela norma ABNT NBR ISO 14044 (ABNT, 2009b). A técnica de ACV foi aplicada com abordagem atribucional e escopo "*berço-ao-portão*" para um fluxo de referência (FR) de 10,78 t etanol hidratado (95% $_{w/w}$), condições equivalentes àquelas adotadas para aferição de desempenho ambiental no item 7.1.2. Os sistemas de produto para os cenários 2A – estabelecido como de referência (baseline) –, e 2B estão arranjados de acordo com os esquemas representados pelas Figuras 9a e 9b. Tais sistemas compreendem os processos elementares de produção de cana-de-açúcar e etanol, cogeração de energia a partir da queima do bagaço da cana, produção de insumos e aditivos de processo, e transporte.

O sistema de produção de cana-de-açúcar, para os cenários 2A e 2B foi modelado em termos das práticas exercitadas no estado de São Paulo e dados secundários foram usados para sua caracterização, considerando uma produção de 81 t/ha (CONAB, 2014). Dados primários foram coletados continuadamente durante os doze meses do ano de 2013 quanto à produção de etanol e cogeração de energia. As demais etapas do sistema de produto foram modeladas com dados secundários obtidos de fontes técnicas referenciáveis. A cobertura geográfica compreendeu o estado de São Paulo para as atividades de produção agrícola de cana, produção de etanol, cogeração e tratamento de vinhaça. Para a produção de aditivos considerou-se a região de origem em cada caso. O inventário associado à etapa de transporte e distribuição de água de processo, desde o poço até a unidade industrial, considerou uma distância de 100 m para o cenário 2A; para o cenário 2B a distância desde a unidade de tratamento até as unidades de lavagem da cana e torta de filtro; abatimento de material particulado, e diluição de fermento foi de 10,0 m. Para os demais processos da etapa industrial em que água de poço foi usada, considerou-se a mesma premissa usada para o cenário 2A.

Figura 9a. Sistema de produto para a produção de etanol – cenário 2A (baseline)

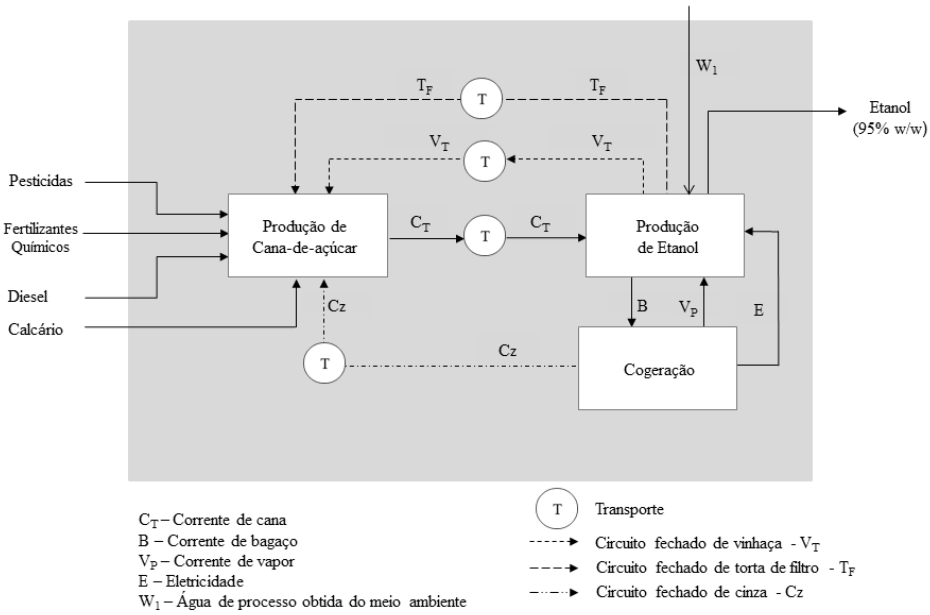
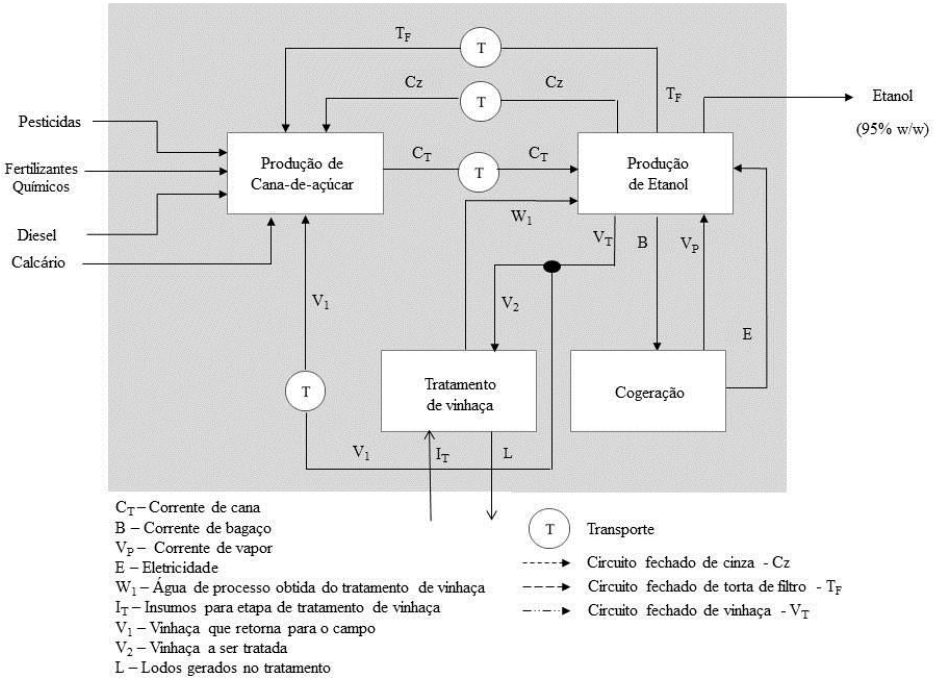



Figura 9b. Sistema de produto para a produção de etanol – cenário 2B



Para o cenário 2B adotou-se como premissa que seria tratada apenas uma quantidade de vinhaça ($V_2$) capaz de atender à demanda hídrica da planta; ou seja, de gerar um total de 204,5 t desta utilidade para as condições de processo mencionadas no item 7.2.2. A premissa baseia-se no fato de que a tecnologia de tratamento proposta por Campos et al não poder, ao menos nos termos atuais de consolidação em que se encontra, ser vista como uma alternativa consistente de produção de água, mas sim, como uma forma promissora de reaproveitamento de vinhaça.

O excedente de vinhaça gerado durante a produção de etanol retorna ao campo tal como descrito na Figura 9b. Essa situação, que caracteriza fertirrigação das áreas de cultivo, foi modelada seguindo condicionantes idênticas àquelas estabelecidas antes na seção 7.1.1 deste documento.

Os consumos energéticos relativos ao tratamento da vinhaça foram desconsiderados dadas as características construtivas e operacionais da unidade que, assim como mencionado antes, opera por gravidade (Campos et al 2014). Os rejeitos gerados no tratamento – lodos de filtração – são descartados no ambiente apenas após receberem tratamentos específicos para reduzir toxicidades e periculosidades. As cargas ambientais procedentes dessas intervenções foram incorporadas aos inventários das etapas em que os mesmos são gerados.

As emissões atmosféricas derivadas da queima de biomassa na caldeira para geração de vapor foram determinadas por balanço estequiométrico. Apenas aspectos ambientais que puderam ser aferidos e verificados foram incluídos nesta análise.

Os inventários de produção dos aditivos usados no tratamento da vinhaça, neste caso $FeCl_3$, $Al_2(SO_4)_3$, NaClO e $[Na_xH_{(3-x)}PO_4]$ foram adaptados para as condições brasileiras a partir dos respectivos inventários *Iron (III) Chloride, 40% in $H_2O$, at plant/CH U*, *Aluminium sulphate, powder, at plant/RER U*, *Sodium hypoclorite, 15% in $H_2O$, at plant/RER U* e *Chemicals inorganic, at plant/GLO U* disponíveis na base de dados Ecoinvent. Os suprimentos desses aditivos foram tratados como se procedessem do mercado interno e seus transportes até a planta de etanol foram modelados a partir de distâncias médias. Adaptou-se também o inventário *Lime, hydrated, loose, at plant/CH U* da Ecoinvent para modelar o CaO.

Dada a falta de informação sobre as características físico-químicas dos lodos gerados nas etapas de filtração, decidiu-se que após tratamento estes materiais que seriam dispostos em aterro sanitário. A modelagem dessa etapa partiu do inventário *Sludge as disposal drilling waste, 71% water to residual material landfill/CH U* (Ecoinvent).

As situações de multifuncionalidade identificadas ao longo do sistema de produto – que correspondem às mesmas descritas para o caso anterior – foram tratadas por alocação em termos idênticos aos apresentados no item 7.1.2.

Da mesma forma, os transportes de fertilizantes e de outros insumos usados na etapa agrícola, bem como os inventários de produção de ureia, SSP e KCl seguiram as mesmas premissas orientativas que balizaram suas respectivas modelagens para o caso de reaproveitamento de vinhaça para fertirrigação.

A Avaliação do Impacto do Ciclo de Vida seguiu também o mesmo diapasão, sendo portanto realizada em dois níveis. No primeiro deles voltou-se a determinar a Demanda de Energia Primária utilizando-se o método *Cumulative Energy Demand (CED)* versão 1.08 para as categorias de impacto de: Non Renewable, fossil (NRF); Non Renewable, nuclear (NRN); Non Renewable, biomass (NRB); Renewable, wind (RW); e Renewable, water (RWA). Também aqui, a categoria Renewable, biomass (RB) voltou a ser descartada dado que suas contribuições estão limitadas a poder calorífico da biomassa (cana-de-açúcar, neste caso), um parâmetro que não variou nos cenários analisados.

No segundo nível de análise, foram determinados os efeitos ambientais decorrentes das emissões geradas no sistema de produto via método ReCiPe - Midpoint (H) – v 1.11 para impactos de: Mudanças Climáticas (CC); Acidificação Terrestre (TA); Eutrofização em Água Doce (FEut); Toxicidade Humana (HT); Ecotoxicidade em Água Doce (FEC); e Depleção de recursos Hídricos (WD).

### *7.2.4. Resultados*

A Tabela 12 apresenta a quantidade de fertilizante químico para os cenários 2A e 2B, determinado a partir de premissas e dados descritos anteriormente. Dado o reaproveitamento da vinhaça como fonte de água de processo, parte dos aportes de N, P e K

que poderiam ser esperados em função da aplicação no campo sob a forma de fertirrigação passaram a ser supridos por fertilizantes químicos no cenário 2B. Essa situação resultou em incrementos de respectivamente 35%, 23% e 792% no consumo de ureia, SSP e KCl em comparação aos obtidos para o cenário 2A. O incremento expressivo no consumo de KCl decorre de elevados níveis de K presentes na vinhaça que deixaram de ser aplicados no campo em virtude de recuperação parcial de seu volume na etapa industrial. Conclui-se a partir disso, que de fato discretos os teores deste nutriente na torta de filtro e nas cinzas.

Tabela 12. Dosagens de fertilizantes químicos para produção 81 t/ha de cana (kg/há)

| **Fertilizante Químico** | **Cenários** | |
|---|---|---|
| | **2A** | **2B** |
| Ureia (45% N) | 306 | 414 |
| SSP (20% $P_2O_5$) | 210 | 259 |
| KCl (60% $K_2O$) | 35,2 | 314 |

A Tabela 13 apresenta os resultados associados à análise de PED para produção de 10,78 t etanol para os cenários 2A e 2B em estudo.

Tabela 13. PED para a produção de 10,78 t de etanol com reaproveitamento de vinhaça como água de processo (GJ/FR)

| **Categoria de Impacto** | **Cenário** | |
|---|---|---|
| | **2A** | **2B** |
| NRF | 74,0 | 170 |
| NRN | 6,6E-01 | 8,70 |
| NRB | 1,6E-03 | 2,0E-03 |
| RW | 3,0E-02 | 5,0E-01 |
| RWA | 1,50 | 29,0 |
| Total | 76,0 | 200 |

As contribuições mais expressivas tanto para o cenário 2A e como para 2B ocorrem na forma de *Non Renewable, fóssil (NRF*) e correspondem respectivamente a 97% e 81%. Incrementos para NRF de 8,9 MJ/kg etanol e para RWA de 2,4 MJ/kg etanol na passagem 2A→2B são os mais significantes, como resultado da adição de novos processos associados ao tratamento de vinhaça.

Quanto ao perfil ambiental, os resultados são mostrados a seguir na Tabela 14, para os cenários analisados.

Tabela 14. Perfil Ambiental da produção de etanol com reaproveitamento de vinhaça como água de processo – cenário 2B

| **Categoria de Impacto** | **Unidades** | **Cenário** | |
|---|---|---|---|
| | | **2A** | **2B** |
| WD | $m^3$ | 302 | 167 |
| CC | kg $CO_{2\ eq}$ | 8015 | 18951 |
| TA | kg $SO_{2\ eq}$ | 317 | 443 |
| FEut | kg $P_{eq}$ | 1,95E-01 | 3,17E-01 |
| HT | kg 1,4-$DB_{eq}$ | 1155 | 2043 |
| FEC | kg 1,4-$DB_{eq}$ | 11,3 | 14,2 |

Comparando os cenários 2A e 2B pode-se perceber que reaproveitar a vinhaça como água de processo resulta em maiores impactos ambientais em termos de CC, TA, FEut, HT e FEC do que para a situação em que este fluido age como fonte de nutrientes para a cultura de cana. Por outro lado, tal como já se poderia supor originalmente, os impactos em termos de WD sofrem reduções expressivas. No item 8 são discutidas em maior nível de detalhe as circunstâncias que consubstanciam e respaldam esta conclusão.

# 8. DISCUSSÃO

## 8.1 Uso da vinhaça no campo em processo de fertirrigação

Uma análise mais específica dos efeitos do reuso de vinhaça como fornecedor de nutrientes na lavoura de cana pode ser realizada a partir das variações relativas de impactos conforme ocorrem adições de vinhaça e torta de filtro. A variação dos valores de *Primary Energy Demand - PED* é apresentada a seguir na Tabela 15.

Tabela 15. Variações relativas (%) de PED por adições de vinhaça e torta de filtro

| **Categoria de Impacto** | **Forma de Cultivo** | | | | | |
|---|---|---|---|---|---|---|
| | **Colheita Manual (%) (*)** | | | **Colheita Mecanizada (%) (*)** | | |
| | **Δ(**) (I → II)** | **Δ(**) (II → III)** | **Δ(**) Acumulado (I → III)** | **Δ(**) (VI → V)** | **Δ(**) (V → VI)** | **Δ(**) Acumulado (IV → VI)** |
| NRF | 7,10 | (–) 1,73 | 5,25 | 6,66 | (–) 1,86 | 4,67 |
| NRN | (–) 1,60 | (–) 2,52 | (–) 4,08 | (–) 1,72 | (–) 2,47 | (–) 4,15 |
| NRB | (–) 17,6 | (–) 4,28 | (–) 21,1 | (–) 17,5 | (–) 4,26 | (–) 21,1 |
| RW | (–) 5,74 | (–) 3,21 | (–) 8,76 | (–) 5,62 | (–) 3,45 | (–) 8,88 |
| RWA | (–) 5,00 | (–) 3,29 | (–) 8,13 | (–) 5,49 | (–) 3,23 | (–) 8,54 |

(*): a indicação (–) refere-se a valores negativos
(**):Δ (x→y) = [(Vy/Vx) – 1]. (100%) Vy: refere-se ao cenário y; Vx: refere-se ao cenário x

Enquanto para a categoria NRF o uso de vinhaça e torta se reverte em aumento acumulado de PEC (5,3%), em termos de RWA observa-se o efeito inverso, com redução de 8,1%. Os desempenhos obtidos para NRF estão ligados a consumos de petróleo e gás natural. Suas contribuições para o cenário I foram de a 41 e 22 GJ/FR respectivamente, enquanto que para o cenário IV foram de 46 e 23 GJ/FR respectivamente. Os reaproveitamentos de vinhaça e torta reduzem o aporte de gás natural pelo fato deste recurso ser usado: (i) como matéria-prima na síntese de amônia ($NH_3$), um intermediário da manufatura de Ureia; e (ii) como fonte de energia térmica na obtenção de adubos químicos em geral.

