**UNIVERSIDADE DE SÃO PAULO
INSTITUTO DE ENERGIA E AMBIENTE
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENERGIA**

ANA CRISTINA GUIMARÃES DONKE

**AVALIAÇÃO DE DESEMPENHO AMBIENTAL E ENERGÉTICO DA
PRODUÇÃO DE ETANOL DE CANA, MILHO E SORGO EM UMA
UNIDADE INTEGRADA, SEGUNDO A ABORDAGEM DO CICLO DE
VIDA**

**SÃO PAULO
2016**

ANA CRISTINA GUIMARÃES DONKE

**AVALIAÇÃO DE DESEMPENHO AMBIENTAL E ENERGÉTICO DA PRODUÇÃO
DE ETANOL DE CANA, MILHO E SORGO EM UMA UNIDADE INTEGRADA,
SEGUNDO A ABORDAGEM DO CICLO DE VIDA**

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Energia do Instituto de Energia e Ambiente da Universidade de São Paulo para a obtenção do título de Mestre em Ciências.

Orientadora: Prof^ª Dr^ª Patrícia Helena Lara dos Santos Matai

Versão Corrigida
(versão original disponível na Biblioteca do Instituto de Energia e Ambiente)

**SÃO PAULO
2016**

AUTORIZO A REPRODUÇÃO E DIVULGAÇÃO TOTAL OU PARCIAL DESTE TRABALHO, POR QUALQUER MEIO CONVENCIONAL OU ELETRÔNICO, PARA FINS DE ESTUDO E PESQUISA, DESDE QUE CITADA A FONTE.

FICHA CATALOGRÁFICA

Donke, Ana Cristina Guimarães.

Avaliação de desempenho ambiental e energético da produção de etanol de cana, milho e sorgo em uma unidade integrada, segundo a abordagem do ciclo de vida / Ana Cristina Guimarães Donke; orientadora Patricia Helena Lara dos Santos Matai:– São Paulo, 2016.

243 f.: il.; 30 cm.

Dissertação (Mestrado em Ciências) – Programa de Pós-Graduação em Energia – Instituto de Energia e Ambiente da Universidade de São Paulo

Nome: DONKE, Ana Cristina Guimarães

Título: Avaliação de desempenho ambiental e energético da produção de etanol de cana, milho e sorgo em uma unidade integrada, segundo a abordagem do ciclo de vida

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Energia do Instituto de Energia e Ambiente da Universidade de São Paulo para a obtenção do título de Mestre em Ciências.

Aprovado em:

Banca Examinadora

Prof. Dr. _____ Instituição: _____

Julgamento: _____ Assinatura: _____

Prof. Dr. _____ Instituição: _____

Julgamento: _____ Assinatura: _____

Prof. Dr. _____ Instituição: _____

Julgamento: _____ Assinatura: _____

Prof. Dr. _____ Instituição: _____

Presidente Assinatura: _____

*Dedico esta dissertação à minha família que, através
de exemplos, tornou-me a pessoa que sou.*

*Ao meu noivo e companheiro Guilherme, que me
apoiou incondicionalmente.*

*A todos que acreditam que, pelo esforço do trabalho,
podem fazer do mundo um lugar melhor.*

AGRADECIMENTOS

À Prof^a Dr^a Patrícia Helena Lara dos Santos Matai, pela confiança, orientação, conversas, ensinamentos e pelo incentivo constante.

Ao Prof^o Dr^o Luiz Alexandre Kulay, pela coorientação, dedicação, confiança, ensinamentos, pela amizade e por ser um grande exemplo.

À amiga Dra^a Marília Ieda da Silveira Folegatti Matsuura, por me iniciar no mundo da ACV, pela confiança, ensinamentos, oportunidades e pela presença constante.

Ao Eng^o Vital Silva Nogueira e toda a equipe da USIMAT, pela excelente recepção e pela disponibilização das informações que tornaram esse trabalho possível.

Aos amigos do GP2, Alex, Letícia, Maria, Rose, Cristiane, Cristina, Cláudia, Laércio e Pini, pelas proveitosas discussões e sugestões, troca de ideias, dicas valiosas e descontração nos momentos necessários. A Eduardo Toshio, pela especial ajuda no início deste trabalho.

Ao Prof^o Dr^o Gil Anderi da Silva, pelas conversas sérias e descontraídas, além dos ensinamentos de vida.

Aos colegas do IEE, pela companhia e ajuda mútua nas disciplinas e por todo auxílio prestado.

Aos meus pais, Sonia e Sergio, ao meu irmão, Paulo Henrique, e a toda a minha família e amigos pela compreensão nos momentos de ausência e incentivo nos momentos de cansaço.

Ao meu grande amor, Gui, que percorreu essa trajetória ao meu lado, incentivando-me em todos os momentos e tornando os meus dias mais leves e muito mais felizes.

Por fim, e mais importante, agradeço a Deus por todas as bênçãos, proteção, força e persistência para a conclusão deste trabalho.

“O que eu faço, é uma gota no meio de um oceano.

Mas sem ela, o oceano será menor.”

Madre Teresa de Calcutá

RESUMO

DONKE, Ana Cristina Guimarães, **Avaliação de Desempenho Ambiental e Energético da Produção de Etanol de Cana, Milho e Sorgo em uma Unidade Integrada, segundo a Abordagem do Ciclo de Vida**. 2016. 243 f. Dissertação (Mestrado em Ciências) – Programa de Pós-Graduação em Energia da Universidade de São Paulo, São Paulo, 2016.

O etanol está consolidado como combustível para movimentação de veículos leves no Brasil e, nos últimos 40 anos, apenas a cultura de cana-de-açúcar tem sido explorada comercialmente para a produção deste combustível. Por outro lado, o desenvolvimento agrícola vem proporcionando safras recordes de grãos nas últimas décadas. A produção de milho se destaca pelo aumento da produtividade, podendo ser semeado como cultura principal ou como cultura de inverno em rotação com a soja. O sorgo, por sua vez, pode atuar como um substituto do milho, apresentando maior rusticidade e tolerância à seca. Dada essa conjuntura, usinas de etanol do Mato Grosso se associaram a produtores de milho e sorgo para incluir novas matéria-primas no processo de produção de combustíveis, compartilhando uma mesma unidade industrial, denominada Usina Integrada ou Usina Flex. No contexto atual, o desenvolvimento de novas tecnologias e setores produtivos exige a consideração de suas potenciais implicações energéticas e ambientais. A Avaliação de Ciclo de Vida (ACV) é uma ferramenta da gestão ambiental usada para avaliar impactos ambientais potenciais associados a produtos, processos e serviço. Sua principal característica é se prestar a essa avaliação de forma sistêmica, levando em conta todas as etapas do seu ciclo de vida. O objetivo deste trabalho foi avaliar e comparar os desempenhos ambiental e energético da produção de etanol a partir dos ativos agrícolas cana-de-açúcar, milho e sorgo, no contexto de usina autônoma integrada, segundo a abordagem do ciclo de vida. Para tanto, estudos de ACV foram conduzidos para cada um dos três produtos, seguindo as diretrizes das normas ABNT NBR ISO 14.040:2009 e ABNT NBR ISO 14.044:2009. Para a análise ambiental aplicou-se o método de Avaliação de Impacto do Ciclo de Vida (AICV) *ReCiPe midpoint* e, para a análise energética, o método Demanda de Energia Cumulativa foi utilizado, seguido pelo cálculo dos Índices de Retorno Energético sobre o Investimento (EROI) para cada combustível. A unidade funcional dos estudos foi 1 m³ de etanol hidratado e o sistema de produto incluiu a produção de insumos, produção da matéria-prima agrícola, produção de etanol, cogeração e etapas de transporte. Os resultados da análise ambiental demonstraram que o etanol de cana-de-açúcar apresenta melhor desempenho do que o etanol de milho e de sorgo em um número maior de categorias de impacto. As análises energéticas demonstraram que o uso de cavaco de madeira na etapa de cogeração dos processos de produção de etanol de milho e sorgo traduziu-se em ganhos energéticos, mas o etanol de cana-de-açúcar ainda apresenta um desempenho melhor por utilizar o bagaço para cogeração. Em termos de EROI, o etanol de cana-de-açúcar disponibilizou 9,77 unidades de energia para cada unidade consumida, o etanol de milho disponibilizou 2,68 e o etanol de sorgo disponibilizou 3,10.

Palavras-chave: Avaliação de Ciclo de Vida, EROI, Balanço energético, Etanol, Cana-de-açúcar, Milho, Sorgo Granífero

ABSTRACT

DONKE, Ana Cristina Guimarães, **Environmental and energy assessment of sugarcane, corn and sorghum ethanol production in an integrated plant, according to the life cycle approach**. 2016. 243 f. Dissertation (Master of Science) – Graduate Program in Energy, University of São Paulo, 2016.

Ethanol is consolidated as fuel to drive light vehicles in Brazil, but for the past 40 years, only the cultivation of sugarcane has been commercially exploited for the production of this fuel. On the other hand, agricultural development has provided high yields of grain in recent decades. Corn production is distinguished by increased productivity, and can be sown as main crop or as a winter crop in rotation with soybeans. Sorghum, in turn, has a higher roughness and tolerance to drought and can act as a substitute for corn. Given this situation, ethanol plants in Mato Grosso were associated with corn and sorghum producers to include new raw materials in the fuel production process, sharing the same plant, called Integrated Plant or Plant Flex. However, the development of new technology and production sectors requires consideration of its potential energy and environmental implications. The Life Cycle Assessment (LCA) is management tool used to evaluate potential environmental impacts associated with products, processes and services. Its main feature is to provide such an assessment in a systematic way, taking into account all stages of their life cycle. The objective of this study was to evaluate and compare the environmental and energy performance of ethanol production from sugarcane, corn and sorghum in the context of integrated autonomous plant, according to the life cycle approach. For that, LCA studies were conducted for each of the three products, following the guidelines of the standards ISO 14040: 2009 and ISO 14044: 2009. For environmental analysis the method of Life Cycle Impact Assessment (LCIA) *Recipe midpoint* was applied and for energy analysis Cumulative Energy Demand method was used, followed by the estimate of the Energy Return On Investment (EROI) for each fuel. The functional unit of the studies was 1 m³ of hydrous ethanol and the product system includes the production inputs, production of agricultural raw material, production of ethanol, cogeneration and transport stages. The results of the environmental analysis showed that the ethanol sugarcane performs better than the ethanol maize and sorghum in a greater number of impact categories. Energy analyzes have shown that the use of wood chips in cogeneration stage of corn ethanol production processes and sorghum has resulted in energy savings, but the ethanol sugarcane still performs better by using bagasse for cogeneration. In terms of EROI, the sugarcane ethanol provided 9.77 units of energy for every unit consumed, corn ethanol provided 2.68 and sorghum ethanol provided 3.10.

Keywords: Life Cycle Assessment, EROI, net energy analysis, ethanol, sugarcane, corn, grain sorghum

LISTA DE FIGURAS

Figura 3.1. Esquema ilustrativo de uma Usina Flex ou Usina Integrada	35
Figura 3.2 - Matérias-primas e seus processos para produção de etanol.....	37
Figura 3.3 - <i>Saccharum officinarum</i> L.	38
Figura 3.4 - <i>Zea Mays</i> L.	42
Figura 3.5 - <i>Sorghum bicolor</i> L. Moench.....	45
Figura 3.6 - Ciclo de Vida de um produto	56
Figura 3.7 - Fases de um estudo de ACV	57
Figura 5.1 - Localização do estado do Mato Grosso (em destaque) no mapa do Brasil.....	75
Figura 5.2. Sistema de Produto e Fronteiras do Sistema de produção de etanol hidratado de cana-de-açúcar	77
Figura 6.1 - Sistema de Produto e Fronteiras do Sistema de produção de etanol hidratado de milho.....	124
Figura 7.1 - Sistema de Produto e Fronteiras do Sistema de produção de etanol hidratado de sorgo	159

LISTA DE GRÁFICOS

Gráfico 3.1 - Evolução da produção nacional de etanol anidro e hidratado – 2003-2012	31
Gráfico 3.2 - Produção de Energia Primária no Brasil – 2012	32
Gráfico 5.1 - Emissões para a categoria de Mudanças Climáticas e principais processos contribuintes para a produção de 1 m ³ de etanol hidratado de cana-de-açúcar	105
Gráfico 5.2 - Participação dos processos que consomem "água de poço" na categoria Depleção de Água para a produção de etanol hidratado de cana-de-açúcar	107
Gráfico 5.3 - Resultados para as categorias de impacto Formação de Material Particulado (FMP), Formação de Oxidação Fotoquímica (FOF) e Acidificação Terrestre (AT) e principais processos contribuintes por categoria para a produção de 1 m ³ de etanol hidratado de cana	109
Gráfico 5.4 - Participação das fontes energéticas de origem fóssil na categoria "Não renovável, fóssil" para a produção de etanol hidratado de cana-de-açúcar	117
Gráfico 5.5 - Comparação entre os EROIs encontrados na literatura para o etanol de cana-de-açúcar.....	120
Gráfico 6.1 - Emissões para a categoria de Mudanças Climáticas e principais processos contribuintes para a produção de 1 m ³ de etanol hidratado de milho	141
Gráfico 6.2 - Resultados para as categorias de impacto Formação de Material Particulado (FMP), Formação de Oxidação Fotoquímica (FOF) e Acidificação Terrestre (AT) e principais processos contribuintes por categoria para a produção de 1 m ³ de etanol hidratado de milho	144
Gráfico 6.3 - Participação das fontes energéticas de origem fóssil na categoria "Não renovável, fóssil" para a produção de etanol hidratado de milho	152
Gráfico 6.4 - Comparação entre os EROIs encontrados na literatura para o etanol de milho	156
Gráfico 7.1 - Emissões para a categoria de Mudanças Climáticas e principais processos contribuintes para a produção de 1 m ³ de etanol hidratado de sorgo	174
Gráfico 7.2 - Resultados para as categorias de impacto Formação de Material Particulado (FMP), Formação de Oxidação Fotoquímica (FOF) e Acidificação Terrestre (AT) e principais processos contribuintes por categoria para a produção de 1 m ³ de etanol hidratado de sorgo	176
Gráfico 7.3 - Participação das fontes energéticas de origem fóssil na categoria "Não-renovável, fóssil" para a produção de etanol hidratado de sorgo	184
Gráfico 7.4 - Comparação entre os EROIs encontrados na literatura para o etanol de sorgo	187

Gráfico 9.1 - Comparação dos desempenhos ambientais das produções de 1 m ³ de etanol hidratado de cana-de-açúcar, milho e sorgo, segundo os resultados obtidos pelo método de AICV ReCiPe Midpoint (H) V1.10 World Recipe H.....	195
Gráfico 9.2 - Comparação entre os desempenhos das produções de etanol de cana-de-açúcar, milho e sorgo para a categoria Mudanças Climáticas	196
Gráfico 9.3 - Comparação entre os desempenhos das produções de etanol de cana-de-açúcar, milho e sorgo para a categoria Depleção de Água	198
Gráfico 9.4 - Comparação entre os desempenhos das produções de etanol de cana-de-açúcar, milho e sorgo para a categoria Formação de Material Particulado	200
Gráfico 9.5 - Comparação entre os desempenhos das produções de etanol de cana-de-açúcar, milho e sorgo para a categoria Formação de Oxidação Fotoquímica.....	201
Gráfico 9.6 - Comparação entre os desempenhos das produções de etanol de cana-de-açúcar, milho e sorgo para a categoria Acidificação Terrestre	202
Gráfico 9.7 - Comparação entre os desempenhos das produções de etanol de cana-de-açúcar, milho e sorgo para a categoria Ecotoxicidade Terrestre.....	204
Gráfico 9.8 - Comparação entre os desempenhos das produções de etanol de cana-de-açúcar, milho e sorgo para a categoria Ecotoxicidade de Água Doce	206
Gráfico 9.9 - Comparação entre os desempenhos das produções de etanol de cana-de-açúcar, milho e sorgo para a categoria Toxicidade Humana	206
Gráfico 9.10 - Comparação entre os desempenhos das produções de etanol de cana-de-açúcar, milho e sorgo para a categoria Eutrofização de Água Doce.....	207
Gráfico 9.11 - Comparação entre os desempenhos das produções de etanol de cana-de-açúcar, milho e sorgo para a categoria Ocupação de Terras Agrícolas	209
Gráfico 9.12 - Comparação entre os desempenhos das produções de etanol de cana-de-açúcar, milho e sorgo para a categoria Ocupação de Transformação de Área Natural	210
Gráfico 9.13 - Comparação dos desempenhos energéticos das produções de 1 m ³ de etanol hidratado de cana-de-açúcar, milho e sorgo, segundo os resultados obtidos pelo método de AICV Demanda Cumulativa de Energia (CED).....	212

LISTA DE TABELAS

Tabela 3.1 - Produção de Cana-de-Açúcar por estado no Brasil, para as safras 2011/12 e 2012/13, em mil toneladas.....	40
Tabela 3.2 - Produção de Milho 1ª e 2ª safras e total por estado no Brasil, para a safra 2012/13, em mil toneladas.....	43
Tabela 3.3 - Produção de Sorgo por estado no Brasil, para a safra 2012/13, em mil toneladas	46
Tabela 5.1 - Área do conjunto de fazendas produtoras de cana-de-açúcar e porcentagens das atividades exercidas na área total	82
Tabela 5.2 - Áreas consideradas para a determinação de Transformação do Uso da Terra para a cultura de cana-de-açúcar, entre os anos 1993 e 2013, no estado do Mato Grosso, Brasil ...	86
Tabela 5.3 - Parâmetros utilizados para o cálculo de emissões de NH ₃ para a atmosfera por aplicação de vinhaça, para produção de cana-de-açúcar	88
Tabela 5.4 - Parâmetros utilizados para o cálculo de emissões de NH ₃ para a atmosfera por aplicação de fertilizantes minerais, para a produção de cana-de-açúcar	88
Tabela 5.5 - Parâmetros utilizados para o cálculo de emissões de NO ₃ ⁻ para águas subterrâneas por aplicação de fertilizantes, para produção de cana-de-açúcar	89
Tabela 5.6 - Parâmetros utilizados para o cálculo de emissões de P para águas superficiais por erosão do solo, para produção de cana-de-açúcar	90
Tabela 5.7 - Parâmetros utilizados para o cálculo de emissões de N ₂ O para a atmosfera por aplicação de fertilizantes e restos culturais, para produção de cana-de-açúcar.....	90
Tabela 5.8 - Teor de Metal Pesado dos insumos ($T_{MP, \text{ insumo}}$) e Teor de Metal Pesado nos colmos ($T_{MP, \text{ colhido}}$) para o cálculo de emissões de metais pesados para águas superficiais e solo por aplicação de fertilizantes, calcário e gesso, para produção de cana-de-açúcar	92
Tabela 5.9 - Substâncias e parâmetros utilizados para o cálculo de emissões para a atmosfera por queima de diesel	93
Tabela 5.10 - Substâncias e parâmetros utilizados para o cálculo de emissões para a atmosfera por queima de palhada.....	94
Tabela 5.11 - Fatores utilizados para a determinação do estoque de carbono orgânico do solo (SOC).....	97
Tabela 5.12 - Fatores utilizados para a determinação do estoque de carbono orgânico na vegetação (C_{VEG})	97

Tabela 5.13 - Parâmetros utilizados para o cálculo de absorção de CO ₂ da atmosfera pela planta, para produção de cana-de-açúcar.....	98
Tabela 5.14 - Inventários de Ciclo de Vida utilizados no Inventário de produção de cana-de-açúcar e os respectivos ICVs dos bancos de dados que serviram como referência para as adaptações.....	99
Tabela 5.15 - Parâmetros industriais considerados no modelo de produção de etanol de cana-de-açúcar.....	101
Tabela 5.16 - Fatores de emissão de substâncias para a atmosfera pela queima de biomassa na caldeira, para geração de energia para a produção de etanol de cana-de-açúcar.....	102
Tabela 5.17 - Fator de emissão de MP ₁₀ para a atmosfera pela queima de bagaço na caldeira, para geração de energia para a produção de etanol de cana-de-açúcar	102
Tabela 5.18 - Perfil ambiental da produção de 1m ³ de etanol hidratado de cana-de-açúcar em Usina Autônoma Integrada no estado do MT, Brasil.	103
Tabela 5.19 - Principais emissões contribuintes para a categoria Mudanças Climáticas para a produção de 1m ³ de etanol hidratado de cana-de-açúcar.....	104
Tabela 5.20 - Principais emissões contribuintes para a categoria Formação de Material Particulado para a produção de 1m ³ de etanol hidratado de cana-de-açúcar.....	108
Tabela 5.21 - Principais emissões contribuintes para a categoria Formação Oxidação Fotoquímica para a produção de 1m ³ de etanol hidratado de cana-de-açúcar.....	109
Tabela 5.22 - Principais emissões contribuintes para a categoria Acidificação Terrestre para a produção de 1m ³ de etanol hidratado de cana-de-açúcar.....	110
Tabela 5.23 - Principais emissões contribuintes para a categoria Ecotoxicidade Terrestre para a produção de 1m ³ de etanol hidratado de cana-de-açúcar.....	111
Tabela 5.24 - Principais emissões contribuintes para a categoria Ecotoxicidade de Água Doce para a produção de 1m ³ de etanol hidratado de cana-de-açúcar.....	112
Tabela 5.25 - Principais emissões contribuintes para a categoria Toxicidade Humana para a produção de 1m ³ de etanol hidratado de cana-de-açúcar.....	112
Tabela 5.26 - Perfil energético da produção de 1m ³ de etanol hidratado de cana-de-açúcar em Usina Autônoma Integrada no estado do MT, Brasil.	116
Tabela 5.27 - Valores de energias disponível e consumida, não renovável por 1m ³ de etanol hidratado de cana-de-açúcar, em GJ, e Índice de Retorno Energético sobre o Investimento (EROI).....	118
Tabela 6.1 - Parâmetros para cálculo de Fator de Alocação Econômica entre soja e milho, para a safra 2013 do estado do Mato Grosso.....	125

Tabela 6.2 - Fatores de ponderação que determinam o fator de alocação entre milho e soja para Transformação do Uso da Terra	126
Tabela 6.3 - Áreas consideradas para a determinação de Transformação do Uso da Terra para o sistema soja-milho/sorgo, entre os anos 1993 e 2013, no estado do Mato Grosso, Brasil ..	130
Tabela 6.4 - Parâmetros utilizados para o cálculo de emissões de NH_3 para a atmosfera por aplicação de fertilizantes minerais, para produção de milho	131
Tabela 6.5 - Parâmetros utilizados para o cálculo de emissões de NO_3^- para águas subterrâneas por aplicação de fertilizantes, para produção de milho	132
Tabela 6.6 - Parâmetros utilizados para o cálculo de emissões de P para águas superficiais por erosão do solo, para produção de milho	132
Tabela 6.7 - Parâmetros utilizados para o cálculo de emissões de N_2O para a atmosfera por aplicação de fertilizantes e restos culturais, para produção de milho.....	133
Tabela 6.8 - Teor de Metal Pesado dos insumos (TMP, insumo) e Teor de Metal Pesado nos grãos colhidos (TMP, colhido) para o cálculo de emissões de metais pesados para águas superficiais e solo por aplicação de fertilizantes, calcário e gesso, para produção de milho .	133
Tabela 6.9 - Parâmetros utilizados para o cálculo de absorção de CO_2 da atmosfera pela planta, para produção de milho.....	134
Tabela 6.10 - Inventários de Ciclo de Vida utilizados no Inventário de produção de milho e os respectivos ICVs dos bancos de dados que serviram como referência para as adaptações....	135
Tabela 6.11 - Parâmetros industriais considerados no modelo de produção de etanol de milho	137
Tabela 6.12 - Fator de emissão de MP_{10} para a atmosfera pela queima de cavaco de madeira na caldeira, para geração de energia para a produção de etanol de milho.....	138
Tabela 6.13 - Inventários de Ciclo de Vida utilizados no Inventário de produção de etanol de milho e os respectivos ICVs do banco de dados que serviram como referência para as adaptações.....	138
Tabela 6.14 - Perfil ambiental da produção de 1m^3 de etanol hidratado de milho em Usina Autônoma Integrada no estado do MT, Brasil.	139
Tabela 6.15 - Principais emissões contribuintes para a categoria Mudanças Climáticas para a produção de 1m^3 de etanol hidratado de milho	140
Tabela 6.16 - Principais emissões contribuintes para a categoria Formação de Material Particulado para a produção de 1m^3 de etanol hidratado de milho.....	144
Tabela 6.17 - Principais emissões contribuintes para a categoria Formação Oxidação Fotoquímica para a produção de 1m^3 de etanol hidratado de milho.....	145

Tabela 6.18 - Principais emissões contribuintes para a categoria Acidificação Terrestre para a produção de 1m ³ de etanol hidratado de milho	146
Tabela 6.19 - Principais emissões contribuintes para a categoria Ecotoxicidade Terrestre para a produção de 1m ³ de etanol hidratado de milho.....	147
Tabela 6.20 - Principais emissões contribuintes para a categoria Ecotoxicidade de Água Doce para a produção de 1m ³ de etanol hidratado de milho.....	148
Tabela 6.21 - Principais emissões contribuintes para a categoria Toxicidade Humana para a produção de 1m ³ de etanol hidratado de milho	148
Tabela 6.22 - Principais emissões contribuintes para a categoria Eutrofização de Água Doce para a produção de 1m ³ de etanol hidratado de milho.....	149
Tabela 6.23 - Perfil energético da produção de 1m ³ de etanol hidratado de milho em Usina Autônoma Integrada no estado do MT, Brasil	151
Tabela 6.24 - Valores de energias disponível e consumida, não renovável por 1m ³ de etanol hidratado de milho, em GJ, e Índice de Retorno Energético sobre o Investimento (EROI) ..	154
Tabela 7.1 - Parâmetros para cálculo de Fator de Alocação Econômica entre soja e sorgo, para a safra 2013 do estado do Mato Grosso.....	160
Tabela 7.2 - Fatores de ponderação que determinam o fator de alocação entre sorgo e soja para Transformação do Uso da Terra	161
Tabela 7.3 - Parâmetros utilizados para o cálculo de emissões de NO ₃ ⁻ para águas subterrâneas por aplicação de fertilizantes, para produção de sorgo.....	166
Tabela 7.4 - Parâmetros utilizados para o cálculo de emissões de N ₂ O para a atmosfera por aplicação de fertilizantes e restos culturais, para produção de sorgo	166
Tabela 7.5 - Teor de Metal Pesado dos insumos (TMP, insumo) e Teor de Metal Pesado nos grãos colhidos (TMP, colhido) para o cálculo de emissões de metais pesados para águas superficiais e solo por aplicação de fertilizantes, calcário e gesso, para produção de sorgo .	167
Tabela 7.6 - Parâmetros utilizados para o cálculo de absorção de CO ₂ da atmosfera pela planta, para produção de sorgo	168
Tabela 7.7 - Inventários de Ciclo de Vida utilizados no Inventário de produção de sorgo e os respectivos ICVs dos bancos de dados que serviram como referência para as adaptações....	169
Tabela 7.8 - Parâmetros industriais considerados no modelo de produção de etanol de sorgo	171
Tabela 7.9 - Perfil ambiental da produção de 1m ³ de etanol hidratado de sorgo em Usina Autônoma Integrada no estado do MT, Brasil.	172

Tabela 7.10 - Principais emissões contribuintes para a categoria Mudanças Climáticas para a produção de 1m ³ de etanol hidratado de sorgo	173
Tabela 7.11 - Principais emissões contribuintes para a categoria Formação de Material Particulado para a produção de 1m ³ de etanol hidratado de sorgo	176
Tabela 7.12 - Principais emissões contribuintes para a categoria Formação Oxidação Fotoquímica para a produção de 1m ³ de etanol hidratado de sorgo	177
Tabela 7.13 - Principais emissões contribuintes para a categoria Acidificação Terrestre para a produção de 1m ³ de etanol hidratado de sorgo	178
Tabela 7.14 - Principais emissões contribuintes para a categoria Ecotoxicidade Terrestre para a produção de 1m ³ de etanol hidratado de sorgo	179
Tabela 7.15 - Principais emissões contribuintes para a categoria Ecotoxicidade de Água Doce para a produção de 1m ³ de etanol hidratado de sorgo	179
Tabela 7.16 - Principais emissões contribuintes para a categoria Toxicidade Humana para a produção de 1m ³ de etanol hidratado de sorgo	180
Tabela 7.17 - Principais emissões contribuintes para a categoria Eutrofização de Água Doce para a produção de 1m ³ de etanol hidratado de sorgo	181
Tabela 7.18 - Perfil energético da produção de 1m ³ de etanol hidratado de sorgo em Usina Autônoma Integrada no estado do MT, Brasil	183
Tabela 7.19 - Valores de energias disponível e consumida, não-renovável por 1m ³ de etanol hidratado de sorgo, em GJ, e Índice de Retorno Energético sobre o Investimento (EROI)...	185
Tabela 8.1 - Critérios de Alocação adotados para análise de sensibilidade para ocupação do solo entre soja e milho safrinha	189
Tabela 8.2 - Critérios de Alocação adotados para análise de sensibilidade para ocupação do solo entre soja e sorgo safrinha	189
Tabela 8.3 - Verificação de sensibilidade com relação aos critérios de alocação do uso do solo para os resultados da categoria Ocupação de Terras Agrícolas para o ICV de produção de milho.....	189
Tabela 8.4 - Verificação de sensibilidade com relação aos critérios de alocação do uso do solo para os resultados da categoria Ocupação de Terras Agrícolas para o ICV de produção de sorgo	190
Tabela 8.5 - Verificação de sensibilidade com relação aos critérios de alocação da mudança no uso do solo para os resultados da categoria Mudanças Climáticas para o ICV de produção de milho	191

Tabela 8.6 - Verificação de sensibilidade com relação aos critérios de alocação da mudança no uso do solo para os resultados da categoria Transformação de Área Natural para o ICV de produção de milho	191
Tabela 8.7 -Verificação de sensibilidade com relação aos critérios de alocação da mudança no uso do solo para os resultados da categoria Mudanças Climáticas para o ICV de produção de sorgo	192
Tabela 8.8 -Verificação de sensibilidade com relação aos critérios de alocação da mudança no uso do solo para os resultados da categoria Transformação de Área Natural para o ICV de produção de sorgo.....	192
Tabela 9.1 - Perfis ambientais das produções de 1 m ³ de etanol hidratado de cana-de-açúcar, milho e sorgo, obtidos pela aplicação do método de AICV ReCiPe Midpoint (H) V1.10 World Recipe H	194
Tabela 9.2 - Perfis energéticos das produções de 1 m ³ de etanol hidratado de cana-de-açúcar, milho e sorgo, obtidos pela aplicação do método Demanda Cumulativa de Energia (CED).212	
Tabela 9.3 Valores de energias fornecidas e consumidas por 1m ³ de etanol de cana-de-açúcar, de milho e de sorgo, em GJ, e Índice de Retorno Energético sobre o Investimento (EROI).214	

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO.....	23
2	OBJETIVOS.....	28
3	REVISÃO DE LITERATURA	29
3.1	HISTÓRICO DO ETANOL NO BRASIL	29
3.2	CONTEXTO ATUAL DO ETANOL NO BRASIL	31
3.3	CONTEXTO ATUAL DO ETANOL NO ESTADO DO MATO GROSSO	33
3.4	USINA FLEX.....	33
3.5	PROCESSOS DE PRODUÇÃO DO ETANOL.....	37
3.5.1	Matérias-primas para produção de etanol	37
3.5.1.1	Cana-de-açúcar.....	38
3.5.1.2	Milho	42
3.5.1.3	Sorgo	44
3.5.2	Produção industrial do etanol.....	47
3.5.2.1	Produção de etanol de fonte sacarina	48
3.5.2.2	Produção de etanol de fonte amilácea.....	51
3.6	PENSAMENTO DO CICLO DE VIDA – DO BALANÇO ENERGÉTICO À METODOLOGIA DA ACV	54
3.6.1	Avaliação do Ciclo de Vida (ACV)	55
3.6.2	Balanço Energético	60
3.7	ESTUDOS DE AVALIAÇÕES AMBIENTAIS E ENERGÉTICAS DE COMBUSTÍVEIS.....	62
4	MATERIAL E MÉTODOS	69
4.1	REVISÃO DE LITERATURA.....	70
4.2	COLETA DE DADOS	70
4.3	CONCEPÇÃO DO MODELO DE PRODUÇÃO DE ETANOL A PARTIR DE DIFERENTES ATIVOS AGRÍCOLAS	71
4.4	MÉTODO DE AVALIAÇÃO AMBIENTAL.....	72
4.5	MÉTODO DE AVALIAÇÃO ENERGÉTICA.....	72
4.6	RESULTADOS	73
4.7	DISCUSSÃO	73
5	AVALIAÇÃO AMBIENTAL E ENERGÉTICA DO ETANOL DE CANA-DE-AÇÚCAR.....	74
5.1	BASES DO ESTUDO DE ACV (OBJETIVO E ESCOPO).....	74
5.1.1	Objetivo	74
5.1.2	Escopo	74
5.1.2.1	Função do sistema, unidade funcional e fluxo de referência	74
5.1.2.2	Requisitos de qualidade dos dados	75
5.1.2.3	Definição do Sistema de Produto e Fronteiras do Sistema.....	76
5.1.2.4	Critérios de Exclusão	76
5.1.2.5	Procedimentos de Alocação	77
5.1.2.6	Premissas.....	78

5.1.2.7	Métodos de Avaliação de Impacto de Ciclo de Vida (AICV).....	79
5.1.2.8	Software de apoio à realização de estudos de ACV.....	80
5.2	INVENTÁRIOS DO CICLO DE VIDA (ANÁLISE DE INVENTÁRIO).....	80
5.2.1	ICV da produção de cana-de-açúcar.....	81
5.2.1.1	Modelos de Emissões e parâmetros utilizados.....	87
5.2.1.2	Banco de dados utilizado.....	98
5.2.2	ICV da produção de etanol de cana-de-açúcar.....	99
5.2.2.1	Modelos de Emissões.....	101
5.2.2.2	Banco de dados utilizado.....	103
5.3	RESULTADOS E DISCUSSÃO (AVALIAÇÃO DE IMPACTO DE CICLO DE VIDA).....	103
5.3.1	Desempenho Ambiental da produção de etanol de cana-de-açúcar.....	103
5.3.1.1	Mudanças Climáticas.....	104
5.3.1.2	Depleção de Água.....	106
5.3.1.3	Formação de Material Particulado, Formação de Oxidação Fotoquímica e Acidificação Terrestre.....	108
5.3.1.4	Ecotoxicidade Terrestre, Ecotoxicidade de Água Doce, Toxicidade Humana e Eutrofização de Água Doce.....	111
5.3.1.5	Ocupação de Terras Agrícolas e Transformação de Área Natural.....	114
5.3.2	Desempenho Energético da produção de etanol de cana-de-açúcar.....	115
5.3.2.1	Fontes de energia não renováveis: fóssil, nuclear e biomassa de origem primária.....	116
5.3.2.2	Fontes de energia renováveis: biomassa, alternativas e hídrica.....	117
5.3.2.3	Índice de Retorno Energético sobre o Investimento (EROI).....	118
6	AVALIAÇÃO AMBIENTAL E ENERGÉTICA DO ETANOL DE MILHO.....	122
6.1	BASES DO ESTUDO DE ACV (OBJETIVO E ESCOPO).....	122
6.1.1	Objetivo.....	122
6.1.2	Escopo.....	122
6.1.2.1	Função do sistema, unidade funcional e fluxo de referência.....	122
6.1.2.2	Requisito de Qualidade dos dados.....	123
6.1.2.3	Definição do Sistema de Produto e Fronteiras do Sistema.....	123
6.1.2.4	Procedimentos de Alocação.....	124
6.1.2.5	Premissas.....	126
6.2	INVENTÁRIOS DO CICLO DE VIDA (ANÁLISE DE INVENTÁRIO).....	127
6.2.1	ICV da produção de milho.....	128
6.2.1.1	Modelos de Emissões e parâmetros utilizados.....	131
6.2.1.2	Banco de dados utilizado.....	135
6.2.2	ICV da produção de etanol de milho.....	135
6.2.2.1	Modelos de Emissões.....	137
6.2.2.2	Banco de dados utilizado.....	138
6.3	RESULTADOS E DISCUSSÃO (AVALIAÇÃO DE IMPACTO DE CICLO DE VIDA).....	139
6.3.1	Desempenho Ambiental da produção de etanol de milho.....	139
6.3.1.1	Mudanças Climáticas.....	139
6.3.1.2	Depleção de Água.....	142

6.3.1.3	Formação de Material Particulado, Formação de Oxidação Fotoquímica e Acidificação Terrestre	143
6.3.1.4	Ecotoxicidade Terrestre, Ecotoxicidade de Água Doce, Toxicidade Humana e Eutrofização de Água Doce	147
6.3.1.5	Ocupação de Terras Agrícolas e Transformação de Área Natural	149
6.3.2	Desempenho Energético da produção de etanol de milho	151
6.3.2.1	Fontes de energia não renováveis: fóssil, nuclear e biomassa de origem primária	152
6.3.2.2	Fontes de energia renováveis: biomassa, alternativas e hídrica	153
6.3.2.3	Índice de Retorno Energético sobre o Investimento (EROI)	153
7	AVALIAÇÃO AMBIENTAL E ENERGÉTICA DO ETANOL DE SORGO	158
7.1	BASES DO ESTUDO DE ACV (OBJETIVO E ESCOPO).....	158
7.1.1	Objetivo	158
7.1.2	Escopo	158
7.1.2.1	Função do sistema, unidade funcional e fluxo de referência	158
7.1.2.2	Definição do Sistema de Produto e Fronteiras do Sistema.....	159
7.1.2.3	Procedimentos de Alocação	160
7.1.2.4	Premissas.....	161
7.2	INVENTÁRIOS DO CICLO DE VIDA (ANÁLISE DE INVENTÁRIO).....	163
7.2.1	ICV da produção de sorgo	163
7.2.1.1	Modelos de Emissões e parâmetros utilizados.....	165
7.2.1.2	Banco de dados utilizado.....	168
7.2.2	ICV da produção de etanol de sorgo	169
7.2.2.1	Modelos de Emissões	171
7.2.2.2	Banco de dados utilizado.....	171
7.3	RESULTADOS E DISCUSSÃO (AVALIAÇÃO DE IMPACTO DE CICLO DE VIDA).....	172
7.3.1	Desempenho Ambiental da produção de etanol de sorgo	172
7.3.1.1	Mudanças Climáticas	173
7.3.1.2	Depleção de Água	175
7.3.1.3	Formação de Material Particulado, Formação de Oxidação Fotoquímica e Acidificação Terrestre	175
7.3.1.4	Ecotoxicidade Terrestre, Ecotoxicidade de Água Doce, Toxicidade Humana e Eutrofização de Água Doce	178
7.3.1.5	Ocupação de Terras Agrícolas e Transformação de Área Natural	181
7.3.2	Desempenho Energético da produção de etanol de sorgo	182
7.3.2.1	Fontes de energia não renováveis: fóssil, nuclear e biomassa de origem primária	183
7.3.2.2	Fontes de energia renováveis: biomassa, alternativas e hídrica	184
7.3.2.3	Índice de Retorno Energético sobre o Investimento (EROI)	185
8	ANÁLISE DE SENSIBILIDADE	188
8.1	ALOCAÇÃO ENTRE USO DA TERRA	189
8.2	ALOCAÇÃO ENTRE MUDANÇA DO USO DA TERRA	190
8.3	ALOCAÇÃO ENTRE APLICAÇÃO DE CALCÁRIO	192
9	AVALIAÇÃO COMPARATIVA EM TERMOS AMBIENTAIS E ENERGÉTICOS DA PRODUÇÃO DE ETANOL.....	194

9.1	COMPARAÇÃO DOS DESEMPENHOS AMBIENTAIS DE ETANOL DE CANA-DE-AÇÚCAR, MILHO E SORGO	194
9.1.1	Mudanças Climáticas	195
9.1.2	Depleção de Água	198
9.1.3	Formação de Material Particulado, Formação de Oxidação Fotoquímica e Acidificação Terrestre	199
9.1.4	Ecotoxicidade Terrestre, Ecotoxicidade de Água Doce, Toxicidade Humana e Eutrofização de Água Doce	203
9.1.5	Ocupação de Terras Agrícolas e Transformação de Área Natural	208
9.2	COMPARAÇÃO DOS DESEMPENHOS ENERGÉTICOS DE ETANOL DE CANA-DE-AÇÚCAR, MILHO E SORGO	211
9.2.1	CED – Demanda Cumulativa de Energia.....	212
9.2.2	EROI - Índice de Retorno Energético sobre o Investimento	214
9.3	COMPARAÇÃO GERAL	217
10	CONSIDERAÇÕES FINAIS	219
11	REFERÊNCIAS.....	225
12	APÊNDICE A - INVENTÁRIO DO CICLO DE VIDA DA PRODUÇÃO DE ETANOL HIDRATADO DE CANA-DE-AÇÚCAR.....	237
13	APÊNDICE B – INVENTÁRIO DO CICLO DE VIDA DA PRODUÇÃO DE ETANOL HIDRATADO DE MILHO	240
14	APÊNDICE C – INVENTÁRIO DO CICLO DE VIDA DA PRODUÇÃO DE ETANOL HIDRATADO DE SORGO	242

1 INTRODUÇÃO

O etanol está consolidado como combustível para movimentação de veículos leves – ou seja, que operam em termos termodinâmicos de acordo com o ciclo Otto – no Brasil. O país é um dos maiores produtores mundiais desta commodity e seu maior exportador. A cana-de-açúcar é a principal matéria-prima para o etanol brasileiro, fato este que levou o país à especialização da produção agrícola e do processamento desta fonte de biomassa. O grau de avanço tecnológico do processamento do etanol brasileiro é tal que, segundo a Empresa de Pesquisa Energética (EPE) (2013), em 2012 os produtos derivados de cana foram a segunda principal fonte de energia primária no país, atrás apenas do petróleo.

A utilização do bagaço para a produção de vapor e eletricidade traz ao etanol de cana-de-açúcar uma característica única, pois torna a produção autossuficiente em relação à energia. Além disso, a cogeração via ciclo Rankine é atualmente uma das tecnologias mais eficientes para o uso racional de energia primária para produzir eletricidade e calor, sendo amplamente aplicada no Brasil (GUERRA et al., 2014).

O excedente de energia elétrica pode ser destinado a outros usos ou ser exportado para a rede concessionária, trazendo benefícios tanto econômicos para a usina, especialmente no período da entressafra em que não há produção de etanol, quanto ambientais e estratégicos para o país. Neste caso, a matriz energética nacional torna-se mais diversificada, possibilitando a substituição de fontes energéticas potencialmente mais agressivas, como as termoelétricas movidas a combustíveis fósseis, e o alívio nas pressões sob as fontes hídricas, já que o período de safra coincide com o período de estiagem nas regiões Sudeste e Centro-Oeste do país - onde se concentra a maior potência instalada em termos de usinas hidrelétricas. A energia elétrica obtida apenas a partir de cogeração via bagaço de cana correspondeu a 6,8% da oferta interna de energia elétrica do país em 2012, de acordo com o Balanço Energético Nacional de 2013 (EMPRESA DE PESQUISA ENERGÉTICA, 2013).

Além de servir de insumo para produção de etanol, a cana é utilizada também para produção de açúcar que abastece o mercado interno e externo. Por atender a tantos usos, a produção de cana encontra-se bastante comprometida. Além disso, o setor é diretamente influenciado por uma característica intrínseca das atividades agroindustriais: a sazonalidade da produção de matéria-prima. É necessário formar estoques do etanol produzido no período de colheita para regularizar a oferta no período da entressafra. Por este motivo, uma safra que apresente resultados econômicos ruins, seja por problemas climáticos ou econômicos, terá alguma possibilidade de se recuperar apenas na colheita do ano seguinte. Nessas condições, a

sucessão de anos de baixo desempenho poderá se traduzir em déficit econômico irrecuperável para muitos produtores e, até mesmo, comprometer a continuidade das atividades na cadeia produtiva correspondente (COMPANHIA NACIONAL DE ABASTECIMENTO, 2010).

Tendo em vista esse quadro, e um contexto de atipicidades climáticas cada vez mais recorrentes, a busca por outras matérias-primas para a produção do biocombustível se torna estrategicamente importante, reduzindo a dependência da produção de etanol a uma só cultura.

É interessante notar que, em 1980, o Programa Nacional de Álcool já trazia a preocupação da diversificação de matérias-primas para a produção de etanol, como justifica Menezes (1980, p.39):

“[...] tal diversificação proporcionaria maior garantia contra o ataque de pragas e moléstias, cuja disseminação seria dificilmente controlável caso a matéria-prima proviesse de uma única espécie vegetal, o que poderia colocar eventualmente em risco o aproveitamento dessa fonte de energia. Pelo simples fato de se adotar a diversificação de culturas, antepor-se-iam barreiras ecológicas ao alastramento de moléstia e pragas. Consequentemente, tanto do ponto de vista agrônomo como estratégico, justifica-se o cultivo de fontes múltiplas de matérias-primas em regiões ecológicas apropriadas, para fazer frente à crescente demanda energética do País.”