Para os cenários II e V a redução de NRF foi de 26% e 24%, e para os cenários III e VI, que aglutinam ainda o efeito da torta, os decréscimos atingiram 30% e 28%. Em contrapartida, o reuso de vinhaça e torta eleva o consumo de petróleo por conta de seus transportes e aplicações no solo. Isso ocorre dado os graus de diluição da vinhaça. Para os cenários II e V as PED's associadas ao petróleo se elevaram em 19% e 17%, e para III e VI registraram-se incrementos de 13% e 11%. A composição desses efeitos resulta nos valores de ΔCumulative (I→III) e ΔCumulative (IV→VI).

Os resultados de RWA para os cenários I e IV (Tabela 8) são impulsionados pela demanda elétrica associada à produção de SSP. De acordo com Silva e Kulay (2003), cerca de 2.0 kWh /kg SSP do montante elétrico total são supridos pelo grid BR, que em 2013 detinha uma contribuição de hidroeletricidade de 71% (EPE, 2014). Ao serem integradas ao sistema, vinhaça e torta reduzem esta dependência resultando em decréscimos acumulados para RWA da ordem de 8%.

Para a análise energética dos resultados acima apresentados, usou-se o conceito de EROI ou Retorno de Energia Sobre o Investimento e que é definido como a razão entre a energia entregue por um processo para a energia utilizada diretamente e indiretamente nesse processo (Gupta e Hall, 2011). O processamento de etanol apresentou balanço energético positivo para os cenários I e IV ao atingirem relações entre a energia intrínseca ao combustível e aquela que procede de fontes primárias não renováveis [EROIi = $E_i^{C2H6O}$ / $NRF_i$] respectivamente de $EROI_I$ = 4,65 e $EROI_{IV}$ = 4,26.

Após serem ajustados para projetar desempenhos para o etanol anidro, e descontarem o aporte de gás natural para produção de $NH_3$ (que é extraído do ambiente, sem, no entanto, se reverter em energia para o processo), esses valores convergem para $EROI'_I$ = 5,80 e $EROI'_{IV}$ = 5,28. Esses índices mostraram coerência com a literatura superando os achados de Santos e Santos (2009) (EROI = 3,15) para condições semelhantes de processo, e de García et al (2011) (EROI = 4,80), cuja estimativa ocorreu a partir da aplicação da técnica de ACV para plantas de etanol instalados no México.

$EROI'_I$ é de magnitude semelhante ao valor de balanço obtido por Macedo et al (2008), para o caso em que esse último seja adequado para representar uma condição em que se ignore a energia associada ao excedente de bagaço, e não se exporte eletricidade (EROI =

8,23).

Por fim, $EROI'_I$ e $EROI'_{IV}$ se enquadram nas faixas de variação de desempenho definidas por Smeets et al (2008) para sistemas instalados em São Paulo que realizam colheita manual (5,50 – 10,6) e mecanizada (5,18 – 9,57), ainda que próximos a seus limites inferiores.

Quanto ao Perfil Ambiental, os valores correspondentes às variações relativas são apresentados a seguir na Tabela 16.

Tabela 16. Variações relativas (%) de impacto fornecidas por adições de vinhaça e torta de filtro

| **Categoria de Impacto** | **Forma de Cultivo** | | | | | |
|---|---|---|---|---|---|---|
| | **Colheita Manual (%) (*)** | | | **Colheita Mecanizada (%) (*)** | | |
| | **Δ(**) (I → II)** | **Δ(**) (II → III)** | **Δ(**) Cumulative (I → III)** | **Δ(**) (VI → V)** | **Δ(**) (V → VI)** | **Δ(**) Cumulative (IV → VI)** |
| CC | (–) 2,81 | (–) 1,62 | (–) 4,39 | (–) 2,71 | (–) 1,90 | (–) 4,56 |
| TA | (–) 23,8 | (–) 5,20 | (–) 27,7 | (–) 23,1 | (–) 5,64 | (–) 27,4 |
| FEut | (–) 3,33 | (–) 0,86 | (–) 4,17 | (–) 9,72 | (–) 3,12 | (–) 12,5 |
| HT | (–) 8,64 | (–) 1,90 | (–) 10,4 | (–) 8,32 | (–) 1,76 | (–) 9,93 |
| TEC | (–) 6,32 | (–) 2,44 | (–) 8,62 | (–) 0,79 | (–) 0,27 | (–) 1,06 |

(*): a indicação (–) refere-se a valores negativos
(**):Δ (x→y) = [(Vy/Vx) – 1]. (100%) Vy: refere-se ao cenário y; Vx: refere-se ao cenário x

Para as duas formas de manejo da cultura a reutilização de vinhaça e torta resultou em ganhos acumulados para todas as categorias de impacto em análise. Destacam-se nesse âmbito as melhorias ocorridas em termos de CC, TA e HT por conta dos elevados valores absolutos registrados pelos cenários baseline para tais categorias (Tabela 9). Nota-se ainda que a incorporação de vinhaça proporcionou sempre benefícios mais significantes do que a de torta, ou seja, Δ (I→II) > Δ (II→III) e Δ (IV→V) > Δ (V→VI)

Os impactos em termos de CC são devidos a emissões de Dióxido de Carbono fóssil ($CO_{2,f}$) e Oxido de Dinitrogênio ($N_2O$) para o ar. Para os cenários I e IV – cuja adubação

ocorre a partir de adubos químicos - estas contribuições acumularam respectivamente 7704 $kgCO_{2\ eq}$/FR para colheita manual (ou, 0,71 kg $CO_{2eq}$/kg etanol 95%$_{w/w}$) e 7975 $kgCO_{2\ eq}$/FR para colheita mecanizada (0,74 kg $CO_{2eq}$/kg etanol 95%$_{w/w}$) sendo o $CO_2$ fóssil responsável por 51% e 52% de cada total (Tabela 17).

A Tabela 17 mostra os resultados das emissões totais desses precursores do impacto para cada cenário em análise.

Tabela 17. Impactos ambientais em termos de CC derivados de emissões de $CO_2$ e $N_2O$ para produção de 10,78t etanol 95%$_{w/w}$

| **Substância** | **Unidades** | **Cenário** | | | | | |
|---|---|---|---|---|---|---|---|
| | | **I** | **II** | **III** | **IV** | **V** | **VI** |
| $CO_2$, f | kg $CO_2$ eq | 4181 | 4474 | 4385 | 4390 | 4683 | 4584 |
| $N_2O$ | kg $CO_2$ eq | 3522 | 3011 | 2976 | 3585 | 3073 | 3022 |

O uso de vinhaça traz aumento do impacto em termos de $CO_{2,f}$ nas passagens dos cenários I → II e IV → V. Em ambos os casos este acréscimo foi de 27 kg/t de etanol. Já a adição de torta de filtro amortece esse efeito, respectivamente em 8,3 kg/t de etanol (II → III) e em 9,2 kg/t de etanol (V →VI).

As emissões de $CO_{2,f}$ procedem de movimentação de máquinas agrícolas, geração de calor para produção de fertilizantes e, principalmente, atividades de transporte. O transporte de vinhaça e torta que ocorrem entre a destilaria e a lavoura gera emissões expressivas de $CO2,_f$. No entanto, tais efeitos são superados pela atenuação das distribuições de ureia, SSP e KCl, cujas malhas compreendem trechos rodoviários entre 100-150km e, no caso especial da fonte potássica, também deslocamentos transoceânicos.

O reuso de vinhaça trouxe ainda melhoras para o desempenho do sistema ao reduzir impactos associados às emissões de $N_2O$ nas passagens dos cenários I→II e IV→V de 47 kg $CO_2$ eq /t etanol. A incorporação de torta seguiu na mesma tendência quanto à atuação desse precursor ao subtrair outros 3,2 kg $CO_2$ eq /t etanol e 4,7 kg $CO_2$ eq /t etanol nas passagens dos cenários II→III e V→VI. Esses benefícios podem ser explicados a partir dos

achados de Stipp e Prochnow (2008), de que a ureia é o fertilizante nitrogenado com maior potencial de perda de N por volatilização. Segundo esses autores, muito embora a emanação do nitrogênio ocorra em geral sob a forma de $NH_3$, é frequente a existência de perdas na forma oxidada, e dentre essas, as de $N_2O$.

As perdas de amônia representaram a maior contribuição para TA, como mostra a Tabela 18, resultante da produção de ureia e sua aplicação no campo. Os usos de vinhaça e torta abateram impactos destas emissões de $NH_3$ de 9,6 kg/t etanol (I→II e IV→V), e 1,60 kg/t etanol (II→III e V→VI). Foram notados também decréscimos discretos de óxido de enxofre ($SO_x$) de 89 g $SO_2$ eq/t etanol (I→II e IV→V), e de 25 g $SO_2$ eq/t etanol para II→III, e 27 g $SO_2$ eq/t etanol para V→VI; estas emissões estão ligadas à produção de ácido sulfúrico, um intermediário da produção de SSP.

Em contrapartida, a troca de parte dos adubos químicos por vinhaça elevou em 344 g $SO_{2\ eq}$/t etanol (I→II e IV→V) aportes para TA que derivam de perdas atmosféricas de óxido de nitrogênio ($NO_x$), por conta da queima de diesel para acionamento dos sistemas de aspersão desse fluído sobre a cultura. As dosagens de torta por sua vez, reduziram em cerca de 10,2 g $SO_2$ eq/t etanol (II→III e V→VI) os impactos advindos do $NO_x$.

Tabela 18. Impactos ambientais em termos de TA devido a emissões de $NH_3$, $SO_x$ e $NO_x$ para produção de 10,78t etanol 95%$_{w/w}$

| **Substância** | **Unidades** | **Cenários** | | | | | |
|---|---|---|---|---|---|---|---|
| | | **I** | **II** | **III** | **IV** | **V** | **VI** |
| $NH_3$ | kg $SO_2$ eq | 388 | 284 | 268 | 396 | 292 | 273 |
| $NO_x$ | kg $SO_2$ eq | 29,8 | 33,5 | 33,4 | 31,3 | 35,0 | 34,9 |
| $SO_x$ (incluindo $SO_2$) | kg $SO_2$ eq | 10,6 | 9,61 | 9,34 | 11,1 | 10,1 | 9,83 |

As perdas de fósforo (P) para a água representam aproximadamente 79% do impacto observado na categoria FEut para os cenários relacionados à colheita manual, e 18% para aqueles que constituem o grupo de práticas mecanizadas. São também causadores de impacto para a categoria os despejos de fosfato ($PO_4^{3-}$) para o meio hídrico, gerados na quase totalidade na produção SSP (Tabela 19). As substituições deste adubo por vinhaça e

torta acumulam reduções de 3,71 g P eq/ t etanol de (I→III) e (IV→VI).

O potencial gerador de Eutrofização da vinhaça que aparece evidenciado na literatura com alguma expressão (Botelho et al, 2014; Ortegón et al, 2016) não se fez notar nesta situação por conta das características do cultivo de cana-de-açúcar, que em termos hídricos ocorre em áreas servidas por malha integrada, exposta à insolação, e com condições propícias à oxigenação natural.

Tabela 19. Impactos ambientais em termos de FEut devido a emissões de $PO_4^{3-}$ e P para produção de 10,78t etanol $95\%_{w/w}$

| **Substância** | **Unidades** | **Cenários** | | | | | |
|---|---|---|---|---|---|---|---|
| | | **I** | **II** | **III** | **IV** | **V** | **VI** |
| $PO_4^{3-}$ | kg P eq | 2,68E-01 | 2,38 E-01 | 2,29 E-01 | 2,66 E-01 | 2,35 E-01 | 2,26 E-01 |
| P | kg P eq | 9,26 E-01 | 9,25 E-01 | 9,25 E-01 | 5,30 E-02 | 5,30 E-02 | 5,20 E-02 |

O uso de fertilizantes, em especial o SSP, proporciona impactos significantes em termos de HT causados principalmente por emissões de cádmio (Cd) e zinco (Zn) como indica a Tabela 20.

Tabela 20. Impactos ambientais em termos de HT devido a emissões para o solo de Cd e Zn para produção de 10,78t etanol $95\%_{w/w}$

| **Substância** | **Unidade** | **Cenários** | | | | | |
|---|---|---|---|---|---|---|---|
| | | **I** | **II** | **III** | **IV** | **V** | **VI** |
| Cd | kg 1,4-DB eq | 752 | 645 | 623 | 751 | 644 | 624 |
| Zn | kg 1,4-DB eq | 91,8 | 69,9 | 67,5 | 91,7 | 69,7 | 67,4 |

O redimensionamento de consumos do ativo fosfatado gerou declínios acumulados dos efeitos de Cd e Zn sobre os sistemas agrícolas (I→III e IV→VI), respectivamente de 12 e 2.2 kg1,4-DB eq /t etanol.

Os resultados obtidos para TEC chamam a atenção em virtude de duas características:

(i) a influência marcante do método de colheita sobre os resultados globais para a categoria; e (ii) a inalteração dos resultados de impacto diante das adições de vinhaça e torta ao solo (Tabela 21).

Tabela 21. Impactos ambientais em termos de TEC devido a emissões para o solo de Cu e Zn para produção de 10,78t etanol 95%$_{w/w}$

| **Substância** | **Unidade** | **Cenários** | | | | | |
|---|---|---|---|---|---|---|---|
| | | **I** | **II** | **III** | **IV** | **V** | **VI** |
| Cobre (Cu) | kg 1,4-DB eq | 2,40 E-01 | 1,80E-01 | 1,70 E-01 | 2,40 E-01 | 1,80E-01 | 1,70 E-01 |
| Zinco (Zn) | kg 1,4-DB eq | 1,30 E-01 | 9,00 E-02 | 9,00 E-02 | 1,30 E-01 | 9,00 E-02 | 9,00 E-02 |

Ambos os fenômenos podem ser explicados pela divergência de precursores em cada forma de processamento agrícola. Para o sistema com colheita manual os impactos de TEC se originam principalmente de perdas de Zn e cobre (Cu) decorrentes das aplicações de fertilizantes, e que juntos totalizam 0,37 kg 1,4 DB eq/RF; e de carbofuran, agroquímico de uso regular para controle de nematóides parasitas da cana (0,17 kg 1,4 DB eq/RF).

### *8.1.1 Análise de Sensibilidade*

O caráter determinístico do modelo concebido para o estudo requereu que uma Análise de Sensibilidade fosse conduzida para aferir os efeitos da variabilidade dos teores de nutrientes da composição da vinhaça ($xi^V$) sobre os resultados obtidos. As dosagens consideradas na verificação foram determinadas com base nas seguintes premissas: (i) apenas fertilizantes químicos e vinhaça seriam aplicados como fonte de nutrição para a cultura; e, (ii) as determinações seriam realizadas apenas para sistema com manejo mecanizado, dada a tendência estabelecida no estado de São Paulo por meio de restrições legais, de interrupção de queimadas previamente à colheita. Como resultado, as alternativas foram baseadas no cenário V cenário descrito na secção 7.1.1.

Um levantamento realizado junto à literatura técnica (Costa et al, 1986; Wilkie et al, 2000; Christofoletti et al, 2013; Santos et al, 2014; Sydney et al 2014) indicou três

possibilidades de composições alternativas: Cenário V': teores máximos de N, P e K em solução; Cenário V'': solução com deficiência de N; e Cenário V''': solução com deficiência de P. Os resultados da coleta de dados, bem como as dosagens de Ureia, SSP e KCl para cada cenário são apresentados na Tabela 22.

Tabela 22. Conteúdo de ativos em vinhaça e quantidade de fertilizantes químicos usados para cada cenário de Análise de Sensibilidade

| Nutriente | Costa et al (1986) | Wilkie et al (2000) | Christofoletti et al (2013) | Santos et al (2014) | Sydney et al (2014) | Fertilizante | Cenário (kg/ha) | | |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| | (mg/L) | | | | | | V' | V'' | V''' |
| N | 700 | 450 | 267 | 1486 | 2.20 | Urea (45% N) | 82,1 | 443 | 361 |
| P | 1740 | 110 | 1.30 | 222 | 105 | SSP (20% $P_2O_5$) | 221 | 263 | 300 |
| K | 760 | 1650 | 2056 | 4500 | 2386 | KCl (60% $K_2O$) | (–) 184(*) | 66.5 | 105 |

(*): a indicação (–) refere-se a valores negativos

A quantidade de $K_2O$ aportada pela vinhaça no cenário V' excedeu as necessidades nutricionais da cana em termos de K. Diante dessa circunstância assumiu-se que tais excessos permaneceriam no solo, na sua estrutura molecular original sem causar nenhum impacto ambiental até que eles sejam consumidos durante o seguinte ciclo de cultivo.

A Tabela 23 apresenta os resultados da influência da concentração de macronutrientes primários (N, P, K) na vinhaça sobre os valores de PED associados à produção de etanol. A depleção de NRF segue sendo a categoria de impacto que mais consumos de PED (97%). Os efeitos associados a RWA seguem em níveis residuais (1,90–2,10%); as demais categorias de impacto continuam a ter contribuições negligenciáveis.

Os resultados de NRF para V' e V'' expressam a influência marcante da síntese de ureia sobre os consumos globais de petróleo e gás natural. Em V'', quando a dosagem de $CO(NH_2)_2$ é máxima constataram-se aumentos de 5% e 30% nos consumos de petróleo e gás natural com relação ao ocorrido na situação de referência (cenário V).

Tabela 23. Análise de Sensibilidade de PED para a produção de etanol para diferentes quantidades de fertilizantes químicos

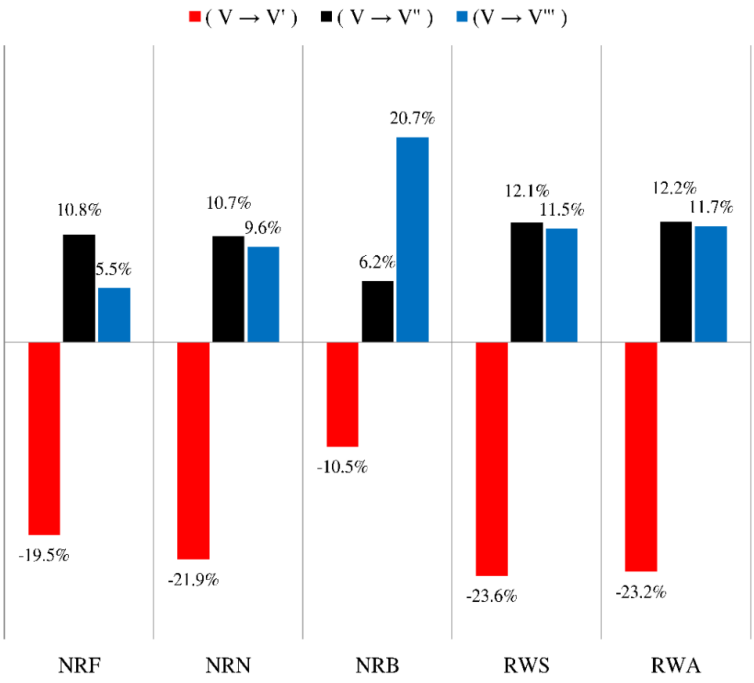
| Categoria de Impacto | Cenário (GJ / FR) | | |
|---|---|---|---|
| | **V'** | **V''** | **V'''** |
| NRF | 60,6 | 83,4 | 79,4 |
| NRN | 5,37E-01 | 7,61E-01 | 7,53E-01 |
| NRB | 1,68E-03 | 2,00E-03 | 2,27E-03 |
| RW | 2,43E-02 | 3,57E-02 | 3,55E-02 |
| RWA | 1,19 | 1,74 | 1,73 |
| Total | 62,4 | 86,0 | 81,9 |

As oscilações de concentração de P e K na vinhaça causam efeitos menos intensos sobre a depleção de NRF. Estes, no entanto, não podem ser desprezados. A dimensão da contribuição de SSP pode ser projetada a partir do desempenho de NRF em V', situação em que o aporte de ureia foi mínimo e o de KCl, nulo. Tal comportamento se verifica também com o adubo potássico em relação a V''', quando sua participação foi a mais elevada da série (superando em 58% a dose administrada em V''). Nesse caso, a associação de KCl e SSP (também na dosagem mais elevada) foi capaz de amortecer a redução 19% do consumo de Ureia que ocorreu de V'' para V''' e assim, manter elevados os níveis de depleção de NRF. A Figura 10 compara, por categoria de impacto, os valores de PED dos cenários definidos para a Análise de Sensibilidade, com aqueles obtidos pelo cenário V, usado nesse caso como referência da escala.

A análise das variantes leva a concluir que uma solução de vinhaça contendo elevados teores de macronutrientes primários é capaz de reduzir em até 23% valores específicos de PED associados à produção de etanol quando estes se comparam relação à solução com composição média definida para o estudo. Esse resultado apresenta maior significado físico em termos de NRF, para a qual o decréscimo foi de 19%. Ainda para essa categoria, uma composição de vinhaça com deficiência de N impõe um acréscimo de consumo de recursos fósseis da ordem de 11% sobre a composição média, valor em cerca de duas vezes superior ao acréscimo proporcionado pela recuperação de vinhaça com baixos índices de P. As

variações em termos de NRN, NRB e RWS são influenciadas pela magnitude dos valores absolutos.

Figura 10. Comparação de desempenhos de PED entre o Cenário V (baseline) e alternativas definidas para Análise de Sensibilidade




Os perfis ambientais relativos a impactos decorrentes de emissões para o ambiente obtidos a partir da análise de sensibilidade aparecem descritos na Tabela 24.

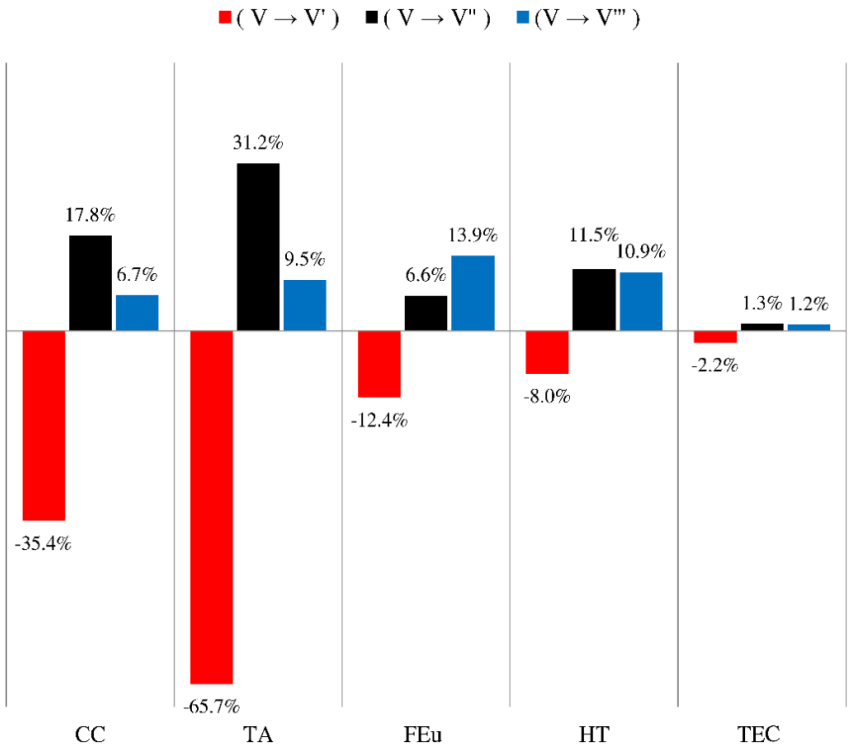
Uma análise mais detida daquele conteúdo explicita a condição do cenário V' de detentor dos mais baixos índices de impacto ambiental para CC, TA e HT. Por outro lado, os desempenhos alcançados pelos cenários V'' e V''' dão conta: (i) da importante influência exercida pela produção de ureia sobre aquelas mesmas categorias; e (ii) da discreta participação da manufatura de SSP sobre os resultados globais. Nota-se ainda que os impactos em termos de FEut mantiveram-se em patamar residual para todas as situações analisadas, constatação que apenas reforça a interpretação dada anteriormente para a participação do SSP no contexto geral da análise.

Tabela 24. Perfil Ambiental obtido a partir da Análise de Sensibilidade para diferentes composições da vinhaça

| Categoria de impacto | Unidade | Cenários (/FR) | | |
|---|---|---|---|---|
| | | V’ | V’’ | V’’’ |
| CC | kg $CO_{2\ eq}$ | 5294 | 9648 | 8738 |
| TA | kg $SO_{2\ eq}$ | 115 | 442 | 369 |
| FEut | kg $P_{eq}$ | 2.52E-01 | 3.06E-01 | 3.28E-01 |
| HT | kg 1,4-$DB_{eq}$ | 1624 | 1967 | 1957 |
| TEC | kg 1,4-$DB_{eq}$ | 7,34 | 7,60 | 7,59 |

Vale por fim destacar improvável relação existente entre impactos ambientais em termos de HT e a deficiência de P na composição da vinhaça e, a incompatibilidade entre os efeitos gerados quanto a TEC e os teores de macronutrientes primários neste mesmo fluído. A Figura 11 compara valores do Perfil Ambiental dos cenários definidos para Análise de Sensibilidade, com aqueles que compuseram o cenário V, os quais, mais uma vez, serviram de referência da escala.

Figura 11. Comparação de desempenhos de Perfil Ambiental entre Cenário V (baseline) e alternativas definidas para Análise de Sensibilidade



Para CC o nível de redução alcançado por V' com relação ao cenário baseline (35%) se apoia no decréscimo de 57% das emissões de $N_2O$ provenientes da redução do consumo de ureia. Dentro da mesma tônica, nas situações em que há participação mais ativa desse adubo no processo agrícola (V'' e V''') percebe-se uma inversão de tendências motivada por acréscimos (de 27% e 8,1%) dessa mesma emissão.

A comparação dos desempenhos associados a TA mostra semelhança com o caso de CC quanto às emissões de amônia que também procedem da produção de Ureia. Enquanto para V' as perdas de $NH_3$ corresponderam a 25% do total registrado em V, nos casos de V'' e V''' ocorreram ganhos de 35% e 10% nas suas emanações.

O cenário V''' tende a apresentar os piores resultados em termos de FEut. No entanto, a comparação entre valores relativos aparenta estar bastante influenciada pela magnitude dos resultados obtidos.

Para HT, o decréscimo de impacto de V' com relação a V se deve às reduções de perdas de Cd e Zn em, respectivamente, 13% e 28%. Já os desempenhos de V'' e V''' estiveram bastante próximos, com as emissões de Cd e Zn se elevando de 19% de 15%. Esse perfil de variação sugere haver pouca relação entre impactos quanto a HT e concentrações de macronutrientes presentes na vinhaça, muito embora as perdas desses metais se vinculem ao SSP. Por fim, em termos de TEC as variações de consumo de ureia e SSP não resultaram em aumento de impactos, confirmando a tendência percebida anteriormente de ausência de relação entre tais parâmetros.

De forma geral, pode-se concluir que a alternativa em que adições de vinhaça e torta de filtro à lavoura com vistas a complementar teores nutricionais, traz reduções de impactos para todas as categorias analisadas independentemente do método de colheita adotado. Em termos de PED as contribuições mais expressivas (97%) ocorrem sob a forma de depleção de Non - Renewable fossil (NRF).

### 8.2 Reaproveitamento de fração líquida de vinhaça como água de processo

A Tabela 25 apresenta variações relativas dos valores de PED entre os cenários 2A e 2B. Tendo em vista estes valores, podem-se perceber aumentos em todas as categorias

analisadas quando a vinhaça é tratada para obter água de processo, ao invés de ser empregada no campo como complemento nutricional na cultura de cana.

Tabela 25. Variações relativas de PED (%) para 2B em relação ao cenário 2A

| **Categoria de Impacto** | **Cenários** |
|---|---|
| | Δ (2A→2B) (%) (*) |
| NRF | 126 |
| NRN | 1223 |
| NRB | 24 |
| RW | 1540 |
| RWA | 1838 |

(*): Δ (x→y) = [(Vy/Vx) – 1]. (100%) Vy: refere-se ao cenário y; Vx: refere-se ao cenário x

Quanto a NRF, o reuso de vinhaça como água de processo resultou em incrementos importantes de impacto devido aos aumentos do consumo de Petróleo e Gás Natural. Suas respectivas contribuições para o cenário 2A foram de 5,70E04 e 1,60E04 MJ/FR, ao passo que para 2B estas corresponderam a 1,10E05 e 4,80E04 MJ/FR. Desse quadro resultam aumentos de 93% no caso do óleo cru e 200% para o gás natural.

No caso do petróleo, os aumentos de consumo se devem em geral ao maior dispêndio de óleo diesel, usado no transporte de aditivos químicos para o tratamento da vinhaça, e na obtenção de $NH_3$. A amônia é insumo essencial para produção de ureia, que de sua parte passou a ser consumida em maior quantidade a fim de atender as necessidades nutricionais da cana. O processamento de NaClO e o incremento na produção de $CO(NH_2)_2$ resultaram ainda em elevação de consumo de gás natural. Por fim, os acréscimos, expressivos, que foram constatados em termos de NRN, RW e RWA remetem ao aumento da demanda de energia elétrica associada às produções, mais uma vez, de ureia e de SSP. No cenário 2A, a demanda elétrica na produção destes dois insumos foi de 96,5 e 170 kWh/FR respectivamente, quanto que no cenário 2B foram de 130 e 209 kWh/FR, resultando em incrementos na demanda de eletricidade de 35% na produção de ureia, e de 23% na

produção de SSP, na passagem 2A→2B.

Em termos do Perfil Ambiental, a Tabela 26 apresenta as variações relativas de perfil entre os cenários em estudo.