Apesar do alerta, nos últimos 40 anos, apenas a cultura de cana foi explorada comercialmente para a produção de etanol para fins combustíveis. Essa constante pode, porém, ser alterada em virtude do estabelecimento de tecnologias agrícolas mais efetivas, que vêm sendo introduzidas nos últimos anos. Como exemplo de matéria-prima alternativa, pode-se citar o milho, produto agrícola usado como matéria-prima para etanol pelos Estados Unidos - o maior produtor do biocombustível do mundo – cuja produtividade no Brasil tem aumentado a cada ano, sempre com safras recordes, mesmo sob condições de cultura não principal – popularmente conhecida como “safrinha”.

No Brasil, durante as últimas décadas, o desenvolvimento agrícola consolidou a situação de país produtor e exportador de *commodities*, apresentando safras recordes de grãos. Segundo o Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística (IBGE) (2013a), em sua estimativa de produção agrícola de outubro de 2013, a safra nacional de cereais, leguminosas e oleaginosas¹ totalizou 186,8 milhões de toneladas (t), 15,4% maior do que a obtida em 2012, com 52,7 milhões de hectares (ha) em área a ser colhida, um aumento de apenas 8% em relação ao ano anterior. Isso indica que foram obtidos ganhos de produtividade, e não apenas de produção. As regiões do Centro-Oeste e Sul são as principais responsáveis pela produção

¹ Produtos: algodão herbáceo (caroço de algodão), amendoim (em casca), arroz (em casca), feijão (em grão), mamona (em baga), milho (em grão), soja (em grão), aveia (em grão), centeio (em grão), cevada (em grão), girassol (em grão), sorgo (em grão), trigo (em grão) e triticale (em grão). (IBGE, 2013a)

de grãos. As culturas que se destacam são a soja, o milho e o arroz, que somam 93% das estimativas de produção e 86,2% da área colhida (INSTITUTO BRASILEIRO DE GEOGRAFIA E ESTATÍSTICA, 2013a).

No Brasil, a produção de milho vem ganhando destaque a cada safra pelo aumento da produtividade em duas safras anuais, podendo ser semeado como cultura principal ou como cultura de rotação, neste caso, geralmente cultivado no fim do período de chuvas e rotacionado com a soja. De acordo com o IBGE (2013a), em 2013, a produção nacional das duas safras somadas foi em 12,9% superior àquela obtida no ano anterior. A primeira safra apresentou acréscimo de 3,2% e a 2ª safra um aumento de 21,4% na produção.

No entanto, apesar das altas produções e boa produtividade, os produtores de milho do Mato Grosso têm encontrado problema para a comercialização de seu produto dada a dificuldade de escoamento da mercadoria para os mercados nacionais e internacionais, causada pela falta de infraestrutura adequada para o transporte da produção.

A produção de milho mato-grossense destinada à exportação circula por via rodoviária até os portos do país. Cerca de 60% desta têm como destino intermediário o Porto de Santos (SP) e outros 12%, o Porto de Vitória (ES). Tomando-se como ponto de partida as principais cidades produtoras de milho do Mato Grosso, cada tonelada de grãos irá percorrer em média 2.042 quilômetros (km) em caminhões antes de ser exportada (IMEA, 2013a). Os altos custos do frete para este tipo de transporte fez com que os ganhos de alguns produtores destas regiões se reduzissem pela metade.

Enquanto a produção de milho no estado do Mato Grosso crescia, a produção de etanol de cana-de-açúcar continuava a apresentar problemas clássicos: a limitação para estoque da matéria-prima vegetal, já que a cana-de-açúcar perde qualidade se não seguir para o processamento logo após a colheita, e o aumento dos preços do açúcar no mercado internacional – que desencoraja a produção de etanol de cana, ao ponto de o Brasil importar etanol dos EUA para complemento da demanda. Esta situação gerou interesse entre formuladores de políticas públicas em apoiar a produção de etanol de milho para suprir a crescente demanda de combustível no país (IGLESIAS; SESMERO, 2015).

Dada essa conjuntura, uma alternativa encontrada pelos produtores de milho, sobretudo da região Centro-Oeste do Brasil, foi a associação com usinas de álcool para fornecer o milho excedente como matéria-prima para a produção de etanol. Dessa forma, é possível agregar valor ao produto próximo às áreas de produção, diminuindo custos com frete, aumentando o lucro do produtor e garantindo a continuidade de seu plantio. Por outro lado, as

usinas de etanol de cana passam a operar também no período de entressafra, reduzindo a ociosidade da planta e ofertando mais combustível para um mercado crescente.

A solução veio com a introdução de uma tecnologia pioneira, em que o processo de produção de etanol de grãos aproveita as instalações e recursos energéticos da usina de cana-de-açúcar. Esse enfoque passou a ser denominado de Usina Integrada, Usina Flexível ou Usina “Flex”.

Dentro da linha de cultivos com potencial para desonerar a produção de cana-de-açúcar para a obtenção de combustível, destaca-se também o sorgo. A cultura também pode ser implementada como segunda safra ou “safrinha”, rotacionada com a soja como primeira cultura. O sorgo apresenta uma janela agrícola menor que a do milho, o que indica a necessidade de menos tempo entre o plantio e a colheita, e pode ser cultivado em épocas mais tardias, em que o volume de chuvas esperado não é suficiente para a cultura do milho (MENEZES, 2015). Outra vantagem do sorgo está nas características morfológicas de seus grãos, que resultam em um melhor rendimento na etapa de moagem que o de seu homólogo para produção de etanol. Milho e sorgo podem ser secos e estocados por muitos meses antes de serem processados. Isso faz com que esses possam substituir a cana no processo de produção de etanol exatamente durante seu período de entressafra. O estado do Mato Grosso, é uma das regiões que demonstram maior viabilidade para a integração destes processos em uma usina integrada.

No entanto, um processo adequado de tomada de decisão, a se efetuar nos dias atuais, não pode se restringir a justificativas econômicas. O desenvolvimento de novas tecnologias e setores produtivos, mas não apenas, exige a consideração de suas potenciais implicações energéticas e ambientais. Além disso, os problemas relacionados ao suprimento de energia e às mudanças climáticas voltaram a atenção da sociedade para o uso de fontes de energia limpa e renovável. Especificamente para o caso de biocombustíveis, a academia tem dedicado grandes esforços em estudar a suas eficiências energéticas, especialmente a partir de cálculos de retorno energético – ou seja, da relação entre a energia renovável disponibilizada pelo combustível em questão e a energia fóssil consumida para a sua produção - e impactos ambientais (GUERRA et al., 2014).

Nas últimas décadas, a preocupação ambiental tornou-se um tema latente para a sociedade. O mundo moderno passou a questionar a carga que a economia global coloca sobre o ambiente através dos insustentáveis padrões de consumo e de produção. Como decorrência disso, diversos questionamentos voltados à imposição de limites, tanto em relação à geração

de rejeitos produzidos pelas atividades antrópicas, como em termos do consumo de recursos naturais materiais e energéticos, passaram a fazer parte da pauta do consumidor comum.

No passado, acreditava-se que, para que a sustentabilidade ambiental do planeta fosse mantida, seria suficiente a implantação de medidas de controle sobre a cadeia produtiva relacionada aos bens de consumo. No entanto, efeitos ambientais negativos, associados sobretudo ao consumo de recursos e à disposição final de produtos sem mais utilidades, mostraram ser esta uma leitura parcial (SEO; KULAY, 2006).

Ao se debruçar mais a fundo sobre a questão, o ser humano moderno observou que a redução da velocidade de degradação do planeta passaria, indispensavelmente, pela aplicação de medidas de adequação sobre todas as etapas do ciclo estabelecido em torno de um produto. Isso inclui, necessariamente, todas as ações que permitam que este cumpra a função para a qual foi concebido. A essa abordagem convencionou-se chamar Ciclo de Vida. Portanto, não basta que apenas a produção de determinado gênero resulte na menor carga de impactos ambientais que a tecnologia pode proporcionar. Todas as demais etapas do Ciclo de Vida deveriam acompanhar este mesmo padrão para que o Desenvolvimento Sustentável pudesse ser, de fato, instaurado.

Em termos de aplicação, isso significa que passariam a ser objeto de medidas de racionalização todas as ações antrópicas relacionadas à extração de recursos junto à natureza, às ações sucessivas que compreendem a manufatura do produto, ao seu uso em si – ou seja, ao atendimento da função – e à sua disposição final, exatamente quando o propósito para o qual foi criado não mais puder ser por ele atendido.

Segundo o United Nations for Environment Programme (UNEP) (2004), a abordagem ciclo de vida ajuda a reconhecer como as escolhas são uma parte do todo nesse sistema de eventos, não apenas no momento de consumo de um produto ou de um serviço, mas também em todas as etapas anteriores e posteriores a esta ação. Essa abordagem possui um caráter sistêmico e permite identificar os riscos e as oportunidades ao longo deste trajeto, buscando uma melhoria contínua.

Sendo assim, a introdução de novos ativos para a produção de etanol em escala comercial, considerando que os processos ocorrem numa mesma planta, deve incitar uma pergunta: seriam estes arranjos produtivos viáveis do ponto de vista ambiental e energético?

2 OBJETIVOS

Tendo em vista o contexto apresentado no capítulo introdutório deste documento, que culminou com a formulação da pergunta que orienta o desenvolvimento desta pesquisa, decidiu-se estabelecer como seu objetivo geral: *avaliar e comparar os desempenhos da produção de etanol a partir de diferentes ativos agrícolas – cana-de-açúcar, milho e sorgo – no contexto de usina autônoma integrada no estado do Mato Grosso, segundo os enfoques ambiental e energético, seguindo a abordagem do ciclo de vida.*

Além do objetivo geral acima mencionado, espera-se obter, também, os seguintes resultados:

- a. Identificação de etapas críticas geradoras de impacto e oportunidades de melhorias nos processos estudados;
- b. Fornecimento de dados e informações que permitam subsidiar novos estudos e tomadas de decisão quanto à exploração da tecnologia de produção integrada de etanol, recém-desenvolvida no Brasil e
- c. Contribuição para a ampliação do banco de dados brasileiro para apoio a estudos de Avaliação de Ciclo de Vida.

3 REVISÃO DE LITERATURA

3.1 Histórico do etanol no Brasil

O etanol se tornou realidade como combustível juntamente com a invenção dos motores de combustão interna. Com o desenvolvimento da tecnologia revolucionária desses motores ao final do século XIX, que permitiu a ascensão e a popularização dos automóveis, o etanol e a gasolina passaram a disputar preferências. Embora mundialmente a gasolina tenha se tornado o combustível padrão para veículos leves, o etanol sempre mostrou-se um substitutivo tecnicamente viável, sendo muitas vezes requisitado em momentos de crise de abastecimento do combustível fóssil (MENEZES, 1980).

Desde a década de 1920 até o fim da II Guerra Mundial, crises de abastecimento de petróleo preocuparam os governos, que recorreram a alternativas de suprimento do mercado automobilístico interno tais como o álcool de vinho na Espanha, álcool de batata na Alemanha e até uma mistura denominada “gasohol”, no caso dos Estados Unidos. Após a II Guerra Mundial, já em meados do século XX, a regularização do abastecimento de petróleo fez com que o álcool perdesse a função principal de substância combustível. Isso levou à suspensão temporária de pesquisas nesse campo, um descuido que contribuiu para postergar ainda mais qualquer solução para as crises do petróleo dos anos 1970 (MENEZES, 1980).

Foi exatamente a crise energética da década de 1970, gerada por conflitos políticos dos países pertencentes à Organização dos Países Exportadores de Petróleo (OPEP), que alavancou um programa de incentivo à produção de etanol no Brasil. Quando os preços do recurso fóssil e seus derivados subiram de forma exacerbada no mercado mundial, o governo brasileiro optou pela estratégia de aumentar a produção interna de combustíveis, visando diminuir o consumo de petróleo e seus derivados e, com isso, a dependência para com os países exportadores. Como ato concreto, foi instituído por meio do Decreto Lei nº. 76.593/75 o Programa Nacional do Álcool ou Proálcool (BRASIL, 1975).

De acordo com Menezes (1980), o Proálcool tinha como principais propósitos a rápida expansão da produção de etanol no país e sua viabilização como combustível e matéria-prima para a indústria química. A opção imediata foi produzir etanol a partir da fermentação e destilação do caldo de cana-de-açúcar, uma cultura introduzida no país no período colonial que apresentava bom desenvolvimento, *know-how* conhecido e estabilidade de mercado. O Proálcool aprimorou tecnologias agrícolas e industriais para a produção de etanol de cana,

adicionou entre 20 e 25% do biocombustível à gasolina nacional e introduziu no mercado veículos leves de motores operados segundo ciclo Otto com esse mesmo combustível.

No entanto, o sucesso dos primeiros anos do Proálcool estava atrelado a outro fator: os baixos preços vigentes no mercado internacional de açúcar incentivavam a destinação de grande parte da cana-de-açúcar para a produção do etanol, e não para o produto dulcificado (MENEZES, 1980).

No fim da década de 1980, justamente quando o governo decidiu reduzir as políticas de incentivo econômico à produção de etanol, os preços do petróleo sofreram retração e o preço do açúcar cresceu no mercado mundial. Essa conjuntura levou o Proálcool à estagnação. Entre 1985 e 2001, a frota de veículos a etanol hidratado foi reduzindo continuamente. A retomada da produção de etanol ocorreu apenas em 2003, com o advento da tecnologia dos motores *flex*, que funcionam sob qualquer proporção de mistura entre álcool e gasolina. Com isso, o consumo do etanol como combustível retomou a rota de crescimento, superando até mesmo o consumo da gasolina em virtude de seus preços mais acessíveis (NOGUEIRA; COSTA, 2012).

A partir de 2004, mesmo sem subsídios por parte do governo, o etanol brasileiro passou a ser economicamente competitivo com a gasolina, que, à época, custava o equivalente a US\$40 por barril. Em relação aos custos de produção, o etanol de cana era mais barato que os de milho, trigo ou beterraba produzidos em outros países. Além das vantagens econômicas, comprovou-se a melhoria da qualidade ambiental que o uso do etanol trazia às cidades, em comparação mais uma vez à gasolina. Uma substituição de 25% da gasolina por etanol fez com que aditivos à base de chumbo e benzeno fossem eliminados dos combustíveis automotivos, resultando também na diminuição de emissões de monóxido de carbono (CO), hidrocarbonetos (HC) e enxofre (S) (GOLDEMBERG, 2008).

Com as preocupações ambientais mundiais que surgiram a partir da segunda metade do século XX, o etanol conquistou respeito no mercado internacional, adquiriu espaço no mercado interno e o Brasil se tornou referência no mercado de exportações de biocombustíveis, com a propagação constante de sua fama de combustível amigável ao meio ambiente. O programa brasileiro de produção e uso do etanol representa a mais importante iniciativa de energia renovável do mundo (NOGUEIRA; COSTA, 2012).

3.2 Contexto atual do etanol no Brasil

Atualmente, o Brasil é um dos maiores produtores mundiais e o maior exportador de etanol. Em 2012, a produção total de etanol no país foi 23,5 milhões de metros cúbicos (m³), entre etanol anidro e hidratado. No Gráfico 3.1 pode-se observar o comportamento da oferta de etanol na última década e constatar o crescimento impulsionado pelos motores *flex* (2005 a 2008), uma quebra de produção em 2009 e a estagnação e queda do total produzido nas safras seguintes. De acordo com a Agência Nacional do Petróleo, Gás Natural e Biocombustíveis (ANP) (2013), a taxa média anual de crescimento da produção nos últimos dez anos foi de 5,6%. Segundo a Companhia Nacional de Abastecimento (CONAB) (2013a), em 2011, o setor sucroalcooleiro nacional contava com 402 unidades industriais, sendo 4% usinas produtoras exclusivamente de açúcar, 32% destilarias de álcool e 64% usinas mistas.

Gráfico 3.1 - Evolução da produção nacional de etanol anidro e hidratado – 2003-2012

Fonte: ANP, 2013

Em 2012, o Brasil exportou 3,1 milhões de m³ de etanol; destaque-se nesse caso a taxa de comercialização com os Estados Unidos, que correspondeu a 66,7% deste total. O Brasil também importou etanol em 2012, num total de 554 mil m³ – exatos 51,3% a menos do que o ocorrido no ano anterior, momento em que os produtores haviam se deparado com uma importante quebra de safra causada por períodos de chuva e estiagem irregulares. Observe-se aqui que a quase totalidade desses volumes adveio também dos Estados Unidos (AGÊNCIA NACIONAL DO PETRÓLEO, GÁS NATURAL E BIOCOMBUSTÍVEIS, 2013).

Para Nogueira e Costa (2012), há uma justificativa para a dinâmica de importação e exportação de um mesmo produto entre Brasil e Estados Unidos: o etanol americano

apresenta menores preços, devido às condições de subsídio em que é produzido, o que favorece para a equalização da balança comercial brasileira. Já o etanol brasileiro possui atributos de qualidade ambiental melhor do que os do próprio etanol de milho americano, que permitem atender às metas para introdução de biocombustíveis na matriz energética dos EUA.

Devido ao alto consumo de energia no setor de transportes no Brasil, que conta com cerca de um terço do consumo de energia final, o etanol combustível é um importante contribuinte para a matriz energética nacional. O Balanço Energético Nacional de 2012 (EMPRESA DE PESQUISA ENERGÉTICA, 2013) indica que os produtos derivados de cana-de-açúcar contribuem com 17,5% da produção de energia primária, ficando atrás apenas do petróleo, responsável por 41%, assim como está indicado no Gráfico 3.2.

Gráfico 3.2 - Produção de Energia Primária no Brasil – 2012

Fonte: EPE, 2013

De acordo com a ANP (2013), as regiões brasileiras que se destacaram na produção de etanol foram o Sudeste, com 60% da produção total, onde as usinas são mais modernas e utilizam caldeiras com pressão elevada, de 65 a 100 bar, para cogeração, e o Centro-Oeste, com 25,7%, porém com usinas ainda antigas e caldeiras que trabalham com vapor a menores pressões, atingindo 21 ou 22 bar. Em 2011 e 2012, o aumento da produção de etanol anidro em detrimento da de etanol hidratado foi um padrão seguido por quase todas as regiões produtoras do país. A exceção ficou por conta do Centro-Oeste, que teve aumentada tanto a produção de etanol anidro quanto a de etanol hidratado.

3.3 Contexto atual do etanol no estado do Mato Grosso

A introdução da cana-de-açúcar no estado do Mato Grosso data da década de 1730, cuja produção era destinada à fabricação de açúcar e aguardente. A partir de 1966, com a implantação da usina Jaciara, uma empresa pública, a região passou a desenvolver e produzir variedades de cana-de-açúcar adaptadas ao Cerrado. Em 1982, com o incentivo do Proálcool, começaram a ser implantadas usinas de etanol no estado do Mato Grosso, até alcançar o número de 9 usinas atualmente operantes (SINDALCOOL-MT, 2011).

Para a safra de 2011/2012, o estado do Mato Grosso foi responsável pela moagem de cerca de 13 milhões de toneladas de cana-de-açúcar, que se converteram em aproximadamente 400 mil toneladas de açúcar e 845 mil m³ de etanol. Das 9 usinas em funcionamento no estado, 4 delas são destilarias, ou seja, produzem apenas etanol, 4 produzem apenas açúcar e apenas uma é considerada usina mista, que produz ambos os produtos (CONAB, 2013a).

Em relação ao porte das usinas mato-grossenses, segundo CONAB (2013a), a maioria das usinas do estado do Mato Grosso são usinas de menor porte, sendo que 44% delas tem capacidade de moagem de até 1 milhão de toneladas por safra, 11% tem capacidade entre 1 e 1,5 milhões de toneladas, 22% tem capacidade entre 1,5 e 2 milhões e outros 22% tem capacidade de mais de 2 milhões de toneladas. Para a safra 2011/2012, o Mato Grosso respondeu por apenas 2,3% de toda a cana-de-açúcar moída no Brasil e por 3,7% do total de etanol produzido no país.

3.4 Usina Flex

Desde o início da década de 2000, a produção de milho no Mato Grosso cresceu ano a ano, ininterruptamente. Devido ao crescimento da safra de inverno e os ganhos de produtividade resultantes do melhor uso de tecnologias agrícolas, na safra 2011/12 a produção chegou a dobrar em relação à safra anterior, saltando para a produção 15,6 milhões de toneladas (COMPANHIA NACIONAL DE ABASTECIMENTO, 2015). Nesta realidade, a produção de milho do estado passou a superar largamente o consumo regional, gerando

inclusive dificuldades para o produtor estocar e transportar o milho produzido (informação verbal²).

Enquanto a produção de milho no estado do Mato Grosso crescia, a produção de etanol de cana-de-açúcar continuava a apresentar problemas clássicos: a limitação para estoque da matéria-prima vegetal e o aumento dos preços do açúcar no mercado internacional – que desencoraja a produção de etanol de cana, ao ponto de o Brasil importar etanol dos EUA para complemento da demanda. Esta situação gerou interesse entre formuladores de políticas públicas em apoiar a produção de etanol de milho para suprir a crescente demanda de combustível no país (IGLESIAS; SESMERO, 2015).

Com uma logística inadequada para o transporte do produto até o mercado consumidor e com níveis tecnológicos que permitem a produção de milho mais barata do país, os produtores locais enxergaram uma oportunidade. Ao invés de exportar o milho barato passou-se a agregar valor ao produto final na própria região (informação verbal³). Como resultado, milho e sorgo passaram a ser matéria-prima para as usinas de etanol da região a partir de 2011.

A solução veio com a introdução de uma tecnologia pioneira, em que o processo de produção de etanol de grãos aproveita as instalações e recursos energéticos da usina de etanol de cana-de-açúcar. Esse enfoque passou a ser denominado de Usina Integrada, Usina Flexível ou Usina “Flex”. Dessa forma, resolvia-se também um problema enfrentado pelos usineiros: a ociosidade das usinas de etanol no período da entressafra da cana (IGLESIAS; SESMERO, 2015; informação verbal⁴).

A produção do etanol de cana-de-açúcar restringe-se ao período de colheita da matéria-prima, que dura entre 180 e 210 dias por ano. Com o novo ativo, uma destilaria autônoma poderia operar por até 11 meses consecutivos dentro de um mesmo ano agrícola. Dessa forma, a usina diminuirá a sua ociosidade uma vez que os equipamentos comuns aos dois processos podem ser compartilhados, como a caldeira e sistema de cogeração, as colunas de fermentação e destilação, entre outros (SOBRINHO, 2012). A Figura 3.1 ilustra a integração simplificada das plantas e o aproveitamento dos equipamentos já existentes na usina de etanol de cana-de-açúcar. A estrutura da planta pode variar de acordo com os arranjos e tecnologias de operação escolhidos.

² Informação fornecida por Giannini, no I Fórum Brasileiro de Etanol de Milho e Sorgo, em Sorriso, MT, em 27 set 2013.

³ Informação fornecida por Glauber Silveira, no I Fórum Brasileiro de Etanol de Milho e Sorgo, em Sorriso, MT, em 27 set 2013.

⁴ Informação fornecida por Alfredo Scholl, no I Fórum Brasileiro de Etanol de Milho e Sorgo, em Sorriso, MT, em 27 set 2013.

Figura 3.1. Esquema ilustrativo de uma Usina Flex ou Usina Integrada

Segundo Camloffski (informação verbal⁵), a integração das plantas de produção de etanol de fontes amilácea e sacarina pode ocorrer por, pelo menos, três arranjos diferentes. A escolha dependerá de fatores como localização, condições de mercado, capacidade, perfil de investimento etc. A tecnologia da planta é que definirá o período máximo de produção de etanol de milho.

A primeira opção de integração das plantas ocorre com *fermentações independentes e moagem de grãos na entressafra da cana*. Neste caso, a produção de etanol de cana ocorre de abril a novembro, por cerca de 7 meses, e o etanol de amido complementa a produção na entressafra, por aproximadamente 4 meses. Neste arranjo, os equipamentos e instalações destinados à geração de vapor e eletricidade, as dornas de fermentação e as colunas de destilação podem ser utilizadas por ambos processos. Além disso, o combustível produzido pelo processo de moagem da cana-de-açúcar - o bagaço - pode ser utilizado para a produção

⁵ Informação fornecida por Diego Camloffski, no I Fórum Brasileiro de Etanol de Milho e Sorgo, em Sorriso, MT, em 27 set 2013.

de energia do processo de etanol de grãos. Esta é a alternativa que exige menores investimentos e adaptações à planta. (informação verbal¹¹)

A segunda opção ocorre com *fermentações independentes e moagem de grãos e cana em paralelo*. Por terem moagem em paralelo, o etanol de grãos pode ser produzido por cerca de 10 meses, já que, diferente da cana, os grãos podem ser estocados. O etanol de cana será produzido por cerca de 7 meses, conforme suas limitações. Para tanto, os equipamentos destinados à cogeração energética serão compartilhados pelos dois processos e as colunas de destilação exigirão uma ampliação. No entanto, o bagaço utilizado como combustível para a geração de energia não será suficiente para suprir os dois processos em paralelo, sendo necessária a suplementação de outro combustível, como cavaco de madeira, por exemplo. (informação verbal⁶).

Por fim, é possível ainda a integração com *fermentação unificada e moagem de grãos e cana em paralelo*. Esta possibilidade também permite produção de etanol de grãos por 10 meses e de cana por 7 meses. Em relação à infraestrutura, os equipamentos de cogeração podem ser compartilhados, assim como as dornas de fermentação e colunas de destilação, e o combustível deve ser suplementado. Essa rota, no entanto, exige uma modificação em relação ao processo tradicional “*dry milling*”, descrito no capítulo anterior. Para que o caldo clarificado da cana-de-açúcar e o mosto de amido do milho ou sorgo possam ser misturados e fermentados juntos, o mosto de amido deve passar pelo processo de retirada dos sólidos antes de ser direcionado aos fermentadores. O mosto segue da sacarificação para a etapa de separação de sólidos e líquidos, em que será centrifugado e seguirá sem sólidos para as dornas de fermentação. O coproduto DDG será gerado nesta etapa, após secagem dos sólidos. (informação verbal¹²).

Há ainda a possibilidade de implantação de uma usina completa de etanol de milho e sorgo, sem integração com a usina de etanol de cana, ao que se denomina “*Green Field*”. Por usar matéria-prima que pode ser estocada, o *Green Field* pode produzir etanol o ano todo e poderá seguir tanto o processo por *dry milling* quanto por *wet milling*. Por outro lado, a iniciativa exigirá os investimentos necessários para a construção de uma planta completa.

⁶ Informação fornecida por Diego Camloffski, no I Fórum Brasileiro de Etanol de Milho e Sorgo, em Sorriso, MT, em 27 set 2013.

3.5 Processos de produção do etanol

3.5.1 Matérias-primas para produção de etanol

De acordo com Pereira Junior (2008), uma grande variedade de matérias-primas pode ser usada como fonte de energia para o processo de fermentação. Estas podem ser agrupadas de acordo com a estrutura e a complexidade molecular dos substratos, nas seguintes categorias: substratos solúveis, que podem ser facilmente extraídos e convertidos diretamente ao etanol, como a sacarose, glicose, frutose e lactose, presentes na cana-de-açúcar, beterraba, melaço, soro de leite etc.; e polissacarídeos insolúveis, que precisam de tratamento moderado para solubilização e hidrólise antes da conversão ao etanol, casos dos amidos de milho e sorgo, da mandioca, do trigo, cevada, batata etc.

Completam a mesma classificação os polissacarídeos insolúveis altamente resistentes, que necessitam de pré-tratamento físico, seguido de hidrólise química ou enzimática para produzir substratos na forma monomérica que serão convertidos em combustível, como a celulose e a hemicelulose de matérias-primas lignocelulósicas, oriundas de vegetais. Um esquema geral das classes de fontes de energia para o processo de fermentação aparece indicado a seguir na Figura 3.2.

Figura 3.2 - Matérias-primas e seus processos para produção de etanol

Fonte: Pereira Junior, 1991 apud Barcelos, 2012.

As características fundamentais da cana-de-açúcar, do milho e do sorgo, matérias-primas que, atualmente, mostram maior viabilidade para a produção de etanol em usinas integradas do Mato Grosso e, portanto, foram consideradas neste trabalho, são apresentadas a seguir.

3.5.1.1 Cana-de-açúcar

A cana-de-açúcar (*Saccharum officinarum* L.) (Figura 3.3) é um vegetal da família Poaceae, a família das gramíneas, e sua origem geográfica é atribuída ao sudeste asiático. Da cana-de-açúcar pode-se produzir açúcar, álcool e aguardente. Além destes, o vegetal gera os coprodutos bagaço, vinhaça e torta de filtro, de grande importância socioeconômica na geração de energia, produção de ração animal, produtos aglomerados, fertilizantes, entre outros (AGUIAR, et al., 2014).

Figura 3.3 - *Saccharum officinarum* L.
Fonte: Navez, 2007.

A cana-de-açúcar é considerada uma planta extremamente eficiente do ponto de vista de conversão energética. Isso se deve, principalmente, ao metabolismo que a cana e diversas outras gramíneas apresentam, chamado metabolismo C4.

O mecanismo C4 permite que as folhas capturem moléculas de CO₂ da atmosfera e as armazenem em moléculas de 4 carbonos – ao invés de moléculas de 3 carbonos, como ocorre nas plantas de metabolismo C3 – que são disponibilizados para a fotossíntese. Esta simples modificação acarreta em uma concentração maior de átomos de carbono disponíveis para

serem metabolizados, tornando a planta menos dependente da abertura e fechamento dos estômatos (organela responsável pelas trocas gasosas da folha), o que diminui as perdas de água pelas folhas. Esta característica garante vantagens à planta que se encontra em regiões de altas luminosidade e temperatura e baixa umidade durante o dia, como é o caso dos campos de cerrado que ocorrem amplamente no Brasil. Isso justifica a ótima adaptação que a cana-de-açúcar apresenta em território brasileiro e demais regiões tropicais do mundo. (BUCKERIDGE, 2015).

Em 2013, o Brasil foi o maior produtor de cana-de-açúcar do mundo, seguido pela Índia e pela China (FOOD AND AGRICULTURE ORGANIZATION OF UNITED NATIONS STATISTICS DIVISION, 2015). O Brasil produziu 588,9 milhões de toneladas de cana-de-açúcar na safra 2012/2013 (COMPANHIA NACIONAL DE ABASTECIMENTO, 2015), conforme apresentado na Tabela 3.1. O estado de São Paulo (SP) foi o principal produtor de cana-de-açúcar do país, sendo responsável por 56% da produção brasileira. Na sequência, os estados com maior participação na produção de cana nacional foram Goiás (GO), Minas Gerais (MG), Paraná (PR), Mato Grosso do Sul (MS), Alagoas (AL) e Mato Grosso (MT). Os outros estados correspondem a menos do que 3% da produção do país. Com isso, 91% da produção de cana-de-açúcar está localizada no eixo Centro-Sul e apenas 9% está na macrorregião Norte-Nordeste.

Dentre os estados de destaque na produção de cana-de-açúcar, os estados de Mato Grosso e Goiás apresentaram os maiores incrementos na produção de 2012/13 em relação à de 2011/12, com crescimento de 24% e 17%, respectivamente (Tabela 3.1). A produtividade média da cultura para a região Centro-Sul do Brasil em 2012/13 foi 72,4 t/ha (COMPANHIA NACIONAL DE ABASTECIMENTO, 2015). A cana-de-açúcar é considerada uma cultura semi-perene, por ser capaz de apresentar boa produtividade por até 6 anos de produção. No primeiro ano de produção, a cultura recebe tratamentos diferenciados e é chamada de ‘cana-planta’. Ao fim deste primeiro ciclo, a cana é colhida e continua produzindo a partir de rebrotas por, pelo menos, mais cinco ciclos. A estas, dão-se o nome de ‘cana-soca’. (AGUIAR, et al., 2014).

A produção agrícola de cana-de-açúcar conta com etapas básicas, iniciadas pela escolha do cultivar em relação às adaptações a características edafoclimáticas, tecnologia dos tratamentos agrícolas e épocas de colheita. Em seguida ocorre o preparo do solo, que pode ser convencional, preparo mínimo ou “sem preparo”, no caso do plantio direto. (AGUIAR, et al., 2014). O preparo de solo convencional condiciona o processo a uma série de atividades mecanizadas com revolvimento de solo, como nivelamento, descompactação, gradação,

aração etc., e aplicação de calcário para correção de pH do solo. O preparo mínimo conta com poucas operações de revolvimento de solo e aplicação de calcário. O plantio direto não realiza revolvimento de solo, resumindo as atividades de preparo à aplicação de calcário para correção do solo e manutenção da palhada no campo.

Tabela 3.1 - Produção de Cana-de-Açúcar por estado no Brasil, para as safras 2011/12 e 2012/13, em mil toneladas

REGIÃO/UF	2011/12	2012/13
	em mil toneladas	
NORTE	2.529,3	2.957,4
RO	157,1	125,1
AC	52,6	70,3
AM	287,0	266,5
PA	666,4	695,3
TO	1.366,2	1.800,2
NORDESTE	63.487,8	52.972,2
MA	2.265,6	2.072,0
PI	992,0	828,1
CE	77,4	57,0
RN	2.973,3	2.247,8
PB	6.723,1	5.354,9
PE	17.642,2	13.575,9
AL	27.705,4	23.533,5
SE	2.551,5	2.219,3
BA	2.557,3	3.083,8
CENTRO-OESTE	92.233,6	106.001,3
MT	13.153,7	16.319,0
MS	33.859,8	36.955,2
GO	45.220,1	52.727,2
SUDESTE	362.089,9	387.228,3
MG	50.241,8	51.208,0
ES	4.003,8	3.431,6
RJ	2.207,9	1.893,8
SP	305.636,4	330.694,9
SUL	40.614,6	39.756,4
PR	40.519,5	39.723,5
RS	95,1	32,9
NORTE/NORDESTE	66.017,1	55.929,7
CENTRO-SUL	494.938,1	532.986,0
BRASIL	560.955,2	588.915,7

Fonte: CONAB, 2015

O plantio é realizado aproximadamente a cada 6 anos por mudas cortadas e distribuídas nos sulcos, que serão propagadas vegetativamente. Os períodos de plantio dependem do ciclo do cultivar, em geral, levam um ano ou um ano e meio até a maturação. A cana-planta exige fertilização de macronutrientes – nitrogênio (N), fósforo (P) e potássio (K) – e micronutrientes em dois momentos: a fertilização de sulco, realizada no plantio, e a de cobertura, realizada no pós-plantio; a cana-soca também exige fertilização de macronutriente, aplicados após a colheita do ciclo anterior (AGUIAR, et al., 2014). Também são aplicadas a torta de filtro e a vinhaça, coprodutos gerados na etapa industrial de produção de etanol e açúcar, que servem como complementação à fertilização do solo (informação pessoal⁷).

As plantas devem receber tratamento com aplicação de pesticidas, de preferência com rotação de princípios ativos, a fim de protegê-las das principais doenças e pragas. Para uniformizar o período de colheita podem ser utilizados maturadores e reguladores de crescimento, para que os colmos de cana sejam colhidos no estágio máximo de açúcares disponíveis na planta. (AGUIAR, et al., 2014).

A colheita pode ocorrer de duas formas, colheita manual, com queima prévia da palhada, ou colheita mecanizada, com ou sem queima da palhada. As colheitas manuais vêm sendo substituídas pelas mecanizadas sem queima prévia de forma a reduzir os impactos socioambientais gerados pela queima da palhada. Para viabilizar a mecanização do corte e o transporte da cana, a colheita deve ocorrer após o período de chuvas. Além disso, a cana-de-açúcar não pode ser estocada. O ideal é que seu processamento ocorra poucas horas após a colheita, de forma a maximizar a extração do açúcar, já que a concentração de sacarose começa a diminuir imediatamente após o corte da planta. (AGUIAR, et al., 2014; informação pessoal⁸). Na colheita manual os colmos de cana são transportados inteiros até a usina, enquanto na colheita mecanizada a cana é cortada e picada pelas colheitadeiras e transportada nessa condição (AGÊNCIA NACIONAL DE ÁGUAS et al., 2009).

Após o período de seis anos de produção, a produtividade das plantas já diminuiu o suficiente para que o ciclo seja encerrado. Um novo preparo de solo é conduzido na área a fim de que um novo ciclo produtivo seja iniciado. A esta atividade de preparo dá-se o nome de *Reforma*, empregada para a melhoria das condições físicas do solo.

⁷ Informação recebida por Nogueira, V. em Campos de Julio, em 2013.

⁸ Informação recebida por Nogueira, V. em Campos de Julio, em 2013.

3.5.1.2 Milho

O milho (*Zea mays* L.) (Figura 3.4) é uma espécie pertencente à Família Poacea e tem como provável origem geográfica o México. É uma planta anual que, no Brasil, pode ser cultivada tanto no verão, quanto na segunda safra (milho safrinha). O consumo dos grãos pode ser feito diretamente, como os casos do milho verde consumido em grãos *in natura* e do milho de pipoca, ou na indústria, onde serão extraídos o óleo e o amido e transformados em inúmeros ingredientes, alimentícios ou não, e rações animais. (AGUIAR, et al., 2014).

Como característica fisiológica, o milho apresenta taxa fotossintética elevada pois, assim como a cana-de-açúcar, apresenta metabolismo C4 e todas as vantagens adaptativas que advém deste sistema. Além disso, para o caso do milho, a alta radiação solar é um parâmetro de grande importância, especialmente para a etapa de maturação dos grãos, que tem relação direta com a taxa de fotossíntese (PEREIRA FILHO, 2015).

Figura 3.4 - *Zea Mays* L.

Fonte: Zell, 2010.

De acordo com a FAO (2015), os três principais países produtores de milho em 2013 foram Estados Unidos (EUA), China e Brasil. O Brasil produziu 81,5 milhões de toneladas de milho nas safras 2012/13 (Tabela 3.2). Destes, 34,6 milhões de toneladas foram produzidas como primeira safra, especialmente nos estados do Sul, nas regiões de fronteira entre Minas Gerais (MG) e Goiás (GO) e oeste da Bahia (BA). A segunda safra foi responsável pela produção de 46,9 milhões de toneladas, concentradas no estado do Mato Grosso (MT), que contribui sozinho com 41% da produção nacional, no Paraná (PR), no sul de Goiás (GO) e sul do Mato Grosso do Sul (MS). A produtividade média no Brasil para o milho de primeira safra

foi 5,10 t/ha e para o de segunda safra foi 5,19 t/ha, em 2012/13 (COMPANHIA NACIONAL DE ABASTECIMENTO, 2013b, 2015).

Tabela 3.2 - Produção de Milho 1ª e 2ª safras e total por estado no Brasil, para a safra 2012/13, em mil toneladas

REGIÃO/UF	2012/13		Total
	1ª safra	2ª safra	
	em mil toneladas		
NORTE	1.145,6	526,6	1.672,3
RR	13,0	-	13,0
RO	167,5	334,0	501,6
AC	111,6	-	111,6
AM	30,8	-	30,8
AP	1,9	-	1,9
PA	565,6	-	565,6
TO	255,2	192,6	447,8
NORDESTE	2.779,8	2.080,0	4.859,8
MA	746,0	563,4	1.309,4
PI	489,5	53,3	542,8
CE	98,1	-	98,1
RN	4,7	-	4,7
PB	26,3	-	26,3
PE	15,8	-	15,8
AL	-	21,9	21,9
SE	-	941,5	941,5
BA	1.399,4	499,9	1.899,3
CENTRO-OESTE	4.114,4	31.796,2	35.910,6
MT	535,2	19.357,8	19.893,0
MS	369,6	7.451,1	7.820,7
GO	2.879,2	4.816,9	7.696,1
DF	330,4	170,4	500,8
SUDESTE	10.637,5	2.040,2	12.677,7
MG	6.834,4	617,8	7.452,2
ES	61,4	-	61,4
RJ	13,3	-	13,3
SP	3.728,4	1.422,4	5.150,8
SUL	15.899,4	10.485,9	26.385,3
PR	7.156,5	10.485,9	17.642,4
SC	3.359,4	-	3.359,4
RS	5.383,5	-	5.383,5
NORTE/NORDESTE	3.925,4	2.606,6	6.532,1
CENTRO-SUL	30.651,3	44.322,3	74.973,6
BRASIL	34.576,7	46.928,9	81.505,7

Fonte: CONAB, 2015

Atualmente, a quantidade de milho produzida em sistema de segunda safra excede a produzida em primeira safra. A prática mais comum conta com a soja como cultura principal, sendo plantada no início da estação chuvosa, tipicamente no mês de outubro, e colhida entre os meses de janeiro e fevereiro. Na sucessão da soja, entre janeiro e o início de março, é plantado o milho como cultura de inverno, que será colhido entre junho e julho. Os meses entre julho e outubro são meses de descanso da terra, a qual é mantida sob a palhada do milho até que o ciclo seja reiniciado com a plantação da soja. A palhada que fica no solo tem a função de protegê-lo de intempéries e evitar impactos causados pelo uso excessivo de maquinários agrícolas, aumenta o teor de matéria orgânica no solo e reduz a taxa de erosão. O sistema plantio direto exige poucas atividades de preparo de solo, resumindo-as a, além da manutenção da palhada no solo, aplicação calcário dolomítico a cada período de, aproximadamente, 5 anos. (PEREIRA FILHO, 2015).

As sementes de milho são previamente tratadas com inseticidas e o plantio ocorre em atividade completamente mecanizada. A cultura exige adubações de macronutrientes (N, P, K e S) no plantio e aplicação de N na adubação de cobertura, durante a condução da cultura. No geral, o cultivo do milho safrinha exige menor aporte de fertilizantes do que o milho cultivado na primeira safra, mesmo para se atingir a mesma produtividade. A condução exige a aplicação de herbicidas, inseticidas e fungicidas para se evitar a incidência de pragas. Por fim, a colheita do milho é completamente mecanizada, extraindo-se os grãos e mantendo a palhada e restos culturais no campo. (AGUIAR et al., 2014).

Os grãos colhidos seguem para a última etapa, o beneficiamento, que fornece as condições necessárias para que os grãos sejam estocados. Nesta atividade, ocorrem a pré-limpeza, a partir de peneiras classificatórias e secagem dos grãos até alcançarem o teor de umidade entre 12% e 14% (PEREIRA FILHO, 2015).

3.5.1.3 Sorgo

O sorgo (*Sorghum* ssp.) também é uma planta pertencente à Família Poacea, com metabolismo do grupo C4 e eficiência fotossintética comum a esta condição, já descrita nos itens destinados à cana e ao milho. Esta planta apresenta elevada produção de biomassa e é indicado para ambientes com restrição hídrica (AGUIAR et al., 2014).

No mercado estão disponíveis diversas variedades e híbridos, indicados para vários fins. O *sorgo sacarino* apresenta porte alto e tem potencial para a produção de biomassa

vegetal. Esta variedade pode apresentar colmos suculentos com presença de açúcares fermentescíveis, destinado para a fabricação de etanol, ou ainda, colmos secos, chamados de *sorgo biomassa*, destinado à cogeração de energia elétrica e etanol de segunda geração. Já o *sorgo forrageiro* é utilizado principalmente para pastejo, fenação, corte verde e cobertura morta. Há, também, o *sorgo vassoura*, que ganha esse nome por suas panículas serem usadas na confecção de vassouras. Por fim, o *sorgo granífero* apresenta porte baixo, adaptado à colheita mecanizada e é destinado à obtenção dos grãos amiláceos, geralmente remetidos à alimentação animal, mas servindo também para a alimentação humana e produção de etanol a partir da fermentação do amido em seus grãos. Os grãos e silagem produzidos a partir do sorgo granífero apresentam valores nutritivos próximos aos do milho. (RODRIGUES, 2008; AGUIAR et al., 2014).

Dos quatro grupos antes enunciados, o sorgo granífero (*Sorghum bicolor* L. Moench), ilustrado pela Figura 3.5, é o que tem maior expressão econômica e está entre os cinco cereais mais cultivados em todo o mundo, ficando atrás apenas do arroz, trigo, milho e cevada (RODRIGUES, 2008).

Segundo a FAO (2015), em 2013 os maiores produtores de sorgo no mundo foram Estados Unidos, Nigéria e México. O Brasil aparece em décimo lugar na lista de maiores produtores de sorgo. A produção brasileira para a safra 2012/13 foi de 2,1 milhões de toneladas, tendo Goiás (GO) como o estado com maior produção, seguido por Minas Gerais (MG) e Mato Grosso (MT) (Tabela 3.3). A produtividade média do sorgo no Brasil foi 2,62 t/ha na safra 2012/13 (COMPANHIA NACIONAL DE ABASTECIMENTO, 2015).

Figura 3.5 - *Sorghum bicolor* L. Moench
Fonte: Döhne, 2008.

Nas últimas décadas, o Brasil teve sua produção bastante alavancada na região Centro-Oeste, devido, principalmente, à adoção do sistema de plantio direto e rotação de culturas, em que o sorgo produz boa palhada para a cobertura do solo, condição exigida por tal sistema, e por representar menores riscos como cultura de inverno, uma vez que o sorgo é mais resistente ao estresse hídrico do que o milho (RODRIGUES, 2012).

Tabela 3.3 - Produção de Sorgo por estado no Brasil, para a safra 2012/13, em mil toneladas

REGIÃO/UF	2012/13 em mil toneladas
NORTE	36,7
TO	36,7
NORDESTE	36,7
PI	1,5
CE	0,3
RN	1,9
PB	0,2
PE	0,5
BA	32,3
CENTRO-OESTE	1.418,5
MT	445,00
MS	39,7
GO	900,2
DF	33,60
SUDESTE	539,6
MG	472,0
SP	67,6
SUL	70,0
RS	70,0
NORTE/NORDESTE	73,4
CENTRO-SUL	2.028,1
BRASIL	2.101,5

Fonte: CONAB, 2015.