Tabela 26. Variações relativas (%) do Perfil Ambiental entre os cenários 2A e 2B

| **Categoria de Impacto** | **Unidades** | **Cenários** |
|---|---|---|
| | | Δ (2A→2B) (**) |
| WD | $m^3$ | (–) 45 |
| CC | kg $CO_{2\ eq}$ | 136 |
| TA | kg $SO_{2\ eq}$ | 40 |
| FEut | kg $P_{eq}$ | 63 |
| HT | kg 1,4-$DB_{eq}$ | 77 |
| FEC | kg 1,4-$DB_{eq}$ | 25 |

(*): a indicação (–) refere-se a valores negativos
(**): Δ (x→y) = [(Vy/Vx) – 1]. (100%) Vy: refere-se ao cenário y; Vx: refere-se ao cenário x

Observa-se que a incorporação da etapa de tratamento de vinhaça levou a uma redução em termos de WD de 45% de 2B em relação a 2A. Em contrapartida, observam-se incrementos para as demais categorias analisadas. A discussão realizada nas próximas seções apresenta não apenas os precursores das categorias de impacto analisadas, como também as etapas do ciclo de vida em que estes são gerados, além dos motivos que os credenciam a ser contribuintes relevantes para cada qual destes efeitos.

### *8.2.1. Mudanças Climáticas (CC)*

A passagem 2A→2B traz aumento do impacto de 1,01 kg $CO_{2eq}$/kg etanol hidratado. Esse resultado se deve principalmente ao aumento das emissões de $CO_{2,f}$, $N_2O$, Metano biogênico ($CH_{4,b}$), Metano fóssil ($CH_{4,f}$) e Dióxido de Carbono, land transformation ($CO_{2,LT}$) para o ar. Juntas, estas emissões totalizaram respectivamente 7927 kg $CO_{2\ eq}$/FR

no cenário 2A e 18889 kg $CO_{2\ eq}$/FR no cenário 2B. As contribuições individuais aportadas por tais substâncias são indicadas na Tabela 27.

As emissões de $CO_{2,f}$, tiveram um acréscimo de 0,83 kg $CO_{2\ eq}$/kg de etanol hidratado, e são devidas em sua maior parte à produção do CaO a partir de calcinação de carbonato de cálcio ($CaCO_3$). Esse processo apresentou uma contribuição individual de 21% no total de emissões para CC no cenário 2B.

Tabela 27. Impactos ambientais em termos de CC para produção de 10,78t de etanol

| **Sustância** | **Unidades** | **Cenário** | |
|---|---|---|---|
| | | **2A** | **2B** |
| $CO_{2,\ f}$ | kg $CO_{2\ eq}$ | 4560 | 13484 |
| $N_2O$ | kg $CO_{2\ eq}$ | 3027 | 3800 |
| $CH_{4,\ b}$ | kg $CO_{2\ eq}$ | 238 | 537 |
| $CH_{4,\ f}$ | kg $CO_{2\ eq}$ | 102 | 333 |
| $CO_{2,LT}$ | kg $CO_{2\ eq}$ | 36,5 | 734 |
| Total | kg $CO_{2\ eq}$ | 7963,5 | 18888 |

Os transportes da fração de vinhaça a ser usada na etapa agrícola e de insumos usados na fase industrial, proporcionaram outros 7,3% de contribuição para a categoria. Nesse caso deve merecer destaque a distribuição de NaClO, cuja distância de transporte, desde a cidade de Portão – RS até a destilaria autônoma é de 1450 km.

As emissões na forma de $CO_{2,LT}$ decorrem da decomposição de matéria orgânica submersa durante a etapa de construção dos reservatórios de hidrelétricas. Essas emissões sofreram aumentos de 60 g $CO_{2\ eq}$/kg de etanol hidratado na passagem 2A→2B (Martins et al. 2013). Já as perdas para o ar de $N_2O$ que ocorrem via nitrificação de adubos nitrogenados, resultaram em elevações da ordem de 70 g $CO_{2\ eq}$/kg de etanol, em virtude da intensificação do consumo de ureia no cenário 2B (Tabela 12).

Finalmente, as perdas de $CH_{4,b}$ e $CH_{4,f}$, totalizaram adições de 50 g $CO_{2\ eq}$/kg etanol hidratado. Para o $CH_{4,f}$ estas tiveram acréscimo de 20 g $CO_{2\ eq}$/kg etanol, e decorrem de

extração de gás natural usado na produção de óleo diesel que, como já indicado, é consumido em maior quantidade em 2B. As emissões de $CH_{4,b}$ se associam em sua quase totalidade à produção de energia hidrelétrica e energia a partir de biomassa no grid brasileiro (EPE, 2014).

### *8.2.2 Acidificação Terrestre (TA)*

Em termos de TA as principais emissões ocorrem na forma de $NH_3$, e de óxidos de nitrogênio e enxofre ($NO_x$ e $SO_x$). As contribuições individuais destas substâncias para a referida categoria de impacto são apresentadas a seguir na Tabela 28.

Tabela 28. Impactos ambientais em termos de TA devido a emissões de $NH_3$, $SO_x$ e $NO_x$ para produção de 10,78t etanol 95%$_{w/w}$

| **Sustância** | **Unidades** | **Cenários** | |
|---|---|---|---|
| | | **2A** | **2B** |
| $NH_3$ | kg $SO_{2\ eq}$ | 273 | 370 |
| $NO_x$ | kg $SO_{2\ eq}$ | 34,8 | 45,8 |
| $SO_x$ (incluindo $SO_2$) | kg $SO_{2\ eq}$ | 9,42 | 27,5 |

As emissões de $NH_3$ proporcionaram as parcelas de contribuição mais expressivas de impacto tanto para 2A quanto para 2B, com aportes de 82% e 83% respectivamente. Essas emissões são resultado do uso de fertilizantes nitrogenados na etapa agrícola, processo que acumulou 82% dos impactos em termos de TA e do qual resultou aumento de 8,95 g $SO_{2\ eq}$/kg etanol hidratado na passagem 2A→2B. Outros processos associados ao sistema analisado tiveram contribuições inferiores a 5%.

No caso do $SO_x$, houve acréscimo de 1,68 g $SO_{2\ eq}$/kg etanol para o cenário 2B. Essa contribuição está ligada à produção de $H_2SO_4$, usado nas obtenções de SSP e $Al_2(SO_4)_3$; e no refino de petróleo para produção de óleo diesel.

Já as emissões de $NO_x$ resultaram em incremento de impacto de exatos 1,02 g $SO_{2\ eq}$/kg etanol quando do reaproveitamento de vinhaça como provedor de água de processo. Esse efeito se deve às etapas de transporte fertilizantes e de NaClO.

### *8.2.3 Eutrofização Terrestre (FEut)*

A Tabela 29 apresenta os perfis de contribuição de impacto em termos de FEut. Em termos gerais, também neste caso observa-se aumento de impacto associado à opção de recuperação de fração de líquida de vinhaça em comparação ao desempenho do cenário base. Esta se fundamenta nas perdas hídricas de P e de fosfatos ($PO_4^{3-}$). Os impactos derivados de emissões de $PO_4^{3-}$ para a água decorrem de lixiviação de ganga de mineração de lignita, mesmo quando esta é disposta em aterros sanitários.

Ao serem somadas, essas adições proporcionam aumento de 10,8 mg P/kg etanol na comparação dos desempenhos de FEut entre os cenários 2A e 2B.

Tabela 29. Impactos ambientais em termos de FEut devido a emissões de $PO_4^{3-}$ e P

| **Sustância** | **Unidades** | **Cenários** | |
|---|---|---|---|
| | | **2A** | **2B** |
| $PO_4^{3-}$ (água) | kg $P_{eq}$ | 1,43E-01 | 2,59E-01 |
| P (água) | kg $P_{eq}$ | 5,20E-02 | 5,80E-02 |

Já as emissões de P para a água originam-se da intensificação do uso de fertilizantes fosfatado (SSP) no solo para atendimento das necessidades da cana-de-açúcar quanto a esse nutriente primário. Esta ação faz elevar os impactos proporcionados por esse precursor em 560 μg $P_{eq}$/kg de etanol quando se comparam 2A e 2B.

### *8.2.4 Toxicidade Humana (HT)*

A produção de óleo diesel e a aplicação de fertilizantes químicos, precursores principais das emissões de Ba e Cd, respondem pelas principais contribuições para HT, as quais montam respectivamente 42% e 14% do total de impacto da categoria.

No cenário 2B, exatos 81% dos impactos decorrem de perdas de bário (Ba) para água, cádmio (Cd) para o solo, e mercúrio (Hg), para o ar. Em comparação aos desempenhos observados em 2A, essas substâncias tiveram os efeitos de sua disposição no ambiente,

aumentados respectivamente de 4,1g, 21,2g e 32,3g 1,4-DB eq /kg etanol hidratado quando analisadas no contexto do reaproveitamento de fração líquida de vinhaça.

Juntam-se a estas, os lançamentos de arsênico (As) para a água, zinco (Zn) para o solo e vanádio (V) para o ar, que muito embora apresentassem contribuições em termos de impacto respectivamente de 6,1%, 3,6% e 3,2%, não poderiam ser depreciadas. A Tabela 30 apresenta em termos quali e quantitativos os precursores de impacto para HT.

Tabela 30. Impactos ambientais em termos de HT

| **Sustância** | **Unidades** | **Cenários** | |
|---|---|---|---|
| | | **2A** | **2B** |
| Ba (água) | kg 1,4-DB $_{eq}$ | 867 | 912 |
| Cd (solo) | kg 1,4-DB $_{eq}$ | 161 | 390 |
| Hg (ar) | kg 1,4-DB $_{eq}$ | 9,47 | 358 |
| As (água) | kg 1,4-DB $_{eq}$ | 14,2 | 116 |
| Zn (solo) | kg 1,4-DB $_{eq}$ | 28,1 | 68,1 |
| V (ar) | kg 1,4-DB $_{eq}$ | 30,6 | 61,9 |

Incrementos nas emissões de Hg para o ar de 32 g /kg etanol são decorrentes da produção do NaOH em células de mercúrio, processo que no Brasil representa 13% do total da produção de soda (ABICLOR, 2015). Pode-se também destacar as emissões de As para a água, decorrentes da produção de $Al_2(SO_4)_3$, que proporcionam 9,5 g 1,4-DB $_{eq}$ /kg etanol a mais do que 2A. Além dessas, destacam-se ainda emissões de Zn decorrentes do uso de fertilizantes no campo (3,7 g 1,4-DB $_{eq}$ /kg etanol), e perdas de V da síntese de ureia (2,9 g 1,4-DB $_{eq}$ /kg etanol).

### *8.2.5 Ecotoxicidade de água doce (FEC)*

Tal como aparece registrado na Tabela 31, as emissões de Ba para a água, associadas à produção de petróleo, constituem-se nos principais precursores de impacto em termos de FEC para os cenários 2A e 2B. Nessas situações os impactos proporcionados por tal

substância representam respectivamente 50% e 42% dos efeitos globais associados à categoria. A estas se seguem, perdas de Diuron para o solo, cujos aportes para 2A e 2B remetem a 21% e 19% respectivamente. Tais perdas, são resultado do uso de pesticidas na produção de cana-de-açúcar usada na produção de eletricidade a partir de biomassa, neste caso bagaço, no grid brasileiro.

Em termos de variação de impactos, a tônica de aumento observada para 2B quando se compara a 2A permanece válida para FEC. No caso das emissões de Ba, o incremento é de 26,6 mg 1,4-DB $_{eq}$ /kg etanol, ao passo que para o Diuron a variação positiva foi de 25,8 mg 1,4-DB $_{eq}$ /kg etanol. Incrementos nas emissões de Br no cenário 2B de 107 mg 1,4-DB $_{eq}$ /kg etanol estão associados à produção de petróleo usado na obtenção do Diesel que abastece os caminhões que transportam insumos de processo, particularmente NaClO.

Tabela 31. Impactos ambientais em termos de FEC

| **Sustância** | **Unidades** | **Cenários** | |
|---|---|---|---|
| | | **2A** | **2B** |
| Ba (água) | kg 1,4-DB $_{eq}$ | 5,66 | 5,95 |
| Diuron (solo) | kg 1,4-DB $_{eq}$ | 2,38 | 2,65 |
| Br (água) | kg 1,4-DB $_{eq}$ | 7,69E-01 | 1,92 |
| Ag (água) | kg 1,4-DB $_{eq}$ | 1,47 | 1,53 |
| Cu (água) | kg 1,4-DB $_{eq}$ | 3,26E-01 | 4,46 E-01 |
| Ni (água) | kg 1,4-DB $_{eq}$ | 2,05 E-01 | 2,87 E-01 |

Vale ressaltar neste caso a influência exercida pelas características fisico-químicas dos lodos de filtração, e a forma como estas são modeladas, sobre os resultados obtidos em termos de impacto ambiental para o sistema. Assim como já fora descrito antes (item 7.2.3), estes rejeitos foram considerados para efeito de modelagem do cenário 2B como matéria residual com expressiva taxa de água associada (71% para este caso) e sem contaminantes de elevado grau de periculosidade e toxidez. Por outro lado, para situações extremas, em que tais condições não mais valessem e que tais rejeitos viessem a ser constituídos por substâncias químicas altamente tóxicas, o perfil de impactos em termos de FEut sofreria

alterações consideráveis. Esta situação se repete para outras categorias de impacto, como FEC e HT.

A associação dos fatos de que: (i) a tecnologia proposta por Campos et al não esta plenamente consolidada; e, (ii) de que há variabilidade da composição da vinhaça em termos dos teores de seus componentes, introduz um grau de incerteza sobre o modelo e, por conta disso, do perfil ambiental que dele deriva. Esta condição é inerente a uma rota processual promissora, mas que ainda se encontra em fase de desenvolvimento.

De qualquer forma, mesmo depois de serem eliminadas oscilações de processo, seria fundamental determinar o perfil de composição provável da vinhaça a ser tratada – ou se não isso, ao menos buscar limites, mínimos e máximos, de concentração de contaminantes naquela solução – a fim de que esses dados pudessem projetar com maior precisão os efeitos da aplicação da referida técnica de reaproveitamento.

### *8.2.6. Depleção de água (WD)*

Em termos de Depleção Hídrica (WD) observou-se um consumo total de água de 302 $m^3$ para 2A, o qual se reduz para 167 $m^3$ no caso de 2B. Desses totais, 80 $m^3$ são destinados à torre de resfriamento e 72 $m^3$ ao processo de imbibição da cana; as operações em questão correspondem às maiores demandas hídricas de toda a etapa industrial.

Um aspecto importante deve, no entanto, ser destacado nessa análise. Muito embora o reuso da fração líquida da vinhaça (2B) tenha reduzido as necessidades de captação de água que estão associadas à destilaria, outros consumos do mesmo recurso natural – associados às produções de $H_2SO_4$ (32,3 $m^3$/FR) e NaCl (13,6 $m^3$/FR) – acabaram amortecendo esse efeito. Em termos processuais, o $H_2SO_4$ usado na produção de $Al_2(SO_4)_3$, enquanto o NaCl é empregado na produção de NaOH, o qual, de sua parte, serve de ativo para síntese de NaClO. Os valores para os dois cenários em análise são apresentados na Tabela 32.

Tabela 32. Depleção de água para 2A e 2B

| Substância | Unidades | Cenário | |
|---|---|---|---|
| | | 2A | 2B |
| Água ($_{recurso\ natural}$) | $m^3$ | 302 | 167 |

### *8.2.7. Avaliação do desempenho ambiental da produção de etanol com substituição de CaO*

Com os resultados apresentados nas seções 8.2.1 até 8.2.6, e considerando que a influência do sistema de tratamento da vinhaça proposto por Campos et al (2014) sobre CC vem principalmente da produção de CaO, optou-se por avaliar um cenário alternativo (2B'), com o objetivo de testar um arranjo que permitisse melhorar o desempenho ambiental do sistema de produção de etanol.

Neste cenário, hidróxido de sódio (NaOH) substitui CaO no processo de tratamento de vinhaça como agente de coagulação/floculação. A estimativa da dosagem de NaOH que corresponde ao consumo de CaO apontado por Campos et al (2014) baseou-se no seguinte raciocínio:

- 1 mol CaO → 2 mol $OH^-$ e em termos mássicos: 56g CaO → 34g $OH^-$.
- Para o consumo de CaO = 4479,95kg/190 t de vinhaça tratada, determinado a partir da dosagem 30 kg CaO/$m^3$ apresentado por Campos et al (2014), projeta-se, portanto, uma demanda total de 2720 kg $OH^-$
- Como: 1 mol NaOH → 1 mol $OH^-$, então 40g NaOH → 17g $OH^-$.
- Assim os 2720 kg $OH^-$ requeridos no processo de coagulação seriam fornecidos por exatos 6400 kg NaOH.

Os resultados indicados na Tabela 33 para 2B' foram determinados, portanto, para uma dosagem de 6,40 t de NaOH.

Tabela 33. Impactos ambientais em termos de CC para o cenário 2B'

| Sustância | Unidades | Cenário | |
|---|---|---|---|
| | | 2B | 2B' |
| $CO_{2,f}$ | kg $CO_{2\,eq}$ | 13484 | 11788 |
| $N_2O$ | kg $CO_{2\,eq}$ | 3800 | 3848 |
| $CH_{4,b}$ | kg $CO_{2\,eq}$ | 537 | 924 |
| $CH_{4,f}$ | kg $CO_{2\,eq}$ | 333 | 332 |
| $CO_{2,LT}$ | kg $CO_{2\,eq}$ | 734 | 1638 |

Em termos globais observou-se uma redução de impactos de 1,90% como CC de 2B' em relação a 2B. Notou-se um decréscimo nas emissões de $CO_{2,f}$ de 12,6%, por conta da substituição de CaO por NaOH. Por outro lado, houve incrementos de impactos provenientes de $CH_{4,b}$ (72%) e $CO_{2,LT}$ (123%), associados em ambos os casos à demanda de eletricidade no processo de produção de soda. Por fim, as contribuições de $CH_{4,f}$ e $N_2O$ se mantiveram quase que inalteradas.

Por esta análise, conclui-se que a substituição de CaO por NaOH permitiria melhorias discretas do desempenho ambiental do sistema em termos de CC. Em primeira instância, essa ação se tornaria mais efetiva caso fossem privilegiadas rotas tecnológicas para obtenção de soda que consumissem menos energia elétrica, ou para as quais esta utilidade pudesse ser suprida, por exemplo, por biomassa, cujas fixação de $CO_2$ do ar, e emissão de $CO_{2,b}$ se equivalem, ao menos em primeira aproximação.

Em termos de TA, observou-se acréscimo de 1,5% nos impactos no cenário 2B' em relação a 2B, como decorrência do aumento nas emissões de $NO_x$ e $SO_x$, sendo que para as formas oxidadas sulfuradas a elevação foi de 16% em relação a 2B. Os resultados são apresentados na Tabela 34.

Tabela 34. Impactos ambientais em termos de TA devido a emissões de $NH_3$, $SO_x$ e $NO_x$ para produção de 10,78t etanol 95%$_{w/w}$ – Cenário 2B'

| Sustância | Unidades | Cenário | |
|---|---|---|---|
| | | 2B | 2B' |
| $NH_3$ | kg $SO_{2\ eq}$ | 370 | 370 |
| $NO_x$ | kg $SO_{2\ eq}$ | 45,8 | 47,6 |
| $SO_x$ (incluindo $SO_2$) | kg $SO_{2\ eq}$ | 27,5 | 31,7 |

Em todos os casos, os acréscimos de impacto proporcionados por 2B' com relação a 2B estão associados ao consumo de diesel para produção e transporte de NaOH. Dada a já comentada baixa magnitude das variações, conclui-se que a substituição de CaO por NaOH não resulta em benefícios ambientais em termos de TA.

Para FEut, ao avaliar a variante 2B' em relação ao cenário 2B, notou-se um incremento no total do impacto de 20%, em virtude principalmente a produção de NaOH. Esta ação resultou em aumentos nas emissões de $PO_4^{3-}$ e P para a água, respectivamente de 0,22 e 0,12 kg $P_{eq}$/kg de etanol. Os resultados em questão podem ser obtidos a partir dos dados indicados a seguir na Tabela 35.

Tabela 35. Impactos ambientais em termos de FEut devido a emissões de $PO_4^{3-}$ e P – cenário 2B'

| Sustância | Unidades | Cenário | |
|---|---|---|---|
| | | 2B | 2B' |
| $PO_4^{3-}$ (água) | kg $P_{eq}$ | 2,59E-01 | 3,15E-01 |
| P (água) | kg $P_{eq}$ | 5,80E-02 | 6,48E-02 |

Em termos gerais é possível concluir que a incorporação do NaOH no processo de tratamento da vinhaça, como substituto do CaO, proporcionou uma piora discreta, ainda que constatável, no desempenho ambiental da produção de etanol no que se refere a FEut.

Quanto a HT, resultados no perfil ambiental para o cenário 2B', apresentados na

Tabela 36, tiveram um incremento total de 0,13 kg 1,4-DB eq /kg etanol hidratado na passagem 2A→2B', 1,6 vezes maior do que o incremento apresentado na passagem 2A→2B.

Tabela 36. Impactos ambientais para HT para os cenários 2B e 2B'

| **Sustância** | **Unidades** | **Cenários** | |
|---|---|---|---|
| | | **2B** | **2B'** |
| Ba (água) | kg 1,4-DB $_{eq}$ | 912 | 911 |
| Cd (solo) | kg 1,4-DB $_{eq}$ | 390 | 390 |
| Hg (ar) | kg 1,4-DB $_{eq}$ | 358 | 834 |
| As (água) | kg 1,4-DB $_{eq}$ | 116 | 132 |
| Zn (solo) | kg 1,4-DB $_{eq}$ | 68,1 | 70,2 |
| V (ar) | kg 1,4-DB $_{eq}$ | 61,9 | 84,2 |

Cabe ressaltar que o incremento mais significativo (133%) é devido às emissões de Hg para o ar decorrentes da produção de NaOH, como foi mencionado no item 8.2.4; outros incrementos no impacto, 36% para V e 14% para As, também estão associados à produção de hidróxido, resultado que pode levar à conclusão de que, em termos de HT, a substituição de CaO por NaOH resulta em um perfil de impacto pouco favorável dados os incrementos significativos nas emissões associadas a esta categoria.

Para FEC, os resultados são apresentados na Tabela 37. Neste caso houve um incremento de 37 mg 1,4-DB eq /kg etanol no total do impacto em relação ao cenário 2B. Tal acréscimo está associado a produção de cana-de-açúcar usada na obtenção de energia elétrica a partir de biomassa (7,6% do grid brasileiro, segundo EPE, 2014) cuja demanda se amplia dada a incorporação do processo de produção de NaOH na etapa de coagulação/floculação. Constatam-se, por outro lado, reduções nas emissões de Br – de 3% – em relação ao cenário 2B, as quais, no entanto, não conseguiram sequer amortecer os impactos provenientes das demais substâncias que contribuem para a categoria.

Tabela 37. Impactos ambientais em termos de FEC para 2B e 2B'

| Sustância | Unidades | Cenários | |
|---|---|---|---|
| | | 2B | 2B' |
| Ba (água) | kg 1,4-DB $_{eq}$ | 5,95 | 5,94 |
| Diuron (solo) | kg 1,4-DB $_{eq}$ | 2,65 | 3,01 |
| Br (água) | kg 1,4-DB $_{eq}$ | 1,92 | 1,86 |
| Ag (água) | kg 1,4-DB $_{eq}$ | 1,53 | 1,53 |
| Cu (água) | kg 1,4-DB $_{eq}$ | 4,46 E-01 | 5,09e-01 |
| Ni (água) | kg 1,4-DB $_{eq}$ | 2,87 E-01 | 3,30e-01 |

Diante do raciocínio antes exposto, conclui-se que para FEC, a substituição de CaO por NaOH não é capaz de reverter os efeitos negativos do reaproveitamento de água contida na vinhaça, quando estes se comparam a fertirrigação. Ao contrário disso, constata-se sim uma elevação de danos sobre o entorno associados a essa categoria de impacto da ordem de 3%.

Note-se por fim que a opção pelo cenário 2B' impõe um aumento global de 72% no consumo de água com relação à 2B, no caso de WD. Os resultados para esta categoria são apresentados na Tabela 38.

Tabela 38. Depleção de água para 2B e 2B'

| Substância | Unidades | Cenário | |
|---|---|---|---|
| | | 2B | 2B' |
| Água ($_{recurso\ natural}$) | $m^3$ | 167 | 287 |

Tal incremento se justifica pela essência da modificação introduzida por 2B', a partir da qual o consumo de água associado à produção de NaCl atinge o patamar de 33,3 $m^3$/FR.

# 9. CONCLUSÕES

Este estudo examinou os efeitos causados por duas alternativas de reaproveitamento de vinhaça sobre o desempenho ambiental do etanol derivado de cana-de-açúcar. A magnificação dos efeitos antes mencionados ocorreu em termos do consumo de recursos, sob a forma de *Primary Energy Demand (PED)* e de geração de emissões, que nesse caso se deu a partir do estabelecimento de um Perfil Ambiental.

As alternativas estudadas foram o uso da vinhaça no campo em processo de fertirrigação e o reaproveitamento da fração líquida de vinhaça como água de processo. Para a primeira delas, observou-se que em termos de PED as contribuições mais expressivas (97%) ocorrem sob a forma de depleção de Non Renewable, fossil (NRF). Além disso, os valores de PED para sistemas com colheita mecanizada superam entre 7,5–8,1% aqueles dispendidos para colheita manual. Quanto à segunda alternativa, apresentaram-se incrementos para NRF e RWA quando a vinhaça recebe tratamento para suprir necessidades hídricas do processo ao invés de ser retornada para o campo como fornecedora de nutrientes no cultivo de cana.

Em termos do Perfil Ambiental, a substituição de adubos químicos por vinhaça e torta mostrou ser benéfica para o desempenho ambiental do etanol. Se para FEut e TEC essas incorporações parecem não resultar em alterações significativas, em termos de CC, TA e HT foram constatadas reduções de impacto com relação às situações em que a adubação do solo se dá apenas com adubos químicos para ambos os manejos. Notou-se ainda que a recuperação da vinhaça contribui de maneira mais efetiva para o desempenho global dos sistemas do que o reuso de torta de filtro.

Uma Análise de Sensibilidade foi também realizada com o objetivo de verificar os efeitos da variação nos teores de nitrogênio (N), fósforo (P) e potássio (K) na composição de vinhaça sobre os resultados obtidos para o Perfil Ambiental.

Resultados de NRF obtidos a partir da Análise de Sensibilidade para os cenários V' – com teores máximos de N, P e K - e V'' – solução com deficiência de N -, relacionados à primeira alternativa, evidenciaram a influência marcante da síntese de ureia nos consumos globais de petróleo e gás natural. A análise indicou ainda que as oscilações de teores de P e K na vinhaça não podem ser negligenciadas.

O cenário V’ deteve os mais baixos índices de impacto ambiental para CC, TA e HT. Já os desempenhos alcançados por V’’ e V’’’, este último cenário referido a uma solução com deficiência de P, reforçam a influência da produção de ureia sobre as mesmas categorias, e a discreta participação da manufatura de SSP sobre os resultados globais.

Para a alternativa de reaproveitamento da vinhaça como água de processo, foram constatados incrementos de impacto para CC, TA, FEut, HT e FEC, a despeito da redução, já esperada, de WD. No entanto, mesmo este benefício acabou sendo amortecido por acréscimos de consumo de água gerados em decorrência da adição de processamentos ao ciclo de vida capazes de respaldar a tecnologia em análise.

Dada a influência da produção de CaO, usado no tratamento da vinhaça, sobre o perfil ambiental, consideou-se o cenário 2B’, em que NaOH substitui o CaO no processo coagulação/floculação. Esta susbtituição mostrou-se benéfica apenas para efeito de CC, situação na qual se observou uma redução de 2% no impacto. Já para as demais categorias de impacto em análise, ocorreu elevação de efeitos adversos sobre o ambiente, particularmente em termos de HT, devido às emissões de Hg decorrentes da produção do NaOH.

Em termos gerais, pode-se concluir que a reutilização de vinhaça e torta de filtro como complemento nutricional para o cultivo de cana-de-açúcar mostra ser melhor alternativa de reaproveitamento do que a ação de recuperação de água para o processo industrial. Mesmo com reduções em termos de WD, que fariam desta última uma alternativa interessante, os incrementos no impacto constatados nas demais categorias analisadas reforçam a importância da realização de análises como as proporcionadas pela ACV, com vistas à adequação de tecnologias que se encontram em fase de concepção, projeto e até, de implementação.

# 10. RECOMENDAÇÕES DE TRABALHOS FUTUROS

Este estudo realizou uma análise sistêmica de ações de reaproveitamento de vinhaça. No entanto, e como já se poderia supor de antemão, muitas perguntas seguem ainda sem resposta após a presente iniciativa ter sido concluída.

No caso da primeira alternativa, sugere-se um estudo de ACV em que seja aplicada a abordagem de expansão de fronteiras para tratar dos casos de multidisciplinaridade, tendo em vista ser esse um caso de substituição.

Por outro lado, a tecnologia de reaproveitamento da vinhaça como água de processo apresentada por Campos et al (2014) pode ser vista como uma possibilidade auspiciosa em termos ambientais. No entanto, certas adequações de processo, como a substituição de alguns insumos e o possível reaproveitamento dos lodos precisam ser ainda exploradas a fim de ter um processo otimizado e eficiente, no sentido de se obter melhores resultados de desempenho ambiental.

Finalmente, para que o reuso pleno da vinhaça venha a ser implementado, ou seja, para que esta possa também ser utilizada como fluido de refrigeração e transporte de energia na caldeira, sugere-se que tratamentos específicos sejam agregados *a posteriori* da etapa de desinfecção, com vistas a ajustar teores de sólidos dissolvidos aos padrões de utilização dessas etapas de processo.

## 11. REFERÊNCIAS


ABNT. Associação brasileira de normas técnicas. ABNT NBR ISO 14001:2004: Sistemas da gestão ambiental Requisitos com orientações para uso. São Paulo: ABNT, 2004.

_____. ABNT NBR ISO 14040: Gestão Ambiental, Avaliação do Ciclo de Vida: definição de objetivo e escopo e Analise de Inventario. São Paulo: ABNT, 2009a.

_____. ABNT NBR ISO 14044: Gestão Ambiental, Avaliação do Ciclo de Vida: requisitos e orientações. São Paulo: ABNT, 2009b.

ANP. Agência Nacional de Petróleo, Gás Natural e Biocombustíveis. Anuário Estatístico de Petróleo, Gás Natural e Biocombustíveis. 2013. ISSN 1983-5884. 232 pp.

Ahmed, O.; Sulieman, A. M. E.; Elhardallou, S. B. Physicochemical, Chemical and Microbiological Characteristics of Vinasse, A By-product from Ethanol Industry. **American Journal of Biochemestry.** v. 3, n. 3, p. 80-83, 2013.