Assim como o milho, o sorgo granífero pode ser produzido em duas safras por ano: na safra de verão, como cultura principal na estação chuvosa; e na safra de inverno, como segunda cultura na estação seca. As plantações de sorgo como primeira safra ocorrem em menor frequência que as em segunda safra, restringindo-se quase sempre à região nordeste e o estado do Rio Grande do Sul (RS).

Nas regiões em que o sorgo é plantado como segunda safra, o grão costuma atuar como um substituto do milho, basicamente por dois motivos: ou por ser uma área considerada de alto risco para o cultivo do milho, já que o sorgo apresenta maior resistência à seca, ou em decorrência de atrasos no plantio da segunda safra, já que o sorgo apresenta um janela agrícola menor do que o milho, ou seja, completa o ciclo produtivo mais rapidamente e pode ser colhido na época indicada (MENEZES, 2015; informação pessoal⁹).

Seguindo a tecnologia de plantio direto, as etapas de preparo do solo, plantio, condução e colheita do sorgo são bastante semelhantes às do milho. Para a fertilização, no entanto, para se atingir as mesmas produtividades, o sorgo exige maiores aplicações dos macronutrientes P e K do que o milho no plantio, e maiores quantidade de N na adubação de cobertura (AGUIAR et al., 2014). Apesar disso, na prática, o sorgo tende a receber menos investimentos de insumos do que a cultura do milho, justamente por ser comumente plantada como uma cultura substituta. Um exemplo disso está na fertilização, a cultura do sorgo pode receber aplicação menor ou nenhuma aplicação de fertilizante no plantio, restringindo-se apenas à adubação nitrogenada (MENEZES, 2015; informação pessoal⁴).

3.5.2 Produção industrial do etanol

A fermentação alcoólica é um processo biológico em que enzimas presentes em leveduras transformam açúcares de cadeias média e longa, como glicose, frutose e sacarose, em energia celular. Nesse processo, etanol e dióxido de carbono (CO₂) são formados como resíduos metabólicos. A apropriação desse *know-how* de processamento, e sua ampliação de escala, fizeram com que o etanol expandisse sua gama de aplicações industriais, dentre elas a aplicação como combustível.

Neste item, serão apresentados os processos de obtenção do etanol por fermentação de dois tipos de fontes de açúcares, as fontes sacarinas e as amiláceas, contemplando, assim, a obtenção do combustível por cana-de-açúcar e por milho e sorgo, respectivamente. Serão exploradas e apresentadas as condições de produção mais comuns ou mais viáveis para o estado do Mato Grosso, que é a região de interesse deste estudo e uma das regiões que demonstram maior viabilidade para a integração destes processos em uma usina integrada.

⁹ Informação recebida por Rostirolla em Campos de Julio, em 2013.

3.5.2.1 Produção de etanol de fonte sacarina

O Brasil é o maior produtor de etanol de cana-de-açúcar do mundo. Os índices médios de produtividade industrial para a produção de etanol ficaram em 83,3 litros (L) por t de cana para etanol hidratado e 80 L/t de cana para etanol anidro na safra de 2011/12 (COMPANHIA NACIONAL DE ABASTECIMENTO, 2013a). O processo de produção de etanol tem início com a recepção da cana-de-açúcar na destilaria. Nesta etapa, a produção vegetal é pesada e são retiradas amostras de material para análise do teor de sacarose. Estes testes servem para, além de determinar a qualidade da matéria-prima recebida, orientar o controle da moagem e o cálculo do rendimento industrial. Em seguida, o caminhão descarrega a cana no pátio da usina e um conjunto de equipamentos elétricos - que inclui guindastes do tipo *Hillo*, carro e garra para translocar a cana até a mesa de elevação da cana até a esteira - é responsável por direcionar a cana para a limpeza. (AGÊNCIA NACIONAL DE ÁGUAS et al., 2009).

A etapa de limpeza dependerá da forma que a cana foi colhida. As colheitas mecanizadas permitem a recepção da cana já picada, exigindo apenas a limpeza com sopragem de ar para a retirada de impurezas vegetais. As colheitas manuais exigem que os colmos passem por um processo de lavagem. Tal cuidado se faz necessário devido à presença de terra carregada junto com a cana nas etapas de colheita e transporte (AGÊNCIA NACIONAL DE ÁGUAS et al., 2009). Neste processo, a água de lavagem é utilizada em reciclo e passa por tratamento em sistema de caixas de areia, com adição de cal e polímeros (informação pessoal¹⁰).

Depois de lavados, os colmos de cana são carregados por esteira, passam por eletroímã, a fim de que seja retirado qualquer tipo de metal que acompanhe o produto e que possa causar danos às moendas e demais equipamentos. Deste ponto a cana segue para o picador e desfibrilador. O primeiro tem a função de reduzir a cana a pedaços menores e o segundo, um conjunto de martelos, tem a função de desfibrar os pedaços de colmo, de forma a expor as fibras e romper as células para facilitar a extração do caldo. (PALACIO, 2010; AGÊNCIA NACIONAL DE ÁGUAS et al., 2009).

Depois de preparada, a cana segue para as moendas ou para difusores, onde ocorre a extração do caldo. A extração por moenda é o método mais utilizado no Brasil e utiliza conjuntos de ternos, ou seja, conjuntos de rolos de esmagamento (PALACIO, 2010). Para facilitar a extração, a este processo é adicionada água para embebição. Também são aplicados

¹⁰ Informação recebida por Nogueira, V. em Campos de Julio, em 2013.

biocidas para evitar contaminações que venham a prejudicar a qualidade do caldo. Quando são utilizados difusores no lugar de moendas não ocorre esmagamento, o caldo é extraído pelo fenômeno de difusão, no qual duas soluções de diferentes concentrações separadas por membrana permeável tendem a adquirir a mesma concentração com o tempo (PALACIO, 2010). Neste método, também ocorre a adição de água de embebição, mas com mais recirculações de caldo do que a extração por moagem. No final do difusor a massa passa por um conjunto de moenda para extrair o caldo residual do bagaço (AGÊNCIA NACIONAL DE ÁGUAS et al., 2009). Ao fim da extração do caldo são obtidos dois produtos: bagaço e caldo misto. O bagaço gerado segue para a caldeira para ser usado como combustível do sistema de cogeração e o caldo misto, uma composição entre o teor de água da cana, os sólidos solúveis e a água de embebição, segue para o tratamento e concentração.

O tratamento do caldo tem por objetivo eliminar suas impurezas por processo físico-químico. Nesta etapa ocorrem os processos de peneiramento, caleação, aquecimento e decantação, onde recebe aplicações de coagulantes, floculantes e reguladores de pH, para que as impurezas sejam arrastadas para o fundo do tanque por sedimentação (PALACIO, 2010). Este sedimento, também chamado de lodo, segue para o filtro rotativo com o intuito de ter açúcares recuperados. O filtro rotativo funciona a vácuo, onde uma quantia de água aplicada arrasta os açúcares do lodo para retornarem ao caldo tratado e, na retirada dessa água com açúcares, o lodo se torna um torta úmida, que é recolhida por caminhão e levada ao campo de cultivo de cana para ser usada como fertilizante (AGÊNCIA NACIONAL DE ÁGUAS et al., 2009). O caldo resultante do decantador ganha o nome de caldo clarificado e segue para o evaporador com o objetivo de eliminar a água excedente, que foi adicionada para embebição nas moendas. A água evaporada neste processo é reutilizada no sistema, ganhando o nome de vapor vegetal.

O caldo clarificado concentrado é o resultado final da etapa de tratamento do caldo. Porém, antes de seguir para a fermentação, este passa por um trocador regenerativo com o caldo misto a fim de que o caldo concentrado ceda calor indiretamente ao caldo misto, suplementando seu aquecimento. Além de economizar energia no aquecimento do caldo misto, essa etapa é importante para diminuir a temperatura do caldo concentrado a ser fermentado, já que a etapa seguinte exige condições controladas de temperatura, por se tratar de uma reação que envolve organismos vivos (informação pessoal¹¹).

¹¹ Informação recebida por Nogueira, V. em Campos de Julio, em 2013.

A fermentação pode ser feita por batelada ou de forma contínua, ou pela associação das duas. O processo de fermentação mais utilizado nas destilarias do Brasil é o *Melle-Boinot*, que tem como característica principal a recuperação de leveduras (*Sacharomyces sp*) através da centrifugação do mosto fermentado (AGÊNCIA NACIONAL DE ÁGUAS et al., 2009). A mistura do mosto é iniciada com o preparo do pé-de-cuba, em que o leite de levedura recuperado é tratado com antissépticos e diluído em água. O processo de fermentação ocorre em dornas, com a mistura do pé-de-cuba e do caldo com concentração ajustada para a fermentação. A reação de fermentação nas dornas duram entre 6 e 8 horas, quando praticamente todo o açúcar é convertido em etanol (AGÊNCIA NACIONAL DE ÁGUAS et al., 2009). Por ser uma reação exotérmica, a reação de fermentação deve estar sob resfriamento constante. Outro produto da fermentação é o CO₂, que passa por lavadores de gases a fim de ter recuperado o etanol por ele arrastado. Este CO₂ pode ser também recuperado e vendido para outros fins, ou simplesmente descartado na atmosfera.

Após a recuperação das leveduras, o mosto fermentado ganha o nome de vinho e segue para as colunas de destilação, onde serão separadas as substâncias desta mistura. O vinho é composto, basicamente, por água, etanol, etanóis superiores, ácido acético e aldeídos. Para a separação, primeiramente o vinho é conduzido para a coluna “A”, onde é injetado vapor e obtém-se a vinhaça, o etanol de segunda com grau alcoólico entre 92° e 94°GL e, em maior quantidade, a flegma, uma mistura de vapores hidroalcoólicos de 45° a 50°GL. A flegma é direcionada à coluna “B”, de retificação, para elevar o grau alcoólico e eliminar as impurezas ainda existentes. Como resultado desta coluna, tem-se o etanol hidratado com 95,1°GL, flegmaça (resíduo da retificação da flegma), o óleo fúsel (mistura de impurezas) e etanol de segunda. O processo pode seguir, caso a intenção seja produzir etanol anidro, com 99,3°GL. Para isso, o etanol hidratado segue para a coluna “C” de destilação onde, com o uso de ciclohexano, será retirada a água do etanol. (AGÊNCIA NACIONAL DE ÁGUAS et al., 2009). O etanol é, então, resfriado e armazenado para posterior comercialização. A vinhaça e a flegmaça seguem para um tanque em que serão diluídas com águas residuais da unidade. Esta vinhaça diluída é levada ao campo e aplicada nas áreas de produção de cana-de-açúcar, suplementando a fertilização, já que o composto apresenta potássio em sua composição.

Toda a energia consumida pelo processo de produção de etanol, seja na forma mecânica, térmica ou elétrica, é produzida na própria usina. A geração de calor e potência ocorre num processo de cogeração, utilizando-se o bagaço da cana-de-açúcar (resultante da etapa de moagem) como combustível baseado no processo termodinâmico conhecido por Ciclo Rankine (GUERRA et al, 2014). Neste processo, o bagaço é queimado na caldeira e

gera vapor, que é expandido em uma turbina, que transforma parte da energia contida no vapor em energia mecânica e esta é convertida em elétrica no gerador acoplado à turbina à vapor. O vapor que deixa o escape da turbina é utilizado como fonte de energia térmica para o processo e, após o seu uso, é condensado e retorna para a caldeira para reiniciar o ciclo. (AGÊNCIA NACIONAL DE ÁGUAS et al., 2009).

A maioria das usinas gera vapor com pressão de 22 bar e 300°C de temperatura. Nessas condições, o vapor gerado é suficiente para suprir todas as demandas energéticas da planta e produz um pequeno excedente de bagaço e energia elétrica. No entanto, usinas mais modernas têm optado por caldeiras que geram vapores de alta pressão, geralmente de 65 bar a 90 bar, capazes de gerar grandes excedentes de energia elétrica que pode ser vendida e exportada para a rede elétrica nacional. (AGÊNCIA NACIONAL DE ÁGUAS et al., 2009).

3.5.2.2 Produção de etanol de fonte amilácea

Os EUA são o maior produtor de etanol do mundo e tem seu processo de produção baseado no milho como matéria-prima, dominando a tecnologia de etanol por fonte amilácea. Os índices de produtividade industrial para etanol de milho americano situam-se entre 372 e 402 L/t de milho (CLEAN FUELS DEVELOPMENT COALITION, 2015). As refinarias de milho americanas são capazes de produzir produtos intermediários a partir do milho para diversos fins, que variam desde alimentos, ração animal, adoçantes, balas e confeitos, até produtos de limpeza, cosméticos, papel, tecidos e etanol, entre muitos outros (CORN REFINERS ASSOCIATION, 2011).

A tecnologia para exploração do milho para produção de etanol também é dominada pelos Estados Unidos e consiste na transformação do amido em açúcar e, então, do açúcar em etanol. Segundo Wang et al (2008), pesquisadores e produtores americanos vêm mostrando que o grão do sorgo também é uma matéria-prima viável para a produção de etanol, graças à sua aceitação tecnológica, adaptação à infraestrutura implantada e viabilidade econômica. O rendimento do etanol de sorgo granífero é semelhante ao rendimento do etanol de milho, no entanto, o seu processo de produção é menos estudado e o processo de melhoramento genético de variedades foi menos desenvolvido. Atualmente, cerca de 95% do etanol norte-americano é produzido a partir do milho e 4% é a partir do sorgo granífero (WANG et al., 2008).

Duas são as principais tecnologias vigentes de produção de etanol por fontes amiláceas: a produção por “*dry milling*” ou moagem via seca e a produção por “*wet milling*” ou moagem via úmida. A via seca é a rota de menor custo, maior produtividade de etanol e mais utilizada nas plantas norte americanas, enquanto a via úmida é menos utilizada, exige maior infraestrutura (consideradas verdadeiras biorrefinarias), mas tem uma produção maior de coprodutos com maior valor agregado (CLEAN FUELS DEVELOPMENT COALITION, 2015; WANG; WU; HUO, 2007).

A rota úmida difere-se da rota seca na etapa de extração do amido da matéria-prima. Neste caso, os grãos de milho são embebidos em uma solução de água e dióxido de enxofre (SO₂) para que sejam amolecidos e suas cascas se soltem. Sem as cascas é possível separar os gérmenes dos grãos e deles se extraem o óleo. O que restou dos grãos é moído e, por centrifugação, separam-se o amido e o glúten. O amido é utilizado para a produção de etanol e os outros coprodutos destinam-se a inúmeras finalidades industriais e alimentícias, conforme descrito anteriormente. (WANG; WU; HUO, 2007).

Na rota seca, os grãos secos vão diretamente dos silos para a moagem, onde são transformados em farinha. A farinha é submetida à etapa de liquefação, hidrólise enzimática e sacarificação, com o objetivo de quebra das moléculas de carboidratos complexos em carboidratos simples. Para tanto, a farinha segue para os misturadores, onde são adicionadas água para sua diluição, vapor para o aumento da temperatura e enzimas α -amilases que, durante o “cozimento”, fragmentarão as moléculas de amido, transformando-as em maltoses (dissacarídeo). Para manter o pH ideal, são acrescentados ácido sulfúrico ou soda cáustica, conforme a necessidade. A mistura deve estar submetida a agitação constante, já que os sólidos podem sedimentar facilmente. Para a sacarificação a temperatura do mosto é reduzida e a enzima gluco-amilase é adicionada. Esta enzima é responsável pela quebra das moléculas de maltose em glicose (monossacarídeo). A essa mistura dá-se o nome de mosto, que seguirá para a etapa de fermentação. (MCALOON et al, 2000).

As leveduras utilizadas na etapa de fermentação não são recuperadas por centrifugação, mas seguem com o mosto fermentado. Dessa forma, a propagação do fermento antes de seu consumo na etapa de fermentação aumenta a eficiência do processo. Para isso, parte do mosto é separado e a ele são adicionadas as leveduras (*Sacharomyces sp*), que aumentarão em volume por propagação. O processo de propagação do fermento dura em

média 9 horas, devendo ser mantido sob refrigeração para que a temperatura permaneça entre 34 e 36°C (informação pessoal¹²).

A fermentação pode ocorrer de duas formas: em processo contínuo, em que o mosto passa por diversos fermentadores até que esteja completamente fermentado, ou em batelada, em que o mosto fica em um fermentador por cerca de 48 horas, até completar a fermentação (CLEAN FUELS DEVELOPMENT COALITION, 2015). Para que as reações metabólicas ocorram satisfatoriamente, são aplicados também ureia para complementar a nutrição das leveduras e antibióticos para prevenir contaminações.

O mosto fermentado segue para a destilação, a fim de ser extraído o etanol da mistura. Essa separação ocorre em duas torres de destilação, pelo mesmo processo descrito para a destilação do etanol de cana-de-açúcar. Da segunda coluna é obtido o etanol hidratado, que pode seguir para a terceira coluna a fim de ser transformado em etanol anidro, conforme o processo descrito anteriormente para etanol de fonte sacarina. A diferença entre os processos se dá pela composição da vinhaça.

Nos processos de produção de etanol por fonte amilácea não há recuperação de fermento, que segue com o mosto para as etapas seguintes de fermentação e destilação até ser dispensado do sistema junto à vinhaça produzida. Por esse motivo, a vinhaça apresenta um conteúdo proteico importante que pode ser recuperado. Para tanto, a vinhaça produzida recebe um tratamento adicional para separar a porção sólida da líquida. A porção líquida pode ser reaproveitada no sistema industrial ou agrícola e a porção sólida segue para um secador, de onde sairá um importante coproduto denominado grãos secos de destilaria ou “*distiller’s dry grain*”, origem da sigla DDG, que será destinado à alimentação animal, por ter alto valor nutritivo. (GRANDA; ZHU; HOLTZAPPLE, 2007).

Apesar da tecnologia bem consolidada e grande volume de produção, o etanol norte-americano é bastante questionado do ponto de vista energético, já que o processo consome, em grande parte, energia advinda de fontes fósseis. As usinas de etanol que operam o processo com moagem à seco costumam consumir eletricidade diretamente da rede. As necessidades de energia térmica - nas etapas de cozimento, destilação, tratamento da vinhaça e secagem do DDG - são supridas pela queima de gás natural. As usinas com rota de moagem úmida são tipicamente maiores e mais complexas que as de rota seca e costumam utilizar sistema de cogeração para suprir a demanda de energia térmica e elétrica. As usinas de maior porte utilizam carvão como combustível, enquanto as de pequeno e médio porte costumam

¹² Informação recebida por Nogueira, V. em Campos de Julio, em 2012.

utilizar gás natural para a cogeração. Os consumos energéticos por tonelada de milho moído para as duas rotas costumam se equivaler. (EGGEMAN; VERSER, 2006).

3.6 Pensamento do Ciclo de Vida – do Balanço Energético à metodologia da ACV

A década de 1960 foi marcada pelo crescimento da preocupação ambiental da sociedade como um todo. Baumann e Tillman (2004) apontam a publicação do livro "Limits to Growth", de Meadows et al., em 1972, como um marco. A obra representou os debates da época com relação aos problemas associados ao desperdício de recursos e a preocupação com relação à destinação final de embalagens descartáveis.

Para o mesmo período, Boustead e Hancock (1979) apontavam três outros debates que fortaleceram a mudança de paradigma com relação aos problemas ambientais. O primeiro foi a assimilação da redução da qualidade ambiental, especialmente pela poluição atmosférica, que se tornava comum nos centros urbanos. O segundo motivo foi a percepção de que os combustíveis convencionais - no caso, os de origem fóssil - estavam disponíveis em quantidade finita e, por terem tempos de produção e consumo incompatíveis, se aproximavam as previsões de esgotamento. Estes dois fatores, no entanto, geraram pouca reação da sociedade. Coube ao terceiro fato o início de mudança nas práticas industriais e nos hábitos de consumo na população: o rápido aumento nos preços dos combustíveis. O aumento drástico no preço do petróleo provocou uma busca frenética por formas alternativas de energia e despertou o mundo para a necessidade de melhor utilização de seus recursos naturais (CHEHEBE, 2002).

Em resposta a essas questões, entre as décadas de 1960 e 1970 surgiram diferentes metodologias para avaliar e comparar os desempenhos de produtos e serviços. Em 1969, um estudo solicitado pela Coca-Cola foi conduzido para avaliar alternativas de embalagens para os seus produtos. A metodologia deveria permitir uma análise ampla, que considerasse consequências energéticas, materiais e ambientais do processo completo de embalagem, desde a extração de matérias-primas até a disposição dos resíduos. Esse trabalho é tido como o pioneiro dos estudos com abordagem ciclo de vida. Na sequência outras comparações entre embalagens foram conduzidas, como por exemplo, embalagens retornáveis e não retornáveis para leite no Reino Unido ou embalagens de PVC e do tipo *TetraPak* na Suécia. (BAUMANN; TILLMAN, 2004).

No auge da crise do petróleo, diversos outros estudos seguiram esta abordagem, mas com foco nas análises de consumo de recursos energéticos. A estes estudos, dava-se o nome de *Net Energy Analysis*, ou Balanço Energético, que comparavam a quantidade de energia disponibilizada à sociedade por um sistema energético com a quantidade de energia consumida naquele sistema. Em consonância com os estudos de comparações de embalagens, os estudos de balanço energético consideravam tanto a energia direta quanto a energia indireta consumida em um processo, abrangendo todas as etapas de produção, da extração à disposição de resíduos. Como argumentado por Boustead e Hancock (1979), as máquinas e operações diretamente usadas no processo de produção representam a maior parte do consumo de energia; no entanto, apesar de as operações auxiliares terem pequenos consumos individualmente, um grande número de atividades auxiliares podem ser responsáveis por uma grande quantidade de energia consumida. Esse conceito consolidou a necessidade e a prática de análises sistêmicas para comparações mais justas entre produtos alternativos.

A partir da metade da década de 1970, o interesse por estudos energéticos diminuiu e os trabalhos conduzidos pela abordagem ciclo de vida perderam evidência (CHEHEBE, 2002). No entanto, apesar da pouca publicidade, a metodologia continuou a ser aplicada em estudos internos de empresas privadas e organizações industriais, com finalidades estratégicas (BAUMANN; TILLMAN, 2004).

Em meados de 1980, os recorrentes desastres ambientais (por exemplo, o acidente na indústria química de Bhopal, Índia; a explosão de Chernobyl, na Ucrânia; o vazamento de óleo dos tanques Exxon Valdez, etc.) retomaram a tônica da proteção ambiental e os estudos de ciclo de vida se consolidaram e difundiram (BAUMANN; TILLMAN, 2004), apoiados pelo desenvolvimento de modelos de emissões, que ampliaram a abrangência de análises do método.

3.6.1 Avaliação do Ciclo de Vida (ACV)

A Avaliação de Ciclo de Vida (ACV) é uma ferramenta da gestão ambiental usada para avaliar impactos ambientais potenciais associados a produtos, processos e serviço. Sua principal característica é se prestar a essa avaliação de forma sistêmica, levando em conta todas as etapas do seu ciclo de vida (SILVA; KULAY, 2006). A Figura 3.6 ilustra, de maneira esquemática, as etapas consideradas no ciclo de vida de um produto.

Esta metodologia possui algumas características-chaves que a distingue de outros métodos de avaliação. Em primeiro lugar, a ACV trabalha com o conceito de unidade funcional, o que implica em uma abordagem relativa, já que os estudos são todos conduzidos em relação ao cumprimento de uma função (ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS, 2009a). Essa característica, no entanto, permite comparações mais justas, que levam em conta os desempenhos apresentados por diferentes alternativas.

Figura 3.6 - Ciclo de Vida de um produto

Fonte: United Nations for Environment Programme, 2004

Em seguida, a ACV realiza análises sistêmicas, desde o ‘berço até o túmulo’, ou seja, a partir da extração dos recursos naturais necessários à confecção de bens de consumo, passando pelas etapas em si de produção, pela sua distribuição, pelo uso para efeito de atendimento da função e se encerra com seu descarte.

Além disso, a ACV enfoca impactos ambientais potenciais e não absolutos. Isso se deve, principalmente, ao fato de os impactos estarem expressos em relação a uma unidade de referência, à integração de dados ambientais de diferentes lugares e períodos (pelo uso de bancos de dados) e à incerteza inerente aos modelos de impactos ambientais necessários para a metodologia (ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS, 2009a). Por outro lado, a ACV é capaz de fazer um diagnóstico quantitativo do desempenho ambiental derivado do atendimento de uma necessidade. Isso ocorre, em linhas gerais, a partir da quantificação dos fluxos de matéria e energia que atravessam, entrando e saindo, as fronteiras estabelecidas entre o sistema em análise e o meio ambiente.

Tais características permitem à ferramenta uma série de aplicações. As principais podem ser destacadas como (1) a identificação de oportunidades de melhorias do desempenho ambiental de produtos, processos ou serviços em diversos pontos de seus ciclos de vida, (2) o fornecimento de informações aos tomadores de decisão (seja em organizações particulares ou governamentais) que permitem orientar a definição de prioridades, o planejamento estratégico ou políticas públicas ambientais, (3) a seleção de indicadores de desempenho ambiental relevantes ou (4) a divulgação de desempenhos ambientais de produtos como ferramenta de marketing das empresas (ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS, 2009b).

Atualmente, os estudos de ACV têm suas práticas de conduta normatizadas pela *International Organization for Standardization* (ISO), que resultou nas publicações ISO 14040 e ISO 14044. No Brasil, a Associação Brasileira de Normas Técnicas (ABNT) foi a responsável por traduzir e publicar as normas, resultando na ABNT NBR ISO 14040, que trata dos princípios e estrutura de estudos de ACV, e na ABNT NBR ISO 14044, com requisitos e orientações, ambas de 2009 (SILVA; KULAY, 2006).

De acordo com a estruturação dada pelas normas ABNT NBR ISO 14040 e 14044 (ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS, 2009a, 2009b), um estudo de ACV é dividido, em termos operativos, em quatro etapas: Definição de Objetivo e Escopo; Análise de Inventário (ICV); Avaliação de Impacto do Ciclo de Vida (AICV); e Interpretação. Dado o caráter iterativo, cada fase do estudo complementa a seguinte e permite alterar as anteriores (Figura 3.7).

Figura 3.7 - Fases de um estudo de ACV

Fonte: Associação Brasileira De Normas Técnicas, 2009a.

A primeira etapa de uma ACV compreende a definição do Objetivo do estudo. Em síntese, esta ação deve identificar as razões para sua realização, o público-alvo, aplicações e intenção de divulgação dos resultados. Associada a ela está a definição do Escopo do estudo, no qual devem constar o objeto da análise e sua função, a unidade funcional considerada e o fluxo de referência. A unidade funcional é o parâmetro que quantifica o exercício da função e

que serve de base de referência para as quantificações de consumos e gerações de matéria e energia ocorridas entre o sistema em análise e o ambiente. O fluxo de referência é o fator que associa o desempenho técnico do produto ou serviço ao atendimento da função selecionada (ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS, 2009a, 2009b).

Ainda no escopo são delimitadas as fronteiras da porção do universo em que se fará a aplicação da técnica de ACV, descrevendo quais subsistemas de produção serão considerados. O conjunto de subsistemas selecionados é chamado Sistema de Produto. Existem diferentes abordagens para a delimitação de fronteiras, a mais completa é a “*cradle-to-grave*” ou “berço-ao-túmulo”. Essa abordagem considera que a ACV será aplicada a todas as fases do ciclo de vida do objeto em análise (Figura 3.5). A abordagem do tipo “*cradle-to-gate*” ou “berço-ao-portão” resume a aplicação da ACV ao assim chamado “foco sobre o produto”, que compreende as interações antrópicas associadas somente às etapas de produção no ciclo de vida de um produto (COLTRO, 2007). Há também abordagens específicas para combustíveis, como “*well-to-wheel*”, “do poço à roda”, ou “*well-to-pump*”, “do poço à bomba”, e “*pump-to-wheel*”, da “bomba à roda”, que seguem a mesma lógica das anteriores, delimitando etapas específicas do ciclo de vida do combustível.

Quando, em qualquer um dos estágios, o sistema gera mais do que um produto final, caracteriza-se um quadro denominado de multifuncionalidade. Para casos dessa natureza as normas determinam a adoção de procedimentos de alocação e que estes estejam claramente apresentados no escopo. Neste caso, as entradas e saídas são divididas entre todos os produtos, de forma a distribuir as cargas ambientais geradas até aquela etapa (ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS, 2009a, 2009b). Essa distribuição pode ser proporcional à massa, potencial energético ou econômico de cada produto, dentre outros critérios. A alocação de cargas ambientais é um tema controverso, mesmo entre a comunidade científica dedicada ao desenvolvimento da ACV, pois carrega algum grau de subjetividade do condutor do estudo na escolha do critério de alocação a ser adotado. Tanto é assim que, sempre que possível, recursos e procedimentos que visam reduzir seus efeitos ou mesmo desobrigar de se fazer alocação são recomendados pela ABNT NBR 14044 (ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS, 2009b), como a redução ou a expansão de fronteiras. Na expansão de fronteiras, por exemplo, o sistema de produto é ampliado de forma a incluir os processos relacionados aos coprodutos gerados e são subtraídas as cargas ambientais evitadas com a produção daquele coproduto naquele novo subsistema (NOGUEIRA, 2012).

Constam também da etapa metodológica de Definição de Escopo os requisitos de qualidade de dados, constituídos pelas definições de coberturas geográfica, temporal e tecnológica adotadas na produção estudada, da caracterização das fontes de dados e de outros pressupostos metodológicos que propiciem consistência e representatividade para os dados utilizados pelo estudo. São também estabelecidos nesta fase do estudo o método a ser empregado para condução da etapa de Avaliação de Impacto do Ciclo de Vida (AICV), bem como as categorias de impactos selecionadas para efeito desta análise. A norma enfatiza a clareza com a qual os pressupostos devem ser apresentados, a fim de preservar a transparência do estudo.

A segunda etapa da ACV, a construção do Inventário de Ciclo de Vida (ICV), começa com a coleta de dados, a ser pautada pelas diretrizes firmadas pela definição de Objetivo e Escopo. A título de organização, convém que sejam desenhados fluxogramas de todos os processos envolvidos na análise, para facilitar a identificação de correntes de entrada e saída que atravessam as fronteiras definidas com o meio ambiente. Após serem coletados os dados, estes devem passar por processo de validação (ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS, 2009a, 2009b) e posterior tratamento, de forma que as quantificações de todos os fluxos de entradas estejam referenciados ao fluxo de referência do estudo e, conseqüentemente, à unidade funcional. O resultado de todas essas ações corresponde ao ICV, ou seja, a uma lista de dados quantificados de consumos e emissões, determinados para as diversas fases do processo, os quais estão referenciados à unidade funcional definida para o estudo (KULAY; SEO, 2010).

A Avaliação de Impacto do Ciclo de Vida inicia-se pela seleção de categorias de impacto às quais os resultados do ICV podem ser associados (ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS, 2009a). Categorias de impacto são classes que representam questões ambientais relevantes, como Mudanças Climáticas, Eutrofização, Acidificação, Ecotoxicidade etc. Segue-se a essa, o procedimento de caracterização, em que os resultados do ICV são classificados em uma ou mais categorias de impacto e, então, magnificados em termos do respectivo efeito ambiental. Isso ocorre multiplicando-se tais correntes de matéria e energia pelos fatores de equivalência. Em linhas gerais, esses fatores padronizam consumos e emissões em função de uma substância de referência, possibilitando assim a totalização de um resultado único de desempenho para cada categoria (KULAY; SEO, 2010). Existem diferentes métodos para essa etapa, que consideram variadas categorias de impacto e agregam os resultados de formas distintas, podendo gerar indicadores de termo médio ou indicadores únicos.

Na última fase de uma ACV, a Interpretação, apresenta-se um resumo dos resultados do estudo, ressaltando as questões ambientais mais significativas. Deve-se apresentar também a avaliação do estudo em relação à completude, sensibilidade e consistência, além das limitações, recomendações e conclusões. A interpretação deve ser feita sempre de acordo com o objetivo e escopo do estudo (ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS, 2009a, 2009b). Por ser um estudo dinâmico, a ACV permite que as fases finais do trabalho alterem as iniciais a fim de torná-lo mais completo e confiável, a isso se dá o nome de iteratividade. Assim, a interpretação pode indicar necessidade de revisões nas fases anteriores.

3.6.2 Balanço Energético

Os estudos de balanço energético foram amplamente difundidos na década de 1970 e, com o aumento da produção de combustíveis renováveis no início da década de 2000, voltou a ganhar espaço entre as publicações de acadêmicos e agências governamentais. A maioria dos estudos de balanço energético objetiva quantificar a energia fornecida pelos sistemas energéticos em relação à energia não renovável por eles consumida. O índice obtido por essa relação é comumente chamado Índice de Retorno Energético sobre o Investimento, ou EROI (sigla em inglês para *Energy Return on Investment*).

No entanto, diferente das avaliações de ciclo de vida ambientais, que caminharam para padronização e normatização de sua metodologia, os estudos de balanço energético são conduzidos por metodologias variadas, com diferentes definições e terminologias, que dificultam comparações entre estudos.

Visando minimizar este problema, Hammerschlag (2006) conduziu um estudo que levantou os principais trabalhos publicados entre 1990 e 2006 com o balanço energético do etanol de milho nos EUA e alinhou seus dados em uma única metodologia, de forma a torná-los comparáveis entre si. Para o autor, devido à falta de padronização, a definição exata dos termos é crucial para o entendimento do leitor em todas as publicações no tema. Dessa forma, as definições por ele estabelecidas são:

Índice de Retorno Energético sobre o Investimento (r_E) é a razão entre a energia contida em certa quantidade de combustível produzido ($E_{\text{disponível}}$) e a energia não-renovável requerida para produzir esta mesma quantidade de etanol ($E_{\text{consumida, não-renovável}}$) (Eq. 3.1). Por se tratar

de uma relação, os termos devem ser reportados na mesma unidade, que se cancelam e, dessa forma, o r_E é representado sem unidade.

$$r_E = \frac{E_{disponível}}{E_{consumida,não-renovável}} \quad \text{Eq. 3.1}$$

Especificamente para a aplicação deste índice em estudos de biocombustível, do resultado obtido pode-se obter uma importante interpretação. Segundo Hammerschlag (2006), se r_E for menor do que 1 (um), a energia total fornecida pelo biocombustível avaliado é menor do que a energia não-renovável consumida em seu processo de produção e, conseqüentemente, o uso direto do combustível não-renovável apresentaria mais vantagem do que a produção e uso do combustível renovável. Se r_E for maior do que 1 (um), então foi possível capturar pelo menos algum valor de energia renovável. Quanto maior o valor de r_E , mais vantajoso aparenta ser a produção do biocombustível. Além disso, r_E sempre será diferente de zero, já que tanto a $E_{disponível}$ quanto a $E_{consumida,não-renovável}$ são números positivos.

Cleveland (1992) apresenta como limitação do método de Balanço Energético o fato de não se tratar da questão da qualidade da energia. Na maioria das análises, diferentes tipos de energia são agregados segundo seu equivalente em energia térmica (Btu, Joules (J) etc.). Essa abordagem ignora o fato de que diferentes tipos de energia apresentam qualidades distintas, por exemplo, um joule de energia elétrica apresenta energia de melhor qualidade do que um joule de carvão, já que a eletricidade propicia uma variedade maior de usos e maior produção econômica do que o combustível fóssil.

Para amenizar este problema, Malça e Freire (2006) sugerem a quantificação dos consumos energéticos pela abordagem ciclo de vida e em termos de energia primária, ou seja, da energia contida em recursos naturais que não passaram por nenhuma conversão ou transformação antropogênica (como carvão, petróleo, energia potencial hídrica, biomassa etc.). Segundo os autores, a energia primária, implicitamente, considera a qualidade da energia, já que é a soma da energia final consumida e inclui todas as perdas das transformações. Na realidade, os consumidores compram energia final, mas o que é realmente consumida é a energia primária, que representa o conteúdo de energia acumulada de todos os recursos fósseis e não fósseis extraídos da natureza, incluindo as perdas que sofrem até o seu uso final.

3.7 Estudos de avaliações ambientais e energéticas de combustíveis

A escolha das ferramentas de avaliações ambiental e energética anteriormente descritas foi influenciada pelo reconhecimento de seus métodos entre a comunidade científica. Diversos estudos têm sido conduzidos com o objetivo comum de conhecer o desempenho ambiental e energético de combustíveis, por meio da abordagem ciclo de vida, metodologia já consolidada que permite um olhar sistêmico e possibilita avaliações de caráter quantitativo, passíveis de comparações. Neste capítulo serão apresentados alguns deles, que serviram como referências para os estabelecimentos de bases metodológicas e análises comparativas para este estudo.

Cavalett et al. (2013), conduziram um estudo comparativo entre os desempenhos ambientais do etanol hidratado de cana-de-açúcar e da gasolina, utilizando diversos métodos de avaliação de impacto de ciclo de vida, entre eles o método *ReCiPe Midpoint (H)*. O estudo considera as etapas de produção agrícola de cana, transporte, produção de etanol e uso final do combustível. Os dados utilizados representam a produção média da região Centro-Sul do Brasil e suas peculiaridades, como alta capacidade de produção, com 500 t de cana moída por hora e caldeiras de alta eficiência, com geração de vapor a 90 bar de pressão, capazes de produzir grandes quantidades de energia elétrica excedente. A unidade funcional foi 1 (um) MJ de combustível. Foi considerada alocação entre etanol e energia elétrica produzida, por critério energético. Os resultados obtidos indicam que, em análises de nível *midpoint*, o etanol apresenta melhores desempenhos ambientais para categorias de aquecimento global, depleção de recursos fósseis e depleção da camada de ozônio. No entanto, para categorias como acidificação, eutrofização, oxidação fotoquímica e uso de terra agrícola, a gasolina demonstra melhores desempenhos.

Muñoz et al (2014) também conduziram estudo nessa vertente. Seu artigo apresenta um estudo de ACV com abordagem berço-ao-túmulo que compara etanol hidratado produzido a partir de diferentes matérias-primas de origem renovável - milho e palha de milho nos EUA, cana-de-açúcar no Nordeste e Centro-Sul brasileiros e beterraba e trigo na França -, e de origem fóssil - de etileno fóssil, no oeste da Europa. A unidade funcional do estudo foi 1 (um) kg de etanol hidratado. O sistema de produto considerou as etapas de produção das matérias primas e seus insumos, transporte da matéria-prima, produção de etanol e seus insumos, segundo a abordagem berço ao portão. Adicionalmente, os autores consideraram a etapa de uso, não como combustível, mas como etanol de uso doméstico, incluindo também as emissões provenientes da volatilização do produto. Foram avaliadas seis categorias de

impacto do método ReCiPe. Para o cenário com etanol de cana-de-açúcar, foi considerada a alocação entre etanol, eletricidade, açúcar, vinhaça e torta de filtro, sendo que o etanol hidratado recebeu fator de alocação de 50%. Para o etanol de milho, considerou-se alocação entre etanol e DDGS, com fatores de 84% e 16%, respectivamente, selecionados segundo o critério econômico. Os autores concluíram que, no geral, os combustíveis obtidos de origem renovável obtiveram melhores desempenhos em termos de mudanças climáticas do que o combustível de origem fóssil. No entanto, quando outros impactos ambientais são considerados, especialmente os relacionados ao uso da terra, os resultados podem se inverter. Aspectos relacionados à mudança de uso da terra têm grande influência sobre os resultados sem, no entanto, existir uma metodologia consolidada para sua determinação.

Guerra et al. (2014), conduziram trabalho que estuda os desempenhos ambiental e energético, com base na ACV, de diferentes cenários de cogeração para a produção de etanol de cana-de-açúcar. Os cenários consideram caldeira com produção de vapor de 67 bar e 480°C como cenário padrão e outros sete cenários que variam etapas do processo de cogeração. Os dados referem-se à produção de etanol no estado de São Paulo, região responsável pela maior parte na produção nacional de etanol. A análise ambiental se deu pela aplicação do método de avaliação de impacto *ReCiPe Midpoint (H)* versão 1.08, em que foram considerados 12 categorias de impacto. Foi considerada uma única alocação entre etanol e bagaço, com critério energético, o que resultou em fatores de cerca de 50% para o bagaço e 50% para o etanol. Como resultados obtidos pelos autores, a etapa agrícola de produção de cana-de-açúcar foi a fase mais impactante do processo de obtenção de etanol para todos os cenários. Além disso, as melhorias de eficiência na etapa de cogeração apresentaram ganhos ambientais em todas as categorias.

Pieragostini, Aguirre e Mussati (2014) estudaram o desempenho ambiental da produção de etanol de milho na Argentina, especificamente na província de Santa Fé. O sistema estudado teve abordagem do berço-ao-portão, incluiu desde as etapas de produção das matérias-primas até a produção de etanol e foi dividido entre sistema agrícola da produção de milho, que conta com plantio direto, e sistema industrial da produção de etanol, com tecnologia *dry milling*. Além disso, comparou os desempenhos do etanol de milho quando é ou não considerada a etapa de uso do DDGS, um dos coprodutos gerados. Não foram consideradas as emissões de carbono diretas e indiretas por mudança no uso da terra. A unidade funcional selecionada foi 1 MJ de etanol anidro. A avaliação de impacto foi conduzida por dois métodos de avaliação, o Ecoindicator 99 e o ReCiPe, ambos em nível *endpoint*, que indicaram os mesmos processos como relevantes para o sistema.

Macedo, Seabra e Silva (2008) se dedicaram a calcular o balanço energético e as emissões de gases de efeito estufa (GEE), a partir da abordagem de ciclo de vida, para a produção de etanol anidro em destilaria autônoma na região Centro-Sul do Brasil. Serviram como base do estudo as condições médias para as safras 2005/2006, com dados de 44 plantas de etanol. Para o levantamento de consumos energéticos, foram considerados os consumos diretos de combustíveis fósseis e eletricidade, os consumos indiretos para a produção de insumos, tanto para a etapa agrícola quanto para a industrial, e a energia necessária para a construção e manutenção dos equipamentos e edificações em uma abordagem do “berço-aopartão” da usina. Os autores seguem, no entanto, os procedimentos de expansão de fronteira e cargas evitadas a fim de se evitar a alocação entre os coprodutos do processo de produção de etanol. Dessa forma, para estabelecer a quantidade de energia gerada pelo processo, os autores consideraram não apenas o etanol, mas a soma dos conteúdos energéticos do combustível líquido e dos coprodutos em dois cenários. O primeiro refere-se à soma das energias disponibilizadas pelo etanol e pelo bagaço excedente e o segundo à soma das energias do etanol, bagaço excedente e da eletricidade produzida no sistema de cogeração. Os resultados alcançados para os balanços energéticos dos respectivos cenários foram 9,0 e 9,3 unidades de energia geradas para cada unidade de energia fóssil consumida. Na avaliação de emissões de gases de efeito estufa, foram encontrados 417 kg CO₂ eq/m³ de etanol hidratado e 436 kg CO₂ eq/m³ de etanol anidro, sem considerar as cargas evitadas.

Em 2011, Seabra et al. (2011) atualizaram o consumo energético e emissões de gases de efeito estufa para a produção de etanol do Centro-Sul brasileiro, utilizando dados de 168 usinas. Neste trabalho, no entanto, a análise abrangeu as usinas associadas, ou seja, as que produzem tanto etanol, anidro e hidratado, quanto açúcar. Desta vez, os autores não consideraram os consumos energéticos demandados pela construção da infraestrutura, mas mantiveram os procedimentos de expansão de fronteira e cargas evitadas. Foi encontrado o consumo energético de 80 kJ para cada MJ de etanol anidro produzido e 721 kJ para cada kg de açúcar. Na vertente emissões de GEE, foram obtidos valores de 21,3 g CO₂ eq/MJ de etanol e 234 g CO₂ eq/kg de açúcar. Esses resultados incluem o desconto das cargas evitadas.

Salla e Cabello (2010), conduziram estudos de desempenho energético da produção de etanol das matérias-primas renováveis cana-de-açúcar, mandioca e milho. Os autores trabalharam com dados de estudos de caso, localizados no estado de São Paulo. Para o levantamento de consumos energéticos da etapa agrícola foram consideradas as produções e usos de insumos e, também, da mão de obra utilizada no campo. Para a etapa industrial, foram levantados os consumos energéticos diretos de vapor e eletricidade gerados em caldeira a

partir da queima de bagaço de cana, para a produção de etanol de cana-de-açúcar, ou lenha, para a produção de etanol de mandioca e milho. A partir destes dados coletados, os autores estabeleceram os índices de balanço energético através da relação entre energia fornecida pelos biocombustíveis e energia total consumida nos processos, e não apenas o consumo de energia fóssil. Os resultados de balanços energéticos encontrados foram 1,09 para o etanol de cana-de-açúcar, 1,76 para o etanol de mandioca e 1,19 para o etanol de milho.

Outro estudo conduzido na área foi o de Dias, Carvalho e Gomes (2010), que estudaram o balanço energético do etanol anidro para uma fronteira mais ampla, que representa a produção de todo o Brasil, a partir de dados médios oficiais e referências bibliográficas. Os autores incluíram em sua análise as entradas energéticas de origem fóssil de produção de maquinário agrícola, mão de obra na etapa agrícola e construção da infraestrutura da usina, além das entradas comumente consideradas, como consumo e transporte de insumos, energia direta etc. Neste contexto, foi encontrado o balanço energético de 10,57 para o etanol anidro de cana-de-açúcar.