Bessa, L. P. et al. Produção de hidrogênio através do uso de bactéria púrpura não sulfurosa *Rhodopseudomona Palustris.* In: Congresso Brasileiro de Engenharia Química Iniciação Científica, 2013, Rio de Janeiro. Universidade Federal Rural do Rio de Janeiro. v. 1. Rio de Janeiro, 2013.

Bonomi, A. et al. The Virtual Sugarcane Biorefinery (VSB) – Report 2011. CTBE/CNPEM - Brazilian Bioethanol Science and Technology Laboratory/ Brazilian Center of Research in Energy and Materials. Campinas, 124pp, 2012.

Botelho, R. G., et al. Environmental Implications Of Using Waste From Sugarcane Industry In Agriculture. In Webb E (ed.) Sugarcane: Production, Consumption and Agricultural Management Systems. Nova Science Publishers Inc., New York, USA, pp. 397, 2014.

BRASIL, SÃO PAULO. Lei n. 11.241, de 19 de setembro de 2002. Dispõe sobre a eliminação gradativa da queima da palha da cana-de-açúcar e dá providências correlatas. São Paulo, 2002.

BRASIL. Portaria MAPA nº 105 de 28 de fevereiro de 2013. Resolve fixar em vinte e cinco por cento o percentual obrigatório de adição de álcool etílico anidro combustível à gasolina, a partir da zero hora do dia 1 de maio de 2013. Diario oficial da República Federativa do Brasil, Poder Executivo, Brasília, DF, 1 de mar. 2013. Seção 1, p.3.

Campos, C. R., et al. Efficiency of physicochemical and biological treatments of vinasse and their influence on indigenous microbiota for disposal into the Environment. **Waste Management**, v. 34, p. 2036-2046.

Capaz, R. S.; Carvalho, V. S.; Nogueira, L. A. Impact of mechanization and previous burning reduction on GHG emissions of sugarcane harvesting operations in Brazil. **Applied energy**, v. 102, p. 220-228, 2013.

Cardin, C. A. Atributos Químicos e Físicos de solo cultivado com cana de açúcar, com e sem aplicação de vinhaça, colhida na forma manual e mecanizada no oeste paulista. Dissertação (Mestrado). Universidade do Oeste Paulista, São Paulo, 70p. 2014.

Carmo, J. B. et al. Infield greenhouse gas emissions from sugarcane soils in Brazil: effects from synthetic and organic fertilizer application and crop trash accumulation. **Global**

**change bioenergy,** v.5, p. 267-280, 2013.

Carthery Jr, L. A. Vinasse Treatment for water reuse, fertilizer and biogas production. World Intellectual Property Organization WO 2014/098874 A1. 13pp. 2014.

Cavalcante VS et al. Potassium Nutrition in Sugar Cane Ratoons Cultured in Red Latosol with a Conservationist System. **J Plant Nutr**, 2015. (in press)

Cavalett, O. et al. Environmental and economic assessment of sugarcane first generation biorefineries in Brazil. **Clean Techn Environ Policy**, v. 14, p.399–410, 2012.

Cavalett O, Chagas M. F, Seabra J. E. A., Bonomi, A. Comparative LCA of ethanol versus gasoline in Brazil using different LCIA methods. **Int J Life Cycle Assess**, v. 18, p. 647–658, 2013.

Cerón, V. Z; Averbe, M. A. G. Caracterización ambiental de las vinazas de residuos de caña de azúcar resultantes de la producción de etanol. **Dyna**, v. 80, n. 177, p. 124–131, 2013.

Cervantes, V. S. O que é a avaliação de ciclo de vida (ACV) de produtos e quais seus impactos sobre o desenvolvimento sustentável? Disponível em: http://www.ecodesenvolvimento.org/posts/2015/marco/o-que-e-a-avaliacao-de-ciclo-de-vida-acv-de?tag=consumo_consciente. Acesso: 09 jun 2015

CGEE – Centro de Gestão e Estudos Estratégicos (2008) Bioetanol de cana-de-açúcar: energia para o desenvolvimento sustentável. BNDES. Rio de Janeiro 316 p.

Chaves-Rodrigues, M. F. et al. Water reuse and recycling according to stream qualities in sugar–ethanol plants. **Energy for Sustainable Development**, V. 17, p. 546-554, 2013.

Christofoletti, C. A. et al. Sugarcane vinasse: Environmental implications of its use. **Waste Management**, v. 33, p. 2752-2761, 2013.

Companhia Nacional de Abastecimento - CONAB. Avaliação da Safra Agrícola de Cana-de-açúcar. SAFRA 2005/06. Terceiro Levantamento. Dezembro de 2005, 13pp.

_____. CONAB. Avaliação da Safra Agrícola de Cana-de-açúcar. SAFRA 2006/07. Terceiro Levantamento. Novembro de 2006, 9pp.

_____. CONAB. Acompanhamento da Safra Brasileira de Cana-de-açúcar. Safra 2007/08. Terceiro Levantamento. Novembro de 2007, 12pp.

_____. CONAB. Acompanhamento da Safra Brasileira de Cana-de-açúcar. Safra 2008/09. Terceiro Levantamento. Dezembro de 2008, 17pp.

_____. CONAB. Acompanhamento da Safra Brasileira de Cana-de-açúcar. Safra 2009/10. Terceiro Levantamento. Dezembro de 2009, 14pp.

_____. CONAB. Acompanhamento da Safra Brasileira de Cana-de-açúcar. Safra 20010/11. Terceiro Levantamento. Janeiro de 2011, 19pp.

_____. CONAB. Acompanhamento da Safra Brasileira de Cana-de-açúcar. Safra 20011/12. Terceiro Levantamento. Dezembro de 2011, 18pp.

_____. CONAB. Acompanhamento da Safra Brasileira de Cana-de-açúcar. Safra 2012/13. Quarto Levantamento. Abril de 2013, 18pp.

_____. CONAB. Acompanhamento da Safra Brasileira de Cana-de-açúcar. Safra 2013/14. Quarto Levantamento. Abril de 2014, 19pp.

_____. CONAB. Acompanhamento da Safra Brasileira de Cana-de-açúcar. Safra 2014/15. Terceiro Levantamento. Dezembro/2014. 31pp.

_____. CONAB. Acompanhamento da Safra Brasileira de Cana-de-açúcar. Safra 2015/16. Segundo Levantamento. Agosto/2015. 35pp.

_____. CONAB. Perfil do Setor do Açúcar e do Álcool no Brasil. Safra 2011/2012, p. 1-88, 2013.

Cordeiro, G. C., Toledo, R. D., Farbain, E. M. R. Caracterização de cinza do bagaço de cana-de-açúcar para emprego com o pozolana em materiais cimnetícios. **Quim. Nova,** v. 32, p. 82-86, 2009.

Cortez, L. A. B., et al. Biodigestão de Efluentes. In: Cortez, L.A.B., Lora, E.S. (Eds.), Biomassa para Energia. Editora da UNICAMP, Campinas, pp. 493–529, 2007.

Cortez, L. A. B (Ed). Bioetanol de Cana-de-Açúcar P&D para Produtividade e Sustentabilidade. Ed Blucher. 2010. 992p. ISBN: 9-788521205319

Costa, F. J. C. B., et al. Utilization of vinasse effluents from an anarobic reactor. **Water Sci Technol**, v. 18, p. 135-141, 1986.

CTBE - Laboratório Nacional de Ciência e Tecnologia em Bioetanol. Monitoramento da cultura de cana-de-açúcar no Estado de São Paulo. Boletim 00/2014 – Novembro/2014.

Dias, M. et al. Production Of Bioethanol And Other Bio-Based Materials From Sugarcane Bagasse: Integration To Conventional Bioethanol Production Process. **Chemical Engineering Research And Design**, v. 87, p. 1206–1216, 2009.

Dias, M. et al. Second Generation Ethanol In Brazil: Can It Compete With Electricity Production? **Bioresource Technology**, v. 102, p. 8964–8971, 2011.

Dias, M. et al. Integrated versus stand-alone second generation ethanol production from sugarcane bagasse and trash. **Bioresource Technology,** v. 103, p. 152-161, 2012.

Dias, M. et el. Sugarcane Processing For Ethanol And Sugar In Brazil. **Environmental Development (In Print),** 2015.

Dias, M. et al. Evaluation Of Process ConFigurations For Second Generation Integrated With First Generation Bioethanol Production From Sugarcane. Fuel Processing Technology, v. 109, p. 84-89, 2013.

EPE - Empresa de Pesquisa Tecnológica (2014). Balanço Energético Nacional 2014: Año Base 2013. CDU 620.9:553.04(81). Rio de Janeiro – RJ

EPE - Empresa de Pesquisa Tecnológica (2015) Balanço Energético Nacional 2015: Año Base 2014. CDU 620.9:553.04(81). Rio de Janeiro – RJ

Fao - Food And Agriculture Organization Of The United Nations. Faostat 2013. Disponível em: < http://faostat.fao.org/site/339/default.aspx >. Acesso Em: 22 Abr. 2015.

Ferreira, V. C. M. Análise da fundamentação da avaliação do ciclo de vida consequencial. Dissertação (Mestrado) - Escola Politécnica, Universidade de São Paulo, São Paulo, 73 p.

2012.

Fiesp – Federação Das Indústrias Do Estado De São Paulo. Outlook Fiesp 2023. Projeções Para O Agronegócio Brasileiro, 2013.

Franco, H. C. J. Eficiência agronômica da adubação nitrogenada de cana planta. Tese (Doutorado). Escola Superior de Agricultura Luiz de Queiros. USP. 127p. Piracicaba, 2008.

Galvão, C. M. Utilização De Vinhaça No Processo De Sacarificação De Biomassa Lignocelulósica. WO 2012/129622 a1. 18 pp. 5 mar. 2012.

Garcia, J. C. C.; Sperling, E. Emissão De Gases De Efeito Estufa No Ciclo De Vida Do Etanol: Estimativa Nas Fases De Agricultura E Industrialização Em Minas Gerais. **Engenharia Sanitária E Ambiental**, v. 15, n. 3, p. 217-222, 2010.

García, C. A. et al. Life-cycle greenhouse gas emissions and energy balances of sugarcane ethanol production in Mexico. **Appl Energ**, v. 88, p. 2088-2097, 2011.

Gonçalves, B. et al. Soil greenhouse gas fluxes from vinasse application in Brazilian sugarcane areas. **Geoderma**, v. 200-201, p. 77–84, 2013.

GREET. Greenhouse gases, regulated emissions, and energy use in transportation. Version 1.8d. Argonne, IL: Argonne National Laboratory; 2010.

Guerra J. P. et al. Comparative analysis of electricity cogeneration scenarios in sugarcane production by LCA. **Int J Life Cycle Assess,** v.19, p. 814–25, 2014.

Gunady M. G. A. et al. Evaluating The Global Warming Potential Of The Fresh Produce Supply Chain For Strawberries, Romaine/Cos Lettuces (Lactuca Sativa), And Button Mushrooms(In PrintAgaricus Bisporus) In Western Australia Using Life Cycle Assessment (LCA). **Journal Of Cleaner Production**, v. 28, p. 81-87, 2012.

Gupta, A. K., Hall, C. A. S. Comparative analysis of electricity cogeneration scenarios in sugarcane production by LCA. **Int J Life Cycle Assess**, v. 19, p. 814–25, 2014.

Hansen A. P. H., Silva, G. A., Kulay, L. Evaluation of the environmental performance of alternatives for polystyrene production in Brazil. **Sci. Total Environ**. v. 532, p. 655–668, 2015.

Heijungs R, Suh S. The Computational structure of Life Cycle Assessment. Kluwer Academic Publishers, Dordrecht, 2002.

Hofsetz, K.; Silva, M. Brazilian Sugarcane Bagasse: Energy And Non-Energy Consumption. **Biomass And Bioenergy**, v. 46, p. 564 -573, 2012.

Intanoo, P. et al. Hydrogen production from alcohol wastewater by an anaerobic sequencing batch reactor under thermophilic operation: Nitrogen and phosphorous uptakes and transformation. **International Journal of Hydrogen Energy,** v. 37, p. 1104–1112, 2012

Intergovernmental Panel on Climate Change - IPCC. Guidelines for national greenhouse gas inventories, Vol. 4 – Agriculture, forestry and other land use, Intergovernmental Panel on Climate Change, 2006.

_____. IPCC. Guidelines for national greenhouse gas inventories, Vol. 3 – Industrial Processes and product Use, Intergovernmental Panel on Climate Change, 2006.

ISO – International Organisation for Standardization. ISO 14044. Environmental management – life cycle assessment – requirements and guidelines, 2006.

Kulay, L. et al. Environmental Comparison Of Conventional And Organic Technological Routes For Sugar Obtaining Concerning To Environmental Sustainability. In: Life Cycle Assessment VIII, 2008, Seattle. American Center On Life Cycle Assessment. v. 1. Seattle. 2008.

Laime, E. M. O. et al. Possibilidades Tecnológicas Para A Destinação Da Vinhaça: Uma Revisão. **Revista Trópica: Ciências Agrarias E Biológicas**, v. 5, p. 16–29, 2011.

Macedo, I. C., Seabra, J. E. A, Silva, J. E. A. R. Greenhouse gases emissions in the production and use of ethanol from sugarcane in Brazil: The 2005/2006 averages and a prediction for 2020. **Biomass Bioenerg,** 2008

Mariano, A. P. et al. The Use Of Vinasse As An Amendment To Ex-Situ Bioremediation Of Soil And Groundwater Contaminated With Diesel Oil. **Brazilian Archives Of Biology And Technology**, v. 4, p. 1043-1055, 2009.

Marcucci M.; Tognotti L. Reuse of wastewater for industrial needs: the Pontedera case. **Resources, Conservation and Recycling**. v. 34, p. 249-259, 2002.

Martinho, H. M. Avaliação da efetividade de arranjos tecnológicos e processuais na elhoria do desempenho ambiental da produção de fosfato bicálcico. Dissertação (Mestrado). Escola Politécnica da Universidade de São Paulo. USP, São Paulo, 156p. 2014.

Martins, M. et al. Perdas de solo e nutrientes por erosão num argissolo com resíduos vegetais de cana-de-açúcar. **Eng. Agrí**. v. 29, p. 8-18, 2009.

Martins, M. V. L. et al. Proposição de um indicador de poluição para usinas hidrelétricas. In: XX Simposio Brasileiro de Recursos Hídricos, 2013, Bento Gonçalves.

MDIC (Ministério do Desenvolvimento e Comércio Exterior) (2013) Aliceweb System. Available at: aliceweb2.mdic.gov.br

Moore, C. C. S.; Kulay, L.Avaliação do desempenho ambiental da produção de etanol com recuperação de vinhaça. In: 4th Congresso Brasileiro sobre Gestão pelo Ciclo de Vida, 2014, São Bernardo do Campo, São Paulo, 2014.

Moore, C. C. S.; Kulay, L. An evaluation of the environmental performance of reused vinasse as fertilizer for sugarcane crops in Brazil. In: 6th Confenrence on Life Cycle Assessment in Latin America, 2015, Lima. Pontifícia Universidad Católica del Perú, Lima, 2015.

Moraes de, M. L. Integração espacial do mercado brasileiro de etanol. Tese (Doutorado). Escola Superior de Agricultura Luiz de Queiros. USP. Piracicaba, 130 p. 2014.