Hammerschlag (2006) percebeu inconsistência e divergência entre as terminologias utilizadas e metodologias conduzidas em estudos de balanço energético e cálculos de EROI de biocombustíveis entre diversos trabalhos publicados na área. Com isso, em seu artigo, além de definir claramente uma proposta de terminologia, realizou um levantamento dos dez trabalhos mais importantes sobre EROI de etanol dos Estados Unidos entre os anos 1990 e 2006 e aplicou-lhes a mesma metodologia de definição de EROI a fim de torná-los comparáveis entre si.

Dentre os estudos comparados pelo autor estão os de Shapouri, Duffield e Wang (2002), Pimentel e Patzek (2005) e Kim e Dale (2005). Os três trabalhos consideraram os consumos de combustíveis e eletricidade nas etapas agrícola, transporte de milho e industrial. Shapouri, Duffield e Wang (2002) e Kim e Dale (2005), consideraram também a etapa de distribuição do etanol. Além disso, todos os trabalhos consideraram os consumos energéticos da produção dos insumos utilizados na etapa agrícola. Pimentel e Patzek (2005) consideraram ainda outras entradas energéticas, tais como energia empregada como mão-de-obra e para a construção da infraestrutura. Todos os autores consideraram alocação entre o etanol e os coprodutos DDG ou DDGS. Após ter os dados tratados por Hammerschlag (2006), Shapouri, Duffield e Wang (2002) apresentaram valores para r_E da ordem de 1,38; Kim e Dale (2005) apresentaram valores de 1,62 como r_E ; e Pimentel e Patzek (2005), por sua vez, apresentam r_E de 0,84.

Cai et al. (2013) estudaram os desempenhos ambiental e energético, do ponto de vista de emissões de GEE e consumos energéticos, dos ciclos de vida de diferentes sistemas de produção de bioetanol de sorgo nos EUA. Os sistemas estudados incluem a produção de etanol a partir de amido, utilizando os grãos de sorgo granífero como matéria-prima; etanol por açúcares fermentescíveis, obtidos da moagem do sorgo sacarino; e etanol celulósico utilizando o sorgo forrageiro. O sistema de produto dos processos incluíram a produção de fertilizantes, a produção da matéria-prima agrícola, a etapa de transporte da matéria-prima até a indústria, a produção de enzimas e fermentos utilizados na etapa industrial, a produção industrial de etanol, o sistema de cogeração a partir de bagaço ou gás natural, o transporte e distribuição do etanol e sua etapa de uso. A unidade funcional selecionada foi 1 (um) MJ de etanol. Especificamente para o etanol de sorgo granífero, foram considerados dois cenários, ambos em planta *dry milling*, o primeiro utilizando gás natural fóssil e o segundo utilizando gás natural renovável a partir da digestão anaeróbica de dejetos de animais, em um sistema de cogeração. Como resultados dos desempenhos energéticos, os autores indicam valores entre 2 e 4,9 para EROI, dependendo da fonte de energia primária usada no processo. Em relação às emissões de GEE, o estudo mostra que o etanol de sorgo granífero é o responsável pelas maiores emissões em comparação com as de sorgo sacarino e forrageiro.

Também sobre o etanol de sorgo, Wang et al. (2008), publicaram trabalho apresentando resultados acerca do desempenho da produção de etanol de sorgo granífero. Foram comparados 7 genótipos e híbridos, do ponto de vista de eficiência na bioconversão da matéria-prima, da influência genética neste desempenho e os principais fatores que impactam a produção de etanol. Os autores complementaram seu estudo com a análise do consumo energético do ciclo de vida da produção, identificando os consumos e economias potenciais. Para o estudo de ciclo de vida, os autores consideraram as etapas de produção agrícola do sorgo, a colheita, secagem e transporte dos grãos, o processamento industrial para produção de etanol e DDGS e a etapa de transporte até o consumidor final. O EROI encontrado no estudo foi 1,38.

Como um primeiro esforço para a avaliação de plantas de etanol com integração de matérias-primas, Donke et al. (2013) estudaram o desempenho ambiental, energético e exergético de uma usina de etanol em quatro diferentes cenários, que envolviam a produção de etanol a partir de cana-de-açúcar e milho, com cogeração a partir de bagaço de cana ou cavaco de madeira e, ainda, a combinação dos ativos para a produção de etanol e cogeração de energia. O estudo baseou-se em dados primários para as etapas agrícolas e na composição de dados primários e secundários para as etapas industriais. Os resultados indicam que,

considerando as três variáveis (ambiental, energética e exergética) simultaneamente, o etanol de milho apresenta bom desempenho inserido na realidade brasileira. Isso ocorre porque, embora energeticamente o etanol de cana se mostre mais eficiente, isso não se comprovou do ponto de vista ambiental – especialmente pela etapa de queima da palhada da cana -, em que o milho ganha destaque.

Nogueira et al. (2014) também estudaram os desempenhos ambientais e termodinâmicos (energético e exergético) da integração de processos de etanol de cana-de-açúcar e milho, porém com enfoque nas alternativas de combustíveis utilizados na etapa de cogeração de energia. O estudo considerou quatro cenários estabelecidos por diferentes arranjos de matérias-primas e combustíveis que fossem capazes de produzir 56.000 m³ de etanol por ano. Os cenários consideram as condições de produção de etanol exclusivamente de milho com cavacos de madeira como combustível, etanol exclusivamente de cana-de-açúcar com bagaço como combustível, etanol a partir de cana-de-açúcar complementado com etanol de milho com bagaço como combustível e, por fim, etanol exclusivamente de milho com gás natural como combustível. De um modo geral, os cenários que contaram exclusivamente com milho apresentaram melhores resultados ambientais, enquanto os que continham cana-de-açúcar em seu processo de produção desempenharam melhor papel no quesito energético. Em uma análise global, o cenário com etanol de cana-de-açúcar apresentou o melhor desempenho.

Milanez et al (2014) estudaram os desempenhos da produção integrada de etanol de diferentes matérias primas, variando diferentes tecnologias de integração. Os autores consideraram 8 cenários que incluíam produção de etanol de cana-de-açúcar em usina autônoma básica e sua integração com a produção de etanol de milho apenas com o consumo do bagaço excedente do processo com cana e com a complementação de cavaco de madeira ao bagaço de cana excedente. Também foram considerados cenários de usina autônoma otimizada de etanol de cana, cujas eficiências energéticas são superiores às da usina básica, e sua integração com diferentes processos para a produção de etanol de milho (com retirada de sólidos após a fermentação, com retirada de sólidos antes da fermentação, com retirada fracionada de coprodutos e com produção de etanol de milho em paralelo ao etanol de cana durante todo o período de safra e entressafra). A análise ambiental utilizou o balanço de GEE como indicador e obteve como resultado que os cenários em que há maior participação de milho no processo apresentam pior desempenho, devido, principalmente, ao uso de fertilizantes. A análise energética considerou o balanço energético a partir da relação entre energia disponível pelo combustível e energia fóssil consumida no processo. Os resultados

obtidos foram semelhantes aos ambientais, a participação do milho reduz o retorno energético devido ao bom desempenho do etanol de cana, causado especialmente pela produção de bagaço como coproduto.

As citações supramencionadas para identificar a lacuna que, ainda que parcialmente, esta pesquisa se propõe a preencher, não esgotam de forma alguma o tema por ela tratado. No entanto, dentro de um universo amplo de comunicações existentes – já que a academia explora há muitos anos a relação entre a produção de etanol combustível e seus desdobramentos sobre o entorno – foram indicadas aqui aquelas produções que mostram aderência com as perguntas que a dissertação se propõe a responder, as quais foram plasmadas na forma dos objetivos do estudo.

4 MATERIAL E MÉTODOS

A fim de atender ao objetivo proposto, o presente trabalho pode ser classificado como exploratório-descritivo, por ter como finalidade reunir informações sobre um tema ainda pouco difundido e por descrever características de um processo estabelecendo relações entre as variáveis (GIL, 1999). O estudo deve buscar reproduzir as condições mais aproximadas possíveis da realidade e, por isso, optou-se por uma abordagem metodológica empírica.

Como estratégia de pesquisa foi escolhida a associação entre pesquisa bibliográfica e coleta de dados em trabalho de campo. A pesquisa bibliográfica visa coletar informações prévias ao estudo a fim de gerar senso crítico para o desenvolvimento do trabalho, bem como parametrizar, comparar e embasar os resultados obtidos. Para a caracterização do objeto de estudo, a coleta de dados em trabalho de campo mostrou-se eficiente, principalmente por se tratar de uma tecnologia recentemente introduzida no país (integração de matérias-primas para a produção de etanol) que restringe-se ainda a poucas usinas em funcionamento e poucos dados disponíveis e publicados.

O método do trabalho está estruturado na forma das etapas listadas a seguir, que serão descritas adiante:

- I. Revisão bibliográfica;
- II. Coleta de dados – trabalho de campo;
- III. Construção de modelos lógicos e representativos da operação de uma usina integrada para cada qual dos insumos – cana-de-açúcar, milho e sorgo –, incluindo suas respectivas condições de processamento para a produção de etanol;
- IV. Aferição dos modelos e verificação da consistência e representatividade das condições que pretendem retratar;
- V. Aplicação da técnica de Avaliação de Ciclo de Vida (ACV) aos modelos em questão, com vistas à quantificação do desempenho ambiental e energético de cada processamento;
- VI. Discussão dos resultados;
- VII. Análise comparativa dos resultados gerados pelos três recortes tratados pelo estudo.

4.1 Revisão de Literatura

O levantamento junto à literatura técnica pertinente e disponível sobre o tema de que trata o estudo não apenas forneceu subsídios para o planejamento dos passos seguintes do projeto, mas também levou à obtenção de dados e informações técnicas complementares sobre o processo de obtenção de etanol a partir das fontes antes enunciadas. Tais informações auxiliaram no processo de construção e serviram de balizamento para a concepção dos modelos para cada situação estudada.

A Revisão de Literatura se deu de forma continuada ao longo do projeto. Os dados por ela providos serviram para estabelecer bases consistentes para as discussões que suportam a análise de resultados.

4.2 Coleta de dados

A coleta de dados efetuada no presente estudo levantou e utilizou documentos, registros em arquivo, entrevistas e coleta de dados a partir de observação direta como fontes de evidência.

A coleta de dados foi realizada de forma sistêmica e iterativa em três visitas técnicas à usina que serviu como base para o modelo. A primeira delas ocorreu em setembro de 2012, durante a temporada de produção de etanol de cana-de-açúcar. A segunda visita deu-se em dezembro de 2012, quando ocorria a produção de etanol a partir de milho e sorgo. A terceira visita, em novembro de 2013, compreendeu a transição entre a produção de etanol de cana e a produção de etanol de milho e sorgo, permitindo a coleta de dados para ambos os processos.

Dado o caráter iterativo do processo, a cada visita as informações levantadas permitiram a formulação de modelos parciais a serem usados na visita seguinte e, assim, chegar a um resultado final mais completo e fidedigno.

Os dados referentes às etapas agrícolas foram coletados a partir de entrevistas com produtores e levantamento de documentos de controle das safras, de forma a caracterizar as tecnologias médias e insumos comumente utilizados na região. Os dados foram complementados por literatura técnico-científica, documentos oficiais do governo e de instituições de pesquisa do estado.

A usina Usimat, localizada no município de Campos de Julio, MT, na região Centro-Oeste do Brasil, forneceu os dados que serviram como base para o modelo industrial de

produção de etanol. Em seu processo de produção, foram incluídos milho e sorgo como matérias-primas para a produção de etanol de forma a aproveitar a estrutura já existente de uma unidade que processava cana-de-açúcar para o mesmo fim.

Os parâmetros referentes às etapas industriais foram obtidos via entrevistas com o corpo técnico da usina, levantamento de documentos de projeto e informativos analíticos da unidade e de observações *in loco* do processo. As informações foram também complementadas por documentos e literatura técnico-científica.

As informações coletadas foram separadas entre cinco subgrupos:

1. Etapa agrícola de produção de cana-de-açúcar;
2. Etapa agrícola de produção de milho;
3. Etapa agrícola de produção de sorgo;
4. Etapa industrial de produção de etanol de cana-de-açúcar;
5. Etapa industrial de produção de etanol de milho e sorgo.

4.3 Concepção do modelo de produção de etanol a partir de diferentes ativos agrícolas

A concepção do modelo de produção de etanol de diferentes ativos agrícolas se deu a partir dos dados coletados em campo e da complementação destes por dados de literatura técnica especializada sobre o tema. Isso ocorreu dada a necessidade de um volume expressivo de dados e informações para que os modelos operacionais de cada situação em análise fossem de fato representativos e consistentes com as realidades que pretendiam retratar.

Em termos estruturais, o modelo caracteriza a produção das matérias-primas agrícolas, o processo de produção do etanol hidratado e a cogeração de energia a partir de balanços de massa e energia e inventários de insumos e emissões – os quais serão detalhados mais adiante nos Capítulos 5, 6 e 7 deste documento. Optou-se por estudar apenas a produção de etanol hidratado, excluindo a de etanol anidro, devido ao processo de produção a partir de milho e de sorgo não operar a etapa de desidratação. Dessa forma, o modelo considera que todo o etanol produzido a partir de cana-de-açúcar que seria destinado à desidratação é convertido em etanol hidratado, facilitando assim as comparações de desempenho entre os processos. Optou-se, também, por modelar os três processos de produção de forma independente, apesar da possibilidade de integração e compartilhamento de coprodutos que uma planta integrada permite. A separação dos processos viabiliza a comparação dos desempenhos dos

combustíveis, visando o cumprimento dos objetivos do trabalho, e amplia as possibilidades de análises futuras tanto para a produção com processos integrados, quanto para processos em paralelo ou processamento de uma única matéria-prima.

4.4 Método de avaliação ambiental

A avaliação do desempenho ambiental realizada a partir da aplicação da técnica de ACV seguiu as diretrizes e o arcabouço conceitual descritos nas normas ABNT NBR ISO 14040 e 14044 (ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS, 2009a, 2009b). Para aferição dos impactos ambientais potenciais foi aplicado o método de Avaliação de Impacto de Ciclo de Vida (AICV) *ReCiPe Midpoint (H) V.1.10 / World Recipe H*, que abrange as análises voltadas a emissões, gerando um perfil ambiental para cada caso estudado.

4.5 Método de avaliação energética

O perfil energético do processo e a avaliação do seu desempenho também se basearam no enfoque de ciclo de vida. Assim, foram também consideradas as diretrizes gerais previstas nas normas ABNT NBR ISO 14040 e 14044 (ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS, 2009a, 2009b). A definição do objetivo e escopo seguiram os mesmos pressupostos metodológicos da avaliação ambiental, a fim de preservar a uniformidade da análise em ambas as dimensões.

Dos perfis energéticos apresentados, foram obtidas as informações necessárias para o cálculo do Índice de Retorno Energético sobre o Investimento (r_E), segundo a definição de Hammerschlag (2006), apresentada no item 3.3.2. O poder calorífico inferior (PCI) do etanol hidratado foi utilizado como fator $E_{\text{disponível}}$ e o consumo de energia fóssil foi utilizado como $E_{\text{consumida, não-renovável}}$.

4.6 Resultados

Os resultados foram apresentados em três capítulos distintos (5, 6 e 7), um para cada matéria-prima da produção de etanol, como os resultados de um estudo de ACV. Cada conjunto de resultados incluiu a descrição de objetivo e escopo, a análise de inventário e os resultados da aplicação dos métodos de AICV, estes apresentados com a discussão.

4.7 Discussão

A discussão dos resultados foi realizada com dois enfoques. A primeira visou a comparação dos desempenhos ambiental e energético do etanol de cada uma das matérias-primas com os desempenhos obtidos em outros trabalhos científicos publicados que mostraram aderência à esta comparação. Esta análise buscou responder o quanto os resultados obtidos no estudo estão condizentes ao contexto em que se inserem.

A segunda discussão objetivou a comparação dos desempenhos dos combustíveis estudados entre si, buscando responder qual das matérias-primas gera menos impactos potenciais ambientais e energéticos para a produção de etanol, considerando que o processo ocorre em uma usina integrada.

5 AVALIAÇÃO AMBIENTAL E ENERGÉTICA DO ETANOL DE CANA-DE-AÇÚCAR

5.1 Bases do estudo de ACV (Objetivo e Escopo)

Este estudo segue os conceitos e aspectos operativos estabelecidos pelas normas ABNT ISO NBR 14040 e 14044 (ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS, 2009a, 2009b).

5.1.1 Objetivo

O objetivo deste estudo de ACV é definido por *avaliar a produção de etanol hidratado a partir de cana-de-açúcar em uma usina autônoma integrada*. Os propósitos deste estudo são proporcionar subsídios para a tomada de decisão quanto a novas tecnologias e matérias-primas para a produção de etanol, bem como contribuir com informações e conhecimento a respeito de tais processos. Dessa forma, o público-alvo do estudo engloba tomadores de decisão da cadeia produtiva do etanol e a comunidade científica.

5.1.2 Escopo

5.1.2.1 Função do sistema, unidade funcional e fluxo de referência

Este estudo se trata de uma ACV atribucional com abordagem do berço-ao-portão, ou seja, considera as etapas anteriores à entrega e uso do produto final, e, portanto, pode ser definida como uma ACV de processo. A função do processo é produzir etanol hidratado em destilaria autônoma integrada e a unidade funcional é *1 m³ de etanol hidratado*. Levando-se em conta os desempenhos técnicos agrícolas e industriais, os fluxos de referência adotados são *13,3 t de cana-de-açúcar para a etapa agrícola e 1 m³ de etanol para a etapa industrial*.

5.1.2.2 Requisitos de qualidade dos dados

Foram utilizados dados primários para a etapa de produção agrícola da cana-de-açúcar e etapa industrial de produção de etanol, complementados com dados secundários, provenientes de literatura técnica especializada. Foram utilizados dados secundários para a produção de insumos (fertilizantes, pesticidas, corretivos, energia elétrica, diesel etc.), provenientes da base de dados *ecoinvent* (para apoio de estudos de ACV, acessada pelo *software Simapro*) e dados de literatura especializada.

Figura 5.1 - Localização do estado do Mato Grosso (em destaque) no mapa do Brasil
Fonte: TUBS, 2008.

A cobertura geográfica do estudo é o estado do Mato Grosso, localizado na região Centro-Oeste do Brasil (Figura 5.1). O processo leva em conta certas peculiaridades da região e, por isso, o sistema não pode ser considerado essencialmente representativo da realidade da produção brasileira. Por outro lado, as mesmas especificidades são determinantes para os desempenhos processual e ambiental da unidade em estudo e correspondem a um retrato bastante fiel da realidade local, que apresenta grande potencial para instalação de processamentos integrados, como já foi apontado antes neste documento. A cobertura temporal cobre o período de coleta dos dados, ou seja, os anos 2012 e 2013, para o sistema de produto. Variações de ordem geográfica ou temporal das coberturas aqui definidas se devem aos escopos dos ICVs utilizados do banco de dados. A cobertura tecnológica considera a produção de cana-de-açúcar por cultivo convencional, com aplicação de calcário no solo, aplicação de torta de filtro e vinhaça como fertirrigação, aplicação de fertilizantes (NPK), aplicação de pesticidas e reguladores de crescimento, colheita de 25% da área por operação mecanizada, sem queima prévia da palhada, e 75% por operação manual com queima prévia da palhada. Na etapa industrial, a limpeza da cana ocorre por lavagem, a extração do caldo é

realizada por moendas à vapor, a fermentação por rota *Melle-Boinot* - com recuperação das leveduras -, e não é realizada a etapa de retificação do etanol hidratado para obtenção de etanol anidro. A planta é suprida energeticamente por sistema de cogeração com caldeira movida a bagaço de cana-de-açúcar, que gera vapor à 22bar, destinado ao suprimento de energia térmica e à geração de eletricidade em gerador. Não há exportação de eletricidade para a rede.

5.1.2.3 Definição do Sistema de Produto e Fronteiras do Sistema

O sistema de produto considera os seguintes processos elementares: (1) produção de cana-de-açúcar, (2) recepção e moagem da cana-de-açúcar, (3) tratamento do caldo, (4) fermentação, (5) destilação para a separação do etanol, (6) tratamento da vinhaça e (7) cogeração de energia (Figura 5.2). O estudo inclui ainda entre as fronteiras do sistema a produção dos insumos consumidos, eletricidade e das etapas de transporte disponíveis na base de dados *Ecoinvent*.

5.1.2.4 Critérios de Exclusão

Como critérios de exclusão, foi adotado que apenas as entradas com participação mássica superior a 1% do total de entradas seriam consideradas nos ICVs. Tal decisão visa diminuir o grau de incerteza que as entradas de massa inferior ao critério de exclusão, e cargas ambientais associadas aos seus ciclos de vida, possam acarretar a este estudo. Exceção a esta regra se fez para o caso dos fitossanitários aplicados na etapa agrícola. Considerando o critério de significância ambiental, foram todos incluídos na análise, independentemente de sua contribuição mássica.

Figura 5.2. Sistema de Produto e Fronteiras do Sistema de produção de etanol hidratado de cana-de-açúcar

5.1.2.5 Procedimentos de Alocação

Procedimentos de alocação se fizeram necessários apenas na etapa de esmagamento da cana-de-açúcar, já que este processo gera três produtos: caldo de cana-de-açúcar, bagaço que será consumido na caldeira (que não ultrapassa as fronteiras do estudo) e bagaço que sobra e não é utilizado no processo. Adotou-se, então, o critério de alocação mássica entre caldo extraído da cana, bagaço para a cogeração e o bagaço gerado em excesso, que não é utilizado no processo de produção de etanol, cujos fatores de alocação são, respectivamente, 82%, 15,09% e 2,91%.

5.1.2.6 Premissas

- Não foram considerados aspectos ambientais associados à construção de bens de capital.
- Na área em que se iniciará um ciclo produtivo de cana-de-açúcar costuma-se incluir a atividade de lavoura em que são plantadas culturas anuais por dois ou três ciclos agrícolas com o intuito de adaptar as condições de cerrado para condições agriculturáveis. No entanto, a cana-de-açúcar foi considerada como único produto de interesse e, não estando incluídas entre os ciclos da cana, as culturas de lavoura não foram consideradas no estudo.
- Para adequação aos métodos de AICV – especificamente à categoria Transformação de Área Natural - as transformações de áreas naturais foram consideradas “*forest*” (floresta), independentemente do tipo de mata nativa.
- Na inexistência de um modelo para a estimativa das emissões atmosféricas provenientes da queima do etanol como combustível da aeronave utilizada para aplicação aérea de fitossanitários, assumiu-se como premissa que a combustão é completa, liberando apenas CO₂ e óxidos de nitrogênio (NO_x), caracterizado aqui como dióxido de nitrogênio (NO₂).
- Apesar de o sistema representado estar em integração com a usina de etanol de fonte amilácea, estabeleceu-se como premissa desse estudo que os modelos seriam avaliados separadamente, dessa forma, apesar de dividirem os mesmos equipamentos, conforme tecnologia descrita, os processos não dividem insumos, como bagaço para cogeração do etanol amiláceo e vinhaça do etanol amiláceo para o campo de cana.
- O tanque de vinhaça recebe vinhaça da etapa de tratamento e águas residuais do processo provenientes de lavagem de piso, purga e lavagem de gases da caldeira. A vinhaça diluída é destinada à aplicação no campo como fertirrigação.
- Os transportes de vinhaça ocorrem por modal rodoviário.
- O sistema de cogeração da usina produz energia elétrica suficiente para a alimentação da usina, do sistema de fertirrigação, dos prédios administrativos e da vila de trabalhadores, mas não há eletricidade excedente. Dessa forma, não foi considerada a exportação de energia elétrica para a rede.

- Considerou-se que o bagaço apresenta um teor de umidade de 44,91% e o Poder Calorífico Inferior (PCI) de 8.604,5 kJ/kg. Admitiu-se que a eficiência energética na caldeira para a conversão de madeira em calor seja 72%.

5.1.2.7 Métodos de Avaliação de Impacto de Ciclo de Vida (AICV)

Para a etapa de AICV da análise ambiental foi utilizado o método *ReCiPe Midpoint (H) V.1.10 / World Recipe H* (GOEDKOOPE, 2012). Este método foi criado a partir da revisão e união de outros dois métodos consagrados de AICV, o *CML* e o *Ecoindicator 99*, e pode ser considerado um dos mais utilizados atualmente.

O ReCiPe considera dezoito categorias de impacto, sendo elas: *Mudanças Climáticas* (MC), *Acidificação Terrestre* (AT), *Eutrofização de Água Doce* (EAD), *Eutrofização Marinha* (EM), *Toxicidade Humana* (TH), *Formação de Oxidação Fotoquímica* (FOF), *Formação de Material Particulado* (FPM), *Ecotoxicidade Terrestre* (ETT), *Ecotoxicidade de Água Doce* (ETA), *Ecotoxicidade Marinha* (ETM), *Ocupação de Área Agrícola* (OAA), *Ocupação de Área Urbana* (OAU), *Transformação de Área Natural* (TAN), *Depleção de Água* (DA), *Depleção de Recursos Fósseis* (DF), *Depleção de Metais* (DM), *Depleção de Ozônio* (DO) e *Radiação Ionizante* (RI). Destas, foram selecionadas onze categorias consideradas relevantes para o estudo e descartadas sete categorias.

Não foram consideradas na análise as categorias Depleção de Metais, pois esta categoria está intimamente ligada a questões de infraestrutura, que, por premissa assumida, não foram consideradas neste estudo; Ocupação de Área Urbana, já que o objeto de estudo está localizado em áreas essencialmente agrícolas e não urbanas; Radiação Ionizante, devido à baixa representatividade da energia nuclear na matriz energética brasileira; Ecotoxicidade Marinha e Eutrofização Marinha, pois a localidade do objeto de estudo está a uma grande distância da costa brasileira e apresenta emissões apenas para água doce que, por sua vez, necessita atravessar diversos entrepostos até chegar ao mar; Depleção de Recursos Fósseis, pois se identificou uma sobreposição para a categoria entre este método e o método CED, utilizado na análise energética e descrito a seguir; e Depleção de Ozônio, que, ao ser considerado na análise, gerou emissões residuais, da ordem de centigramas CFC-11 eq por m³ de etanol.

Para a AICV do estudo energético foi selecionado o método *Cumulative Energy Demand V.1.08* (JUNGBLUTH; FRISCHKNECHT, 2009). O método CED, conforme

descrito anteriormente, trabalha com unidades de energia primária discretizadas em seis categorias de impacto, dadas: *Não renovável, fóssil*; *Não renovável, nuclear*; *Não renovável, biomassa*; *Renovável, biomassa*; *Renovável, eólica, solar e geotérmica (alternativas)*; e *Renovável, hídrica*. Todas as categorias de impacto foram consideradas.

O método CED trata especificamente de entradas energéticas primárias e cobre os aspectos relacionados a consumos de recursos, enquanto o método ReCiPe Midpoint é voltado aos aspectos de saídas do sistema na forma de emissões.

5.1.2.8 Software de apoio à realização de estudos de ACV

Adotou-se como ferramenta operacional de apoio à execução de estudos de ACV o software *Simapro v. 8.0.3.14 Analyst*.

5.2 Inventários do Ciclo de Vida (Análise de Inventário)

A etapa de Inventário do Ciclo de Vida consiste na coleta e validação de dados brutos e posterior tratamento dos dados para que todas as entradas e saídas de um processo elementar estejam referenciadas ao seu fluxo de referência. Os inventários construídos alimentam o software que processará a etapa seguinte de AICV.

Para o modelo de produção de etanol de cana-de-açúcar foram construídos inventários para cada processo elementar, que serão apresentados neste documento de forma unificada, a fim de se preservar a confidencialidade das informações fornecidas pela Usina e pelos produtores de cana-de-açúcar.

As informações utilizadas como dados brutos e seus respectivos procedimentos de cálculo estão apresentadas neste capítulo. Os modelos de cálculos de emissões para a etapa agrícola e industrial foram selecionados com base nas publicações do *Ecoinvent* (NEMECEK; KÄGI, 2007; NEMECEK; SCHNETZER, 2011) e complementados com modelos de publicações que consideravam outras emissões relevantes ou adaptavam modelos às condições brasileiras. Os modelos utilizados para os cálculos de emissões também estão aqui apresentados.

A produção de insumos e as etapas de transporte também foram consideradas e seus inventários foram obtidos do banco de dados *Ecoinvent* e adaptados às condições brasileiras.

Tais inventários estão descritos neste capítulo, sempre relacionando o inventário adaptado ao seu inventário de origem.

O inventário unificado da produção de etanol de cana-de-açúcar está apresentado no APÊNDICE A - Inventário do Ciclo de Vida da produção de etanol hidratado de cana-de-açúcar.

5.2.1 ICV da produção de cana-de-açúcar

As informações coletadas para este modelo dizem respeito às práticas de 15 fazendas produtoras de cana-de-açúcar que suprem as necessidades de matéria-prima sacarina da usina de etanol. Em cada fazenda, os ciclos produtivos são de 6 anos em média, ocorrendo a reforma da área ao fim deste período. Além disso, algumas plantas levam 12 meses da rebrota até a maturação e outras levam 18 meses, o que propicia a distribuição da colheita por um período maior de tempo, de forma a não formar estoques de cana colhida e não deixar a usina ociosa por tempo demasiado. Esses fatores implicam na ocorrência de diferentes atividades em diferentes áreas em um mesmo período. Para a coleta de dados, inicialmente, foram estabelecidas as áreas das fazendas em que ocorriam cada uma das atividades naquele ano. As atividades poderiam ser: *condução*, que são as atividades de tratos culturais nas áreas de cana-soca - ou seja, de plantas que já estão em seu segundo corte ou mais - que coincide com a área que será colhida naquele ano; *plantio*, são as atividades específicas para a cana-planta - as plantas que ainda sofrerão o primeiro corte -, as áreas com essa atividade não serão colhidas naquele ano; *reforma*, são as atividades realizadas ao fim do ciclo produtivo de 6 anos, em que são realizadas descompactações de solo e aplicação de corretivos de acidez, a fim de recuperar a área antes que um novo ciclo produtivo se inicie naquela área; *expansão recente*, são as atividades realizadas em uma área nova que será usada para o plantio de cana, conta também com atividades de descompactação e aplicação de calcário; e *expansão com lavoura*, é a etapa subsequente à expansão recente, em que são plantadas culturas anuais variadas para melhorar as condições do solo antes de receber o plantio de cana-de-açúcar. Esta última etapa, no entanto, não foi considerada na coleta de dados, conforme indicado nas premissas desse trabalho, portanto, não considerou-se o consumo de insumos ou emissões para essa área.

Após as áreas das fazendas serem classificadas segundo o seu estágio de atividade, de forma que todas as atividades fossem representadas no inventário, as quantidades de insumos

foram coletadas separadamente para cada tipo de atividade, em kg ou L por hectare, e multiplicadas pela porcentagem correspondente à atividade na qual cada insumo era consumido. Em seguida, os consumos por hectare ajustados foram divididos pela produtividade obtida em campo, obtendo-se assim um inventário com informações por tonelada de cana.

A área total das fazendas que abastecem a usina com cana-de-açúcar corresponde a 17.734 ha (informação pessoal¹³). Para os cálculos de consumo do inventário, foram excluídas as áreas de corredores, áreas construídas e áreas identificadas com erosão. Dentre as áreas consideradas, que totalizaram 17.157 ha, foram estipuladas as porcentagens condizentes a cada atividade e calculados os insumos proporcionalmente às atividades específicas (Tabela 5.1). No caso de pesticidas, quando foram utilizados diferentes produtos com a mesma função – pois são comprados segundo as condições de mercado –, foram selecionados os produtos mais significativos em área de aplicação, com base em dados dos plantios de 2012 e 2013.

Tabela 5.1 - Área do conjunto de fazendas produtoras de cana-de-açúcar e porcentagens das atividades exercidas na área total

Atividades	%	ha
Área colhida - cana soca	54%	9.186
Área plantada - cana planta	23%	3.934
Área reformada	4%	656
Área de expansão com lavoura	13%	2.219
Área de expansão recente	7%	1.162
Área considerada	100%	17.157
Área não considerada (corredores, sede, usina e erosão)		577
Área total		17.734

A área de reforma pode ser considerada abaixo do esperado, já que, no geral, para um ciclo de 6 anos cerca de 17% da área total seria destinada à reforma. No entanto, esta área de reforma reduzida pode ser compensada pelas grandes áreas de expansão, que somam 20% entre expansão com lavoura e expansão recente, que trarão maiores produtividades no primeiro ano de produção.

As áreas de expansão com lavoura correspondem a áreas de expansão em que são plantadas culturas anuais por dois ou três ciclos agrícolas com o intuito de adaptar as condições de cerrado para condições agriculturáveis. Porém, este inventário trata

¹³ Informação recebida por Sanches em Campos de Julio, em 2013.

especificamente de cana-de-açúcar e não considera o "*crop system*". Portanto, essas culturas não foram consideradas no estudo.

Produtividade

A safra levantada apresentou índices de produtividade de 84.700 kg/ha (informação pessoal¹⁴). Esta produtividade é excepcionalmente boa ao compará-la com as dos anos-safras anteriores e com a média para o estado. Essa alta produtividade pontual pode ser resultado da grande área de expansão do ano anterior, já que o primeiro ano de produção apresenta maiores produtividades. Além disso, outros motivos como o aumento da adubação, aumento da aplicação de fitossanitários etc. podem ser responsáveis pelo desempenho acima da média, que estão uniformemente refletidos no restante do inventário.

As mudas utilizadas no plantio são produzidas no local e, dessa forma, são retiradas da produção total de cana. Dessa forma, para o cálculo da produtividade adotada neste estudo, foram descontadas as quantidades de cana usadas na forma de muda. São utilizadas 15 t/ha de cana-de-açúcar como mudas, que produzirão colmos por seis anos em média, resultando no consumos de 2,5 t/ha de cana por ano, que não serão destinadas como produto final, mas sim retornarão ao início da etapa agrícola para gerar novas plantas. Com este ajuste, a produtividade efetiva considerada, ou seja, que resultará em produto destinado à etapa industrial, é de 82,2 t/ha.

Ocupação do solo

A ocupação da terra é considerada como um recurso da natureza “consumido” e foi calculada segundo Nemecek e Schnetzer (2011). A ocupação da terra sempre associa dois fatores, o primeiro é a área que está sendo ocupada por determinada atividade ou produto e o segundo é o tempo pelo qual esta área está sendo ocupada. Este dado foi obtido diretamente em função da tonelada de cana produzida. Em termos de área ocupada, considerou-se que, pela produtividade da cana-de-açúcar, a produção de 1 t de cana ocupa 121,62 metros quadrados (m²). Em relação ao tempo em que a cultura ocupa o solo, foi considerado que em um ciclo de 6 anos, a cana ocupa o solo por 5,5 anos, já que a terra fica desocupada por 6 meses (período de descanso da terra) entre um ciclo e o próximo. Ao anualizar a ocupação do solo, considerando o período de descanso, tem-se ocupação por cana em 91% do ano. Logo, a

¹⁴ Informação recebida por Sanches em Campos de Julio, em 2013.

ocupação do solo aqui considerada será 111,5 m².ano. A cultura ocupa solo classificado por “terra arável, irrigada”.

Transformação de Uso da Terra

A determinação da Transformação de Uso da Terra foi baseada nos procedimentos descritos por Nemecek, Schnetzer e Reinhard (2014), com uma adaptação no que diz respeito ao padrão de expansão. Como pressupostos, foi considerada a transformação de uso da terra dentro de um período de 20 anos e foram levantados os dados para o estado do Mato Grosso, assumindo-se a representatividade do estado para o caso estudado. O método geral para a determinação de transformação do uso da terra deste trabalho (informação pessoal¹⁵) será descrito a seguir.

O primeiro passo foi levantar as áreas ocupadas pelas culturas de interesse no estado do Mato Grosso nos anos de 1993 e 2013. Foram selecionados como fontes dos dados levantamentos oficiais e publicações do IBGE e da CONAB. Com esses dados é possível estabelecer a área total da cultura que já existia 20 anos atrás e, portanto se manteve, e a área que não existia, definida como área de expansão.

Para o estabelecimento do padrão de expansão para a área da cultura no estado, foram estabelecidas e quantificadas quais as possíveis transformações de uso da terra. Para isso, fez-se uso de um pressuposto importante: considerando a viabilidade técnica e o padrão histórico de expansão de culturas agrícolas no país, admitiu-se que as culturas avançam, preferencialmente, nessa ordem: (1) sobre culturas anuais e café - cujo solo já está domesticado e estável e apresenta boas condições para o plantio, (2) sobre áreas de pastagens - que já se encontram como áreas abertas e (3) sobre áreas de mata nativa – que exigem recursos para a derrubada de árvores e tempo para a adaptação do solo para a agricultura. Importante ressaltar que esta é uma das opções de estabelecer o padrão de expansão. Este padrão poderia ser substituído por outros, por exemplo, por um cenário pessimista, em que todo o crescimento de área plantada da cultura ocorresse sobre áreas de mata nativa ou um cenário otimista, em que todo o crescimento de área ocorre sobre culturas anuais e, portanto, não gera mudança de uso da terra. No entanto, como escolha metodológica, o trabalho seguiu o padrão inicialmente descrito.

Para determinar se houve mudança de uso da terra ou não, foram levantadas as áreas plantadas com as culturas anuais de 1ª safra mais tradicionais (arroz, feijão e milho) e com

¹⁵ Informação recebida por Marília Folegatti Matsuura em São Paulo, em 27 mar 2015.

café dos anos 1993 e 2013 e, também, as áreas de pastagem nestes mesmos períodos. No caso de ter ocorrido redução das áreas de culturas anuais entre esses 20 anos, foi considerado que a cultura de interesse avançou sobre culturas anuais, na mesma proporção de sua redução. Caso a área de avanço da cultura estudada sobre cultura anual não contemple o crescimento total da cultura de interesse, considerou-se que o restante avançou sobre pastagem ou sobre mata nativa. Seguindo a lógica, são, então, levantadas as áreas de pastagens (plantadas e naturais) do estado nos anos de 1993 e 2013. No caso de ter ocorrido redução das áreas de pastagem, considera-se que a cultura de interesse avançou sobre pastagem na mesma proporção de seu decréscimo. Havendo ainda excedente de área de expansão da cultura não contemplada pelo crescimento sobre pastagem, considera-se que o restante da expansão ocorreu sobre mata nativa. Com esse exercício, é possível determinar a porcentagem da área de expansão da cultura que se deu sobre cada tipo de uso da terra.

O último passo é aplicar as porcentagens de expansão como “fatores de conversão do uso do solo em questão”, para determinar a representação de cada tipo de transformação de uso da terra em uma unidade de área atual de cultura plantada (no caso, por ha) ou por cada t de produto cultivado.

Os dados considerados para a determinação da Transformação do Uso da Terra da cultura de cana-de-açúcar no Mato Grosso estão demonstrados na Tabela 5.2. Foram levantados os dados de área plantada no estado em 1993 no Censo Agropecuário 1995-1996 (INSTITUTO BRASILEIRO DE GEOGRAFIA E ESTATÍSTICA, 1997) e os dados de 2013 no portal eletrônico IBGE Estados (INSTITUTO BRASILEIRO DE GEOGRAFIA E ESTATÍSTICA, 2013b). Segundo o levantamento, cerca de 74% da área atual de cana no MT foi implantada nos últimos 20 anos e apenas 26% da área já existia antes desse período. Para o levantamento de áreas plantadas de arroz, feijão primeira safra, milho primeira safra e café, foram utilizadas as publicações de Séries Históricas (por cultura) da CONAB (COMPANHIA NACIONAL DE ABASTECIMENTO, 2015).

Neste caso, a área de expansão da cultura da cana-de-açúcar foi menor do que a redução da área de culturas anuais. Dessa forma, seguindo a lógica previamente estabelecida, toda a expansão de cana-de-açúcar no Mato Grosso se deu sobre áreas de culturas anuais, havendo transformação de uso da terra de “terra arável, não irrigada” para “terra arável, irrigada”. Por ser a cana-de-açúcar uma cultura semiperene e não anual, portanto com características físicas e morfológicas diferentes, foram consideradas as emissões de CO₂ derivadas dessa mudança de uso da terra. As emissões atmosféricas estão descritas no item 5.2.1.1.

Tabela 5.2 - Áreas consideradas para a determinação de Transformação do Uso da Terra para a cultura de cana-de-açúcar, entre os anos 1993 e 2013, no estado do Mato Grosso, Brasil

	cana-de-açúcar	culturas anuais
	ha	
área plantada - 1993	73.181 ¹	810.034 ³
área plantada - 2013	282.741 ²	281.390 ³
crescimento de área	209.560	-528.644
% de expansão da cana		100%
Fatores de conversão do uso do solo (A)		74,1%

Fonte: ¹IBGE, 1997; ²IBGE, 2013b; ³CONAB, 2015

Transporte de insumos

As etapas de transporte dos insumos agrícolas foram também modeladas neste trabalho. Considerou-se para todos os casos o uso de modal rodoviário em caminhões de capacidade de 7,5–16 t. Os dados de operação usados nesses processos foram obtidos de bancos de dados e adaptados para as condições locais. Assim como sugere a norma ABNT ISO 14040 (ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS, 2009a), a consistência dessas aproximações foi previamente testada a fim de avaliar suas implicações sobre os resultados finais do estudo.

Devido à falta de dados específicos, para o transporte dos insumos calcário, gesso, herbicidas, inseticidas, fungicidas, fertilizantes, maturadores, inibidores e diesel foi considerado como local de origem o centro comercial mais próximo. A este trajeto foi atribuída a distância de 100 km da área de destino (distância até o centro urbano mais próximo) e, somou-se a esta a distância de raio médio da fazenda, 22 km, totalizando em distância média de 122 km percorridos até o local de aplicação. Para o transporte da vinhaça e da torta de filtro da usina até a área de aplicação e o transporte de cana-de-açúcar do campo até a usina foi considerada a distância média de raio da fazenda, 22 km.

5.2.1.1 Modelos de Emissões e parâmetros utilizados

Em relação às emissões das etapas agrícolas, fez-se uso de modelos difundidos e aceitos pela comunidade científica. Os guias *ecoinvent* (NEMECEK; KÄGI, 2007; NEMECEK; SCHNETZER, 2011) foram selecionados como referências norteadoras para a escolha dos modelos de cálculos de emissões, mas também fez-se uso de referências complementares para a adaptação dos modelos às condições brasileiras quando possível (MILANEZ et al., 2014; NOVAIS; SMYTH, 1999; COMISSÃO EUROPEIA, 2010; CANALS, 2003; SUGAWARA, 2012; GARCIA; SPERLING, 2010). O mesmo ocorreu para as emissões das etapas industriais, em que Intergovernmental Panel on Climate Changes (IPCC) (2006) e Agência Nacional de Águas (ANA) et al. (2009) são exemplos de referências norteadoras.

A seguir estão apresentados os modelos utilizados para as estimativas de emissões, seguidos dos parâmetros selecionados para a alimentação destes modelos.

Emissões de amônia (NH_3) para a atmosfera por uso de fertilizantes

As emissões de amônia para o ar foram estimadas segundo Nemecek e Schnetzer (2011) e adaptação de Milanez et al. (2014) e podem decorrer do uso de vinhaça e fertilizantes. Foram calculadas as emissões de NH_3 por uso de vinhaça (Eq. 5.2, Tabela 5.3) e fertilizante multinutriente (Eq. 5.3, Tabela 5.4) para a cana-de-açúcar.

$$NH_{3,vinhaça} = Q_{vinhaça} * N_{vinhaça} * F_{TAN} * FE_{TAN} * \frac{17}{14} * (1 - N_2O_{vinhaça}) \quad \text{Eq. 5.2}$$

Onde,

$NH_{3,vinhaça}$ = emissão de NH_3 por uso de vinhaça, em kg/ha

$Q_{vinhaça}$ = quantidade de vinhaça aplicada, em m³/ha

$N_{vinhaça}$ = teor de N na vinhaça, em %

F_{TAN} = teor de solubilização do N na vinhaça, em %

FE_{TAN} = fator de emissão para compostos líquidos digeridos, em %

Fator de conversão mássico de N para NH_3 = 17/14

$N_2O_{vinhaça}$ = emissões totais de óxido nitroso (N_2O) por uso de vinhaça, em %

Tabela 5.3 - Parâmetros utilizados para o cálculo de emissões de NH₃ para a atmosfera por aplicação de vinhaça, para produção de cana-de-açúcar

N _{vinhaça}	F _{TAN}	FE _{TAN}	N ₂ O _{vinhaça}
kg N/m ³		%	
0,27	50%	60%	1%

Fonte: Nemecek e Schnetzer, 2011

$$NH_{3,fertilizante} = \sum(Q_{fertilizante} * FE_{fertilizante}) * \frac{17}{14} * (1 - N_2O_{fertilizante}) \quad \text{Eq. 5.3}$$

Onde,

NH_{3, fertilizante} = emissão de NH₃ por uso de fertilizantes, em kg/ha

Q_{fertilizante} = quantidade de fertilizante aplicada, por tipo de fertilizante, em kg/ha

FE_{fertilizante} = fator de emissão para fertilizante, por tipo de fertilizante, em %

Fator de conversão mássico de N para NH₃ = 17/14

N₂O_{fertilizante} = emissões totais de N₂O por uso de vinhaça, em %

Tabela 5.4 - Parâmetros utilizados para o cálculo de emissões de NH₃ para a atmosfera por aplicação de fertilizantes minerais, para a produção de cana-de-açúcar

FE _{fertilizante}	N ₂ O _{fertilizante}
	%
NPK	4%
	1%

Fonte: Nemecek e Schnetzer, 2011; Trivelin e Franco, 2009

Emissões de nitrato (NO₃⁻) para a águas subterrâneas por uso de fertilizantes

As emissões de nitrato foram estimadas segundo Nemecek e Schnetzer (2011) (Eq. 5.4), com adaptações de diversos parâmetros às condições brasileiras (Tabela 5.5). Para a cultura da cana-de-açúcar, as entradas de N correspondem à soma de N obtido da vinhaça e N obtido de fertilizante mineral.

$$NO_{3,fertilizantes}^{-} = \left\{ 21,37 + \left(\frac{P}{c} * L \right) * [(0,0037 * S) + (0,0000601 * N_{org}) - (0,00362 * U)] \right\} * \frac{62}{14} \quad \text{Eq. 5.4}$$

Onde,

NO_{3,fertilizante}⁻ = emissão de NO₃⁻ por uso de fertilizantes, em kg/ha

P = precipitação + irrigação, em mm/ano

c = teor de argila, em %

L = profundidade de raiz, em m

S = nitrogênio fornecido pelo fertilizante, em kg N/ha

N_{org} = nitrogênio contido na matéria orgânica do solo, em kg N/ha

U = nitrogênio absorvido pela cultura, em kg N/ha

Fator de conversão mássico de N para NO_3^- = 62/14

Tabela 5.5 - Parâmetros utilizados para o cálculo de emissões de NO_3^- para águas subterrâneas por aplicação de fertilizantes, para produção de cana-de-açúcar

P	c	L	S	Norg	U
mm/ano	%	m		kg N/ha	
2507,3 ^{1,2}	23% ²	0,6 ³	101,74 ²	1140,8 ⁴	99,43 ⁵

Fonte: ¹Portal Mato Grosso, 2008; ²informação pessoal¹⁶; ³Macedo, 2007; ⁴Abbruzzini, 2011; ⁵Vitti et al, 2005.

Emissão de fosfato (PO_4^{3-}) para águas superficiais e subterrâneas por uso de fertilizantes

Os solos tropicais, como os solos brasileiros, apresentam mecanismos de fixação de fósforo, devido à baixa disponibilidade natural desse nutriente no solo. Com baixos teores de P solúvel, a mobilidade do elemento não é suficiente para que ocorra processos de lixiviação e escoamento de fósforo para águas superficiais (NOVAIS; SMYTH, 1999). Por isso, apesar de serem consideradas no guia Ecoinvent, essas emissões não foram consideradas neste estudo.

Emissão de fósforo (P) para águas superficiais por erosão do solo

As emissões de fósforo foram estimadas segundo Nemecek e Schnetzer (2011) (Eq. 5.5), com adaptações de parâmetros às condições brasileiras, às culturas e tipos de cultivos (Tabela 5.6). A emissão ocorre na forma de fosfatos, no entanto, neste modelo é quantificado por seu equivalente em fósforo.

$$P_{er} = S_{er} * P_{ss} * F_r * F_{era} \quad \text{Eq. 5.5}$$

Onde,

P_{er} = emissão de P por erosão de solo, em kg/ha

S_{er} = quantidade de solo erodido, em kg/ha

P_{ss} = quantidade de P em solo superficial, em kg P/kg solo

F_r = fator de enriquecimento do solo erodido por P (adimensional)

F_{era} = fração do solo erodido que alcança águas superficiais, em %

¹⁶ Informação recebida por Sanches em Campos de Julio, em 2013.

Tabela 5.6 - Parâmetros utilizados para o cálculo de emissões de P para águas superficiais por erosão do solo, para produção de cana-de-açúcar

S_{er}	P_{ss}	F_r	F_{era}
kg/ha	kg P/kg solo		%
13500 ¹	0,00095 ²	1,86 ²	20% ²

Fonte: ¹Garbiate, 2011; ²Nemecek e Schnetzer, 2011.

Emissão de óxido nitroso (N_2O) para a atmosfera por uso de fertilizantes e restos culturais

As emissões de N_2O foram estimadas com referência a Nemecek e Schnetzer (2011) (Eq. 5.6), complementada por outros trabalhos que forneceram parâmetros representativos para as respectivas culturas no Brasil (Tabela 5.7). As emissões de N_2O são dadas pela soma das emissões de N_2O diretas por uso de fertilizantes e restos culturais deixados no campo, de N_2O derivado da amônia e N_2O derivado de nitratos. Para a cultura de cana-de-açúcar, considerou-se que os restos culturais deixados no campo correspondem à palhada de 25% da área de cana colhida, o que corresponde ao processo mecanizado. Para os outros 75% da área, que sofrem colheita manual, a palhada é queimada e, portanto, não é deixada no campo. Importante lembrar que os restos culturais da cana-de-açúcar limitam-se às folhas.

$$N_2O_{total} = \frac{44}{28} * \left[(0,01 * (N_{tot} + N_{rc}) + \left(0,01 * \frac{14}{17} * NH_3 \right) + \left(0,0075 * \frac{14}{62} * NO_3^- \right) \right] \quad \text{Eq.5.6}$$

Onde,

N_2O_{total} = emissão de N_2O por uso de fertilizantes e restos culturais, em kg/ha

Fator de conversão mássico de N para N_2O = 44/28

N_{tot} = soma do N em fertilizantes minerais e orgânicos, em kg/ha

N_{rc} = N presente nos restos culturais que são deixados no campo, em kg/ha

NH_3 = emissão de NH_3 por uso de fertilizantes, em kg/ha

Fator de conversão mássico de NH_3 para N = 14/17

NO_3^- = emissão de NO_3^- por uso de fertilizantes, em kg/ha

Fator de conversão mássico de NO_3^- para N = 14/62

Tabela 5.7 - Parâmetros utilizados para o cálculo de emissões de N_2O para a atmosfera por aplicação de fertilizantes e restos culturais, para produção de cana-de-açúcar

Teor de N nos restos culturais	
Kg N / t cana	0,6

Fonte: Vitti et al., 2005

Emissão de óxidos de nitrogênio (NO_x) para a atmosfera por uso de fertilizantes

As emissões de NO_x também foram estimadas de acordo com Nemecek e Schnetzer (2011) (Eq. 5.7). Neste caso, não foi necessária a complementação com fatores nacionais, uma vez a emissão do NO_x corresponde a 21% da emissão de N_2O .

$$NO_{x, fertilizante} = N_2O_{total} * 0,21 \quad \text{Eq. 5.7}$$

Onde,

$NO_{x, fertilizante}$ = emissão de NO_x por uso de fertilizantes, em kg/ha

N_2O_{total} = emissão de N_2O por uso de fertilizantes e restos culturais, em kg/ha

Emissão de dióxido de carbono (CO_2) para a atmosfera por uso de ureia como fertilizante

As emissões de CO_2 por uso de ureia foram calculadas de acordo com Nemecek e Schnetzer (2011) e não se fez necessário o uso de parâmetros adaptados (Eq.5.8).

$$CO_{2, ureia} = 1,57 * Q_{ureia} * \frac{28}{60} \quad \text{Eq. 5.8}$$

Onde,

$CO_{2, ureia}$ = emissão de CO_2 por uso de ureia, em kg/ha

Fator de emissão de CO_2 para ureia = 1,57 kg CO_2 /kg de N-ureia

Q_{ureia} = quantidade de ureia aplicada, em kg/ha

Fator de conversão mássico de ureia (CH_4N_2O) para N = 28/60

Emissão de metais pesados para águas superficiais e solo por uso de fertilizantes e calcário

Para a estimação das emissões de metais pesados não foi adotada a referência de Nemecek e Schnetzer (2011), devido à falta de parâmetros requisitados pelo modelo para as condições brasileiras, como a concentração de metais pesados em águas subterrâneas e solos e deposição de metais pesados. Canals (2003) foi adotado como referência para os cálculos de estimativa de emissão de metais pesados (Eq. 5.9 e 5.10). Outras referências foram utilizadas para o levantamento de parâmetros nacionais (Tabela 5.8).

$$MP_{\text{águas sup.}} = [(\sum T_{MP, \text{insumo}} * Q_{\text{insumo}}) - (T_{MP, \text{colhido}} * Q_{\text{colhido}})] / 1000000 * 0,0001 \quad \text{Eq. 5.9}$$

Onde,

$MP_{\text{águas sup.}}$ = emissão do metal pesado para águas superficiais, em kg/ha

$T_{MP, \text{insumo}}$ = teor do metal pesado nos insumos (fertilizantes, calcário e gesso), em mg/kg

Q_{insumo} = quantidade de insumo aplicado, em kg de nutriente/ha

$T_{MP, \text{colhido}}$ = teor do metal pesado nos colmos/grãos colhidos, em mg/kg

Q_{colhido} = quantidade de colmos/grãos colhidos, em kg/ha

FE = fator de emissão para águas superficiais = 0,0001

$$MP_{\text{solo}} = \{[(\sum T_{MP, \text{insumo}} * Q_{\text{insumo}}) - (T_{MP, \text{colhido}} * Q_{\text{colhido}})] / 1000000\} - MP_{\text{águas sup.}} \quad \text{Eq. 5.10}$$

Onde,

MP_{solo} = emissão do metal pesado para o solo, em kg/ha

$T_{MP, \text{insumo}}$ = teor do metal pesado nos insumos (fertilizantes, calcário e gesso), em mg/kg

Q_{insumo} = quantidade de insumo aplicado, em kg de nutriente/ha

$T_{MP, \text{colhido}}$ = teor do metal pesado nos colmos/grãos colhidos, em mg/kg

Q_{colhido} = quantidade de colmos/grãos colhidos, em kg/ha

$MP_{\text{águas sup.}}$ = emissão do metal pesado para águas superficiais, em kg/ha

Tabela 5.8 - Teor de Metal Pesado dos insumos ($T_{MP, \text{insumo}}$) e Teor de Metal Pesado nos colmos ($T_{MP, \text{colhido}}$) para o cálculo de emissões de metais pesados para águas superficiais e solo por aplicação de fertilizantes, calcário e gesso, para produção de cana-de-açúcar

Metal Pesado	$T_{MP, \text{insumo}}$ ¹					$T_{MP, \text{colhido}}$
	ureia	TSP	KCl	Calcário	Gesso	
			mg/kg			mg/kg
Cd	0,03	52,00	0,05	0,00	0,80	0,00 ²
Cu	3,94	45,00	4,36	6,00	10,00	2,34 ³
Zn	28,86	299,00	40,16	7,00	50,00	3,69 ³
Pb	0,72	3,50	4,80	0,00	9,90	1,33 ²
Ni	1,31	43,99	1,83	0,00	4,90	0,00 ²
Cr	1,31	260,99	1,74	9,90	9,90	0,00 ²

Fonte: ¹Sugawara, 2012; ²Camilotti, 2009; ³Orlando Filho, 1993 apud Adorna, 2011.

Emissões para atmosfera pela queima de diesel

A estimativa de emissões de substâncias provenientes da queima do diesel em máquinas agrícolas segue como referência Nemecek e Kägi (2007). A fórmula utilizada para

o cálculo é demonstrada na Equação 5.11 e a lista de substâncias, assim como os respectivos parâmetros, na Tabela 5.9.

$$E_{\text{gases exaustão}} = Q_{\text{diesel}} * FE_{\text{gases exaustão}} * 0,001 \quad \text{Eq. 5.11}$$

Onde,

$E_{\text{gases exaustão}}$ = Emissão da substância dos gases de exaustão, em kg/ha

Q_{diesel} = Quantidade de diesel consumido, em kg/ha

$FE_{\text{gases exaustão}}$ = Fator de emissão para a substância pela queima de diesel, em g/kg

Tabela 5.9 - Substâncias e parâmetros utilizados para o cálculo de emissões para a atmosfera por queima de diesel

Substância nos gases de exaustão	$FE_{\text{gases exaustão}}$ g/kg combustível
CO ₂	3,12E+03
SO ₂	1,01E+00
CH ₄	1,29E-01
C ₆ H ₆	7,30E-03
Cd	1,00E-05
Cr	5,00E-05
Cu	1,70E-03
N ₂ O	1,20E-01
Ni	7,00E-05
Zn	1,00E-03
C ₂₀ H ₁₂ Benzo(a)pireno	3,00E-05
NH ₃	2,00E-02
Se	1,00E-05
Benzo(a)antraceno	8,00E-05
Benzo(a)fluorantreno	5,00E-05
Criseno	2,00E-04
Dibenzo(a,h)-antraceno	1,00E-05
Fluoranteno	4,50E-04
Fenanteno	2,50E-03
Hidrocarbonetos	3,00E+00
CO, fóssil	5,40E+00
NO _x	4,25E+01

Fonte: Nemecek e Kägi, 2007

Emissões para atmosfera pela queima da palhada da cana-de-açúcar

As emissões de substâncias pela queimada da palha, bem como seus parâmetros, são estimadas segundo o modelo de Garcia e Sperling (2010) (Eq. 5.12 e Tabela 5.10). O processo de produção da cana-de-açúcar conta com a colheita manual em 75% da área colhida. A queima prévia da cana é uma prática comum em sistemas de colheita manual. A principal justificativa é proteger os trabalhadores de animais peçonhentos. Essa prática, no entanto, tende a ser completamente substituída pela colheita mecanizada nesta região, seguindo a tendência nacional.

$$E_{\text{palhada}} = Q_{\text{palhada}} * FE_{\text{palhada}} \quad \text{Eq. 5.12}$$

Onde,

E_{palhada} = Emissão da substância pela queima da palhada, em kg/ha

Q_{palhada} = Quantidade de palhada produzida, em t/ha

FE_{palhada} = Fator de emissão para a substância pela queima da palhada, em kg/t

Tabela 5.10 - Substâncias e parâmetros utilizados para o cálculo de emissões para a atmosfera por queima de palhada

Substâncias na queima da palhada	FE_{palhada} kg/t palha
Compostos Orgânicos Voláteis (VOC)	7
CO biogênico	92
NO _x	2,5
Material Particulado, <10um	7,8
Material Particulado, <2,5um	3,9
SO ₂	0,4
N ₂ O	0,070
CH ₄ biogênico	2,70

Fonte: Garcia e Sperling, 2010

Emissões para atmosfera pela queima da etanol

Outra característica restrita ao processo de produção de cana-de-açúcar é o uso de etanol como combustível para aplicações aéreas de fitossanitários. No entanto, não foi encontrado um modelo que estime as emissões atmosféricas da queima do combustível em aeronave de uso agrícola. Dessa forma, as emissões foram estimadas a partir do balanço estequiométrico simples, sendo considerada como premissa que a combustão é completa e

libera apenas CO₂ biogênico, não liberando CO. Uma pequena parcela de NO_x, caracterizada aqui como NO₂, também foi estimada durante a combustão.

Emissões de pesticidas para o solo

A estimativa de emissões de pesticidas para o solo seguiu as recomendações de Nemecek e Schnetzer (2011), que consideram que todos os produtos fitossanitários aplicados têm o solo como compartimento final. As emissões são expressas por quantidade do ingrediente ativo aplicado ou, quando o ingrediente ativo não consta na lista de substâncias no banco de dados, por seu grupo químico correspondente. Quando a substância não está disponível, tampouco o grupo químico, a opção “pesticida não especificado” foi selecionada e utilizada como emissão.

Emissões de CO₂ para a atmosfera por Mudança de Uso da Terra

As emissões de CO₂ devido à mudança de uso da terra foram estimadas segundo a Directiva 2009/28/CE de 23 de Abril de 2009 da Comissão Europeia (COMISSÃO EUROPEIA, 2009) e a Decisão da Comissão de 10 de Junho de 2010 relativa a diretrizes para o cálculo das reservas de carbono no solos para efeito da Diretiva 2009/28/CE (COMISSÃO EUROPEIA, 2010).

O primeiro documento (COMISSÃO EUROPEIA, 2009), que trata da promoção de energias de fontes renováveis na Europa, apresenta o modelo utilizado para o cálculo de emissões de CO₂ por mudança do estoque de carbono (C), tanto do solo quanto da vegetação, na mudança de uso da terra anualizada num horizonte de 20 anos (Eq. 5.13).

$$e_l = (CS_R - CS_A) * \frac{44}{12} * \frac{1}{20} \quad \text{Eq. 5.13}$$

Onde,

E_l = emissão anual de CO₂ por alteração do uso da terra, em t CO₂/ha.ano

CS_R = carbono armazenado associado ao uso de referência do solo (20 anos antes), em t C/ha

CS_A = carbono armazenado associado ao uso de atual do solo, em t C/ha

Fator de conversão mássica de carbono para CO₂ = 44/12

Fator de anualização num horizonte de 20 anos = 1/20

O segundo documento (COMISSÃO EUROPEIA, 2010) estabelece as diretrizes para o cálculo de estoques de carbono em diferentes tipos de solo, diferentes tipos de vegetação e culturas agrícolas e sob variadas condições tecnológicas de cultivo. Na Eq. 5.14 está apresentado o cálculo que define a quantidade de carbono armazenada em uma área segundo a sua ocupação, determinando assim os fatores CS_R e CS_A da Eq. 5.13.

$$CS_i = (SOC + C_{VEG}) * A \quad \text{Eq. 5.14}$$

Onde,

CS_i = carbono armazenado associado ao uso i do solo, incluindo solo e vegetação, em t C/ha

SOC = carbono orgânico do solo, em t C/ha

C_{VEG} = carbono armazenado na vegetação aérea e subterrânea, em t C/ha

A = fator de conversão da superfície do tipo de uso em questão, em % da área sujeita à mudança deste uso da terra

A Eq. 5.15 demonstra o cálculo de estoque de carbono no solo, determinando o fator SOC da Eq. 5.14. Os fatores necessários para o cálculo do SOC , assim como o fator C_{VEG} da Eq. 5.14, são obtidos do documento da Comissão Europeia (2010) que apresenta diversas opções de valores para os fatores, segundo as características específicas de cada caso. Nas Tabelas 5.11 e 5.12 estão descritos os valores selecionados e utilizados neste estudo e as descrições das características que levaram às suas escolhas. Mais detalhes podem ser obtidos nos documentos de referência.

$$SOC = SOC_{ST} * F_{LU} * F_{MG} * F_I \quad \text{Eq. 5.15}$$

Onde,

SOC = carbono orgânico do solo, em t C/ha

SOC_{ST} = carbono orgânico normal do solo na camada superior do solo até aos 30 centímetros de profundidade, em t C/ha

F_{LU} = fator de uso do solo (adimensional)

F_{MG} = fator de tecnologia de cultivo (adimensional)

F_I = fator de aporte de insumos (adimensional)

Tabela 5.11 - Fatores utilizados para a determinação do estoque de carbono orgânico do solo (SOC)

Usos da Terra	cultura anual	cana-de-açúcar	pastagem	mata nativa
Região climática	Tropical Semi-úmida			
Tipo de Solo (SOC _{ST})	Solos com argila de baixa atividade			
	tC/ha	47		
Uso do Solo (F _{LU})	Cultivo	Cultivo	Savana	Floresta Autóctone (não degradada)
	Fator	0,48	0,48	1
Tecnologia de Cultivo (F _{MG})	sem mobilização	mobilização completa	intervenção mínima	NA
	Fator	1,22	1	-
Aporte de Insumos (F _I)	elevado sem estrume	médio	médio	NA
	Fator	1,11	1	-

Fonte: Comissão Europeia, 2010.

Tabela 5.12 - Fatores utilizados para a determinação do estoque de carbono orgânico na vegetação (C_{VEG})

Usos da Terra	cultura anual	cana-de-açúcar	pastagem	mata nativa
Tipo de Vegetação	-	Tropical		Tropical
Região Climática	Todas	Tropical semi-úmida	Tropical semi-úmida	-
Zona Ecológica	-	Floresta tropical semi-úmida de folha caduca	-	Matagais
Continente	-	América Central e do Sul	-	América do Norte e do Sul
C _{VEG}	tC/ha	0	5	8,1
				53

Fonte: Comissão Europeia, 2010

Absorção de CO₂ da atmosfera

Nemecek e Schnetzer (2011) foram utilizados como referência para o cálculo da estimativa de absorção de CO₂ pela planta. Apenas a parte da planta que é colhida – chamada aqui de produto de referência - é considerada como “exportadora” de CO₂, já que os restos culturais deixados no solo tendem a se decompor em poucos anos, devolvendo o CO₂ fixado para a atmosfera. Também são desconsiderados os teores de carbono presentes nas sementes ou mudas utilizadas no plantio. O modelo usado para o cálculo está demonstrado na Eq. 5.16 e os parâmetros utilizados na Tabela 5.13.

$$CO_{2,absorvido} = \frac{44}{12} * [(Q_{PR} * MS_{PR} * C_{MS,PR}) - (Q_{semente} * MS_{sem.} * C_{MS,sem.})] \quad \text{Eq. 5.16}$$

Onde,

$CO_{2,absorvido}$ = CO_2 absorvido pela parte colhida da planta, em kg/ha

Fator de conversão mássico de C para CO_2 = 44/12

Q_{PR} = Quantidade do produto de referência, em kg/ha

MS_{PR} = Teor de matéria seca no produto de referência, em kg MS/kg produto

$C_{MS,PR}$ = Teor de carbono na massa seca do produto de referência, em kg C/kg produto

$Q_{semente}$ = Quantidade de sementes/mudas, em kg/ha

$MS_{sem.}$ = Teor de matéria seca na semente/muda, em kg MS/kg sem./muda

$C_{MS,aem.}$ = Teor de carbono na massa seca da semente/muda, em kg C/kg semente/muda

Tabela 5.13 - Parâmetros utilizados para o cálculo de absorção de CO_2 da atmosfera pela planta, para produção de cana-de-açúcar

Produto de Referência	MS_{PR}	$C_{MS,PR}$	$MS_{sem.}$	$C_{MS,sem}$
	kg MS/kg PR	kg C/kg MS	kg MS/kg PR	kg C/kg MS
colmos	0,3 ¹	0,42 ²	0,3 ¹	0,42 ²

Fonte: ¹Sampaio & Salcedo, 1991 apud Gomes, 2003; ²Ripoli & Ripoli, 2004 apud Marques et al, 2009.

5.2.1.2 Banco de dados utilizado

A produção de insumos e as etapas de transporte também foram consideradas e seus ICVs foram obtidos do banco de dados Ecoinvent e USLCI e adaptados às condições brasileiras. As adaptações realizadas se referem à substituição de toda eletricidade consumida nos processos pela eletricidade do *grid* brasileiro e, também, à substituição de energia térmica de qualquer fonte por energia térmica proveniente de gás natural. Em relação às etapas de transporte, foram utilizados os ICVs do banco de dados Ecoinvent para todos os insumos utilizados diretamente nos ICVs construídos. Na Tabela 5.14, são apresentados os ICVs utilizados e os ICVs dos bancos de dados que serviram como referências para as adaptações.

Tabela 5.14 - Inventários de Ciclo de Vida utilizados no Inventário de produção de cana-de-açúcar e os respectivos ICVs dos bancos de dados que serviram como referência para as adaptações.

Referência Ecoinvent	Inventários Adaptados
Urea, as N, at regional storehouse/RER U	Urea, as N, at regional storehouse - BR
Triple superphosphate, as P ₂ O ₅ , at regional storehouse/RER U	Triple superphosphate, as P ₂ O ₅ , at regional storehouse - BR
Potassium chloride, as K ₂ O, at regional storehouse/RER U	Potassium chloride, as K ₂ O, at regional storehouse - BR
Limestone, milled, loose, at plant/CH U	Limestone, milled, loose, at plant - BR
Gypsum, mineral, at mine/CH U	Gypsum, mineral, at mine - BR
Glyphosate, at regional storehouse/RER U	Glyphosate, at regional storehouse - BR
Herbicides, at regional storehouse/RER U	Herbicides, at regional storehouse - BR
2,4-D, at regional storehouse/RER U	2,4-D, at regional storehouse - BR U
Propylene glycol, liquid, at plant/RER U	Propylene glycol, liquid, at plant - BR U
Pyridine-compounds, at regional storehouse/RER U	Pyridine-compounds, at regional storehouse - BR U
Fungicides, at regional storehouse/RER U	Fungicides, at regional storehouse - BR U
Triazine-compounds, at regional storehouse/RER U	Triazine-compounds, at regional storehouse - BR U
Diuron, at regional storehouse/RER U	Diuron, at regional storehouse - BR
Insecticides, at regional storehouse/RER U	Insecticides, at regional storehouse - BR

Referência USLCI	Inventários Adaptados
Diesel, at refinery/1/US	Diesel, at refinery/BR

Para as etapas de transporte foi selecionado o ICV do banco de dados Ecoinvent denominado “*Transport, lorry 7,5-16t, EURO3/RER U*”.

É importante salientar que todas as adaptações consideradas no estudo foram analisadas exaustivamente a fim de se verificar a magnitude das variações que poderiam acarretar ao modelo. As adaptações realizadas adequam os dados à realidade brasileira sem, no entanto, influenciar direta e artificialmente os resultados.

5.2.2 ICV da produção de etanol de cana-de-açúcar

O modelo aqui descrito teve como fontes de informação dados primários, coletados conforme descrição dos materiais e métodos (item 4.2). Estes foram complementados por dados secundários obtidos em literatura especializada, com destaque para as produções de Palacio (2010), da ANA et al. (2009) e Dias et al. (2011), que se complementam, mantendo sempre a coerência e fidelidade necessárias à realidade brasileira.

Os dados primários foram coletados para as produções de etanol das safras 2012/2013 e 2013/2014. A combinação dos dois conjuntos entre si e com os dados secundários gerou um

inventário uniforme e representativo. Os dados de insumos materiais e energéticos do processo foram coletados em quilogramas (kg), litros (L) ou megawatts (MW) por hora (h) e complementados e ajustados pelo fechamento dos balanços de massa e energia. Os valores ajustados por hora foram, então, divididos pelo volume de etanol produzido por hora para se obter um ICV com informações por m³ de etanol.

Rendimento industrial

A produtividade e produção total de etanol estão relacionadas não apenas à quantidade de cana disponível, mas principalmente à capacidade de moagem e destilação da usina. Para o estudo, a capacidade de moagem considerada foi 177 t cana/h. Essa capacidade considera 218 dias de moagem, apresentando 85% de aproveitamento do tempo. Os outros 15% referem-se a dias de chuva, defeitos mecânicos, manutenção etc. Com isso, a capacidade anual de moagem da planta é aproximadamente 790 mil toneladas de cana-de-açúcar. O rendimento industrial considerado foi 77,2 L de etanol/t cana. No conjunto total do processo, para cada 177 t/h de cana moída, são gerados 10,78 t/h de etanol, equivalentes a 13,65 m³/h nas condições em que o produto é obtido. Os principais parâmetros industriais que caracterizam este modelo estão descritos na Tabela 5.15.

Eletricidade

No caso dos geradores elétricos, o vapor vivo movimenta uma turbina que, por sua vez, movimenta o gerador, produzindo energia elétrica que será distribuída na rede para consumo dos setores industriais, do bombeamento da fertirrigação, das vilas de funcionários e do setor administrativo, e também produzindo vapor de escape que será aproveitado nos processos que demandam energia térmica. O modelo faz uso de dois geradores elétricos, um com capacidade de geração de 1.200 kW e outro de 3.000 kW e voltagem de 440V. Para o cálculo dos consumos elétricos por setor industrial foram coletados os valores de potência aparente, em kVA, por setor. Para a transformação dos valores de potência aparente em potência efetiva, foi considerado que a potência mecânica instalada de cada setor da indústria leva em conta o fator de potência mínimo exigido pela agência reguladora ANEEL (AGÊNCIA NACIONAL DE ENERGIA ELÉTRICA, 2012) de 0,92. Considera-se que não há excedente de energia gerada e, portanto, não há aporte de eletricidade na rede elétrica proveniente dos geradores da usina.

Tabela 5.15 - Parâmetros industriais considerados no modelo de produção de etanol de cana-de-açúcar

Parâmetro	Valor
Capacidade anual de moagem	790.000 t cana
Produção anual de etanol	60.760 m ³
Eficiência de extração da usina	85 %
Bagaço (% da cana)	26 %
Produção total anual de bagaço	205.400 t
Consumo de bagaço (44,9% umidade)	219 kg/t cana
Poder calorífico do bagaço (PCI)	8.604,5 kJ/kg
Período de produção: Safra (abril a novembro)	218 dias
Dias / horas efetivas de operação	186 dias / 4.460 horas
Fator de capacidade da usina	85,3 %
Processamento horário de cana	177 t/h
Produção horária de etanol	13,65 m ³ /h
Rendimento industrial de etanol	77,2 L/t cana
Consumo de vapor vivo (21 bar)	539 kg/t cana ou 95,5 t/h
Consumo de vapor para processo (1,5 bar)	360 kg/t cana ou 63,85 t/h
Perfil de produção da usina	100 % etanol hidratado
Pressões de vapor de extração/exaustão/condensação	21 bar / 1,5 bar / 0,8 bar
Potência mecânica instalada	3200 kW
Capacidade elétrica instalada	4.200 kW

5.2.2.1 Modelos de Emissões

Para as etapas industriais foram estimadas as emissões que estão descritas a seguir.

Emissões de dióxido de carbono para a atmosfera por fermentação

A fermentação é uma reação metabólica das leveduras que produz CO₂. A quantificação desta emissão seguiu o balanço estequiométrico, conforme indicado em ANA et al. (2009) e apresentado na Eq 5.17.

Emissões de etanol para atmosfera nas colunas de destilação

Na etapa de destilação ocorre uma perda natural de etanol por evaporação nas torres de destilação. Segundo Sugawara (2012), esta perda é da ordem de 0,2%.

Emissões de vapor para atmosfera na torre de resfriamento

Também na etapa de cogeração, especificamente na torre de resfriamento, foi considerada a emissão de água para a atmosfera na forma de vapor, conforme descrição do sistema de produto.

Emissões para a atmosfera por queima de biomassa na caldeira

Também foram estimadas as emissões da etapa de cogeração, devido à queima de combustível na forma de biomassa na caldeira, no caso, o bagaço de cana. Foram consideradas as emissões de CO, CO₂, NO_x, N₂O, metano (CH₄) e compostos orgânicos voláteis que não o metano (NMVOCs), segundo os fatores de IPCC (2006), e MP₁₀, segundo fatores da Companhia Ambiental do Estado de São Paulo (CETESB) (2009). As Tabelas 5.16 e 5.17 apresentam os fatores de emissões utilizados.

Tabela 5.16 - Fatores de emissão de substâncias para a atmosfera pela queima de biomassa na caldeira, para geração de energia para a produção de etanol de cana-de-açúcar

Substância	Unidade	Fator de emissão
CO ₂	kg/TJ	112.000
CH ₄		30
N ₂ O		4
NO _x		100
CO		4.000
NMVOCs		50

Fonte: IPCC, 2006.

Tabela 5.17 - Fator de emissão de MP₁₀ para a atmosfera pela queima de bagaço na caldeira, para geração de energia para a produção de etanol de cana-de-açúcar

Substância	Unidade	Fator de emissão
MP ₁₀	kg/t _{bagaço}	7,8

Fonte: CETESB, 2009.

5.2.2.2 Banco de dados utilizado

Devido ao critério de corte estabelecido no escopo deste trabalho, não foram utilizados ICVs para insumos que pudessem ser adaptados do banco de dados.

Para as etapas de transporte foi utilizado o ICV do banco de dados Ecoinvent denominado “*Transport, lorry 16-32t, EURO4/RER U*”.

5.3 Resultados e Discussão (Avaliação de Impacto de Ciclo de Vida)

5.3.1 Desempenho Ambiental da produção de etanol de cana-de-açúcar

A análise ambiental está pautada na aplicação do método *ReCiPe Midpoint H – World Recipe (H)*. Os resultados serão apresentados segundo a descrição dos perfis ambientais e das etapas contribuintes para cada impacto potencial. Tal como a Unidade Funcional indica, será apresentado o desempenho ambiental da produção de 1 m³ de etanol hidratado de cana-de-açúcar produzido em Usina Autônoma Integrada no estado do Mato Grosso.

Na Tabela 5.18 está apresentado o perfil ambiental da produção de 1m³ de etanol hidratado de cana-de-açúcar. A seguir, os resultados serão apresentados e comparados a outros estudos publicados para cada categoria de impacto analisada.

Tabela 5.18 - Perfil ambiental da produção de 1m³ de etanol hidratado de cana-de-açúcar em Usina Autônoma Integrada no estado do MT, Brasil.

Categoria de impacto	Unidade	por 1m³ de etanol hidratado de cana-de- açúcar
Mudanças Climáticas	kg CO ₂ eq	456
Depleção de Água	m ³	23,9
Formação de material Particulado	kg PM ₁₀ eq	41,0
Formação de Oxidação Fotoquímica	kg NMVOC	19,7
Acidificação Terrestre	kg SO ₂ eq	10,2
Ecotoxicidade Terrestre	kg 1,4-DB eq	1,01
Ecotoxicidade de Água Doce	kg 1,4-DB eq	0,694
Eutrofização de Água Doce	kg P eq	0,759
Toxicidade Humana	kg 1,4-DB eq	35,0
Ocupação de Terras Agrícolas	m ² .a	1.436
Transformação de Terra Natural	m ²	1,71E-03

5.3.1.1 Mudanças Climáticas

A produção de etanol de cana-de-açúcar gera emissões potenciais de 456 kg CO₂ eq por m³ de etanol hidratado. Conforme indica o Gráfico 5.1, o subprocesso que mais influencia esta categoria de impacto é a etapa agrícola de produção da cana, que contribui com cerca de 60% das emissões de todo o processo. As substâncias que mais contribuem para este montante são CO₂ de origem fóssil, N₂O, CH₄ biogênico e CO₂ proveniente de Mudança do Uso da Terra. As emissões e participações das respectivas substâncias estão mostrados na Tabela 5.19.

Tabela 5.19 - Principais emissões contribuintes para a categoria Mudanças Climáticas para a produção de 1m³ de etanol hidratado de cana-de-açúcar

Emissões	Mudanças Climáticas	
	kg CO ₂ eq	%
CO ₂ fóssil	159	35%
N ₂ O	128	28%
CH ₄ biogênico	98,7	22%
CO ₂ MUT	64,5	14%
outros	5,80	1%
Total	456	100%

No Gráfico 5.1 podem ser observadas as contribuições de emissões por etapa do processo. O processo responsável pelas maiores emissões de CO₂ fóssil são de responsabilidade das etapas de transporte entre campo e usina (torta de filtro, vinhaça e cana-de-açúcar), que utilizam caminhões de 16 a 32 t de capacidade e resultam em 94,9 kg CO₂ eq. A etapa agrícola de produção da cana também contribui com emissões de CO₂ fóssil, somando 23,1 kg CO₂ eq provenientes principalmente das operações agrícolas realizadas com tratores. Por fim, o processo de produção da amônia, insumo para a fabricação do fertilizante ureia, contribui com 10,1 kg CO₂ eq.

As principais emissões de N₂O provêm da produção de cana-de-açúcar, devido, principalmente, ao uso e emissões dos fertilizantes nitrogenados.

As emissões de CH₄ vêm, também, da etapa agrícola com 81,6 kg CO₂ eq, especificamente pela queima da palhada da cana que é colhida manualmente, o que, neste estudo, representa 75% da área de colheita.

As emissões de CO₂ por Mudança de Uso da Terra (MUT) cabem principalmente à etapa agrícola de produção da cana-de-açúcar, com a emissão de 63,7 kg CO₂ eq, devido à

expansão e substituição das áreas de plantio. Também é observada uma participação muito pequena das hidrelétricas que fornecem eletricidade à matriz elétrica brasileira.

Gráfico 5.1 - Emissões para a categoria de Mudanças Climáticas e principais processos contribuintes para a produção de 1 m³ de etanol hidratado de cana-de-açúcar

Comparando os resultados obtidos com os encontrados em literatura, pode-se observar que a emissão foi bastante semelhante à encontrada por Cavalett et al (2013), que encontraram emissões de 516,67 kg CO₂ eq por m³ de etanol hidratado produzido, englobando a etapa de uso do combustível.

Em outro estudo, Muñoz et al. (2014) avaliaram o desempenho ambiental de etanol hidratado na região Centro-Sul do Brasil. Os autores obtiveram valores de 825,48 kg CO₂ eq emitidos por m³ de etanol hidratado produzido. As etapas de queima da palhada pré-colheita e de MUT contribuíram para este resultado. Cabe ressaltar que os autores utilizaram a mesma metodologia para definição da MUT que a usada neste trabalho, embora tenham assumido uma fronteira geográfica mais ampla.

Guerra et al. (2014) estudaram os impactos relacionados à produção da energia cogerada em uma usina de etanol de cana, cujo combustível é o bagaço. Em termos absolutos, aplicadas as devidas conversões, para o cenário *standard*, os autores encontraram valores superiores para a categoria. Para eles, o valor absoluto observado para Mudanças Climáticas foi 1.397,16 kg CO₂ eq por m³ de etanol anidro, mas as principais substâncias emitidas foram as mesmas que neste estudo. Os autores também observaram que a emissão de maior contribuição para a categoria é o N₂O que ocorre na etapa agrícola por uso de fertilizantes.

Também ganham destaque as emissões por queima da palhada, queima de diesel em operações mecanizadas e outras operações que neste estudo se mostraram de menor relevância. Importante lembrar que o estado de São Paulo apresenta maiores índices de colheita mecanizada da cana que o estado do Mato Grosso e, com isso, tende a consumir mais diesel nesta etapa. Para os autores, as contribuições de CO₂ por MUT, cerca de 350 kg CO₂ eq, apresentaram maior importância do que a observada neste estudo, já que consideraram que a cana-de-açúcar avança essencialmente sobre pastagem em São Paulo, enquanto no Mato Grosso isso ocorre sobre áreas agrícolas de culturas anuais, dado o menor crescimento relativo da cultura no estado. Em relação ao CO₂ fóssil, os autores encontraram emissões parecidas com as encontradas neste estudo, da ordem de 178 kg CO₂ eq. Essas emissões também foram geradas nas etapas de transporte, aplicações de fertilizantes e operações mecanizadas. A última substância contribuinte foi o CH₄, com 18,2 kg CO₂ eq emitidos pela mesma atividade, a queima da palha para a colheita manual. No entanto, o valor encontrado por eles é bastante inferior ao deste trabalho pelo fato de, no estado de São Paulo, a maioria da cana ser colhida mecanicamente e sem a prática de queimada.

5.3.1.2 Depleção de Água

Os resultados para a categoria de Depleção de Água indicam que, para a produção de 1 m³ de etanol de cana-de-açúcar, são consumidos 23,9 m³ de água. A maior parte deste consumo de água se dá na forma de água de poço, que participa com 98% da água consumida. O Gráfico 5.2 apresenta as etapas em que ocorrem o consumo de água de poço, com suas respectivas participações.

Guerra et al. (2014) encontraram o consumo de 17,1 m³ de água para cada m³ de etanol anidro produzido. O consumo menor de água pode ser justificado pela maior eficiência das caldeiras, já que, mesmo o cenário com vapores de menor pressão e temperatura, ainda apresentam pressão e temperatura maiores do que as consideradas neste estudo e, portanto, necessitam menor quantidade de água para gerar a mesma quantidade de eletricidade. O estudo considerou a alocação entre o etanol e o bagaço gerado. Em relação à categoria de depleção de água, também encontraram que a maior parte da água consumida vai para a alimentação da etapa industrial. Para o seu estudo, 90,4% da água consumida no processo de obtenção do etanol anidro tem como origem águas de rios. Assim como neste estudo, a etapa de maior consumo é o sistema de cogeração. No entanto, como o estudo de Guerra et al.

(2014) foca na produção de energia pela cogeração e considera alocação entre etanol e bagaço – distribuindo assim os impactos ambientais de todas as subetapas do processo industrial pelos dois produtos - essa água é majoritariamente destinada à geração de vapor. Neste estudo, ao considerar o etanol como produto de análise e alocação apenas entre o bagaço excedente ao processo e o caldo extraído, diversos outros subprocessos da etapa industrial se destacam por seus consumos de água.

Gráfico 5.2 - Participação dos processos que consomem "água de poço" na categoria Depleção de Água para a produção de etanol hidratado de cana-de-açúcar

Cavalett et al. (2013), em estudo comparativo entre etanol hidratado e gasolina, apresentam os desempenhos ambientais desses combustíveis para diversos métodos de avaliação de impacto, inclusive para o *ReCiPe Midpoint (H)*. Na categoria de Depleção de Água, foi obtido o valor absoluto de $6,76E-5 \text{ m}^3/\text{MJ}$ de etanol hidratado, ou seja, $1,44 \text{ m}^3/\text{m}^3$ de etanol hidratado. Este resultado é bastante diferente do encontrado neste estudo e dois fatores podem tê-lo influenciado. O primeiro está relacionado ao modelo industrial, que considera sistema de cogeração moderno e eficiente (vapor de 90 bar e turbina de condensação com extração) para produção de vapor e eletricidade, o que permite a geração de grande quantidade de energia elétrica excedente (Cavalett et al., 2013). O segundo está relacionado à alocação realizada entre etanol e energia elétrica, desonerando o etanol de impactos ambientais, uma vez que a produção de eletricidade é grande e o critério adotado foi o energético.

5.3.1.3 Formação de Material Particulado, Formação de Oxidação Fotoquímica e Acidificação Terrestre

As categorias de Formação de Material Particulado, Formação de Oxidação Fotoquímica e Acidificação Terrestre serão analisadas em conjunto por estarem comumente associadas à atividade de combustão e suas consequentes emissões, como será mostrado adiante.

Na categoria de FMP, a produção de 1m³ de etanol hidratado é responsável pela emissão de 41 kg MP₁₀ eq. As substâncias que se destacam para a composição desta emissão estão na Tabela 5.20.

Tabela 5.20 - Principais emissões contribuintes para a categoria Formação de Material Particulado para a produção de 1m³ de etanol hidratado de cana-de-açúcar

Emissões	Formação Material Particulado	
	kg PM ₁₀ eq	%
MP ₁₀ , fonte estacionária	22,7	55%
MP ₁₀	10,6	26%
MP _{2,5}	5,31	13%
outros	2,39	6%
Total	41	100%

No processo de obtenção de etanol de cana, as etapas que se destacam nesta categoria são a queima de bagaço na caldeira, para a geração de vapor de alta pressão no sistema de cogeração, e a queima de palha na etapa de colheita manual da cana-de-açúcar, com 22,7 e 15,9 kg PM₁₀ eq, respectivamente (Gráfico 5.3).

Guerra et al. (2014) obtiveram valores de emissões superiores aos aqui encontrados para esta categoria. Muito embora as emissões tenham sido ocasionadas pelas mesmas etapas (queima de palhada da cana pré-colheita, queima de bagaço na caldeira e, também, queima do diesel em maquinário agrícola), os autores encontraram 107,11 kg PM₁₀ eq potencialmente emitidos para essa categoria, cerca de 2,5 vezes as emissões encontradas neste estudo.

Cavalett et al. (2013) encontraram emissões de 7,30 kg PM₁₀ eq para esta categoria, valores bem inferiores que os encontrados aqui e por Guerra et al. (2014). No entanto, as emissões estão principalmente associadas à combustão do bagaço para geração de calor e eletricidade na caldeira, já que no estudo foi considerado que toda a cana é colhida

mecanicamente, sem queima da palha. Além disso, a alta eficiência das caldeiras e os critérios de alocação devem influenciar o resultado com emissões tão inferiores.

Gráfico 5.3 - Resultados para as categorias de impacto Formação de Material Particulado (FMP), Formação de Oxidação Fotoquímica (FOF) e Acidificação Terrestre (AT) e principais processos contribuintes por categoria para a produção de 1 m³ de etanol hidratado de cana

Na categoria Formação de Oxidação Fotoquímica, as emissões potenciais são expressas na unidade kg NMVOC (*non-methane volatile organic compounds* ou compostos orgânicos voláteis não-metânicos). A produção de etanol de cana gerou emissões potenciais de 19,8 kg NMVOC, conforme expresso na Tabela 5.21.

Tabela 5.21 - Principais emissões contribuintes para a categoria Formação Oxidação Fotoquímica para a produção de 1m³ de etanol hidratado de cana-de-açúcar

Emissões	Formação de Oxidação Fotoquímica	
	kg NMVOC	%
CO ₂ biogênico	10,2	52%
NOx	6,88	35%
NMVOC	1,35	7%
Etanol	1,16	6%
outros	0,21	1%
Total	19,8	100%

Destas emissões, o CO₂ biogênico tem origem em duas etapas do processo, na queima de bagaço para geração de vapor na caldeira e na queima da palhada da cana para a colheita

manual. As emissões dos NO_x são identificadas também na etapa de queima de bagaço na caldeira, mas principalmente na etapa agrícola, com contribuições da aplicação de fertilizantes nitrogenados e da queima de diesel nas operações mecanizadas e, principalmente, da queima da palhada. Os NMVOC são gerados na queima do bagaço na caldeira. O etanol, por sua vez, é gerado na última etapa da produção de etanol, a destilação, já que uma pequena porcentagem do produto é perdida por evaporação (Gráfico 5.3).