Moraes, B. S. et al. Anaerobic digestion of vinasse from sugarcane biorefineries in Brazil from energy, environmental, and economic perspectives: Profit or expense? **Applied Energy.** v. 113, p. 825-835, 2014.

Moreno, L. M. Transição da colheita da cana-de-açúcar manual para a mecanizada no Estado de São Paulo: Cenários e perspectivas. Dissertação (Mestrado). Programa de pos-graduação em energia, EP-FEA-IEE-IF. 97p. Universidade de São Paulo, São Paulo, 2011.

Moreno, A. Açúcar e etanol impulsionam crescimento de 44,2% do PIB sucroenergético. Jornal Cana, Maio 30, 2014. Disponível em < http://www.jornalcana.com.br/acucar-e-etanol-impulsionam-crescimento-de-442-do-pib-sucroenergetico/>. Acesso em: 23 maio. 2015.

Nascimento, D. D. Uso da biomassa da cana-de-açúcar para a geração de energia elétrica: análise energética, exergética e ambiental de sistemas de cogeração de sucroalcooleira do interior paulista. Dissertação (Mestrado). Escola de Engenharia de São Carlos. Universidade de São Paulo. 112 pp. São Carlos, 2010.

Nemecek, T, Kägi, T. Life Cycle Inventories of Swiss and European Agricultural Production System Final report Ecoinvent v2.0 N 15a. Agroscope Reckenholz-Taenikon Research Station ART, Swiss Centre for Life Cycle Inventories, Zurich and Dübendorf, CH, retrieved from www.ecoinvent.org, 2007.

Nemecek, T., Schnetzer, J. Methods of assessment of direct field emissions for LCIs of agricultural production systems. Agroscope Reckenholz-Tänikon Research Station ART. Zurich 34p, 2011.

Nogueira, A. R. et al. (2014) Use of Environmental and Thermodynamic Indicators to Assess the Performance of an Integrated Process for Ethanol Production. **ENRR**, v. 4, p. 59-74.

Nogueira, C. E. C. et al. Exploring possibilities of energy insertion from vinasse biogas in the energy matrix of Paraná State, Brazil. **Renewable and sustainable energy reviews**, v, 48, p. 300-305, 2015.

Novais, R. F., Smyth, T. J. Fósforo em solo e planta em condições tropicais. Universidade Federal de Viçosa. 399p. Viçosa, MG, 2009

Oliveira W. S. et al. Sugarcane crop under vinasse fertirrigation and mineral fertilization. **Revista Verde**, v. 9, p. 1-5, 2014.

Ometto, A. R., Hauschild, M. Z., Roma, W. N. L. Lifecycle assessment of fuel ethanol from sugarcane in Brazil. **Int J Life Cycle Assess**, v.14, p. 236–247, 2009.

Orrego, D. A. F. Comparação termodinâmica e ambiental (Emissões de $CO_2$) das rotas de produção e utilização de combustíveis veiculares derivados de petróleo e gás natural, biocombustíveis, hidrogênio e eletricidade (veículos elétricos). Dissertação (Mestrado). Escola Politécnica da Universidade de São Paulo – Universidade de São Paulo, 205p. 2014.

Ortegón G. P., Arboleda FM, Candela L, Tamoh K, Valdes-Abellan J. Vinasse application to sugar cane fields. Effect on the unsaturated zone and groundwater at Valle del Cauca (Colombia). **Science of the Total Environement**, v. 539, p. 410-419, 2016

Palacios-Bereche, R. et al. New alternatives for the fermentation process in the etanol production from sugarcane: Extractive and low temperature fermentation. **Energy**, v. 70, p. 595–604, 2014.

Paraízo, D. Sistemas de preparo do solo para plantio de cana. Cana-de-açúcar, Janeiro 13, 2013. Disponível em: <http://www.novacana.com/cana/sistemas-preparo-solo-plantio-da-cana/>. Acesso em: 18 de dezembro 2015.

Pina J. C. et al. Organic residues on rooting and yield of sugarcane in Typic

Quartzipsamments soil. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, v. 19, p. 650-655, 2015.

Poveda, M. M. R. Análise econômica e ambiental do processamento da vinhaça com aproveitamento energético. 2014. 160 pp. Dissertação (Mestrado) – Instituto de Energia e Ambiente, Universidade de São Paulo, São Paulo, 2014.

Raij, B van et al. (Eds). Recomendações de adubação e calagem para o Estado de São Paulo. 2 Ed. Campinas: IAC, 1997. (Boletim Técnico, 100).

Rico, J. A.; Mercedes, S. S. P.; Sauer, I. L. Genesis and consolidation of the Brazilian bioethanol: A review of policies and incentive mechanisms. **Renewable and sustainable energy reviews**, v. 14, p. 1874-1887, 2010.

Rico, J. A.; Sauer, I. L. A review of Brazilian biodiesel experiences. **Renewable and sustainable energy reviews**, v. 45, p. 513-529, 2015.

Rocha, M. H. Uso da análise do Ciclo de Vida para comparação do Desempenho Ambiental de quatro alternativas para tratamento da vinhaça. Dissertação (Mestrado). Instituto de Engenharia Mecânica – Universidade Federal de Itajuba, Itajuba, 234p. 2009.

Rocha, M. H. et al. Life cycle assessment (LCA) for biofuels in Brazilian conditions: A meta-analysis. **Renewable and sustainable energy reviews**, v. 37, p. 435-459, 2014.

Rodrigues Junior F. A., Magalhães, P. S. G., Franco, H. C. J. Soil attributes and leaf nitrogen estimating sugar cane quality parameters: Brix, pol and fibre. **Precis Agric**, v. 14, p. 270-279, 2013.

Ronquim, C. C. Queimada na colheita de cana-de-açúcar: impactos ambientais, sociais e econômicos. Campinas: Embrapa Monitoramento por Satélite, 2010 45 p.: il. (Embrapa Monitoramento por Satélite. Documentos, 77). ISSN 0103-78110.

De Sá, L. R. V.; Cammarota, M. C.; Ferreira-Leitãoa, V. S. Produção de hidrogênio via fermentação anaeróbia – aspectos gerais e possibilidade de utilização de resíduos agroindustriais brasileiros. **Química Nova**, v. 37, n. 5, p. 857-867, 2014.

Salomon, K. R. Lora, E. E. S. Estimate of the electric energy generating potential for different sources of biogas in Brazil. **Biomass and bioenergy,** v. 33, p. 1101-1107, 2009.

Santos, R. E. R., Santos, I. A. Análise da viabilidade energética da produção de etanol em microdestilarias. In: 4th International Conference of Bioenergy. Curitiba, 2009. http://www.porthuseventos.com.br/site/eventos/2009/eventobioenergia.com.br/congresso/br/tecnica/RodolfoSantos.pdf.

Santos D. H. et al. Produtividade de cana-de-açúcar sob adubação com torta de filtro enriquecida com fosfato solúvel. Pesq. Agropec. Trop., v. 40, n. 4, p. 454-461, 2010.

Santos, D. H. Et al. Qualidade tecnológica da cana-de-açúcar sob adubação com torta de filtro enriquecida com fosfato solúvel. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**. v. 15, p. 443-449, 2011.

Santos D. H., et al. The effect of filter cakes enriched with soluble phosphorus used as a fertilizer on the sugarcane ratoons. **Acta Scientiarum Agronomy**, v. 36, p. 365-372, 2014.

Santos, S. C. et al. Hydrogen production from diluted and raw sugarcane vinasse under

thermophilic anaerobic conditions. **International journal of hydrogen energy**, v. 39, p. 9599-9610, 2014.

Seabra, J. E. A. et al. A techno-economic evaluation of the effects of centralized cellulosic ethanol and co-products refinery options with sugarcane mill clustering. **Biomass and Bioenergy**, v. 34, p. 1065–1078, 2010.

Seabra JEA et al. Life cycle assessment of Brazilian sugarcane products: GHG emissions and energy use. **Biofuels, Bioproducts and Biorefining**, v. 5, p. 519 – 532, 2011.

Seabra, J.E.A.; Macedo, I.C. Comparative analysis for Power generation and ethanol production from sugarcane residual biomass in Brazil. Energy Policy, v.39, p.421-428, 2011.

Secretaria do Meio Ambiente – Etanol Verde, SMA/SP. Protocolo Agroambiental. Disponível em: < http://www.ambiente.sp.gov.br/etanolverde/protocolo-agroambiental/o-protocolo/>. Acesso 08 jun. 2015.

SeaRates. Distance and Time [map]. Scale undetermined; generated by SeaRates LP; using Google Maps. 2013. Available from: http://www.searates.com/reference/portdistance.

Smeets, E. et al.The sustainability of Brazilian ethanol—An assessment of the possibilities of certified production. **Biomass Bioenerg**, v. 32, p. 781-813, 2008.

Soobadar, A. Application of vinasse to sugarcane. In. Web E (ed) Sugarcane: Production, Consumption, and Agricultural management system Nova Science Publisher, 1st ed. New York, p. 331-359, 2014.

Silva, G. A., Kulay, L. Application of life cycle assessment to the LCA case studies single superphosphate production. **Int J Life Cycle Assess**, v. 8, p. 209–214, 2003.

Silva, M. A. S. da; Griebeler, N. P.; Borges, L. C. Uso de vinhaça e impactos nas propriedades do solo e lençol freático. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, v.11, p.108- 114, 2007.

Silva, V. L. Estudo Econômico das diferentes formas de transporte de vinhaça em fertirrigação na cana-de-açúcar. Dissertação (Mestrado) – Faculdade de Ciências agrárias e veterinárias, Universidade Estadual Paulista, Jaboticabal, 54, 2009.

Silva FIC, Garcia A (2009) Colheita Mecânica e Manual da Cana-de-açúcar: Histórico e Análise. Nucleus V. 6, N. 1, pp. 233-248. doi: 10.3738/1982.2278.149

Silva, G. A.; Kulay, L. A. Avaliação do Ciclo de Vida. In: Vilela Jr., A.; Demajorovic, J. (Org.). Modelos e ferramentas de Gestão Ambiental: Desafios e perspectivas para as organizações. 2ª ed. revista e ampliada. São Paulo: Editora Senac, 2010. p. 325-348.

Silva, G.A. Disciplina PQI 5849: Fundamentos da Proteção Ambiental e Segurança de Processos Industriais. Programa de Pós Graduação em Engenharia Química. Universidade de São Paulo. São Paulo, 2012.

Silva, G. A. Avaliação das tecnologias de disposição de vinhaça de cana-de-açúcar quanto ao desenvolvimento ambiental e econômico. Tese (Doutorado) – Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, São Carlos, 196p, 2012.

Silva, A. P. M.; Bono, J. A. M.; Pereira, F. De A. R. Aplicação de vinhaça na cultura de

cana-de-açúcar: Efeito no solo e na produtividade de colmos. **Revista brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, v. 18, p. 38-43, 2014.

De Souza, et al. Fertirrigação com vinhaça na produção de cana-de-açúcar. **Revista ACSA**, v. 11, n. 2, p. 7 – 12, 2015.

Stipp, S. R., Prochnow, L. I. Maximização da eficiência e minimização de impactos ambientais da adubação nitrogenada. **Informações Agronômicas**, v.124, p. 1-7, 2008.

Sugawara, E. T. Comparação dos desempenhos ambientais do B5 etílico de soja e de óleo diesel, por meio da avaliação do ciclo de vida (ACV). Dissertação (Mestrado) – Escola Politécnica, Universidade de São Paulo, São Paulo, 242 p., 2012.

Sydney, E. B., et al. Economic process to produce biohydrogen and volatile fatty acids by a mixed culture using vinasse from sugarcane ethanol industry as nutrient source. **Biosource technology**, v. 159, p. 380-386, 2014.

Teixeira, W. S. Cana-de-açúcar: Prospecção para a safra 2013/2014. **Ecoenergia,** n. 19, p. 10-15, 2013.

UNICA – União da Indústria de Cana-de-Açúcar. Estiagem e quebra na produtividade agrícola reduzem oferta de cana para a safra 2014/2015 na região centro-sul do país. Disponível em: < http://www.unica.com.br/noticias/>. Acesso em: 23 abr. 2015.

_____. ÚNICA. Exportação anual de açúcar pelo Brasil por estado de origem. Disponível em: < http://www.unicadata.com.br/listagem.php?idMn=43>. Acesso em: 13 mai. 2015.

_____. ÚNICA. Detalhamento das exportações de etanol pelo Brasil. Disponível em: < http://www.unicadata.com.br/listagem.php?idMn=74>. Acesso em: 13 mai. 2015.

Vilela, F. S. V. Avaliação do ciclo de vida da produção industrial de etanol e açúcar Estudo de Caso: Usina Jalles Machado S/A. 2013. 93 p. Dissertação (Mestrado) – Departamento de engenharia mecânica, Universidade de Brasília, Brasília, 2013.

Van der Voet, E et al. Allocation Issues in LCA Methodology: A Case Study of Corn Stover-Based Fuel Ethanol. **International Journal of Life Cycle Assessment.** 14, 529-539, 2009.

Vitti, G. C, Mazza, J. A. Planejamento, estratégias de manejo e nutrição da cultura de cana-de-açúcar. **Inf. Agron**. v. 97, p.1-16. Potafos, Encarte Técnico, 2002.

Walter, A. et al. Sustainability assessment of bio-ethanol production in Brazil considering land use change, GHG emissions and socio-economic aspects. **Energy Policy.** v. 39, p. 5703-5713, 2011.

Wilkie, A. C., Riedesel, K. J., Owens, J. M. Stillage characterization and anaerobic treatment of ethanol stillage from conventional and cellulosic feedstocks. **Biomass Bioenerg**, v. 19, p. 63-102, 200.

doi: 10.1016/S0961-9534(00)00017-9

Zúñiga, F. B; Bazúa, M. C.D.; Lozano, R. Cambios químicos en el suelo por aplicación de materia orgánica soluble tipo vinazas, **Revista Internacional de Contaminación Ambiental**, v. 16, n. 3, p. 89–101, 2000.