Muñoz et al. (2014) encontraram valores semelhantes para esta categoria, com emissões de 23,47 kg NMVOC/m³ de etanol. Os autores apontaram a etapa de queima da palhada pré-colheita como a etapa de maior influência para este resultado, e os hidrocarbonetos orgânicos voláteis, NO_x e SO_2 como principais substâncias responsáveis pela emissão total. Guerra et al. (2014), encontraram valores superiores. Em seu estudo, para a produção de 1m³ de etanol anidro, são gerados 65,32 kg NMVOC, mais de 3 vezes as emissões aqui encontradas. A etapa que mais contribuiu naquele contexto foi, mais uma vez, a queima pré-colheita da palha da cana-de-açúcar. Cavalett et al. (2013) também encontraram emissões para esta categoria causadas pela emissão de etanol na etapa de destilação. Os autores encontraram emissões da ordem de 6,58 kg NMVOC.

Por fim, a categoria de Acidificação Terrestre é expressa em kg SO_2 eq. No geral, duas emissões principais contribuíram para as emissões de 10,2 kg SO_2 eq do etanol de cana-de-açúcar para essa categoria, a emissão de amônia (NH_3) e de óxidos de nitrogênio (NO_x), conforme Tabela 5.22.

Tabela 5.22 - Principais emissões contribuintes para a categoria Acidificação Terrestre para a produção de 1m³ de etanol hidratado de cana-de-açúcar

Emissões	Acidificação Terrestre	
	kg SO_2 eq	%
Amônia	5,53	55%
NO_x	3,85	38%
SO_x	0,546	5%
outros	0,251	2%
Total	10,2	100%

Para esta categoria, a substância que mais influencia o desempenho ambiental do produto não teve como origem um processo de combustão. A amônia é contabilizada na etapa agrícola de produção de cana-de-açúcar e se deve à atividade de adubação. No entanto, a próxima substância com maior contribuição no resultado são os NO_x , potencialmente emitidos na aplicação de fertilizantes e queima de diesel em maquinários na etapa agrícola,

mas também na queima de bagaço na caldeira e nas etapas de transporte. No geral, a etapa agrícola é quem mais influencia no resultado desta categoria (Gráfico 5.3).

Para a categoria, Cavalett et al. (2013) encontraram emissões semelhantes, com 11,38 kg SO₂ eq por m³ de etanol hidratado, causados principalmente pelo uso de fertilizantes. Muñoz et al. (2014) encontraram valores pouco menores, com 9,71 kg SO₂ eq, associados às emissões de NO_x e SO₂. Guerra et al. (2014) encontraram valores de 26,7 kg SO₂ eq por m³ de etanol anidro. As emissões cuja origem foi a aplicação de fertilizantes foram semelhantes, 6,39 kg SO₂ eq para o etanol anidro de SP e 5,53 kg SO₂ eq para o etanol hidratado do MT. No entanto, os autores encontraram maior expressividade na emissão proveniente da queima de diesel nas operações agrícolas, que contribuíram com 71,1% das emissões da categoria.

5.3.1.4 Ecotoxicidade Terrestre, Ecotoxicidade de Água Doce, Toxicidade Humana e Eutrofização de Água Doce

As categorias de impacto relacionadas à toxicidade são apresentadas segundo a unidade kg 1,4-DB eq. Tratando especificamente da categoria de Ecotoxicidade Terrestre, o etanol de cana-de-açúcar emite potencialmente 1,01 kg 1,4-DBeq e a etapa que contribui majoritariamente para este impacto potencial é a agrícola.

As principais substâncias contribuintes (Tabela 5.23) provêm de fitossanitários, aplicados para o controle de pragas. Este resultado não surpreende, uma vez que o processo agrícola tem suas fronteiras intimamente relacionadas aos compartimentos da natureza, apresentando mais fluxos elementares do que as etapas industriais e de transporte, que costumam ter fluxos mais bem controlados.

Tabela 5.23 - Principais emissões contribuintes para a categoria Ecotoxicidade Terrestre para a produção de 1m³ de etanol hidratado de cana-de-açúcar

Emissões	Ecotoxicidade Terrestre	
	kg1,4-DBeq	%
Fipronil	0,554	55%
Diuron	0,243	24%
Hexazinona	0,0885	9%
Clomazona	0,059	6%
outros	0,0655	6%
Total	1,01	100%

Dentre as substâncias elencadas na Tabela 5.23, a substância fipronil tem origem em um inseticida usado para prevenir cupins e brocas na fase inicial do crescimento da cana. As substâncias diuron, hexazinona e clomazona são compostos de herbicidas com fins de controle de plantas daninhas.

A categoria Ecotoxicidade de Água Doce acompanha o perfil da categoria Ecotoxicidade Terrestre e as emissões são, em sua maioria, causadas pelos mesmos produtos. Para o etanol de cana-de-açúcar, 0,694 kg 1,4-DB eq são potencialmente emitidos, segundo a participação das substâncias listadas na Tabela 5.24. As emissões dos metais pesados aqui identificados (bromo, níquel e cobre) ocorrem nas etapas de extração de petróleo para produção de diesel.

Tabela 5.24 - Principais emissões contribuintes para a categoria Ecotoxicidade de Água Doce para a produção de 1m³ de etanol hidratado de cana-de-açúcar

Emissões	Ecotoxicidade de Água Doce	
	kg 1,4-DB eq	%
Fipronil	0,418	60%
Diuron	0,0966	14%
Bromo	0,0369	5%
Níquel	0,0322	5%
Cobre	0,0229	3%
outros	0,0874	13%
Total	0,694	100%

Na categoria de Toxicidade Humana, o impacto potencial para o etanol de cana soma a emissão de 35 kg 1,4-DB eq (Tabela 5.25). É na etapa agrícola que estão os principais processos responsáveis pelos resultados dessa categoria. A substância com contribuição mais expressiva é o cádmio, cuja origem está na aplicação de fertilizantes e corretivos no solo.

Tabela 5.25 - Principais emissões contribuintes para a categoria Toxicidade Humana para a produção de 1m³ de etanol hidratado de cana-de-açúcar

Emissões	Toxicidade Humana	
	kg 1,4-DB eq	%
Cádmio	28	80%
Manganês	1,48	4%
outros	5,52	16%
Total	35	100%

Cavalett et al. (2013) encontraram valores parecidos para etanol hidratado. Na categoria de ET, foi levantada a emissão de 1,24 kg 1,4-DB eq e na categoria EAD, a emissão de 1,13 kg 1,4-DB eq, também devido à aplicação de pesticidas e fertilizantes. Guerra et al. (2014) também encontraram valores compatíveis, porém de pior desempenho, para as categorias de toxicidade. Para Ecotoxicidade Terrestre e Ecotoxicidade de Água Doce os impactos potenciais encontrados em seu trabalho, para 1m³ de etanol anidro, foram 4,10 e 1,68 kg 1,4-DB eq, respectivamente. Grande parte destas emissões se deve, como neste trabalho, ao uso de fitossanitários para a proteção da cultura contra pragas, especialmente dos produtos carbofuran, fipronil e diuron. O uso da substância carbofuran no modelo de cultivo de São Paulo pode justificar o pior desempenho em relação à produção de cana do Mato Grosso, modelada neste estudo. A aplicação de fitossanitários é específica para cultura e estes devem ser utilizados de acordo com a incidência de determinadas pragas. Por estarem em regiões, biomas e condições climáticas distintas, as produções de cada estado poderão necessitar de doses ou tipos de fitossanitários diferentes. Além disso, a emissão de metais pesados pela queima do diesel em atividades agrícolas mecanizadas também influenciou o resultado encontrado pelos autores. Possivelmente, a alta mecanização na colheita no estado de São Paulo reflete em emissões maiores originadas pela queima do diesel.

Para a categoria de Toxicidade Humana, Cavalett et al. (2013) encontraram 36,93 kg 1,4-DB eq por m³ de etanol hidratado, muito parecido com os resultados obtidos neste estudo. Guerra et al. (2014) encontraram emissões de 56,24 kg 1,4-DB eq por m³ de etanol anidro. Também nesta categoria, as emissões de metais pesados decorrentes da queima de diesel na etapa agrícola, altamente mecanizada, influenciaram os resultados. Além disso, as emissões de cádmio para o solo pelo uso de fertilizantes ganharam destaque, assim como os resultados obtidos por este estudo.

A categoria de Eutrofização de Água Doce é representada pela unidade kg P eq. O etanol de cana apresentou emissões potenciais de 0,759 kg P eq por m³ de etanol hidratado. No processo de produção do etanol de cana este impacto potencial é responsabilidade da etapa agrícola de produção de cana-de-açúcar. A principal substância que gera esse impacto é o fósforo, contribuindo com 98,4% das emissões de P eq. Cabe lembrar que o fósforo é escasso em solos brasileiros e o que existe dele é encontrado na forma não solubilizada. Portanto, essa emissão é resultante exclusivamente do efeito de erosão causada pela chuva.

Muñoz et al. (2014) encontraram valores inferiores para a categoria, de 0,105 kg P eq. Guerra et al. (2014) encontraram valores de 0,030 kg P eq por m³ de etanol anidro, sendo que 95,5% das emissões ocorrem por fosfato para a água. Essa emissão ocorre na etapa de

fabricação de fertilizante fosfatado. Cavalett et al. (2013) encontraram praticamente o mesmo valor que Guerra et al., com emissões de 0,033 kg P eq/ m³ de etanol hidratado, também pela aplicação de fertilizantes no campo.

5.3.1.5 Ocupação de Terras Agrícolas e Transformação de Área Natural

A categoria de ocupação de terras agrícolas sempre associa dois fatores, o primeiro é a área que está sendo ocupada por determinada atividade ou produto e o segundo é o tempo pelo qual esta área está sendo ocupada. A junção deles gera o indicador cuja unidade é expressa por m².ano. A ocupação necessária para a produção de 1m³ de etanol hidratado de cana é 1.436 m².ano. A maior parte da área ocupada para a produção de etanol de cana recebe a classificação de “*Occupation, arable, irrigated*”, ou seja, área arável irrigada, representando praticamente 100% da área para esta categoria. Esta é a classificação utilizada para definir a área ocupada pela plantação de cana-de-açúcar, considerada irrigada devido à fertirrigação com vinhaça. Outras influências de ocupação de terra agrícola são irrisórias frente à contribuição desta etapa.

Guerra et al. (2014) encontraram valores pouco menores para Ocupação de Terras Agrícolas, da ordem de 959 m².ano por m³ de etanol anidro, porém com classificação de área arável não-irrigada. A menor ocupação de área deve estar relacionada às maiores produtividades encontradas no estado de São Paulo, em relação ao estado do Mato Grosso. Cavalett et al. (2013) encontraram valores ainda menores para a categoria, resumindo-a a 129,16 m².ano, também relacionados à área de produção da cana-de-açúcar. Já Muñoz et al. (2014) encontraram valor mais próximo ao deste estudo, com ocupação de 1.675 m².ano para cada m³ de etanol hidratado.

A categoria Transformação de Área Natural (TAN) é expressa em m². Nesta categoria, em nível *midpoint*, não há diferenciação entre os tipos de uso da terra e são contabilizados apenas os usos de terra natural. Com isso, o resultado se dá pela diferença entre a soma das áreas naturais que precederam a implementação de determinada atividade e a soma das áreas naturais que restaram da implementação da mesma atividade.

A produção de 1 m³ de etanol de cana aqui estudado foi responsável pela transformação de 0,00171 m² de área natural. Por se tratar de uma categoria que considera duas ações distintas, a transformação de algo e a transformação para algo, é difícil tratar a contribuição de cada aspecto com números absolutos, já que o resultado será dado por uma

diferença. São duas as entradas que mais contribuem com o resultado final. A primeira é a “*Transformation, from forest*”, ou transformação de área de floresta, que foi responsável pela redução de 0,00242 m² de área natural, 89% da redução total, na etapa geração de eletricidade em hidrelétricas. A segunda é “*Transformation, to forest*”, ou transformação para área de floresta, que acrescenta 0,00088 m² de área natural, 75% do acréscimo total, na etapa de recuperação de áreas de mineração (de insumos). A diferença entre apenas essas duas entradas representam 90% da diferença total. A etapa de produção agrícola não aparece nesta categoria porque, segundo a lógica adotada para a definição de expansão da cultura no estado, a cana-de-açúcar não avançou sobre áreas naturais no horizonte temporal de 20 anos.

Para Guerra et al. (2014), o valor encontrado para esta categoria foi 0,0622 m² de área natural transformada por m³ de etanol anidro. Segundo os autores, a maior parte da TAN se dá pela extração do petróleo em países cuja produção é *onshore*, que exportam a matéria-prima para o Brasil. O restante se deve à expansão de área de cana sobre áreas naturais, que pouco ocorreu no estado de São Paulo. Para Cavalett et al. (2013), a transformação de área natural é ligeiramente maior, cerca de 0,088 m² por m³ de etanol hidratado produzido.

5.3.2 Desempenho Energético da produção de etanol de cana-de-açúcar

A análise energética teve como base a aplicação do método de avaliação de impacto Demanda Cumulativa de Energia (CED), cujos resultados a serem descritos são os perfis energéticos na forma de energia primária consumida. Para tanto, em consonância com a análise ambiental, será apresentado o desempenho energético da produção de 1 m³ de etanol hidratado de cana, produzido em Usina Autônoma Integrada no estado do MT. Além deste, será apresentado o balanço energético de cada combustível, calculado pela razão entre a energia disponível renovável e a energia consumida não renovável.

O método de avaliação de impacto CED conta com oito categorias de impacto que classificam as fontes de energia primárias consumidas para o processo ou produto objeto de estudo. Três das categorias pertencem ao grupo das fontes de energia não renováveis e as outras cinco ao grupo das fontes renováveis de energia.

A Tabela 5.26 apresenta o perfil energético da obtenção de 1 m³ de etanol hidratado de cana-de-açúcar. Por se tratarem de categorias expressas em uma mesma unidade, é possível obter um indicador único que represente o consumo total de energia pela simples soma dos resultados das categorias. A produção de 1m³ de etanol hidratado de cana consumiu 2,25GJ

de energia. Na sequência serão descritos os resultados e contribuições de cada categoria analisada.

Tabela 5.26 - Perfil energético da produção de 1m³ de etanol hidratado de cana-de-açúcar em Usina Autônoma Integrada no estado do MT, Brasil.

Subcategorias de impacto	Unidade	por 1m³ de etanol hidratado de cana-de- açúcar
Não renovável, fóssil		2185
Não renovável, nuclear	MJ	23,4
Não renovável, biomassa primária		0,032
Renovável, biomassa secundária		1,75
Renovável, alternativas (eólica, solar, geotérmica)	MJ	0,492
Renovável, hídrica		38,7
Indicador único	MJ	2249

5.3.2.1 Fontes de energia não renováveis: fóssil, nuclear e biomassa de origem primária

São classificadas como fontes de energia não renováveis as fontes fóssil, nuclear e a biomassa proveniente de floresta primária. Dentre as três subcategorias, as fontes fósseis são as que mais se destacam, com consumos de 2.195MJ, e serão analisadas em maior detalhe. As categorias de fonte nuclear e biomassa de origem primária participaram com 23,4 MJ e 32 kJ consumidos, respectivamente. A energia nuclear apresentou baixa representatividade no resultado final pelo fato de ter pouca participação da matriz energética nacional, contribuindo com apenas 0,92% da energia primária do país em 2013 (EMPRESA DE PESQUISA ENERGÉTICA, 2014). A energia proveniente de biomassa primária, ou seja, madeira e restos culturais de florestas naturais sem intervenção ou manejo, foi a subcategoria de menor representatividade na análise, não demonstrando grande relevância para este estudo.

Para a subcategoria de fontes fósseis, o etanol de cana apresenta o consumo de 2,18 GJ para a produção de 1 m³ de combustível, contribuindo com 97% do consumo energético total para a produção de 1 m³ de etanol. Dentre as fontes fósseis, 1,73 GJ são consumidos na forma de petróleo e 436 MJ na forma de gás natural, conforme ilustra o Gráfico 5.4.

Gráfico 5.4 - Participação das fontes energéticas de origem fóssil na categoria "Não renovável, fóssil" para a produção de etanol hidratado de cana-de-açúcar

O petróleo é consumido principalmente pela etapa de produção de diesel usado nas etapas de transporte, seguida pela produção do diesel que é usado nos maquinários agrícolas. O gás natural é consumido em diversos processos, sendo o principal deles a produção de ureia a ser usada como fertilizante nitrogenado. As produções de cloreto de potássio e superfosfato triplo usados como fertilizantes também se destacam como consumidores de energia fóssil.

5.3.2.2 Fontes de energia renováveis: biomassa, alternativas e hídrica

No método CED são consideradas entre as fontes de energia renováveis as subcategorias biomassa secundária, que considera madeira e restos vegetais de florestas cultivadas, alternativas, que engloba as energias de fonte eólica, solar e geotérmica, e energia hídrica, gerada nas usinas hidrelétricas.

Cada m^3 de etanol hidratado de cana-de-açúcar apresenta o consumo de 1,75MJ na forma de biomassa renovável. Essa biomassa representa a participação das usinas de etanol na matriz energética brasileira, que exportam o excedente de sua geração elétrica para o *grid* nacional. A segunda subcategoria dentre as fontes renováveis é a de fontes alternativas, cujo consumo é de 0,492MJ/ m^3 de etanol. Junto com a subcategoria de biomassa primária, essas são as fontes de menor representatividade entre os consumos energéticos, fato justificado pela ainda baixa participação de fontes eólicas, solares e geotermiais na matriz energética brasileira.

A terceira e última subcategoria renovável é a energia hídrica, representada como a energia potencial contida em reservatórios de usinas hidrelétricas. A produção de etanol de cana consumiu 38,7MJ na forma de energia hídrica por cada m³ produzido. Seu consumo está associado à produção dos insumos no Brasil, já que a matriz elétrica brasileira tem a participação majoritária da energia hídrica, com 70,6% (EMPRESA DE PESQUISA ENERGÉTICA, 2014). Os insumos que consomem a energia do *grid* nacional e se destacam por isso no processo são o superfosfato triplo, a ureia, o calcário e, em menor quantidade, o diesel consumido nas operações agrícolas, o diesel das etapas de transporte e o glifosato.

5.3.2.3 Índice de Retorno Energético sobre o Investimento (EROI)

O balanço energético foi estipulado pelo cálculo do EROI, que segue a terminologia descrita por Hammerschlag (2006), conforme indicado no capítulo de Revisão Bibliográfica. O valor usado como $E_{\text{disponível}}$, ou seja, a energia gerada pela queima do combustível, foi o PCI do etanol hidratado, definido pela Agência Nacional do Petróleo, Gás Natural e Biocombustíveis (ANP) (2013) como 6.300 kcal/kg ou 21,35 GJ/m³.

O valor usado como $E_{\text{consumida, não renovável}}$ foi obtido do resultado da subcategoria “Fontes de energia não renováveis, fóssil” do método CED, já que as outras fontes da categoria se mostraram pouco representativas para o estudo e esse pressuposto foi observado em trabalhos de diferentes autores. O resultado do Índice de Retorno Energético sobre o Investimento para o etanol de cana da Usina Autônoma Integrada do MT foi 9,77 (Tabela 5.27).

Tabela 5.27 - Valores de energias disponível e consumida, não renovável por 1m³ de etanol hidratado de cana-de-açúcar, em GJ, e Índice de Retorno Energético sobre o Investimento (EROI)

$E_{\text{disponível}}$	$E_{\text{consumida, não renovável}}$	EROI (r_E)
GJ		
21,35	2,19	9,77

Seguindo esta mesma abordagem metodológica, Macedo, Seabra e Silva (2008) avaliaram o balanço energético do etanol anidro produzido na região Centro-Sul do Brasil, segundo a abordagem do berço-ao-portão. Para o levantamento da $E_{\text{consumida, não renovável}}$, os autores consideraram os consumos de energia diretos, na forma de combustíveis e eletricidade, os consumos indiretos, para a produção dos insumos agrícolas e industriais e,

também, a energia consumida na manufatura, construção e manutenção de equipamentos e edificações. O consumo total de energia não renovável por eles encontrada foi 2,43 GJ/m³ de etanol anidro, consumo pouco maior que o encontrado neste estudo, sendo que os consumos de infraestrutura foram considerados por eles e não para este trabalho. Para o levantamento da $E_{\text{disponível}}$ também foi considerado o PCI do etanol anidro, no valor de 22,3 GJ/m³, e a ele somadas as energias contida no bagaço excedente e a produzida na forma de eletricidade. O EROI obtido no estudo foi 9,3. Porém, para fins de comparabilidade de resultados, a energia contida no bagaço e a eletricidade foram excluídas da análise. Ao considerar o etanol como único produto, o EROI resultou em uma razão de 8,24, pouco menor do encontrado por este trabalho e condizente com o seu maior consumo energético.

Em estudo mais recente, Seabra et al. (2011) atualizaram as informações do consumo de energia fóssil para a produção de etanol anidro na mesma região que o estudo anterior, mas excluíram os consumos relacionados à infraestrutura e consideraram a produção de três produtos principais, açúcar, etanol anidro e etanol hidratado. Para isso, utilizaram uma alocação de critério mássico para distribuir as cargas ambientais da produção de cana-de-açúcar entre os três produtos. O consumo de energia fóssil para a produção de 1 MJ de etanol anidro foi 80 kJ, o que resultaria em um EROI de 12,5. No entanto, este valor abrange alguns pressupostos e abordagens diferentes daqueles estabelecidos para o presente estudo. Os autores consideraram os consumos energéticos para distribuição do etanol para a etapa de uso e, também, debitaram da soma dos consumos a quantidade de energia gerada como bagaço e eletricidade, considerando a abordagem de carga evitada. Trazendo os dados de seu estudo para os contornos metodológicos deste trabalho, ou seja, excluindo-se as cargas evitadas e a etapa de distribuição do combustível, os consumos energéticos da produção de etanol seriam de 151 kJ/MJ de etanol anidro. Considerando o PCI do etanol anidro como $E_{\text{disponível}}$, o balanço energético obtido neste caso foi 6,62, menor do que o do estudo de 2008 e do que o valor encontrado por este estudo.

Salla e Cabello (2010), também conduziram estudos de desempenho energético da produção de etanol de cana-de-açúcar, mas também de mandioca e milho. Para o levantamento de consumos energéticos da etapa agrícola foram considerados os consumos de combustíveis, da produção de sementes, fertilizantes, calcário e pesticidas, transporte da matéria-prima até a usina e, também, da mão de obra utilizada no campo. Para os consumos da etapa industrial o levantamento foi feito a partir dos consumos de eletricidade e de vapor, gerados em caldeira a partir da queima de bagaço de cana ou lenha. Os índices de balanço energético foram estabelecidos seguindo uma metodologia diferente das descritas nas

referências anteriores. Como os consumos energéticos da etapa industrial estão expressos em MJ de vapor e eletricidade, intrinsicamente foram contabilizados os consumos de energia na forma de bagaço e lenha, que correspondem à categoria de energias renováveis. Com isso, o balanço energético do etanol de cana-de-açúcar obtido pelos autores foi bastante inferior em relação aos balanços obtidos nas referências citadas e também neste trabalho, indicando a relação de 1,09. No entanto, aplicando aos dados utilizados pelos autores à metodologia utilizada nos outros estudos, ou seja, considerando que toda a energia consumida na etapa industrial tem origem renovável e, portanto, não compõe o indicador $E_{consumida}$, o balanço energético alcançaria o valor de 11,74.

Dias, Carvalho e Gomes (2010) levantaram o balanço energético do etanol anidro brasileiro. Foram incluídos na análise os consumos energéticos referentes à produção de maquinários e infraestrutura e, também, à mão de obra na etapa agrícola. O valor de balanço energético por eles encontrado foi 10,57 unidades de energia geradas para cada unidade de energia fóssil consumida.

O gráfico 5.5 compara os valores de balanço energético obtidos para a Usina Autônoma Integrada no MT com os encontrados pela literatura analisada, após adequações à metodologia.

Gráfico 5.5 - Comparação entre os EROIs encontrados na literatura para o etanol de cana-de-açúcar

Caso não fossem realizadas adaptações metodológicas aos dados levantados em literatura, o etanol de cana-de-açúcar da Usina Autônoma Integrada do MT apresentaria um dos piores desempenhos de retorno energético, obtendo melhores resultados apenas do que o

estudo de Macedo, Seabra e Silva (2008) que considera dados antigos, de 2005 e 2006, o que pode justificar o pior desempenho. No entanto, considerando as adaptações necessárias para tornar os dados comparáveis, o EROI encontrado neste estudo apresentou desempenho intermediário dentre os observados na literatura. O fato do processo estudado não estar entre os melhores desempenhos energéticos pode ser explicado por alguns fatores.

No geral, os estudos levam em conta dados médios para a região centro-sul do Brasil ou, ainda, dados de estudo de caso para o estado de São Paulo, responsável pela maior parte da produção nacional de etanol. Ao se comparar essas informações é importante considerar os motivos para o desenvolvimento do etanol ter se dado especialmente em São Paulo ao longo dos últimos anos. Com características edafoclimáticas favoráveis e logística bem estabelecida, o estado de São Paulo obteve desenvolvimento tecnológico e ganhos econômicos pelo aumento da escala da produção. Em contrapartida, estima-se que no cerrado, bioma mais representativo no estado do Mato Grosso, 50% da área não é adequada para o cultivo de cana-de-açúcar. As limitações se dão, especialmente, pelos índices pluviométricos e pela qualidade do solo (GOLDEMBERG; COELHO; GUARDABASSI, 2008).

Tais diferenças, físicas e históricas, justificam os desempenhos encontrados, já que as eficiências atuais encontradas em São Paulo influenciam os resultados médios para a região Centro-Sul. Além de menor produção agrícola média para o estado, as usinas do MT são pouco eficientes energeticamente, por apresentarem estruturas mais antigas. No entanto, investimentos tecnológicos, modernização e aumento das eficiências nas usinas do Mato Grosso trariam melhorias no desempenho energético de suas produções de etanol. Há de se analisar, no entanto, o potencial de outras matérias-primas para a fabricação do combustível renovável, uma vez que, se o Mato Grosso não apresenta as melhores características para o plantio de cana-de-açúcar, é o estado que mais produz grãos do país, com alta tecnologia agrícola e grandes índices de produtividade.

6 AVALIAÇÃO AMBIENTAL E ENERGÉTICA DO ETANOL DE MILHO

6.1 Bases do estudo de ACV (Objetivo e Escopo)

As bases do estudo de ACV de etanol de milho também seguem os preceitos das normas ABNT ISO NBR 14040 e 14044 (ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS, 2009a, 2009b). Além disso, objetivando a criação de modelos homogêneos, os escopos dos três estudos foram delineados conjuntamente, de forma a tornar os resultados dos três estudos comparáveis entre si. Pode-se considerar, portanto, que os pressupostos descritos na definição de objetivo e escopo do etanol de cana-de-açúcar (item 5.1) valem também para este estudo de etanol de milho, com exceção aos itens específicos deste estudo - *objetivo; função do sistema, unidade funcional e fluxo de referência; requisitos de qualidade dos dados; definição do sistema de produto e fronteiras do sistema; procedimentos de alocação; e premissas* -, que estão descritos a seguir:

6.1.1 Objetivo

O objetivo deste estudo de ACV é definido por *avaliar a produção de etanol hidratado a partir de milho em uma usina autônoma integrada*. Os propósitos deste estudo são proporcionar subsídios para a tomada de decisão quanto a novas tecnologias e matérias-primas para a produção de etanol, bem como contribuir com informações e conhecimento a respeito de tais processos. Dessa forma, o público-alvo do estudo engloba tomadores de decisão da cadeia produtiva do etanol e a comunidade científica.

6.1.2 Escopo

6.1.2.1 Função do sistema, unidade funcional e fluxo de referência

Este estudo se trata de uma ACV atribucional com abordagem do berço-ao-portão, que pode ser definida como uma ACV de processo. A função do processo é produzir etanol

hidratado em destilaria autônoma integrada e a unidade funcional é *1 m³ de etanol hidratado*. Levando-se em conta os desempenhos técnicos agrícolas e industriais, os fluxos de referência adotados são *2,76 t de milho para a etapa agrícola e 1 m³ de etanol para a etapa industrial*.

6.1.2.2 Requisito de Qualidade dos dados

Os requisitos de qualidade dos dados se equivalem para este estudo e para o de cana-de-açúcar nos termos de fontes dos dados, cobertura geográfica e temporal. A cobertura tecnológica deste estudo considera a produção de milho por sistema de plantio direto, em rotação com a cultura da soja e aplicação de calcário no solo, aplicação de vinhaça como fertirrigação, fertilizantes, pesticidas e plantio e colheita mecanizados e secagem dos grãos em secadores elétricos. A tecnologia empregada para a produção de etanol é tipo “*Dry Milling*” em usina autônoma integrada com usina de etanol de cana, cuja integração conta com *fermentações independentes e moagem de grãos na entressafra da cana*, de forma a utilizar as instalações destinadas à geração de vapor e eletricidade, dornas de fermentação e colunas de destilação da usina de etanol de cana. A energia necessária ao processamento de etanol é suprida pela queima de na caldeira. O etanol hidratado produzido não passa por retificação para produção de etanol anidro. A planta é suprida energeticamente por sistema de cogeração com caldeira movida a cavaco de madeira, que gera vapor à 22bar, destinado ao suprimento de energia térmica e à geração de eletricidade em gerador. Não há exportação de eletricidade para a rede.

6.1.2.3 Definição do Sistema de Produto e Fronteiras do Sistema

O sistema de produto considera os seguintes processos elementares: (1) produção de milho, (2) recepção e moagem, (3) diluição, liquefação, cozimento e hidrólise enzimática, (4) propagação do fermento e fermentação, (5) destilação para a separação do etanol, (6) tratamento da vinhaça, (7) cogeração de energia e (8) produção agrícola de madeira a ser usada como combustível para a cogeração (Figura 6.1). O estudo inclui ainda entre as fronteiras do sistema a produção dos insumos consumidos, eletricidade e das etapas de transporte disponíveis na base de dados *Ecoinvent*.

Figura 6.1 - Sistema de Produto e Fronteiras do Sistema de produção de etanol hidratado de milho

6.1.2.4 Procedimentos de Alocação

Por se tratar de um cultivo em rotação de culturas, algumas alocações se fazem necessárias, especialmente na etapa agrícola de produção de milho. Foi realizada alocação no aspecto de uso da terra na etapa agrícola de produção de milho, devido ao fato desta cultura ser cultivada em sistema de rotação com outra cultura, no caso, a soja. No sistema de produção agrícola com rotação de culturas o solo é ocupado, em geral, por uma cultura na estação chuvosa, outra cultura na estação seca e fica vazio em um terceiro momento, denominado período de descanso da terra. A ocupação da terra neste período de descanso foi alocada entre as culturas rotacionadas, segundo o critério econômico.

Para o estabelecimento dos fatores de alocação econômica foram levados em conta os preços médios de venda da tonelada de milho e de soja na região. Esses valores foram convertidos em preços médios de venda por ha, a partir das produtividades. A porcentagem da contribuição dos ganhos econômicos de cada cultura nos ganhos totais são os fatores de

alocação. Os valores considerados no cálculo dos fatores de alocação econômica estão descritos na Tabela 6.1.

Tabela 6.1 - Parâmetros para cálculo de Fator de Alocação Econômica entre soja e milho, para a safra 2013 do estado do Mato Grosso

	Unidade	Safr 2013	
		Milho	Soja
Preço médio de venda ¹	R\$/saca	10,7	47,1
	R\$/t	179	785
Produtividade	t/ha	7,54	2,99
Rentabilidade	R\$/ha	1349	2347
Fator de Alocação Econômica	-	36,5%	63,4%

Fonte: ¹Instituto Mato-grossense de Economia Agropecuária, 2013a, 2013b.

Outra alocação foi necessária para aspectos e emissões resultantes da transformação do uso da terra, também devido à rotação de culturas. O critério de alocação teve como base o critério de paridade, de forma que ambas as culturas dividam igualmente os impactos potenciais gerados, corrigido por um fator de ponderação que estabelece a proporção de área de soja que recebe milho como segunda safra.

Para compreender o fator de ponderação, é importante lembrar que, no estado do MT, o sistema de rotação inclui a soja como cultura principal, e de maior valor econômico, e uma segunda cultura de inverno, cultivada em sistema safrinha, cuja espécie pode variar de um ciclo anual para o outro. Por esse motivo, para fins de determinação de expansão da cultura, foi assumido que a cultura da soja determina o crescimento das áreas do sistema de rotação e que as transformações decorrentes desta expansão são ponderadas segundo a participação das culturas de segunda safra (neste trabalho, o milho e o sorgo) no sistema de rotação com a soja. O fator de ponderação é a porcentagem da área de milho safrinha em relação à área total de soja no MT, no caso 42% (Tabela 6.2). Este fator corrige o fator de alocação fixo de 50% que distribui as cargas de transformação do uso da terra entre cada uma das culturas rotacionadas. Tal correção se faz necessária apenas pelo fato de ter se assumido que a cultura de soja determina a expansão do conjunto.

Por fim, realizou-se alocação também para o calcário utilizado na correção de solo, já que este produto é aplicado a cada 5 anos em média e beneficia tanto a cultura do milho quanto a da soja. Foi considerado que cada uma das duas culturas recebe 50% da aplicação de calcário.

Tabela 6.2 - Fatores de ponderação que determinam o fator de alocação entre milho e soja para Transformação do Uso da Terra

Áreas plantadas		Fatores de ponderação		Fator de Alocação Transformação do Uso da Terra
soja 1 ^a safra 2013 (ha)	milho 2 ^a safra 2013 (ha)	proporção do milho como 2 ^a safra da soja	critério de paridade rotação de culturas	
7.931.905 ¹	3.349.100 ²	42%	50%	21%

Fonte:¹IBGE, 2015; ² CONAB, 2013c.

6.1.2.5 Premissas

- Não foram considerados aspectos ambientais associados à construção de bens de capital.
- Na região, a produção do milho ocorre de forma integrada com a soja, formando um sistema de rotação de culturas. Dessa forma, embora duas culturas diferentes dividam o mesmo espaço em períodos de tempo distintos, neste estudo não foi considerado o “*crop system*” ou expansão de fronteira. Neste caso, o milho foi considerado como único produto de interesse, tendo sido realizadas alocações apenas dos recursos compartilhados entre as culturas de soja e milho, como a ocupação e mudança de uso da terra e a aplicação de corretivos.
- Para adequação aos métodos de AICV, as transformações de áreas naturais foram consideradas “*forest*” independente do tipo de mata nativa.
- Apesar de o sistema representado estar em integração com a usina de etanol de cana, estabeleceu-se como premissa desse estudo que os modelos seriam avaliados separadamente, dessa forma, apesar de dividirem os mesmos equipamentos, conforme tecnologia descrita, os processos não dividem insumos, como bagaço para cogeração e vinhaça para o campo de cana.
- O tanque de vinhaça recebe vinhaça da etapa de tratamento e águas residuais do processo provenientes de lavagem de piso, purga e lavagem de gases da caldeira. A vinhaça diluída será destinada à aplicação no campo como fertirrigação.
- A título de posterior comparação com os demais modelos, admitiu-se que a vinhaça tratada, juntamente com águas residuais da usina, são reaproveitadas no campo. Apesar de essa prática ainda não ocorrer na região, adubação do milho por aplicação de vinhaça é possível e, neste estudo, viabiliza a extrapolação das análises

possibilitando a avaliação de uma usina de etanol produzido exclusivamente a partir de milho. Com isso, considerou-se a etapa de transporte da vinhaça da usina até o campo, embora o inventário de milho não reflita as condições resultantes de aplicação da vinhaça no campo de milho. As emissões decorrentes da aplicação de vinhaça não foram consideradas devido à falta de dados sobre a composição da vinhaça gerada na produção de etanol de milho. As emissões decorrentes da etapa de transporte da vinhaça da planta industrial até o campo foram consideradas.

- Os transportes de vinhaça ocorrem por modal rodoviário.
- Não foi considerada alocação entre o etanol e o DDG, sendo que a vinhaça ficou com toda a carga ambiental do processo de tratamento da vinhaça. Esse pressuposto foi considerado devido ao fato de o DDG ainda não ter um mercado consolidado na região, já que a pecuária ainda é majoritariamente extensiva no país. Dessa forma, buscou-se evitar distorções do modelo ou melhorias artificiais do desempenho ambiental do principal produto do processo, o etanol.
- O combustível utilizado na caldeira para o processo a partir de fontes amiláceas foi o cavaco de madeira a partir de eucalipto. Devido à localização geográfica da planta, o cavaco de madeira se mostra como a matéria-prima energética mais viável, além de ser um produto de origem renovável. As fazendas de produção de eucalipto localizam-se a 50 km, em média, da usina.
- Considerou-se que o cavaco de madeira apresenta um teor de umidade de 28,6% e o PCI de 14.400 kJ/kg. Admitiu-se que a eficiência energética na caldeira para a conversão de madeira em calor seja 65%.
- No processo de produção de etanol de milho não existem equipamentos que consomem diretamente o vapor de alta pressão, no entanto existe um maior consumo de vapor de escape durante o processo, já que ele é necessário na etapa de cozimento e na etapa de destilação, uma vez que não existe etapa de concentração de caldo ou mosto.

6.2 Inventários do Ciclo de Vida (Análise de Inventário)

Para o modelo de produção de etanol de milho foram construídos inventários para cada processo elementar, que serão apresentados neste documento de forma unificada, a fim

de se preservar a confidencialidade das informações fornecidas pela Usina e pelos produtores de milho.

Os dados brutos utilizados e seus respectivos procedimentos de cálculo estão apresentados neste capítulo. Em relação às emissões, foram considerados os mesmos modelos descritos para a produção de etanol de cana (itens 5.2.1.1 e 5.2.2.1). Neste capítulo, serão apresentados apenas os parâmetros necessários para alimentar os modelos que diferem para a produção de milho e etanol de milho em relação ao estudo para cana.

Serão apresentados também os inventários provenientes do banco de dados *ecoinvent* utilizados para este trabalho, sempre com indicação no caso de terem sofrido adaptações para as condições brasileiras.

Os inventários da produção de etanol de milho estão apresentados no APÊNDICE B – Inventário do Ciclo de Vida da produção de etanol hidratado de milho.

6.2.1 ICV da produção de milho

As informações coletadas para a concepção desse modelo foram providas por três diferentes produtores de milho safrinha localizados na região oeste do Mato Grosso para a safra de 2013. Os dados foram coletados em unidades por ha e combinados de forma a gerar um inventário o mais uniforme possível, adotando as práticas e quantidades de produtos mais representativas da região. No caso de pesticidas, quando foram utilizados diferentes produtos com a mesma função, foram selecionados os produtos recorrentes entre os produtores e calculadas as médias das quantidades aplicadas. Todos os consumos por ha foram, então, divididos pela produtividade obtida em campo, o que gerou um Inventário de consumos e emissões por tonelada de milho produzido.

O sistema de produção de milho safrinha utilizado apresenta características típicas e práticas difundidas na mesma região em que ocorre a produção da cana-de-açúcar, onde as condições climáticas desobrigam da operação de irrigação para a cultura.

Produtividade

A produtividade média alcançada em 2013 para o milho safrinha da região, e considerada neste estudo, foi de 7.540 kg/ha (informação pessoal¹⁷).

¹⁷ Informação recebida por Rostirolla em Campos de Julio, em 2013.

Ocupação do solo

A ocupação do solo para a cultura de milho foi calculada da mesma forma que para a cana-de-açúcar, descrita anteriormente, segundo Nemecek e Schnetzer (2011). Em relação à ocupação da área, uma tonelada de milho safrinha produzido ocupa 1.326 m².

Em relação ao tempo em que a cultura ocupa o solo, devem-se levar em consideração as peculiaridades do sistema de plantio direto com rotação de culturas. A ocupação do solo foi distribuída entre soja e milho de acordo com os meses de ocupação efetiva; ou seja, 4 meses para a soja e 4 meses subsequentes para o milho. No entanto, restam outros 4 meses no ano em que a terra permanece em descanso, com cobertura da palhada da segunda cultura. Como o período de descanso com palhada é inerente ao sistema de plantio direto, visando a conservação da qualidade e sustentabilidade do solo, considerou-se que ambas as culturas sejam beneficiadas por esse período e, portanto, fez-se uso de alocação para esses 4 meses, segundo o critério econômico. O critério em questão determina que o consumo do recurso está atrelado aos valores econômicos dos produtos e, portanto, é distribuído proporcionalmente aos ganhos financeiros de cada produção.

Considerando os fatores de alocação 36,5% para milho e 63,4% para soja, descritos na Tabela 6.1, o milho ocupa o solo por um período de 5,46 meses. A ocupação do solo, na forma de “terra arável, irrigada”, considerada é de 603,5 m². ano por tonelada de milho.

Transformação de Uso da Terra

A determinação da Transformação do Uso da Terra para a produção do milho safrinha seguiu estritamente as mesmas etapas descritas para a cana no item 5.2.1. No entanto, por se tratarem de culturas cultivadas no sistema de plantio direto com rotação de culturas, o milho safrinha seguiu alguns pressupostos adicionais no que diz respeito à alocação, conforme descrição no capítulo 6.1.2.3.

Os dados de áreas plantadas também foram obtidos do Censo Agropecuário 1995 (INSTITUTO BRASILEIRO DE GEOGRAFIA E ESTATÍSTICA, 1997), do portal eletrônico IBGE Estados (INSTITUTO BRASILEIRO DE GEOGRAFIA E ESTATÍSTICA, 2013b) e das publicações de Séries Históricas da CONAB (COMPANHIA NACIONAL DE ABASTECIMENTO, 2015). Além destes, os dados de áreas de pastagens foram obtidos do Censo Agropecuário 1995 do IBGE (1997) e do Instituto Mato-grossense de Economia Agropecuária (IMEA) (2014) – definida como 27% da área total do MT.

Como pode ser visto na Tabela 6.3, dentre as áreas de soja atuais, 79% foram implantadas nos últimos 20 anos e apenas 21% foram estabelecidas a mais tempo. Seguindo a lógica pré-estabelecida, toda a área de culturas anuais e café que sofreu redução pode ter sido substituída por áreas de soja. Ainda assim, sobram áreas de expansão da soja não contempladas pela substituição de culturas anuais, que podem ter substituído áreas de pastagem. No entanto, o levantamento de áreas de pastagem no MT indica que, nos últimos 20 anos, o estado apresentou um acréscimo de áreas de pastagem, não sendo possível a substituição de pasto por qualquer cultura. Dessa forma, segue-se para a última hipótese de que, a área de expansão que não substitui culturas anuais e tampouco áreas de pastagem, deve ter avançado sobre áreas de mata nativa. As áreas de mata nativa são classificadas como do tipo “áreas de floresta”. Muito embora a classificação mais apropriada desta mata nativa seja áreas de cerrado, ou ainda vegetação esclerófila, o método de AICV utilizado limita a classificação deste fluxo elementar por considerar apenas um tipo de vegetação natural, justamente “áreas de floresta”. No entanto, esta simplificação não resulta em maiores problemas, já que é escopo deste estudo trabalhar com indicadores *midpoint*, cuja categoria de impacto relacionada é *Transformação de Área Natural*, o que justifica a simplificação de áreas nativas a apenas um tipo de fluxo elementar.

Tabela 6.3 - Áreas consideradas para a determinação de Transformação do Uso da Terra para o sistema soja-milho/sorgo, entre os anos 1993 e 2013, no estado do Mato Grosso, Brasil

	Soja	Culturas anuais	Pastagens	Mata nativa
	ha			
área plantada - 1993	1.680.257 ¹	810.034 ³	21.452.019 ¹	-
área plantada - 2013	7.931.905 ²	281.390 ³	24.391.214 ⁴	-
crescimento de área	6.251.648	-528.644	2.939.195	-
% de expansão da cana		8%	0%	92,0%
Fatores de conversão do uso do solo (A)		6,3%	0,0%	72,5%

Fonte: ¹ IBGE, 1997; ² IBGE, 2013b ³ CONAB, 2015; ⁴ IMEA, 2014.

Conforme indicado no item 5.2.1, o padrão de expansão aqui apresentado poderia ser substituído por outros, por exemplo, o cenário pessimista e o otimista descritos. Para o caso de culturas rotacionadas, como o caso do milho ou sorgo safrinha, ainda existe a possibilidade de não se atribuir carga nenhuma de origem de mudanças de uso da terra, por se tratarem de cultura de segunda safra, que não é a cultura principal de interesse. Neste caso, a soja, cultura

principal, receberia as cargas de mudança de uso da terra, por ser a principal motivante à expansão da área plantada.

Transporte de insumos

A modelagem dos transportes de insumos do cultivo de milho seguiu o mesmo padrão adotado para a cana-de-açúcar em termos de modal de distribuição e da capacidade de carga dos veículos, caminhões de capacidade de 7,5-16 t. A distância média considerada, no entanto, foi de 30 km para todos os insumos, já que a produção de soja e milho, como atividade tradicional, costuma estar mais próxima do centro comercial. O transporte de milho até a usina de etanol percorre uma distância média de 200 km.

6.2.1.1 Modelos de Emissões e parâmetros utilizados

Para as estimativas de emissões da etapa de produção de milho foram utilizados os mesmos modelos de emissões apresentados para a produção de cana-de-açúcar. No geral, os parâmetros utilizados para alimentar os modelos são específicos para cada cultura e diferem entre os estudos. Serão, portanto, apresentados neste capítulo apenas os parâmetros e especificidades das emissões para a produção de milho.

Emissões de amônia para a atmosfera por uso de fertilizantes

As emissões de amônia do processo de produção de milho foram calculadas por uso de fertilizante multinutriente e de ureia (Eq. 5.3, Tabela 6.4). Apesar de o modelo considerar a aplicação de vinhaça nos campos de milho, as emissões provenientes de tal aplicação não foram calculadas por falta de dados específicos sobre a composição da vinhaça gerada no processo de etanol de milho.

Tabela 6.4 - Parâmetros utilizados para o cálculo de emissões de NH_3 para a atmosfera por aplicação de fertilizantes minerais, para produção de milho

$\text{FE}_{\text{fertilizante}}$		$\text{N}_2\text{O}_{\text{fertilizante}}$
	%	
NPK	4% ¹	1% ¹
ureia	30% ²	

Fonte: ¹Nemecek e Schnetzer, 2011; ²Trivelin e Franco, 2009

Emissões de nitrato para águas subterrâneas por uso de fertilizantes

As emissões de nitrato para águas subterrâneas por uso de fertilizantes foram calculadas segundo a Eq. 5.4 e os parâmetros para a cultura de milho na região de estudo estão apresentados na Tabela 6.5.

Tabela 6.5 - Parâmetros utilizados para o cálculo de emissões de NO_3^- para águas subterrâneas por aplicação de fertilizantes, para produção de milho

P	c	L	S	Norg	U
mm/ano	%	m		kg N/ha	
2500 ¹	50% ²	1,0 ³	94 ²	4000 ⁴	180,96 ⁵

Fonte: ¹Portal Mato Grosso, 2008; ²informação pessoal¹⁸; ³Broch e Ranno, 2012; ⁴informação pessoal¹⁹; ⁵Coelho et al., 2008.

Emissão de fósforo para águas superficiais por erosão do solo

O modelo utilizado para a emissão de fósforo por erosão está apresentado na Eq. 5.5 e os parâmetros para o milho estão na Tabela 6.6.

Tabela 6.6 - Parâmetros utilizados para o cálculo de emissões de P para águas superficiais por erosão do solo, para produção de milho

S_{er}	P_{ss}	F_r	F_{era}
kg/ha	kg P/kg solo		%
2500 ¹	0,00095 ²	1,86 ²	20% ²

Fonte: ¹Alvarenga et al, [1998?]; ²Nemecek e Schnetzer, 2011.

Emissão de óxido de dinitrogênio para a atmosfera por uso de fertilizantes e restos culturais

A emissão do N_2O foi estimada seguindo o modelo apresentado na Eq. 5.6 e os parâmetros selecionados estão apresentados na Tabela 6.7. São considerados restos culturais do milho cultivado em sistema de plantio direto todas as partes da planta, com exceção dos grãos.

¹⁸ Informação recebida por Rostirolla em Campos de Julio, em 2013.

¹⁹ Informação recebida por Debiasi, por correio eletrônico, em 2015.

Tabela 6.7 - Parâmetros utilizados para o cálculo de emissões de N₂O para a atmosfera por aplicação de fertilizantes e restos culturais, para produção de milho

Teor de N nos restos culturais	
Kg N / t milho	10

Fonte: Coelho et al., 2008.

Emissão de óxidos de nitrogênio para a atmosfera por uso de fertilizantes

A estimativa para esta emissão segue a Eq. 5.7 e não são necessários parâmetros específicos.

Emissão de dióxido de carbono para a atmosfera por uso de ureia como fertilizante

A emissão do CO₂ por uso de ureia é calculada segundo a equação 5.8. Não são necessários parâmetros específicos.

Emissão de metais pesados para águas superficiais e solo por uso de fertilizantes e calcário

As emissões de metais pesados para águas superficiais foram estimadas segundo a Eq. 5.9 e as emissões para solo, segundo a Eq. 5.10. Os parâmetros utilizados estão apresentados na Tabela 6.8.

Tabela 6.8 - Teor de Metal Pesado dos insumos (TMP, insumo) e Teor de Metal Pesado nos grãos colhidos (TMP, colhido) para o cálculo de emissões de metais pesados para águas superficiais e solo por aplicação de fertilizantes, calcário e gesso, para produção de milho

Metal Pesado	T _{MP, insumo} ¹				T _{MP, colhido}
	Ureia	TSP	KCl	Calcário	
	mg/kg				mg/kg
Cd	0,03	52,00	0,05	0,00	0,01 ²
Cu	3,94	45,00	4,36	6,00	1,50 ³
Zn	28,86	299,00	40,16	7,00	22,0 ²
Pb	0,72	3,50	4,80	0,00	2,00 ³
Ni	1,31	43,99	1,83	0,00	0,40 ²
Cr	1,31	260,99	1,74	9,90	0,30 ²

Fonte: ¹Sugawara, 2012; ²Ferreira et al., 2003; ³Rangel et al., 2006.

Emissões para atmosfera pela queima de diesel

As emissões de gases de exaustão por queima de óleo diesel são calculadas segundo a Eq. 5.11. Os parâmetros selecionados para este cálculo não são específicos ao tipo de cultura ou região, mas sim ao tipo de combustível empregado na queima, comum aos três estudos.

Dessa forma, os parâmetros utilizados para estimar estas emissões para a produção de milho estão apresentados na Tabela 5.13.

Emissões para atmosfera pela queima da palhada da cana-de-açúcar

As emissões por queimada de palhada são contabilizadas apenas para a cana-de-açúcar, já que esse processo não ocorre na produção de milho, cuja palhada é deixada no campo como preconiza o sistema de plantio direto.

Emissões para atmosfera pela queima do etanol

Pelo fato de ocorrerem aplicações aéreas de fitossanitários, cujo combustível consumido é o etanol, apenas para a produção de cana-de-açúcar, essa emissão não foi considerada para a produção de milho.

Emissões de pesticidas para o solo

Os mesmos pressupostos antes apresentados para essa emissão para produção de cana foram aqui igualmente considerados.

Emissões de CO₂ para a atmosfera por Mudança de Uso da Terra

As emissões de CO₂ por Mudança de Uso da Terra foram estimadas segundo as equações 5.13, 5.14 e 5.15, conforme descrito no capítulo correspondente para cana-de-açúcar. Os parâmetros selecionados para a produção de milho, definido como *cultura anual*, também estão descritos nas Tabelas 5.11 e 5.12.

Absorção de CO₂ da atmosfera

A absorção de CO₂ pela planta de milho foi calculada segundo a Eq. 5.16. Os parâmetros específicos para a cultura do milho estão demonstrados na Tabela 6.9.

Tabela 6.9 - Parâmetros utilizados para o cálculo de absorção de CO₂ da atmosfera pela planta, para produção de milho

Produto de Referência	MS _{PR}	C _{MS,PR}	MS _{sem.}	C _{MS,sem}
	kg MS/kg PR	kg C/kg MS	kg MS/kg PR	kg C/kg MS
Grãos	2,21 ¹	0,39 ²	2,21 ¹	0,39 ²

Fonte: ¹ Turco, 2011; ² Pavinato, 1993.

6.2.1.2 Banco de dados utilizado

As adaptações dos inventários de fontes secundárias utilizados no ICV de produção de milho seguem os mesmos preceitos estabelecidos na adaptação de Inventários para o ICV de cana-de-açúcar. A Tabela 6.10 apresenta os ICVs utilizados no estudo e os ICVs dos bancos de dados que serviram como referência para as adaptações.

Tabela 6.10 - Inventários de Ciclo de Vida utilizados no Inventário de produção de milho e os respectivos ICVs dos bancos de dados que serviram como referência para as adaptações

Referência Ecoinvent	Inventários Adaptados
Urea, as N, at regional storehouse/RER U	Urea, as N, at regional storehouse - BR
Triple superphosphate, as P ₂ O ₅ , at regional storehouse/RER U	Triple superphosphate, as P ₂ O ₅ , at regional storehouse - BR
Potassium chloride, as K ₂ O, at regional storehouse/RER U	Potassium chloride, as K ₂ O, at regional storehouse - BR
Limestone, milled, loose, at plant/CH U	Limestone, milled, loose, at plant - BR
Glyphosate, at regional storehouse/RER U	Glyphosate, at regional storehouse - BR
Atrazine, at regional storehouse/RER U	Atrazine, at regional storehouse - BR
Insecticides, at regional storehouse/RER U	Insecticides, at regional storehouse - BR
Pyridine-compounds, at regional storehouse/RER U	Pyridine-compounds, at regional storehouse - BR U
Organophosphorus-compounds, at regional storehouse/RER U	Organophosphorus-compounds, at regional storehouse - BR U
Cyclic N-compounds, at regional storehouse/RER U	Cyclic N-compounds, at regional storehouse - BR U
Fungicides, at regional storehouse/RER U	Fungicides, at regional storehouse - BR U
Maize seed organic, at farm/CH U	-
Referência USLCI	Inventários Adaptados
Diesel, at refinery/I/US	Diesel, at refinery/BR
Electricity, diesel, at power plant/US U	Electricity, diesel, at power plant/BR U

Para as etapas de transporte foi selecionado o ICV do banco de dados Ecoinvent denominado “*Transport, lorry 7,5-16t, EURO3/RER U*”.

6.2.2 ICV da produção de etanol de milho

A caracterização dos sistemas de produção industrial de etanol de milho segue as características da tecnologia “*Dry Milling*” e integração do tipo *fermentações independentes e moagem de grãos na entressafra da cana*. As fontes dos dados utilizados para a construção do modelo foram basicamente primárias, conforme descrito no capítulo de materiais e métodos

(item 4.2), e complementados com informações obtidas de fontes secundárias da literatura especializada, principalmente McAloon et al. (2000), Shapouri e Gallagher (2005) e Singh (2010), utilizadas para complementação e validação dos dados considerados.

Os dados primários foram coletados para as produções de etanol da safra e 2013/2014. A combinação do conjunto de dados levantados com os dados secundários gerou um inventário uniforme e representativo. Os dados de insumos materiais e energéticos do processo foram coletados em kg, L ou MW por hora e complementados e ajustados pelo fechamento dos balanços de massa e energia. Os valores ajustados por hora foram, então, divididos pelo volume de etanol produzido por hora para se obter um ICV com informações por m³ de etanol.

Rendimento Industrial

A produtividade e produção total de etanol estão relacionadas à capacidade de moagem e destilação da usina. Os equipamentos instalados permitem uma capacidade de moagem da unidade de 900 t grãos/dia, ou 37,5 t grãos/h, que resultam na moagem de 95.400 t de grãos em um período de 106 dias de operação (informação pessoal²⁰); O rendimento de etanol de fontes amiláceas está ligado ao teor de amido contido nos grãos, que, no caso do milho, é de 62,97% e foi obtido por análises laboratoriais (informação pessoal²⁰). O rendimento industrial do etanol de milho considerado foi de 361,6 L etanol/t milho, gerando a produção de 34.497 m³ de etanol pela safra. No conjunto total do processo, para cada 37,5 t/h de milho moído, são gerados 10,97 t/h de etanol, equivalentes a 13,56 m³/h nas condições em que o produto é obtido (considerando densidade média do etanol hidratado 809 kg/m³). Todo o etanol produzido a partir de fontes amiláceas corresponde a etanol hidratado. Os principais parâmetros industriais que caracterizam este modelo estão descritos na Tabela 6.11.

Eletricidade

Dada a menor capacidade de moagem dos grãos da usina em relação à moagem de cana, o consumo de energia elétrica para este processo é menor, sendo suficiente o funcionamento de apenas um gerador de capacidade elétrica de 3.000 kW e voltagem de 440V.

Para o cálculo dos consumos elétricos por setor industrial também foram coletados os valores de potência aparente, em kVA, por setor, e os valores foram transformados de

²⁰ Informação recebida por Nogueira em Campos de Julio, em 2013.

potência aparente em potência efetiva, considerando que a potência mecânica instalada de cada setor da indústria leva em conta o fator de potência mínimo exigido pela agência reguladora ANEEL (AGÊNCIA NACIONAL DE ENERGIA ELÉTRICA, 2012) de 0,92. Considera-se que não há excedente de energia gerada e, portanto, não há aporte de eletricidade na rede elétrica proveniente dos geradores da usina.

Tabela 6.11 - Parâmetros industriais considerados no modelo de produção de etanol de milho

Parâmetro	Valor
Capacidade anual de moagem	95.400 t grãos
Produção anual de etanol	34.497 m³
Eficiência de moagem da usina	75 %
Consumo de cavaco (28,6 % umidade)	
Caldeira	597 kg/t grãos ou 22,4 t/h
Secagem do DDG	72 kg/t grãos ou 2,7 t/h
Poder calorífico do cavaco (PCI)	14.400 kJ/kg
Período de produção: Entressafra da cana (dezembro a abril)	120
Dias / horas efetivas de operação	106 dias / 2.544 horas
Fator de capacidade da usina	88,3 %
Processamento horário de milho	37,5 t/h
Produção horária de etanol	13,56 m³/h
Rendimento Industrial do etanol	361,6 L/t
Consumo de vapor vivo (21 bar)	2,21 t/t grãos ou 83 t/h
Consumo de vapor para processo (1,5 bar)	2,21 t/t grãos ou 83 t/h
Perfil de produção da usina	100 % etanol hidratado
Pressões de vapor de extração/exaustão/condensação	21 bar / 1,5 bar / 0,8 bar
Potência mecânica instalada	2590 kW
Capacidade elétrica instalada	4.200 kW

6.2.2.1 Modelos de Emissões

Para as etapas industriais da produção de etanol de milho, foram estimadas as mesmas emissões e segundo os mesmos modelos e parâmetros estabelecidos e descritos para o modelo de produção de etanol de cana-de-açúcar (item 5.2.2.1). Uma única exceção foi feita para a estimativa de emissão de MP₁₀, já que o fator de emissão é específico para o tipo de biomassa

utilizada como fonte de energia, que neste caso será cavaco de madeira. O fator de emissão utilizado está apresentado na Tabela 6.12.

Tabela 6.12 - Fator de emissão de MP_{10} para a atmosfera pela queima de cavaco de madeira na caldeira, para geração de energia para a produção de etanol de milho.

Substância	Unidade	Fator de emissão
MP_{10}	kg/t _{cavaco}	4,40

Fonte: CETESB, 2009.

6.2.2.2 Banco de dados utilizado

Para a etapa de produção de etanol de milho, foram utilizados ICVs de bancos de dados referentes à produção de cavaco de madeira como combustível da caldeira e do secador utilizado no tratamento da vinhaça. As produções destes insumos, bem como as etapas de transporte, foram obtidas do banco de dados Ecoinvent e adaptados às condições brasileiras. Os ICVs adaptados e os que lhes serviram de referência estão apresentados na Tabela 6.13.

Tabela 6.13 - Inventários de Ciclo de Vida utilizados no Inventário de produção de etanol de milho e os respectivos ICVs do banco de dados que serviram como referência para as adaptações.

Referência Ecoinvent	Inventários Adaptados
Industrial residual wood chopping, stationary electric chopper, at plant/RER U	Industrial residual wood chopping, stationary electric chopper, at plant/BR U
Industrial residue wood, mix, hardwood, u=40%, at plant/RER U	Industrial residue wood, mix, hardwood, u=40%, at plant/BR
Industrial residue, hardwood, including bark, u=70%, at plant/RER U	Industrial residue, hardwood, including bark, u=70%, at plant/BR U

Para as etapas de transporte foi utilizado o ICV do banco de dados Ecoinvent denominado “*Transport, lorry 16-32t, EURO4/RER U*”.

6.3 Resultados e Discussão (Avaliação de Impacto de Ciclo de Vida)

6.3.1 Desempenho Ambiental da produção de etanol de milho

Os resultados da análise ambiental a serem aqui apresentados foram obtidos da aplicação do método *ReCiPe Midpoint H – World Recipe (H)*. Os resultados serão apresentados segundo a descrição dos perfis ambientais e das etapas contribuintes para cada impacto potencial. Tal como a Unidade Funcional indica, as emissões potenciais estão referenciadas à produção de 1 m³ de etanol hidratado de milho produzido em Usina Autônoma Integrada no estado do Mato Grosso.

Na Tabela 6.14 está apresentado o perfil ambiental da produção de 1 m³ de etanol hidratado de milho e, na sequência, os resultados serão apresentados e comparados a outros estudos publicados para as categorias de impacto às quais se encontraram análises pares.

Tabela 6.14 - Perfil ambiental da produção de 1m³ de etanol hidratado de milho em Usina Autônoma Integrada no estado do MT, Brasil.

Categoria de impacto	Unidade	por 1m³ de etanol hidratado de milho
Mudanças Climáticas	kg CO ₂ eq	1650
Depleção de Água	m ³	16,6
Formação de Material Particulado	kg PM ₁₀ eq	3,96
Formação de Oxidação Fotoquímica	kg NMVOC	12,2
Acidificação Terrestre	kg SO ₂ eq	21,4
Ecotoxicidade Terrestre	kg 1,4-DB eq	21,1
Ecotoxicidade de Água Doce	kg 1,4-DB eq	17,2
Toxicidade Humana	kg 1,4-DB eq	133
Eutrofização de Água Doce	kg P eq	0,124
Ocupação de Terras Agrícolas	m ² .a	1.980
Transformação de Terra Natural	m ²	562

6.3.1.1 Mudanças Climáticas

A produção de etanol de milho gera emissões potenciais da ordem de 1.650 kg CO₂ eq por m³ de combustível produzido. A emissão que mais se destaca para este produto é o CO₂ proveniente da Mudança do Uso da Terra (CO₂ MUT) que disponibiliza 722 kg CO₂ eq para a atmosfera, representando 43,8% da emissão total. Este resultado está atrelado ao critério de

alocação utilizado para o cálculo da área de expansão das culturas (descrito nos itens anteriores), já que as emissões proveniente da Mudança do Uso da Terra podem variar segundo os critérios de alocação adotados. Por isso, segundo a norma ABNT NBR 14040 (ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS, 2009a), quando se realizam alocações em um estudo, cabe a condução de uma análise de sensibilidade que visa aferir as variações nos resultados decorrentes da aplicação de diferentes critérios de alocação. As análises de sensibilidade estão apresentadas no capítulo 8 deste trabalho.

Além do CO_2_{MUT} , outras substâncias que se destacam nesta categoria de impacto são CO_2 de origem fóssil, N_2O , CH_4 de origem fóssil e CH_4 de origem biogênica, conforme demonstrados na Tabela 6.15.

Tabela 6.15 - Principais emissões contribuintes para a categoria Mudanças Climáticas para a produção de 1m^3 de etanol hidratado de milho

Emissões	Mudanças Climáticas	
	kg CO_2 eq	%
CO_2_{MUT}	722	43,8%
$\text{CO}_2_{\text{fóssil}}$	534	32,4%
N_2O	356	21,6%
$\text{CH}_4_{\text{fóssil}}$	17,1	1,04%
$\text{CH}_4_{\text{biogênico}}$	16,2	0,98%
Outros	4,70	0,28%
Total	1.650	100%

No Gráfico 6.1, estão expressas as contribuições de emissões de CO_2 eq por etapas do processo. O único processo destacado como responsável pelas emissões de CO_2_{MUT} é a etapa agrícola de produção de milho, devido à expansão de área plantada, dados os critérios descritos anteriormente.

As emissões de CO_2 fóssil dividem-se entre as etapas de transporte por caminhões de 16-32 t, utilizados no carregamento de grãos de milho, vinhaça e cavaco de madeira, que emitem 247 kg CO_2 eq; a produção agrícola de milho, com 102 kg CO_2 eq que provêm da queima de diesel nos tratores e, principalmente, da aplicação de fertilizantes nitrogenados; além da etapa de produção de amônia, insumo para os fertilizantes nitrogenados, com 62,3 kg CO_2 eq.

Uma terceira substância a ser mencionada é o N_2O cujas contribuições concentram-se nas etapas de produção agrícola do milho, devido à aplicação de fertilizantes e manutenção da

palhada no solo; na geração de vapor na caldeira, pela queima de cavaco; e nas etapas de transporte de milho, vinhaça e cavaco de madeira.

Por fim, as emissões de CH₄ fóssil e biogênico têm origens, respectivamente, na queima de gás natural utilizado na produção de amônia e a queima de cavaco na caldeira.

Gráfico 6.1 - Emissões para a categoria de Mudanças Climáticas e principais processos contribuintes para a produção de 1 m³ de etanol hidratado de milho

Muñoz et al. (2014), em seu estudo apresentado no item 3.4 deste documento, também estudaram o desempenho ambiental da produção de etanol de milho nos EUA. Os autores encontraram o valor de 825,5 kg CO₂ eq como emissão potencial para a categoria Mudanças Climática para cada m³ de etanol produzido. Cabe lembrar que os autores utilizaram as mesmas metodologias para a estimativa de MUT e emissões de GEE causadas pela MUT que as conduzidas neste trabalho. No entanto, para o etanol de milho americano, não foi observado aumento da área plantada no período dos últimos 20 anos e, consequentemente, não se observou MUT, tal qual ocorreu com a cana-de-açúcar neste estudo. Esse fato sozinho justifica as emissões menores encontradas para o etanol de milho norte-americano do que para o etanol de milho brasileiro do Mato Grosso. Além disso, os resultados apresentados pelo etanol dos EUA resultam da aplicação de um fator de alocação entre etanol e DDGS (84% e 16%, respectivamente), que melhora o desempenho ambiental como um todo ao distribuir cargas, e que não foi considerado neste estudo para etanol de milho brasileiro. No entanto, estes resultados não consideram a etapa de secagem dos grãos de milho, frequentemente necessária para alcançar a umidade apropriada para estocagem. Para checar a influência desta

etapa, os autores realizaram teste de sensibilidade e encontraram um aumento de 17% nas emissões desta categoria, o que levaria o resultado a 965,83 kg CO₂ eq/m³ de etanol hidratado. A título de comparação, descontando-se as emissões causadas pela MUT, o etanol brasileiro emitiria potencialmente 928 kg CO₂ eq.

Em outro trabalho, Pieragostini, Aguirre e Mussati (2014) estudaram o desempenho ambiental da produção de etanol de milho na Argentina, considerando a etapa agrícola de produção de milho por plantio direto e a etapa industrial de produção de etanol pela tecnologia *dry milling*. A avaliação de impacto foi conduzida pelo método de avaliação ReCiPe *endpoint*. Apesar de o método ReCiPe em nível *endpoint* apresentar o perfil ambiental em unidades distintas do perfil apresentado pelo nível *midpoint*, ambos apresentam os resultados igualmente por categorias de impacto e não diferem ao se analisar os processos que influenciam cada uma das categorias, sendo, dessa forma, viável a comparação entre os resultados do estudo desses autores com o estudo apresentado neste trabalho.

Para a categoria Mudanças Climáticas, as conclusões a que Pieragostini, Aguirre e Mussati (2014) chegaram foram que a etapa agrícola contribui com cerca de 30% das emissões. No presente trabalho, apenas a etapa agrícola contribuiu com quase 70% das emissões potenciais para Mudanças Climáticas. Essa diferença se deve ao fato de os autores não terem observado Mudanças de Uso da Terra e, conseqüentemente, não terem levantado tais emissões. Já para o etanol de milho brasileiro, as emissões por MUT contribuíram com 43% das emissões totais. Para o estudo argentino, a maior contribuição para a categoria se deu na etapa de geração de calor, através da queima do combustível utilizado na caldeira, no caso o gás natural.

6.3.1.2 Depleção de Água

Para a categoria de Depleção de Água, o perfil ambiental da produção de 1 m³ de etanol hidratado de milho indica o consumo de 16,6 m³ de água. Deste total, 87,3% do consumo se dá na forma de água de poço e 11,1% é classificada como água natural de origem desconhecida. A água de poço é consumida na etapa industrial de produção de etanol, na quantia de 14,5 m³ e distribuída basicamente em duas etapas, na torre de resfriamento para a cogeração de energia (46,6%) e na embebição da farinha do milho para extração do amido (43,4%).

Flury et al. (2012) estudaram especificamente os consumos de água do processo produtivo de etanol de diversas matérias-primas renováveis, considerando o mesmo conjunto de dados e premissas utilizados por Muñoz et al. (2014), já citado anteriormente. Os resultados de consumo de água de origem natural encontrados pelos autores indicaram a depleção de 802 kg de água por kg de etanol produzido, que resulta em 649 m³ de água para cada m³ de etanol produzido. No entanto, deste valor, apenas 0,668 m³ se referem ao consumo de água da etapa industrial e 648,4 m³ estão vinculados à etapa agrícola. Tal variação se dá pelo fato de a produção de milho norte-americana considerada no estudo ser irrigada, diferentemente da condição brasileira. Especificamente sobre a etapa industrial, pode-se concluir que a planta de etanol de milho brasileira apresenta uma baixa eficiência do ponto de vista de consumo de água, se comparada aos resultados apresentados por Flury et al. (2012). Possivelmente, a planta americana apresenta mais reciclos de água, redirecionando a água de vinhaça ao próprio processo, por exemplo.

Ahmetovic, Martín & Grossmann (2010) estudaram especificamente a otimização do consumo de água na produção de etanol de milho nos EUA. Em seus levantamentos, os autores encontraram na literatura valores de 263 a 832 m³ de água consumida apenas na etapa agrícola para cada m³ de etanol produzido. Tal consumo se deve especificamente à irrigação do milho. Para a etapa industrial, os autores encontraram também uma grande variedade no consumo de água, com valores de 3 a 15 m³ por m³ de etanol. No entanto, como resultado do estudo de otimização do uso da água no processo industrial, os autores conseguiram reduzir o consumo de água para apenas 1,7 m³ por m³ de etanol produzido. As otimizações realizadas foram reciclos de água em etapas como na caldeira, na torre de resfriamento, na embebição e no fermentador, considerando os devidos tratamentos de água, específicos para cada etapa.

6.3.1.3 Formação de Material Particulado, Formação de Oxidação Fotoquímica e Acidificação Terrestre

Para a categoria de Formação de Material Particulado, a produção de 1 m³ de etanol de milho apresenta emissões potenciais de 3,96 kg PM₁₀ eq. As substâncias que se destacam nessa emissão estão listadas na Tabela 6.16.

Tabela 6.16 - Principais emissões contribuintes para a categoria Formação de Material Particulado para a produção de 1m³ de etanol hidratado de milho

Emissões	Formação de Material Particulado	
	kg PM ₁₀ eq	%
NH ₃	2,29	57,8%
NO _x	1,19	30,1%
MP _{2,5}	0,235	5,9%
Outros	0,245	6,2%
Total	3,96	100%

Dentre as etapas contribuintes dessas emissões, a queima de combustível na caldeira e as etapas de transporte são representativas para a categoria, mas a etapa agrícola é quem recebe o maior destaque (Gráfico 6.2). A emissão de amônia ocorre especificamente na etapa agrícola e se deve às emissões decorrentes do uso de fertilizantes e da queima do diesel nas operações mecanizadas. As emissões de óxidos de nitrogênio se distribuem em diversas etapas do processo, mas se destacam, principalmente, na queima de cavaco de madeira para a alimentação da caldeira e, também, nas etapas de transporte. O material particulado <2,5µm também se deve à queima de cavaco para geração de calor.

Gráfico 6.2 - Resultados para as categorias de impacto Formação de Material Particulado (FMP), Formação de Oxidação Fotoquímica (FOF) e Acidificação Terrestre (AT) e principais processos contribuintes por categoria para a produção de 1 m³ de etanol hidratado de milho

Em Pieragostini, Aguirre e Mussati (2014) os resultados para a categoria FMP assemelharam-se aos obtidos neste estudo. Para eles, a etapa agrícola tem a maior

participação nesta categoria (com 54% das emissões totais) e se deve, principalmente, ao uso de fertilizantes na condução do plantio.

Na categoria Formação de Oxidação Fotoquímica, as emissões potenciais são expressas na unidade kg NMVOC (*non-methane volatile organic compounds* ou compostos orgânicos voláteis não-metânicos). A produção de etanol de milho gerou 12,2 kg NMVOC. A Tabela 6.17 apresenta as principais substâncias que somam essa emissão.

Tabela 6.17 - Principais emissões contribuintes para a categoria Formação Oxidação Fotoquímica para a produção de 1m³ de etanol hidratado de milho

Emissões	Formação de Oxidação Fotoquímica	
	kg NMVOC	%
NO _x	5,39	44,2%
CO, biogênico	4,04	33,1%
NMVOC	1,44	11,8%
Etanol	1,14	9,3%
Outros	0,19	1,6%
Total	12,2	100%

Da emissão total, 44,2% se devem aos NO_x, cujas emissões estão distribuídas entre as etapas de queima de cavaco na caldeira para geração de vapor, nas atividades de transporte e na etapa agrícola, pela aplicação de fertilizantes nitrogenados e queima de diesel em operações mecanizadas (Gráfico 6.2). Na sequência, o CO_{biogênico} é responsável por 33,1% e os NMVOC por 11,8% das emissões e são contabilizados devido às emissões da queima de cavaco para geração de vapor na caldeira. Por fim, o etanol corresponde a 9,3% da emissão total e também é gerado como perda na etapa de destilação.

Muñoz et al. (2014) encontraram valores bastante inferiores para a categoria FOF para etanol de milho norte-americano. As emissões potenciais se resumiram a 2,43 kg NMVOC por m³ de etanol produzido, cerca de 5 vezes menos do que as emissões estimadas para o etanol brasileiro. Dada a alta contribuição da etapa da caldeira na produção de etanol de milho do MT, pode-se inferir que a queima de gás natural tem uma menor contribuição para esta categoria do que a queima de cavacos de madeira.

Para a produção de etanol de milho na Argentina, Pieragostini, Aguirre e Mussati (2014) encontraram um comportamento diferente para esta categoria. Em seu estudo, a etapa agrícola contribuiu mais do que a etapa de queima de gás natural na caldeira, sendo que a atividade de maior destaque foi a colheita mecanizada. Para o etanol de milho brasileiro, a

etapa agrícola ficou apenas em terceiro lugar em termos de etapas contribuintes, embora a queima de diesel nas operações mecanizadas também tenha contribuído. Considerando o estudo argentino, reforça-se que, possivelmente, a opção pela queima de gás natural na caldeira tenha se convertido em menores emissões para esta categoria do que a queima de cavaco de madeira.

Por fim, para a categoria de Acidificação Terrestre, a produção de 1 m³ de etanol de milho emite potencialmente 21,5 kg SO₂ eq. Duas substâncias principais contribuíram para as emissões dessa categoria, a amônia e os óxidos de nitrogênio (Tabela 6.18).

Tabela 6.18 - Principais emissões contribuintes para a categoria Acidificação Terrestre para a produção de 1m³ de etanol hidratado de milho

Emissões	Acidificação Terrestre	
	kg SO ₂ eq	%
NH ₃	17,6	82,0%
NO _x	3,02	14,1%
Outros	0,856	3,98%
Total	21,5	100%

A etapa que mais influencia as emissões de amônia é a agrícola, conforme mostra o Gráfico 6.2. Nesta fase, a emissão ocorre pela aplicação de fertilizantes. Na sequência, as etapas de queima de cavaco na caldeira e transportes demonstram alguma influência, principalmente devido aos NO_x.

Novamente, os resultados obtidos por Pieragostini, Aguirre e Mussati (2014) corroboram os resultados acima apresentados. A produção de etanol de milho na Argentina também apresentou a etapa agrícola como maior contribuinte para a AT (com 60% das emissões) com destaque para a aplicação de fertilizantes.

Os resultados obtidos por Muñoz et al. (2014) apresentam emissões quase 3 vezes inferiores às indicadas para o etanol brasileiro, resumindo-se a 7,28 kg SO₂ eq. No entanto, os autores não apresentam detalhes sobre quais etapas da produção têm maior influência sobre este resultado.

6.3.1.4 Ecotoxicidade Terrestre, Ecotoxicidade de Água Doce, Toxicidade Humana e Eutrofização de Água Doce

As categorias de impacto relacionadas à Toxicidade são apresentadas segundo a unidade kg 1,4-DB eq. Tratando, primeiramente, da categoria de Ecotoxicidade Terrestre, para a produção de 1 m³ de etanol de milho, são potencialmente emitidos 21,1 kg 1,4-DB eq. 97,6% dessa quantidade advêm da aplicação de um único produto, o herbicida atrazina, conforme indicado na Tabela 6.19. Como era de se esperar, a etapa agrícola é a única responsável pelas emissões de pesticidas, como a atrazina e o diflubenfuron.

Tabela 6.19 - Principais emissões contribuintes para a categoria Ecotoxicidade Terrestre para a produção de 1m³ de etanol hidratado de milho

Emissões	Ecotoxicidade Terrestre	
	kg 1,4DB eq	%
Atrazina	20,6	97,6%
Diflubenfuron	0,185	0,88%
Outros	0,315	1,49%
Total	21,1	100%

Para Pieragostini, Aguirre e Mussati (2014), a principal etapa contribuinte para a categoria de Ecotoxicidade Terrestre também é a agrícola. Em seu estudo, estimou-se que 99% das emissões se devem à fase agrícola, especificamente ao uso de fertilizantes e insumos, sem, no entanto, que se especificasse a contribuição da aplicação de pesticidas.

A categoria Ecotoxicidade de Água Doce (EAD) acompanha o perfil da categoria Ecotoxicidade Terrestre e as emissões são, em sua maioria, causadas pelos mesmos produtos. A produção de etanol de milho apresenta potencial emissão de 17,2 kg 1,4-DB eq para o ambiente dulcícola. Tal qual a categoria de Ecotoxicidade Terrestre, estas emissões se devem especialmente à aplicação de atrazina, correspondendo a 94,8% da emissão total (Tabela 6.20).

O mesmo comportamento foi observado no estudo de Pieragostini, Aguirre e Mussati (2014), a etapa agrícola contribuiu com 96% das emissões para a categoria EAD, geradas pelo uso de fertilizantes e outros insumos, sem maiores especificações.

Tabela 6.20 - Principais emissões contribuintes para a categoria Ecotoxicidade de Água Doce para a produção de 1m³ de etanol hidratado de milho

Emissões	Ecotoxicidade de Água Doce	
	kg 1,4DB eq	%
Atrazina	16,3	94,8%
Níquel	0,144	0,84%
Manganês	0,135	0,78%
Outros	0,621	3,61%
Total	17,2	100%

Na categoria de Toxicidade Humana, o impacto potencial para o etanol de milho soma 133 kg 1,4-DB eq (Tabela 6.21). A produção de etanol de milho também tem a etapa agrícola concentrando as emissões para toxicidade humana. O cádmio é a substância que mais contribui com o impacto potencial, contabilizando 64,5% de toda a possível emissão e a origem desse metal pesado é a aplicação de fertilizantes e corretivos. Em seguida, o manganês contribui com 16,2% das emissões e provém da disposição das cinzas pela queima do cavaco. Na sequência, as substâncias que influenciam o impacto potencial são vanádio, arsênico, chumbo e mercúrio.

Tabela 6.21 - Principais emissões contribuintes para a categoria Toxicidade Humana para a produção de 1m³ de etanol hidratado de milho

Emissões	Toxicidade Humana	
	kg 1,4DB eq	%
Cádmio	85,8	64,5%
Manganês	21,5	16,2%
Vanádio	3,66	2,75%
Arsênico	3,53	2,65%
Chumbo	2,37	1,78%
Mercúrio	1,96	1,47%
Outros	14,2	10,7%
Total	133	100%

A última das categorias ligadas a emissões, a Eutrofização de Água Doce, tem suas emissões expressas pela unidade kg P eq. Em números, o etanol de milho apresentou emissões potenciais de 0,124 kg P eq (Tabela 6.22).

Tabela 6.22 - Principais emissões contribuintes para a categoria Eutrofização de Água Doce para a produção de 1m³ de etanol hidratado de milho

Emissões	Eutrofização de Água Doce	
	kg P eq	%
Fósforo	0,0809	65,2%
Fosfato	0,0397	32,0%
Outros	0,003	2,74%
Total	0,124	100%

No processo de produção do etanol de milho este impacto potencial é de responsabilidade da etapa agrícola de produção de grãos. A principal substância que gera esse impacto é o fósforo, contribuindo com 65,2% das emissões de P eq. Cabe lembrar que o fósforo é escasso em solos brasileiros e o que existe dele é encontrado de forma não solubilizada. Portanto, essa emissão é resultante exclusivamente do efeito de erosão causado pela chuva e não da lixiviação do fertilizante aplicado diretamente no solo. Também são estimadas emissões de fósforo na etapa de produção de glifosato.

A outra substância que se destaca para este caso é o fosfato, sendo responsável por 32% das emissões. Essa emissão concentra-se na etapa de produção do fertilizante fosfatado.

Muñoz et al. (2014) encontraram emissões maiores para esta categoria, com cerca de 0,364 kg P eq. Segundo os autores, as emissões se devem à aplicação de fertilizantes fosfatados em grandes quantidades que, diferente do caso brasileiro, costumam sofrer lixiviação e *run-off* e alcançar os corpos hídricos mais facilmente.

O desempenho do etanol de milho argentino (PIERAGOSTINI; AGUIRRE; MUSSATI, 2014) mostrou-se semelhante ao apresentado neste trabalho. Para os autores, 94% das emissões potenciais de Eutrofização de Água Doce ocorreram na etapa agrícola, sendo que, destas, 46% se devem ao uso de fertilizantes e 46% à etapa de produção de fertilizantes fosfatados (no caso, MAP e DAP).

6.3.1.5 Ocupação de Terras Agrícolas e Transformação de Área Natural

A ocupação de terra necessária para a produção de 1 m³ de etanol hidratado de milho é 1.980 m².ano. Da área ocupada no ciclo de vida de sua produção, 84,3%, ou 1.670 m².ano, correspondem à classificação “*Occupation, arable, irrigated*”, indicando a grande importância da etapa agrícola de produção de milho em termos de área ocupada. Também é observada a ocupação de área agrícola na forma de “*Occupation, forest, intensive, normal*”,

ou área de floresta intensiva, com 14,6% da ocupação total. Esta ocupação se deve à etapa de produção de cavacos de madeira a serem usados como fonte energética na etapa de cogeração da fase industrial da produção de etanol.

Pieragostini, Aguirre e Mussati (2014) encontraram uma participação ainda maior da etapa agrícola nesta categoria. Em seu estudo, 96% se devem à etapa de produção de grãos de milho, com grande participação da etapa de produção de sementes. Para o modelo argentino, a produtividade média do milho considerada foi 7.726 kg/ha, pouco superior à considerada neste estudo (7.540 kg/ha), e a ocupação se deu por um período de 7 meses, período superior aos 5,46 meses de solo ocupado pelo milho brasileiro. Nestas condições, cada tonelada do milho argentino ocupa o solo em 755 m².ano, valor pouco superior que a ocupação de 603,5 m².ano por tonelada de milho brasileiro, que apresenta produtividade menor, mas uma ocupação por menor tempo.

Já o etanol de milho americano, estudado por Muñoz et al. (2014), apresenta uma ocupação menor de terras agrícolas, com índices de 995,4 m².ano/m³ de etanol. Isso se justifica, principalmente, pelas altas produtividades alcançadas na produção de milho americano, como as 9.703 kg/ha de milho considerada pelos autores. Os autores também consideraram o período de 7 meses entre plantio e colheita do milho, levando à ocupação de 600,84 m².ano por tonelada de milho.

A categoria Transformação de Área Natural é expressa em m² e, em nível *midpoint*, não há diferenciação entre os tipos de uso da terra, sendo contabilizados apenas os usos de terra natural. Com isso, conforme citado anteriormente, o resultado é expresso pela diferença entre a soma das áreas naturais que precederam a implementação de determinada atividade e a soma das áreas naturais que resultaram da implementação da mesma atividade.

A produção de 1 m³ de etanol de milho foi responsável pela transformação de 562 m² de área natural. A área total de transformação é extremamente influenciada pela etapa de cultivo agrícola do milho, cuja parcela de maior destaque é classificada como “*Transformation, from forest*” e ocorre na quantidade de 562 m². Outras entradas de transformações de uso da terra são observadas, mas tendem a se anular na diferença entre “transformações de...” e “transformações para...”, não influenciando diretamente os resultados.

É muito importante ressaltar que estes resultados são diretamente influenciados pelo critério de alocação adotado para a definição da expansão da cultura. Neste caso, o milho é uma cultura de inverno, rotacionada com a cultura da soja plantada no verão e, por isso, cada uma das culturas recebe um fator de alocação para a expansão de área plantada. Como

explicado anteriormente (item 6.1.2.4), este fator está atrelado à área total de plantio da cultura como rotação. Os resultados das análises de sensibilidade estão descritos no capítulo 8 deste documento.

Pieragostini, Aguirre e Mussati (2014) não observaram mudança no uso da terra para a produção de milho na Argentina, já que a área utilizada para a produção de milho foi classificada como “*Transformation, from arable*” e “*Transformation, to arable*”, ou seja, a área ocupada é transformada de terra arável para terra arável, sem transformações. Com isso, a etapa que se destaca para essa categoria é a produção de fertilizantes fosfatados (MAP e DAP), devido à etapa de mineração de rochas fosfáticas.

6.3.2 Desempenho Energético da produção de etanol de milho

O perfil energético da produção de etanol de milho foi obtido pela aplicação do método de avaliação de impacto Demanda Cumulativa de Energia (CED), cujos resultados são expressos na forma de energia primária consumida. Na Tabela 6.23, está apresentado o desempenho energético da produção de 1 m³ de etanol hidratado de milho, produzido em Usina Autônoma Integrada no estado do MT. Na sequência, será apresentado também o balanço energético de cada combustível, calculado pela razão entre a energia disponível renovável e a energia consumida não renovável.

A aplicação do método de avaliação de impacto CED indicou que a produção de 1 m³ de etanol hidratado de milho consumiu 27 GJ de energia. Na sequência serão descritos os resultados e contribuições de cada categoria analisada.

Tabela 6.23 - Perfil energético da produção de 1m³ de etanol hidratado de milho em Usina Autônoma Integrada no estado do MT, Brasil

Subcategorias de impacto	Unidade	por 1m ³ de etanol hidratado de milho
Não renovável, fóssil		7980
Não renovável, nuclear	MJ	113
Não renovável, biomassa primária		0,156
Renovável, biomassa secundária		18700
Renovável, alternativas (eólica, solar, geotérmica)	MJ	2,98
Renovável, hídrica		210
Pontuação única	MJ	27006

6.3.2.1 Fontes de energia não renováveis: fóssil, nuclear e biomassa de origem primária

Dentre as fontes não renováveis de energia, são incluídas as fontes fóssil, nuclear e a biomassa proveniente de floresta primária. A produção de 1 m³ de etanol de milho consome cerca de 7.980 MJ na forma de energia fóssil, 113 MJ na forma de energia nuclear e 156 kJ na forma de energia proveniente de biomassa primária. Comparativamente, a energia nuclear tem baixa expressividade, representando menos de 0,5% do consumo energético total do processo, pelo fato de ter pouca participação da matriz energética nacional. A energia de biomassa primária ganha destaque ainda menor, não demonstrando relevância para este estudo.

Dentro da subcategoria de fontes fósseis, dos 7,98 GJ consumidos na produção de 1 m³ de etanol de milho, 69,4% se dá pelo consumo de petróleo (5,54 GJ) e 29,2% pelo consumo de gás natural (2,33 GJ) (Gráfico 6.3).

Gráfico 6.3 - Participação das fontes energéticas de origem fóssil na categoria "Não renovável, fóssil" para a produção de etanol hidratado de milho

O petróleo é utilizado especialmente nas etapas de produção de diesel para transporte, produção de diesel para o maquinário agrícola e produção da ureia aplicada como fertilizante nitrogenado na etapa de produção de milho, nesta ordem. O gás natural é consumido nas etapas de produção de ureia usada como fertilizante, na produção do glifosato usado como herbicida e na produção de diesel usado nas etapas de transporte.

6.3.2.2 Fontes de energia renováveis: biomassa, alternativas e hídrica

Dentre as fontes de energia renováveis do método CED, são consideradas as subcategorias biomassa secundária (esta produzida pelo cultivo de florestas), energia eólica, solar e geotérmica que, neste método, são agrupadas e somadas em uma mesma categoria denominada ‘energias alternativas’; e energia hídrica, gerada nas usinas hidrelétricas.

Conforme apresentado na Tabela 6.23, 1 m³ de etanol de milho produzido consome 18,7 GJ na forma de biomassa renovável, sendo esta a subcategoria de maior relevância, já que representa 69,2% do consumo energético total. Este alto consumo de biomassa renovável está associado ao consumo de cavacos de madeira para cogeração energia térmica e elétrica que alimentam a etapa industrial de produção de etanol. Estando todo o processo industrial fundamentado nesta fonte de energia, é natural que esta categoria ganhe destaque no desempenho energético.

A segunda categoria dentre as fontes renováveis é a de fontes alternativas e reúne três fontes primárias de energia: a eólica, a solar e a geotermal. O etanol de milho consome 2,98 MJ por m³ de combustível, dentre os quais 2,95 MJ são consumidos como energia eólica, que está presente na matriz elétrica nacional. As fontes solar e geotermal têm baixa representatividade tanto na matriz elétrica quanto no processo de produção de etanol e podem ser consideradas irrelevantes na análise.

A última subcategoria dentre as renováveis é a energia de fonte hídrica. Apesar de apresentar bastante representatividade na matriz elétrica brasileira, os consumos energéticos desta origem se resumem a menos de 1% do consumo global do processo. Isso se deve ao fato de a usina possuir um sistema de cogeração e, com isso, se tornar autossuficiente do ponto de vista de geração elétrica. Os consumos de energia hídrica se resumem aos vinculados aos processos de produção de insumos.