## APÉNDICE

| A.1 – Inventário de produção de cana-de-açúcar via colheita manual / CENÁRIO III | | | |
|---|---|---|---|
| **Aspecto Ambiental** | **Quantidade** | **Unidades** | **Observações** |
| Sugarcane, at farm/BR manual harvesting | 82600 | kg | |
| **Resources** | | | |
| Occupation, arable, non-irrigated | 1 | há a | |
| Energy, gross calorific value, in biomass | 408688 | MJ | Premissa de 4,9478 MJ/kg, conforme inventário do ecoinvent "Sugarcane, at farm/BR U" |
| **Materials/fuels** | | | |
| Vinasse, as N, at transportation | 34,81 | kg | Cenário I: 0 kg Cenário II: 34,81kg |
| Vinasse, as P2O5, at transportation | 10,76 | kg | Cenário I: 0 kg Cenário II: 10,76 kg |
| Vinasse, as K2O, at transportation | 185,1 | kg | Cenário I: 0 kg Cenário II: 185,1kg |
| Vinasse, as other materials, at transportation | 92449 | kg | Cenário I: 0 kg Cenário II: 92449 kg Água + outros |
| Filter cake, as N, at transportation | 6,240 | kg | Cenário I: 0 kg Cenário II: 6,24 kg |
| Filter cake, as P2O5, at transportation | 2,120 | kg | Cenário I: 0 kg Cenário II: 2,12 kg |
| Filter cake, as K2O, at transportation | 3,021 | kg | Cenário I: 0 kg Cenário II: 3,02 kg |
| Filter cake, as outros, at transportation | 645,3 | kg | Cenário I: 0 kg Cenário II: 645,3 kg |
| Urea, as N, at regional storehouse/RER U - | 137,7 | kg | Cenário I: |

| | | | |
|---|---|---|---|
| Mestrado | | | 199,7 kg<br>Cenário II:<br>146,2 kg |
| Single superphosphate, as P2O5, at regional storehouse/RER U - CILCA | 48,08 | kg | Cenário I:<br>61,01 kg<br>Cenário II:<br>50,25 kg |
| Potassium chloride, as K2O, at regional storehouse/RER U - Mestrado | 21,87 | kg | Cenário I:<br>210 kg<br>Cenário II:<br>24,9 kg |
| Limestone, milled, loose, at plant/CH U - Mestrado | 400 | kg | |
| Gypsum, mineral, at mine/CH U - Mestrado | 200 | kg | |
| Pesticide unspecified, at regional storehouse/RER U - Petrobras | 0,31 | kg | |
| Glyphosate, at regional storehouse/RER U - Petrobras | 0,259 | kg | |
| Diuron, at regional storehouse/RER U - Mestrado | 0,098 | kg | |
| Carbofuran, at regional storehouse/RER U - Mestrado | 0,42 | kg | |
| Tractor, production/CH/I U | 7,985 | kg | |
| Agricultural machinery, general, production/CH/I U | 12,61 | kg | |
| Diesel, at refinery/l/US | 119,9 | l | |
| Sugarcane transport/BR Manual harvesting | 1 | ha | |
| Inputs transport/BR Manual Harvesting | 1 | ha | |
| Vinasse pumping and storage system operation/BR | 45,79 | m3 | |
| Diesel, burned in building machine/GLO U | 4328 | MJ | |
| Vinasse aspertion system operation/BR | 68,33 | m3 | |
| Trash burning, in field /BR | 11,17 | ton | |
| Fertilizer emissions/BR, Manual harvesting | 1 | ha | |
| Pesticides emissions/BR, Manual harvesting | 1 | ha | |
| Transporte dos demais insumos não nutrientes | 1 | ha | |
| **Emissions to soil** | | | |
| Zinc | 21,78 | g | |
| Lead | 3,539 | g | |
| Cadmium | 0,817 | g | |

| A.2 – Inventário de produção de cana-de-açúcar via colheita mecanizada / CENÁRIO VI | | | |
|---|---|---|---|
| **Aspecto Ambiental** | **Quantidade** | **Unidades** | **Observações** |
| Sugarcane, at farm/BR mechanized harvesting | 81000 | kg | |
| **Resources** | | | |
| Occupation, arable, non-irrigated | | 1 | Há.a |
| Energy, gross calorific value, in biomass | | 400771 | Premissa de 4,9478 MJ/kg, conforme inventário do ecoinvent "Sugarcane, at farm/BR U" |
| **Materials/fuels** | | | |
| Vinasse, as N, at transportation | 34,13 | kg | Cenário IV: 0 kg Cenário V: 34,13 kg |
| Vinasse, as P2O5, at transportation | 10,55 | kg | Cenário IV: 0 kg Cenário V: 10,55 kg |
| Vinasse, as K2O, at transportation | 181,5 | kg | Cenário IV: 0 kg Cenário V: 181,5 kg |
| Vinasse, as materials, at transportation | 90656 | kg | Cenário IV: 0 kg Cenário V: 90656 kg |
| Filter cake, as N, at transportation | 6,12 | kg | Cenário IV: 0 kg Cenário V: 6,12 kg |
| Filter cake, as P2O5, at transportation | 2,12 | kg | Cenário IV: 0 kg Cenário V: 2,12 kg |
| Filter cake, as K2O, at transportation | 2,96 | kg | Cenário IV: 0 kg Cenário V: 2,96 kg |
| Filter cake, as other materials, at transportation | 632,6 | kg | Cenário IV: 0 kg Cenário V: 632,6kg |
| Urea, as N, at regional storehouse/RER U - Mestrado** | 137,9 | kg | Cenário IV: 199,7 kg Cenário V: 147,3 kg |
| Single superphosphate, as P2O5, at regional storehouse/RER U - CILCA | 47,37 | kg | Cenário IV: 60,05 kg |

| | | | |
|---|---|---|---|
| | | | Cenário V: 49,50 kg |
| Potassium chloride, as K2O, at regional storehouse/RER U - Mestrado** | 25,52 | kg | Cenário IV: 210 kg<br>Cenário V: 28,49 kg |
| Limestone, milled, loose, at plant/CH U - Mestrado | 400 | kg | |
| Gypsum, mineral, at mine/CH U - Mestrado | 200 | kg | |
| Pesticide unspecified, at regional storehouse/RER U - Petrobras | 0,270 | kg | |
| Glyphosate, at regional storehouse/RER U - Petrobras | 0,2592 | kg | |
| Diuron, at regional storehouse/RER U - Mestrado | 0,0976 | kg | |
| Harvester, production/CH/I U | 4,428 | kg | |
| Tractor, production/CH/I U | 5,13 | kg | |
| Agricultural machinery, general, production/CH/I U | 9,455 | kg | |
| Diesel, at refinery/l/US | 151,006 | l | |
| Sugarcane transport/BR mechanized harvesting | 1 | ha | |
| Inputs transport/BR mechanized harvesting | 1 | ha | |
| Vinasse pumping and storage system operation/BR | 1 | ha | |
| Diesel, burned in building machine/GLO U | 5448,75 | MJ | |
| Vinasse aspertion system operation/BR | 67 | $m^3$ | |
| Fertilizer emissions/BR mechanized harvesting | 1 | ha | |
| Pesticides emissions/BR mechanized harvesting | 1 | ha | |
| Transporte dos demais insumos não nutrientes | 1 | ha | |
| **Emissions to soil** | | | |
| Zinc | 21,01 | g | |
| Lead | 3,414 | g | |
| Cadmium | 0,788 | g | |

| A.3 – Inventário de transporte de cana-de-açúcar / Colheita Manual | | | |
|---|---|---|---|
| **Aspecto Ambiental** | **Quantidade** | **Unidades** | **Observações** |
| Sugarcane transport/BR CTBE 2012 manual harvesting | 1 | ha | |
| **Materials/fuels** | | | |
| Diesel, at refinery/BR | 79,04 | l | |
| Lorry 28t/RER/I U | 0,00077 | p | |
| Maintenance, lorry 28t/CH/I U | 0,00077 | p | |
| **Emissions to air** | | | |
| Ethane, 1,1,1,2-tetrafluoro-, HFC-134a | 0,32 | g | |
| Carbon dioxide, fossil | 209,9 | kg | |
| Sulfur dioxide | 66,39 | g | |
| Cadmium | 0,00074 | g | |
| Copper | 0,16 | g | |
| Chromium | 0,0068 | g | |
| Nickel | 0,0071 | g | |
| Zinc | 0,14 | g | |
| Lead | 0,016 | g | |
| Selenium | 0,00066 | g | |
| Mercury | 0,00000133 | g | |
| Chromium IV | 0,00000664 | g | |
| Carbon monoxide, fossil | 182,34 | g | |
| Nitrogen oxides | 799,49 | g | |
| Particulates, < 2.5 um | 10,41 | g | |
| Particulates, > 10 um | 7,85 | g | |
| Particulates, > 2.5 um, and < 10um | 8,7 | g | |
| NMVOC, non-methane volatile organic compounds, unspecified origin | 4,21 | g | |
| Methane, fossil | 10,94 | g | |
| Benzene | 0,00000294 | g | |
| Toluene | 0,000000421 | g | |
| Xylene | 0,000036 | g | |
| Formaldehyde | 0,00035 | g | |
| Acetaldehyde | 0,0002 | g | |
| Ammonia | 0,7 | g | |
| Dinitrogen monoxide | 4,21 | g | |
| PAH, polycyclic aromatic hydrocarbons | 0,00014 | g | |
| Heat, waste | 2835,23 | MJ | |
| **Emissions to water** | | | |
| Zinc, ion | 0,0025 | kg | |
| Copper, ion | 0,00006 | kg | |
| Cadmium, ion | 0,0000009 | kg | |
| Chromium, ion | 0,00000429 | kg | |
| Nickel, ion | 0,000012 | kg | |
| Lead | 0,000037 | kg | |
| **Emissions to soil** | | | |
| Zinc | 0,0025 | kg | |
| Copper | 0,00006 | kg | |
| Cadmium | 0,0000009 | kg | |
| Chromium | 0,00000429 | kg | |

| | | |
|---|---|---|
| Nickel | 0,000012 | kg |
| Lead | 0,000037 | kg |
| **Waste to treatment** | | |
| Disposal, lorry 28t/CH/I U | 0,00077 | p |

| A.4 – Inventário do transporte de insumos / Colheita Manual | | | |
|---|---|---|---|
| **Aspecto Ambiental** | **Quantidade** | **Unidades** | **Observações** |
| Inputs transport/BR CTBE 2012 manual harvesting | 1 | ha | |
| **Materials/fuels** | | | |
| Diesel, at refinery/BR | 10 | l | |
| Lorry 40t/RER/I U | 0,000039 | p | |
| Maintenance, lorry 40t/CH/I U | 0,000039 | p | |
| **Emissions to air** | | | |
| Ethane, 1,1,1,2-tetrafluoro-, HFC-134a | 0,029 | g | |
| Carbon dioxide, fossil | 26,56 | kg | |
| Sulfur dioxide | 8,4 | g | |
| Cadmium | 0,000091 | g | |
| Copper | 0,018 | g | |
| Chromium | 0,00074 | g | |
| Nickel | 0,00081 | g | |
| Zinc | 0,016 | g | |
| Lead | 0,0014 | g | |
| Selenium | 0,000084 | g | |
| Mercury | 1,67E-07 | g | |
| Chromium IV | 8,4E-07 | g | |
| Carbon monoxide, fossil | 20,5 | g | |
| Nitrogen oxides | 101,25 | g | |
| Particulates, < 2.5 um | 1,57 | g | |
| Particulates, > 10 um | 0,72 | g | |
| Particulates, > 2.5 um, and < 10um | 0,8 | g | |
| NMVOC, non-methane volatile organic compounds, unspecified origin | 2,18 | g | |
| Methane, fossil | 0,97 | g | |
| Benzene | 1,54E-06 | g | |
| Toluene | 2,18E-07 | g | |
| Xylene | 0,000019 | g | |
| Formaldehyde | 0,00019 | g | |
| Acetaldehyde | 0,0001 | g | |
| Ammonia | 0,064 | g | |
| Dinitrogen monoxide | 0,38 | g | |
| PAH, polycyclic aromatic hydrocarbons | 0,000013 | g | |
| Heat, waste | 358,7 | MJ | |
| **Emissions to water** | | | |
| Zinc, ion | 0,00023 | kg | |
| Copper, ion | 5,51E-06 | kg | |
| Cadmium, ion | 8,23E-08 | kg | |
| Chromium, ion | 3,93E-06 | kg | |
| Nickel, ion | 1,06E-06 | kg | |
| Lead | 3,39E-06 | kg | |
| **Emissions to soil** | | | |
| Zinc | 0,000232 | kg | |
| Copper | 5,51E-06 | kg | |
| Cadmium | 8,23E-08 | kg | |
| Chromium | 3,93E-07 | kg | |
| Nickel | 1,06E-06 | kg | |

| | | |
|---|---|---|
| Lead | 3,39E-06 | kg |
| **Waste to treatment** | | |
| Disposal, lorry 40t/CH/I U | 0,000039 | p |

| A.5 –Inventário de produção de etanol hidratado (95% $_{w/w}$) | | | |
|---|---|---|---|
| **Aspecto Ambiental** | **Quantidade** | **Unidades** | **Observações** |
| Hydrate ethanol (95% ww), to storage | 10,7845 | ton | |
| Fusel oil, to storage | 0,324 | ton | |
| Vinasse, to preparison | 268,35 | ton | |
| **Materials/fuels** | | | |
| Vegetal steam (0,8bar @130C), to process | 55 | ton | |
| Clarified wine, to destillery | 224,46 | ton | |
| **Electricity/heat** | | | |
| Electricity, from cogeneration unit | 669,04 | kWh | Consumo de energia referente às diversas operações associadas à destilação. |
| **Emissions to air** | | | |
| Ethanol | 23,01 | kg | Dado secundário |

| A.6 – Inventário do primeiro bloco de tratamento da vinhaça | | | |
|---|---|---|---|
| **Aspecto Ambiental** | **Quantidade** | **Unidades** | **Observações** |
| Vinasse, from treatment 1 | 190,378 | m3 | |
| Activated sludge | 19,661 | m3 | Lodo usado na fermentação fed batch, formado a partir da biomassa decantada |
| **Materials/fuels** | | | |
| Vinasse, to preparison | 190,398 | ton | Vinhaça que sai da torre de destilação e que entra no bloco que inclui a decantação, a formação do lodo ativado e a fermentação fed-batch |
| aditivos, treatament 1 | 19,378 | $m^3$ | |

| A.7 – Inventário da etapa de filtração 1 | | | |
|---|---|---|---|
| **Aspecto Ambiental** | **Quantidade** | **Unidades** | **Observações** |
| Supernatant from filter 1 | 190,237 | ton | |
| **Materials/fuels** | | | |
| Vinasse, from treatment 1 | 390,378 | m3 | |
| **Waste to treatment** | | | |
| Sludge to HA chemical landfill U | 140,69 | kg | Lodo gerado na filtração, tratado como resíduo |

| A.8 – Inventário do segundo bloco de tratamento da vinhaça | | | |
|---|---|---|---|
| **Aspecto Ambiental** | **Quantidade** | **Unidades** | **Observações** |
| Supernatant from treatment 2 | 196,614 | ton | Bloco do processo de tratamento que inclui os processos de floculação e filtração 2 |
| **Materials/fuels** | | | |
| Iron (III) chloride, 40% in H2O, at plant/CH U | 0,0571 | ton | Floculante |
| Aluminium sulphate, powder, at plant/RER U | 0,9512 | ton | Floculante |
| Lime, hydrated, loose, at plant/CH U - Mestrado | 5,7071 | ton | Floculante |
| Supernatant from filter1 | 190,237 | ton | |
| Transport, lorry 16-32t, EURO5/RER U | 2926,77 | tkm | Transporte de insumos do processo de floculação até a destilaria |
| **Waste to treatment** | | | |
| Sludge to HA chemical landfill U | 338,05 | kg | Lodo que sai da filtração 2 |

| A.9 – Inventário da etapa de Neutralização do sobrenadante (supernatant) gerado no bloco 2 de tratamento | | | |
|---|---|---|---|
| **Aspecto Ambiental** | **Quantidade** | **Unidades** | **Observações** |
| Neutralization process | 196635 | kg | |
| **Materials/fuels** | | | |
| Supernatant from filter 3 | 196633 | kg | |
| Chemicals inorganic, at plant/GLO U | 0,9832 | kg | Ortopolifosfato |
| Transport, lorry 16-32t, EURO5/RER U | 0,30968 | tkm | Transporte de ortopolifosfato desde o lugar de produção até a destilaria = 316 km |

| A.10 – Inventário da etapa de desinfecção | | | |
|---|---|---|---|
| **Aspecto Ambiental** | **Quantidade** | **Unidades** | **Observações** |
| Água para reuso da vinhaça, to process/BR U | 204,5 | ton | Água que será usada nas etapas definidas |
| **Materials/fuels** | | | |
| Neutralization process | 196,635 | ton | |
| Hipoclorito de Sodio, 15% H2O, transportada/BR U | 7,8654 | ton | |