6.3.2.3 Índice de Retorno Energético sobre o Investimento (EROI)

O balanço energético foi estipulado pelo cálculo do EROI seguindo a terminologia descrita por Hammerschlag (2006), conforme indicado no capítulo de Revisão Bibliográfica. Assim como definido para o estudo do etanol de cana, o valor usado como $E_{\text{disponível}}$ foi o PCI do etanol hidratado, definido pela ANP (2013) como 6.300 kcal/kg ou 21,35 GJ/m³.

O valor usado como $E_{\text{consumida, não renovável}}$ foi obtido do resultado da subcategoria “Fontes de energia não renováveis, fóssil” do método CED, já que as outras fontes não renováveis se mostraram pouco representativas para o estudo e esse pressuposto foi observado em trabalhos de diferentes autores. O resultado do Índice de Retorno Energético sobre o Investimento está na Tabela 6.24.

Tabela 6.24 - Valores de energias disponível e consumida, não renovável por 1m³ de etanol hidratado de milho, em GJ, e Índice de Retorno Energético sobre o Investimento (EROI)

$E_{\text{disponível}}$	$E_{\text{consumida, não renovável}}$	EROI (r_E)
GJ		
21,35	7,98	2,68

Hammerschlag (2006) percebeu inconsistência e divergência entre as terminologias utilizadas e metodologias conduzidas em estudos de balanço energético e cálculos de EROI de biocombustíveis entre diversos trabalhos publicados na área. Com isso, em seu artigo, além de definir claramente uma proposta de terminologia, realizou um levantamento dos dez trabalhos mais importantes sobre EROI de etanol dos Estados Unidos entre os anos 1990 e 2006 e aplicou-lhes a mesma metodologia de definição de EROI a fim de torná-los comparáveis entre si. Sendo esta a metodologia utilizada para a condução do presente trabalho, o etanol de milho do MT torna-se também comparável aos demais estudos. Cabe ressaltar que, durante a padronização dos dados, Hammerschlag (2006) considerou o Poder Calorífico Superior (PCS) para determinar a quantidade de energia disponível pelo etanol, ainda que tenha ressaltado em seu trabalho que a escolha entre o PCI e o PCS não carrega efeitos significativos no cálculo do r_E .

Dentre os trabalhos considerados por Hammerschlag (2006), três foram conduzidos com o objetivo de se avaliar o desempenho energético da produção de etanol de milho segundo a tecnologia *Dry Milling* e serão aqui analisados, sendo eles: Shapouri, Duffield e Wang (2002), Pimentel e Patzek (2005) e Kim e Dale (2005). Os três trabalhos consideraram os consumos de combustíveis e eletricidade nas etapas agrícola, transporte de milho e industrial. Shapouri, Duffield e Wang (2002) e Kim e Dale (2005), consideraram também a etapa de distribuição do etanol. Além disso, todos os trabalhos consideraram os consumos energéticos da produção dos insumos utilizados na etapa agrícola. Pimentel e Patzek (2005) consideraram ainda outras entradas energéticas, tais como energia empregada como mão-de-obra e para a construção da infraestrutura. Todos os autores consideraram alocação entre o etanol e os coprodutos DDG ou DDGS.

Após ter os dados tratados por Hammerschlag (2006), Shapouri, Duffield e Wang (2002) apresentaram valores para r_E da ordem de 1,38. Porém, se a $E_{\text{disponível}}$ do trabalho dos autores for substituída pelo PCI, tal qual considerado para o etanol de milho brasileiro, o balanço energético do etanol de milho americano desses autores seria 1,24. Caso não fosse considerada a alocação entre etanol e coprodutos (considerando ainda o PCI), o balanço energético cairia para 1,02. Dessa forma, os resultados podem ser comparados com os resultados do etanol de milho do Mato Grosso de forma mais justa.

Kim e Dale (2005) apresentaram valores de 1,62 como r_E . Este foi o maior dos valores de retorno energético entre os três trabalhos americanos analisados e pode ser justificado pelo fato de os autores terem considerado a produção de milho por plantio direto. Os resultados mostram que a adoção desta tecnologia de produção reduziu o consumo energético na etapa agrícola, especialmente no que diz respeito ao consumo de combustível e eletricidade na produção de milho e na produção de fertilizantes. No entanto, o valor de r_E também diminuiu caso seja aplicado o PCI ao invés de PCS e, somado a isso, seja desconsiderada a alocação entre coprodutos. Os novos valores seriam 1,46 e 1,06, respectivamente. A diminuição do retorno energético é maior neste caso, pois os autores consideraram um fator de alocação alto para os coprodutos, ficando o etanol com apenas 75% dos consumos energéticos.

Pimentel e Patzek (2005), por sua vez, apresentaram resultados discrepantes em relação ao EROI do etanol de milho americano. Os resultados obtidos pelos autores apresentam r_E de 0,84, indicando que não há retorno energético renovável sobre a energia fóssil investida no processo. Hammerschlag (2006) indica diversos motivos para tal divergência, incluindo a adoção de premissas conservadoras em relação à eficiência energética de diversos processos, a inclusão de consumos energéticos raramente considerados em outros estudos, como a energia consumida como mão de obra de trabalhadores no campo ou a energia despendida para a construção de bens de capital (equipamentos e instalações), e, ainda, o baixo valor de alocação para coprodutos, resumindo a divisão a apenas 7% da energia para os coprodutos. Aplicando os mesmos ajustes realizados aos outros dois estudos, o r_E do estudo de Pimentel e Patzek (2005) apresentaria retorno de 0,75 se fosse considerado o PCI e 0,70 caso considerado o PCI e não houvesse aplicação de fatores de alocação.

Salla e Cabello (2010), também conduziram estudos de desempenho energético da produção de etanol, porém no Brasil, a partir das matérias-primas milho, cana-de-açúcar e mandioca. Para o levantamento de consumos energéticos da etapa agrícola foram considerados os consumos de combustíveis, da produção de sementes, fertilizantes, calcário e pesticidas, transporte da matéria-prima até a usina e, também, da mão de obra utilizada no

campo. Para os consumos da etapa industrial o levantamento foi feito a partir dos consumos de eletricidade e de vapor, gerados em caldeira a partir da queima de bagaço de cana ou lenha. Os resultados obtidos para o balanço energético não podem ser diretamente comparados porque os índices foram obtidos por uma metodologia diferente das descritas neste trabalho e nas referências anteriores. A diferença se dá pelo fato de terem sido consideradas todas as formas de energia consumida e não apenas a energia de origem fóssil. Com isso, o balanço energético do etanol de milho obtido pelos autores foi 1,19. No entanto, aplicando a metodologia utilizada nos outros estudos aos dados utilizados pelos autores, ou seja, considerando que toda a energia consumida na etapa industrial tem origem renovável e, portanto, não compõe o indicador $E_{\text{consumida}}$, o balanço energético do etanol de milho alcançaria o valor de 2,96.

O Gráfico 6.4 compara os valores de balanço energético obtido para a Usina Autônoma Integrada no MT com os encontrados pela literatura analisada, após adequação à metodologia.

Gráfico 6.4 - Comparação entre os EROIs encontrados na literatura para o etanol de milho

O EROI do etanol de milho obtido neste estudo foi o segundo maior dentre os analisados em literatura encontrada no assunto, ficando atrás apenas dos resultados encontrados por Salla e Cabello (2010), embora com pouca diferença entre seus valores. O fator de convergência entre os dois estudos é, além de serem ambos conduzidos com dados brasileiros, a utilização de combustível renovável para a geração da energia consumida diretamente no processo. As usinas de etanol norte-americanas apresentam como padrão o uso

de gás natural como combustível para a geração de calor e o uso da eletricidade fornecida pela rede elétrica nacional, a qual, por sua vez, é produzida em usinas nucleares e, principalmente, em termelétricas movidas a combustíveis fósseis (HAMMERSCHLAG, 2006).

Pelo fato de o EROI considerar especificamente o consumo de energia fóssil não renovável, qualquer processo que considere o consumo de energia renovável nas suas principais etapas apresentará um desempenho superior para este índice. Além disso, a matriz elétrica também terá influência no desempenho energético dos insumos utilizados nos processos. Enquanto a matriz elétrica dos Estados Unidos está baseada em usinas movidas a combustíveis fósseis, a matriz elétrica brasileira apresenta a participação relativamente alta de energia renovável na forma de energia hídrica.

Conforme analisado anteriormente, o único dos três trabalhos norte-americanos que considerou o plantio direto como sistema de produção de milho obteve o melhor desempenho de EROI. Isso indica outro fator que pode interferir no desempenho energético da produção de etanol brasileira, o plantio direto, sistema de produção de milho mais disseminado no país. Esta tecnologia agrícola apresenta menores consumos energéticos diretos como, por exemplo, os de combustíveis fósseis ao excluir diversas atividades mecanizadas de preparo do solo, e também menores consumos indiretos, já que, teoricamente, exigem menores aplicações de fertilizantes, cujo processo de produção é considerado energo-intensivo.

Embora ainda apresente desempenho energético inferior ao etanol de cana-de-açúcar, o etanol de milho brasileiro apresenta bom desempenho energético ao se comparar com outros países. Aparentemente, a definição deste resultado está vinculada ao uso de combustíveis renováveis e à cogeração no processo de produção do etanol. Isto indica que os resultados poderiam ser diferentes caso a produção de etanol de milho brasileira também estivesse baseada em combustíveis fósseis, como gás natural por exemplo.

7 AVALIAÇÃO AMBIENTAL E ENERGÉTICA DO ETANOL DE SORGO

7.1 Bases do estudo de ACV (Objetivo e Escopo)

Tal qual descrito nos capítulos 5.1 e 6.1, este estudo segue as bases estabelecidas pelas normas ABNT NBR IS 14040 e 14044 (ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS, 2009a, 2009b) e os pressupostos descritos na definição de objetivo e escopo do estudo de etanol de cana-de-açúcar e de etanol de milho. Serão, portanto, apresentados neste capítulo apenas os pressupostos específicos para este estudo - *objetivo; função do sistema, unidade funcional e fluxo de referência; definição do sistema de produto e fronteiras do sistema; procedimentos de alocação; e premissas* -, que diferem dos textos já descritos anteriormente. Os requisitos de qualidade dos dados se equivalem para este estudo, para o etanol de milho e de cana-de-açúcar nos termos de fontes dos dados, cobertura geográfica e temporal e se equivalem para este estudo e para o de milho nos termos de cobertura tecnológica. Adotaram-se procedimentos de alocação para as mesmas etapas, pelas mesmas justificativas e sob os mesmos critérios descritos no escopo do estudo de etanol de milho (item 6.1.2.3), diferindo apenas os fatores de alocação.

7.1.1 Objetivo

O objetivo deste estudo de ACV é definido por *avaliar a produção de etanol hidratado a partir de sorgo em uma usina autônoma integrada*. Os propósitos deste estudo são proporcionar subsídios para a tomada de decisão quanto a novas tecnologias e matérias-primas para a produção de etanol, bem como contribuir com informações e conhecimento a respeito de tais processos. Dessa forma, o público-alvo do estudo engloba tomadores de decisão da cadeia produtiva do etanol e a comunidade científica.

7.1.2 Escopo

7.1.2.1 Função do sistema, unidade funcional e fluxo de referência

Este estudo se trata de uma ACV atribucional com abordagem do berço-ao-portão, que pode ser definida como uma ACV de processo. A função do processo é produzir etanol hidratado em destilaria autônoma integrada e a unidade funcional é *1 m³ de etanol hidratado*. Levando-se em conta os desempenhos técnicos agrícolas e industriais, os fluxos de referência adotados são *2,82 t de sorgo para a etapa agrícola* e *1 m³ de etanol para a etapa industrial*.

7.1.2.2 Definição do Sistema de Produto e Fronteiras do Sistema

O sistema de produto considera os seguintes processos elementares: (1) produção de sorgo, (2) recepção e moagem, (3) diluição, liquefação, cozimento e hidrólise enzimática, (4) propagação do fermento e fermentação, (5) destilação para a separação do etanol, (6) tratamento da vinhaça, (7) cogeração de energia e (8) produção agrícola de madeira a ser usada como combustível para a cogeração (Figura 7.1). O estudo inclui ainda entre as fronteiras do sistema a produção dos insumos consumidos, eletricidade e das etapas de transporte disponíveis na base de dados *ecoinvent*.

Figura 7.1 - Sistema de Produto e Fronteiras do Sistema de produção de etanol hidratado de sorgo

7.1.2.3 Procedimentos de Alocação

O estudo do etanol de sorgo também exigiu procedimentos de alocação, especialmente por se tratar de cultivo com rotação de culturas. Foram realizadas alocações para as mesmas etapas - ou seja, para as etapas de uso da terra e transformação de uso da terra, bem como suas emissões -, pelas mesmas justificativas e sob os mesmos critérios descritos no escopo do estudo de etanol de milho (item 6.1.2.3).

Para o estabelecimento dos fatores de alocação econômica foram levados em conta os preços médios de venda da tonelada de sorgo e de soja na região. Esses valores foram convertidos em preços médios de venda por ha, a partir das produtividades. A porcentagem da contribuição dos ganhos econômicos de cada cultura nos ganhos totais são os fatores de alocação. Os valores considerados no cálculo dos fatores de alocação econômica estão descritos na Tabela 7.1.

Tabela 7.1 - Parâmetros para cálculo de Fator de Alocação Econômica entre soja e sorgo, para a safra 2013 do estado do Mato Grosso

	Unidade	Safra 2013	
		Sorgo	Soja
Preço médio de venda ¹	R\$/saca	11,00	47,14
	R\$/t	183,33	785,67
Produtividade	t/ha	3,83	2,99
Rentabilidade	R\$/ha	702,16	2.347,57
Fator de Alocação Econômica	-	23,0%	77,0%

Fonte: ¹ informação pessoal²¹; Instituto Mato-grossense de Economia Agropecuária, 2013b.

A outra alocação necessária foi realizada para os aspectos e emissões resultantes da transformação do uso da terra, também devido à rotação de culturas. O critério de alocação teve como base, tal qual descrito para o milho, o critério de paridade. Dessa forma, ambas as culturas dividem igualmente os impactos potenciais gerados, exigindo, no entanto, uma correção por um fator de ponderação que estabelece a proporção de área de soja que recebe sorgo como segunda safra.

Para compreender o fator de ponderação, é importante lembrar que, no estado do MT, o sistema de rotação inclui a soja como cultura principal, e de maior valor econômico, e uma segunda cultura de inverno, cultivada em sistema safrinha, cuja espécie pode variar de um ciclo anual para o outro. Por esse motivo, para fins de determinação de expansão da cultura,

²¹ Informação recebida por Rostirolla em Campos de Julio, em 2013.

assumiu-se que a cultura da soja determina o crescimento das áreas do sistema de rotação e que as transformações decorrentes desta expansão são ponderadas segundo a participação das culturas de segunda safra (neste trabalho, o milho e o sorgo) no sistema de rotação com a soja. O fator de ponderação é a porcentagem da área de sorgo safrinha em relação à área total de soja no MT, no caso 2% (Tabela 7.2). Este fator corrige o fator de alocação fixo de 50% que distribui as cargas de transformação do uso da terra entre cada uma das culturas rotacionadas.

Tabela 7.2 - Fatores de ponderação que determinam o fator de alocação entre sorgo e soja para Transformação do Uso da Terra

Áreas plantadas		Fatores de ponderação		Fator de Alocação Transformação do Uso da Terra
soja 1ª safra 2013 (ha)	sorgo 2ª safra 2013 (ha)	participação do sorgo como 2ª safra da soja	critério de paridade rotação de culturas	
7.931.905 ¹	163.200 ²	2%	50%	1%

Fonte: ¹ IBGE, 2015; ² CONAB, 2013c.

Por fim, também se realizou alocação para o calcário utilizado na correção de solo, já que este produto beneficia tanto a cultura do sorgo quanto a da soja. Foi considerado que cada uma das duas culturas recebe 50% da aplicação de calcário.

7.1.2.4 Premissas

- Não foram considerados aspectos ambientais associados à construção de bens de capital.
- Na região, a produção do sorgo ocorre de forma integrada com a soja, formando um sistema de rotação de culturas. Dessa forma, embora duas culturas diferentes dividam o mesmo espaço em períodos de tempo distintos, neste estudo não foi considerado o “*crop system*” ou expansão de fronteira. Neste caso, o sorgo foi considerado como único produto de interesse, tendo sido realizadas alocações de alguns recursos entre as culturas de soja e sorgo, como a ocupação e mudança de uso da terra ou a aplicação de corretivos.
- Para adequação aos métodos de AICV, as transformações de áreas naturais foram consideradas “*forest*” independente do tipo de mata nativa.

- Apesar de o sistema representado estar em integração com a usina de etanol de cana, estabeleceu-se como premissa desse estudo que os modelos seriam avaliados separadamente, dessa forma, apesar de dividirem os mesmos equipamentos, conforme tecnologia descrita, os processos não dividem insumos, como bagaço para cogeração e vinhaça para o campo de cana.
- O tanque de vinhaça recebe vinhaça da etapa de tratamento e águas residuais do processo provenientes de lavagem de piso, purga e lavagem de gases da caldeira. A vinhaça diluída será destinada à aplicação no campo como fertirrigação.
- A título de posterior comparação com os demais modelos, admitiu-se que a vinhaça tratada gerada na etapa industrial, juntamente com águas residuais da usina, são reaproveitadas no campo. Apesar de essa prática ainda não ocorrer na região, a adubação do sorgo por aplicação de vinhaça é possível e, neste estudo, viabiliza a extrapolação das análises possibilitando a avaliação de uma usina de etanol produzido exclusivamente a partir de sorgo. Com isso, considerou-se a etapa de transporte da vinhaça da usina até o campo, embora o inventário de sorgo não reflita as condições resultantes de aplicação da vinhaça no campo. As emissões decorrentes da aplicação de vinhaça não foram consideradas devido à falta de dados sobre a composição da vinhaça gerada na produção de etanol de sorgo. As emissões decorrentes da etapa de transporte da vinhaça da planta industrial até o campo foram consideradas.
- Os transportes de vinhaça ocorrem por modal rodoviário.
- Não foi considerada alocação entre o etanol e o DDG, sendo que a vinhaça ficou com toda a carga ambiental do processo de tratamento da vinhaça. Esse pressuposto foi considerado devido ao fato de o DDG ainda não ter um mercado consolidado na região, já que a pecuária ainda é majoritariamente extensiva no país. Dessa forma, buscou-se evitar distorções do modelo ou melhorias artificiais do desempenho ambiental do principal produto do processo, o etanol.
- O combustível utilizado na caldeira para o processo a partir de fontes amiláceas foi o cavaco de madeira a partir de eucalipto. Devido à localização geográfica da planta, o cavaco de madeira se mostra como a matéria-prima energética mais viável, além de ser um produto de origem renovável. As fazendas de produção de eucalipto localizam-se a 50 km, em média, da usina.

- Considerou-se que o cavaco de madeira apresenta um teor de umidade de 28,6% e o PCI de 14.400 kJ/kg. Admitiu-se que a eficiência energética na caldeira para a conversão de madeira em calor seja 65%.
- No processo de produção de etanol de sorgo não existem equipamentos que consomem diretamente o vapor de alta pressão, no entanto existe um maior consumo de vapor de escape durante o processo, já que ele é necessário na etapa de cozimento e na etapa de destilação, uma vez que não existe etapa de concentração de caldo ou mosto.

7.2 Inventários do Ciclo de Vida (Análise de Inventário)

Para o modelo de produção de etanol de sorgo foram construídos inventários para cada processo elementar, que serão apresentados neste documento de forma unificada, a fim de se preservar a confidencialidade das informações fornecidas pela Usina e pelos produtores de sorgo.

Os dados brutos utilizados e seus respectivos procedimentos de cálculos estão apresentados neste capítulo. Em relação às emissões, foram considerados os mesmos modelos descritos para a produção de etanol de cana (itens 5.2.1.1 e 5.2.2.1). Neste capítulo, serão apresentados apenas os parâmetros necessários para alimentar os modelos que diferem para a produção de sorgo e etanol de sorgo em relação ao estudo para cana.

Serão apresentados também os ICVs provenientes do banco de dados *Ecoinvent* utilizados para este trabalho, sempre com indicação no caso de terem sofrido adaptações para as condições brasileiras.

Os ICVs da produção de etanol de sorgo estão apresentados no APÊNDICE C – Inventário do Ciclo de Vida da produção de etanol hidratado de sorgo.

7.2.1 ICV da produção de sorgo

As informações coletadas para a concepção do modelo de produção agrícola dos grãos de sorgo foram fornecidas por dois diferentes produtores de sorgo safrinha localizados na região oeste do Mato Grosso para a safra de 2013. Os dados foram coletados em unidades por ha e combinados de forma a gerar um inventário o mais uniforme possível. Por se tratarem de

dois conjuntos de dados, quando as doses de produtos aplicados diferiam entre si foram adotadas as médias para consolidar as informações em um único inventário. Todos os consumos por ha foram, então, divididos pela produtividade obtida em campo, o que gerou um Inventário de consumos e emissões por t de sorgo produzido.

O sistema de produção de sorgo safrinha utilizado apresenta características típicas e práticas difundidas na mesma região em que ocorre a produção da cana-de-açúcar e milho, onde as condições climáticas desobrigam da operação de irrigação para a cultura.

Produtividade

A produtividade média alcançada na safra de 2013 para o sorgo safrinha foi 3.830 kg/ha (informação pessoal²²).

Ocupação do Solo

A ocupação do solo pelo cultivo de sorgo segue o método descrito para cana-de-açúcar e milho, segundo Nemecek e Schnetzer (2011). Sobre a área ocupada pelo sorgo, partindo dos dados de produtividade, tem-se que para a produção de uma tonelada de grão são ocupados 2.610,97 m². Para a determinação do período de ocupação do sorgo no solo, por ser uma cultura de segunda safra, assim como o milho, considera-se a rotação com a cultura da soja e a necessidade de alocação do recurso.

O período de ocupação efetiva do sorgo é 3,5 meses, sendo 4,5 meses o tempo de ocupação da soja, já que a escolha do plantio de sorgo está normalmente atrelada a um período maior de ocupação do solo pela primeira cultura, a soja. Os outros 4 meses do ano permanecem em descanso, cobertos pela palhada do sorgo, e necessitam ser alocados, pela mesma justificativa descrita para o milho. A alocação do período de descanso do solo também ocorreu a partir do critério econômico e seguem os fatores 23% para sorgo e 77% para soja, descritos na Tabela 7.1.

Considerando o fator de alocação, o sorgo ocupa a terra pelo período de 4,42 meses no ano e, portanto, a ocupação do solo pelo sorgo produzido é de 961,9 m².ano. A terra ocupada também é do tipo “terra arável, irrigada”.

²² Informação recebida por Rostirolla em Campos de Julio, em 2013.

Transformação do Uso da Terra

A determinação da Transformação do Uso da Terra para a produção do sorgo safrinha seguiu exatamente as mesmas etapas descritas para a cana-de-açúcar e para o milho e, por se tratar também de uma cultura de segunda safra em rotação com a soja, segue os mesmos pressupostos de expansão estabelecidos para o milho.

Como é a cultura de soja quem determina a expansão do sistema de rotação soja e sorgo, assim como do sistema soja e milho, os dados de crescimento e decréscimo de áreas plantadas foram demonstrados na Tabela 6.3. Os dados que diferem entre o milho e o sorgo são os fatores de ponderação, definidos segundo a participação do sorgo como segunda cultura em rotação com a soja. Neste caso, a área de sorgo segunda safra corresponde a 2% da área de soja (COMPANHIA NACIONAL DE ABASTECIMENTO, 2013c) e, portanto, deve receber a mesma porcentagem das cargas de expansão, ou seja, de transformação do uso da terra (Tabela 7.2). O fator de alocação de 50% também é aplicado neste caso, seguindo a mesma justificativa anteriormente descrita.

Transporte de insumos

A modelagem do transporte de insumos é rigorosamente igual àquela estabelecida para o milho, em termos do modal selecionado, da capacidade de carga dos veículos e das distâncias cobertas pela operação.

7.2.1.1 Modelos de Emissões e parâmetros utilizados

Para as estimativas de emissões da etapa de produção de sorgo foram utilizados os mesmos modelos de emissões apresentados para a produção de cana-de-açúcar e de milho. No geral, os parâmetros utilizados para alimentar os modelos são específicos para cada cultura e diferem entre os estudos. Serão, portanto, apresentados neste capítulo apenas os parâmetros e especificidades das emissões para a produção de sorgo.

Emissões de amônia para a atmosfera por uso de fertilizantes

Assim como para o ICV de produção de milho, as emissões de amônia do processo de produção de sorgo foram calculadas por uso de fertilizante multinutriente e de ureia (Eq. 5.3). Por se tratar dos mesmos fertilizantes, os parâmetros selecionados para o sorgo são os mesmos utilizados para o milho e apresentados na Tabela 6.4. Apesar de o modelo considerar

a aplicação de vinhaça nos campos de sorgo, as emissões provenientes de tal aplicação não foram calculadas por falta de dados específicos sobre a composição da vinhaça gerada no processo de etanol de sorgo.

Emissões de nitrato para águas subterrâneas por uso de fertilizantes

As emissões de nitrato para águas subterrâneas por uso de fertilizantes foram calculadas segundo a Eq. 5.4 e os parâmetros para a cultura de sorgo na região de estudo estão apresentados na Tabela 7.3.

Tabela 7.3 - Parâmetros utilizados para o cálculo de emissões de NO_3^- para águas subterrâneas por aplicação de fertilizantes, para produção de sorgo

P	c	L	S	Norg	U
mm/ano	%	m		kg N/ha	
2500 ¹	50% ²	1,5 ³	19 ²	4000 ⁴	114,9 ⁵

Fonte: ¹Portal Mato Grosso, 2008; ²informação pessoal²³; ³Rodrigues, 2008; ⁴informação pessoal²⁴; ⁵Resende et al, 2009.

Emissão de fósforo para águas superficiais por erosão do solo

O modelo utilizado para a emissão de fósforo por erosão está apresentado na Eq. 5.5 e os parâmetros, sendo os mesmos utilizados para o milho, estão na Tabela 6.6.

Emissão de óxido de dinitrogênio para a atmosfera por uso de fertilizantes e restos culturais

A emissão do N_2O foi estimada seguindo o modelo apresentado na Eq. 5.6 e os parâmetros selecionados estão apresentados na Tabela 7.4. São considerados restos culturais do sorgo cultivado em sistema de plantio direto todas as partes da planta, com excessão dos grãos.

Tabela 7.4 - Parâmetros utilizados para o cálculo de emissões de N_2O para a atmosfera por aplicação de fertilizantes e restos culturais, para produção de sorgo

Teor de N nos restos culturais	
Kg N / t sorgo	15

Fonte: Pittelkow et al, 2012.

²³ Informação recebida por Rostirolla em Campos de Julio, em 2013.

²⁴ Informação recebida por Debiasi, por correio eletrônico, em 2015.

Emissão de óxidos de nitrogênio para a atmosfera por uso de fertilizantes

A estimativa para esta emissão segue a Eq. 5.7 e não são necessários parâmetros específicos.

Emissão de dióxido de carbono para a atmosfera por uso de ureia como fertilizante

A emissão do CO₂ por uso de ureia é calculada segundo a equação 5.8. Não são necessários parâmetros específicos.

Emissão de metais pesados para águas superficiais e solo por uso de fertilizantes e calcário

As emissões de metais pesados para águas superficiais foram estimadas segundo a Eq. 5.9 e as emissões para solo, segundo a Eq. 5.10. Os parâmetros utilizados estão apresentados na Tabela 7.5.

Tabela 7.5 - Teor de Metal Pesado dos insumos (TMP, insumo) e Teor de Metal Pesado nos grãos colhidos (TMP, colhido) para o cálculo de emissões de metais pesados para águas superficiais e solo por aplicação de fertilizantes, calcário e gesso, para produção de sorgo

Metal Pesado	T _{MP, insumo} ¹				T _{MP, colhido}
	ureia	TSP	KCl	Calcário	
		mg/kg			mg/kg
Cd	0,03	52,00	0,05	0,00	0,00 ²
Cu	3,94	45,00	4,36	6,00	0,07 ²
Zn	28,86	299,00	40,16	7,00	0,20 ²
Pb	0,72	3,50	4,80	0,00	0,00 ²
Ni	1,31	43,99	1,83	0,00	0,65 ³
Cr	1,31	260,99	1,74	9,90	-

Fonte: ¹Sugawara, 2012; ²Tomaz et al. 2009; ³Revoredo e Melo, 2006.

Emissões para atmosfera pela queima de diesel

As emissões de gases de exaustão por queima de óleo diesel são calculadas segundo a Eq. 5.11. Os parâmetros utilizados para estimar estas emissões para a produção de milho estão apresentadas na Tabela 5.13.

Emissões para atmosfera pela queima da palhada da cana-de-açúcar

As emissões por queimada de palhada são contabilizadas apenas para a cana-de-açúcar, já que esse processo não ocorre na produção de sorgo, cuja palhada é deixada no campo como preconiza o sistema de plantio direto.

Emissões para atmosfera pela queima do etanol

Pelo fato de ocorrerem aplicações aéreas de fitossanitários, cujo combustível consumido é o etanol, apenas para a produção de cana-de-açúcar, essa emissão não foi considerada para a produção de sorgo.

Emissões de pesticidas para o solo

Os mesmos pressupostos antes apresentados para essa emissão para produção de cana foram aqui igualmente considerados.

Emissões de CO₂ para a atmosfera por Mudança de Uso da Terra

As emissões de CO₂ por Mudança de Uso da Terra foram estimadas segundo as equações 5.13, 5.14 e 5.15. Para este modelo, o sorgo é definido como *cultura anual* e os parâmetros selecionados estão descritos nas Tabelas 5.15 e 5.16.

Absorção de CO₂ da atmosfera

A absorção de CO₂ pela planta de sorgo foi calculada segundo a Eq. 5.16. Os parâmetros específicos para a cultura do milho estão demonstrados na Tabela 7.6.

Tabela 7.6 - Parâmetros utilizados para o cálculo de absorção de CO₂ da atmosfera pela planta, para produção de sorgo

Produto de Referência	MS _{PR}	C _{MS,PR}	MS _{sem.}	C _{MS,sem}
	kg MS/kg PR	kg C/kg MS	kg MS/kg PR	kg C/kg MS
Grãos	1,51	0,43	1,51	0,43

Fonte: Dias et al, 2013.

7.2.1.2 Banco de dados utilizado

As adaptações dos ICVs de fontes secundárias utilizados no ICV de produção de sorgo seguem os mesmos preceitos estabelecidos na adaptação de Inventários para o ICV de cana-de-açúcar e o ICV de milho. A Tabela 7.7 apresenta os ICVs utilizados no estudo e os ICVs dos bancos de dados que serviram como referência para as adaptações.

Tabela 7.7 - Inventários de Ciclo de Vida utilizados no Inventário de produção de sorgo e os respectivos ICVs dos bancos de dados que serviram como referência para as adaptações

Referência Ecoinvent	Inventários Adaptados
Urea, as N, at regional storehouse/RER U	Urea, as N, at regional storehouse - BR
Limestone, milled, loose, at plant/CH U	Limestone, milled, loose, at plant - BR
Glyphosate, at regional storehouse/RER U	Glyphosate, at regional storehouse - BR
Atrazine, at regional storehouse/RER U	Atrazine, at regional storehouse - BR
Insecticides, at regional storehouse/RER U	Insecticides, at regional storehouse - BR
Pyridine-compounds, at regional storehouse/RER U	Pyridine-compounds, at regional storehouse - BR U
Maize seed organic, at farm/CH U	-

Referência USLCI	Inventários Adaptados
Diesel, at refinery/I/US	Diesel, at refinery/BR
Electricity, diesel, at power plant/US U	Electricity, diesel, at power plant/BR U

Para as etapas de transporte foi selecionado o ICV do banco de dados Ecoinvent denominado “*Transport, lorry 7,5-16t, EURO3/RER U*”.

7.2.2 ICV da produção de etanol de sorgo

A caracterização dos sistemas de produção industrial de etanol de milho segue as características da tecnologia “*Dry Milling*” e integração do tipo *fermentações independentes e moagem de grãos na entressafra da cana*. As fontes dos dados utilizados para a construção do modelo foram basicamente primárias, conforme descrito no capítulo de materiais e métodos (item 4.2), e complementados com informações obtidas de fontes secundárias da literatura especializada, principalmente McAloon et al. (2000), Shapouri e Gallagher (2005) e Singh (2010), utilizadas para complementação e validação dos dados considerados.

Os dados primários foram coletados para as produções de etanol da safra e 2013/2014. A combinação do conjunto de dados levantados com os dados secundários gerou um inventário uniforme e representativo. Os dados de insumos materiais e energéticos do processo foram coletados em kg, L ou MW por hora e complementados e ajustados pelo fechamento dos balanços de massa e energia. Os valores ajustados por hora foram, então, divididos pelo volume de etanol produzido por hora para se obter um ICV com informações por m³ de etanol.

Rendimento Industrial

A produtividade e produção total de etanol estão relacionadas à capacidade de moagem e destilação da usina. Os equipamentos instalados permitem uma capacidade de moagem da unidade de 900 t grãos/dia, ou 37,5 t grãos/h. Nessas condições, a usina moeu em um ano o equivalente a 95.400 t de grãos, por um período de 106 dias de operação (informação pessoal²⁵). O rendimento de etanol de fontes amiláceas está ligado ao teor de amido contido nos grãos, que, no caso do sorgo, é de 57,54%, valor obtido por análise laboratorial (informação pessoal²⁶). O rendimento industrial do etanol de sorgo foi 354,3 L etanol/t sorgo, o que levou à produção de 33.810 m³ de etanol pela safra. No conjunto total do processo, para cada 37,5 t/h de sorgo moído, são gerados 10,75 t/h de etanol, equivalentes a 13,29 m³/h nas condições em que o produto é obtido (considerando densidade média do etanol hidratado 809 kg/m³ (ANP, 2013)). Todo o etanol produzido a partir de fontes amiláceas corresponde a etanol hidratado. Os principais parâmetros industriais que caracterizam este modelo estão descritos na Tabela 7.8.

Elettricidade

O consumo de energia elétrica para o processo de produção de etanol por fonte amilácea é menor do que o por cana-de-açúcar, sendo suficiente o funcionamento de apenas um gerador de capacidade elétrica de 3.000 kW e voltagem de 440V.

Para o cálculo dos consumos elétricos por setor industrial, assim como para o modelo do milho, foram coletados os valores de potência aparente, em kVA, por setor e os valores foram transformados de potência aparente em potência efetiva, considerando que a potência mecânica instalada de cada setor da indústria leva em conta o fator de potência mínimo exigido pela agência reguladora ANEEL (2012), de 0,92. Considera-se que não há excedente de energia gerada e, portanto, não há aporte de eletricidade na rede elétrica proveniente dos geradores da usina.

²⁵ Informação recebida por Nogueira em Campos de Julio, em 2013.

²⁶ Informação recebida por Nogueira em Campos de Julio, em 2013.

Tabela 7.8 - Parâmetros industriais considerados no modelo de produção de etanol de sorgo

Parâmetro	Valor
Capacidade anual de moagem	95.400 t grãos
Produção anual de etanol	33.810 m ³
Eficiência de moagem da usina	85%
Consumo de cavaco (28,6 % umidade)	
Caldeira	619 kg/t grãos ou 23,2 t/h
Secagem do DDG	72 kg/t grãos ou 2,7 t/h
Poder calorífico do cavaco (PCI)	14.400 kJ/kg
Período de produção: Entressafra da cana (dezembro a abril)	120
Dias / horas efetivas de operação	106 dias / 2.544 horas
Fator de capacidade da usina	88,3 %
Processamento horário de milho	37,5 t/h
Produção horária de etanol	13,29 m ³ /h
Rendimento Industrial do etanol	354,3 L/t
Consumo de vapor vivo (21 bar)	2,21 t/t grãos ou 83 t/h
Consumo de vapor para processo (1,5 bar)	2,21 t/t grãos ou 83 t/h
Perfil de produção da usina	100 % etanol hidratado
Pressões de vapor de extração/exaustão/condensação	21 bar / 1,5 bar / 0,8 bar
Potência mecânica instalada	2590 kW
Capacidade elétrica instalada	4.200 kW

7.2.2.1 Modelos de Emissões

Para as etapas industriais da produção de etanol de sorgo, foram estimadas as mesmas emissões e segundo os mesmos modelos e parâmetros estabelecidos e descritos para o modelo de produção de etanol de milho (item 6.2.2.1).

7.2.2.2 Banco de dados utilizado

Por se tratar de modelos industriais muito semelhantes, os ICVs utilizados e adaptados de bancos de dados para os ICVs de produção de etanol de sorgo foram os mesmos utilizados para modelar os ICVs de produção de etanol de milho. Esses ICVs estão apresentados na

Tabela 6.13 no item 6.2.2.2. Para as etapas de transporte também foi utilizado o ICV do banco de dados Ecoinvent denominado “*Transport, lorry 16-32t, EURO4/RER U*”.

7.3 Resultados e Discussão (Avaliação de Impacto de Ciclo de Vida)

7.3.1 Desempenho Ambiental da produção de etanol de sorgo

A análise ambiental a ser aqui apresentados está baseada na aplicação do método *ReCiPe Midpoint H – World Recipe (H)*. Os resultados serão apresentados segundo a descrição dos perfis ambientais e das etapas contribuintes para cada impacto potencial. Tal como a Unidade Funcional indica, as emissões potenciais estão referenciadas à produção de 1 m³ de etanol hidratado de sorgo produzido em Usina Autônoma Integrada no estado do Mato Grosso.

Na Tabela 7.9 está apresentado o perfil ambiental da produção de 1 m³ de etanol hidratado de sorgo e, na sequência, os resultados serão apresentados e comparados a outros estudos publicados para cada categoria de impacto analisada. Pelo fato de poucos estudos sobre ACV de etanol de sorgo terem sido encontrados nas bases de dados buscadas, os resultados de algumas das categorias serão comparados com resultados encontrados para o milho, já que os sistemas de produção, tanto o agrícola quanto o industrial, apresentam semelhanças suficientes para justificar esse ato.

Tabela 7.9 - Perfil ambiental da produção de 1m³ de etanol hidratado de sorgo em Usina Autônoma Integrada no estado do MT, Brasil.

Categoria de impacto	Unidade	por 1m³ etanol hidratado de sorgo
Mudanças Climáticas	kg CO ₂ eq	877
Depleção de Água	m ³	15,0
Formação de material Particulado	kg PM ₁₀ eq	2,65
Formação de Oxidação Fotoquímica	kg NMVOC	12,3
Acidificação Terrestre	kg SO ₂ eq	12,0
Ecotoxicidade Terrestre	kg 1,4-DB eq	34,7
Ecotoxicidade de Água Doce	kg 1,4-DB eq	27,8
Eutrofização de Água Doce	kg P eq	0,028
Toxicidade Humana	kg 1,4-DB eq	41,0
Ocupação de Terras Agrícolas	m ² .a	3.050
Transformação de Terra Natural	m ²	55,1

7.3.1.1 Mudanças Climáticas

A produção de etanol de sorgo emite potencialmente 877 kg CO₂ eq para cada m³. As substâncias que mais contribuem para essa emissão são o CO₂ de origem fóssil, o N₂O e o CO₂ proveniente da Mudança do Uso da Terra (CO₂ MUT), nessa ordem, e estão apresentadas na Tabela 7.10.

Tabela 7.10 - Principais emissões contribuintes para a categoria Mudanças Climáticas para a produção de 1m³ de etanol hidratado de sorgo

Emissões	Mudanças Climáticas	
	kg CO ₂ eq	%
CO ₂ fóssil	450	51,3%
N ₂ O	326	37,2%
CO ₂ MUT	71,0	8,10%
CH ₄ biogênico	15,6	1,78%
CH ₄ fóssil	13,3	1,52%
outros	1,10	0,13%
Total	877	100%

As contribuições de cada etapa do processo por substância estão apresentadas no Gráfico 7.1. As emissões de CO₂ fóssil provêm, principalmente, das etapas de transporte de grãos de milho, vinhaça e cavaco de madeira por caminhões de 16-32 t de capacidade; da queima de diesel nas operações mecanizadas e aplicação de fertilizantes nitrogenados na etapa agrícola; e na produção de amônia usada na fabricação de ureia. As emissões de N₂O somaram 326 kg CO₂ eq, dos quais 88,6% são gerados na etapa de produção agrícola de sorgo, devido a aplicação de fertilizantes nitrogenados. No quesito emissões de CO₂ MUT, os resultados sugerem que o etanol de sorgo emite 70 kg CO₂ eq, cerca de 10 vezes menos do que as emissões por mudança de uso da terra do milho. Assim como para o milho, estes resultados podem ter forte influência do critério de alocação adotado (ver capítulo 8).

Cai et al. (2013), levantaram as emissões de GEE da produção de etanol a partir de sorgo granífero, considerando dois cenários, o primeiro usando gás natural fóssil como fonte energética da produção de etanol e o segundo utilizava gás natural renovável proveniente da biodigestão de dejetos animais. O sistema de produto considerou também a produção de fertilizantes, da matéria-prima agrícola e seu transporte, a produção de enzimas e fermento, a produção industrial de etanol pelo processo *dry milling*, o transporte e distribuição do etanol e sua etapa de uso.

Gráfico 7.1 - Emissões para a categoria de Mudanças Climáticas e principais processos contribuintes para a produção de 1 m³ de etanol hidratado de sorgo

No cenário em que o gás natural fóssil é utilizado como combustível, a emissão de gases de efeito estufa até a etapa de produção do etanol (sem distribuição e consumo do produto) é estimada em 1.150,8 kg CO₂ eq/m³ de etanol produzido, não considerando emissões originadas de mudança de uso da terra, tampouco alocações ou créditos para coprodutos gerados. A etapa que se destaca entre as emissões da categoria foi a de produção de etanol, que contribuiu com 43,6% das emissões. Se fossem consideradas as emissões por MUT, os autores estimaram como emissão total 1.705,9 kg CO₂ eq/m³ de etanol.

No cenário em que se utiliza gás natural de origem renovável, as emissões de GEE são menores em relação à que utiliza fonte fóssil. Sem alocações ou créditos para os coprodutos, as emissões são estimadas em 719,5 kg CO₂ eq/m³ de etanol. Neste caso, a etapa que ganha maior destaque é a produção de fertilizantes, uma vez que as emissões da etapa de produção de etanol são diminuídas. Se à emissão total forem somadas as emissões provenientes de MUT, as emissões potenciais são 1.274,6 kg CO₂ eq/m³ de etanol.

Ambos os cenários mostraram emissões superiores em relação à geração de GEE do que os encontrados por este estudo. O desempenho que mais se aproximou ao encontrado para o etanol de sorgo do Mato Grosso foi o cenário de Cai et al. (2013) que considera energia de fonte renovável sem a contabilização de emissões causadas por MUT. No entanto, as emissões causadas por MUT para o sorgo brasileiro sofrem a influência de fatores de alocação entre a cultura de sorgo e soja, definindo o resultado final. Se outros critérios de alocação fossem selecionados os resultados seriam diferentes. Possivelmente, o estudo de etanol de

sorgo americano não considerou fatores de alocação entre culturas rotacionadas, ou mesmo não houve rotação de culturas.

7.3.1.2 Depleção de Água

Os resultados obtidos para a categoria de Depleção de Água indicam o consumo potencial 15 m³ de água para a produção de cada m³ de etanol hidratado de sorgo. Dessa quantia, 98%, ou seja, 14,7 m³ de água são consumidos na forma de água de poço, extraída do subsolo. A água de poço é utilizada especialmente em duas etapas, na torre de resfriamento para a cogeração de energia (45,9%) e na embebição da farinha de sorgo para extração do amido (43,7%).

Os resultados apresentados pelo etanol de sorgo são bastante semelhantes aos apresentados no capítulo 6.3.1.2 para etanol de milho e, conseqüentemente, diferem substancialmente dos resultados encontrados por Flury et al. (2012), que conduziram avaliação de consumo de água para os mesmos sistemas analisados por Muñoz et al. (2014). Os consumos de água para etanol de milho norte-americano foram da ordem de 649 m³ por m³ de etanol produzido, sendo que 99,9% deste consumo se devem à etapa agrícola de produção de milho, que é irrigada. Desconsiderando a etapa de irrigação, que não ocorre para o sorgo safrinha produzido no MT, os consumos de água do processo de obtenção de etanol de milho americano seriam inferiores aos de etanol de sorgo, com apenas 0,668 m³ de água por m³ de combustível fabricado, demonstrando uma maior eficiência no consumo de água da etapa industrial.

7.3.1.3 Formação de Material Particulado, Formação de Oxidação Fotoquímica e Acidificação Terrestre

Para a categoria de Formação de Material Particulado, o perfil ambiental da produção de etanol de sorgo indicou a emissão potencial de 2,65 kg MP₁₀ eq. As principais substâncias que contribuíram para este resultado foram os óxidos de nitrogênio, com 45,7% do total, seguido pela amônia, com 41,9%, e pelo material particulado <2,5µm, com 7,5%.

Tabela 7.11 - Principais emissões contribuintes para a categoria Formação de Material Particulado para a produção de 1m³ de etanol hidratado de sorgo

Emissões	Formação de Material Particulado	
	kg PM10 eq	%
NO _x	1,21	45,7%
NH ₃	1,11	41,9%
MP _{<2,5µm}	0,199	7,5%
Outros	0,131	4,9%
Total	2,65	100%

As etapas responsáveis pelas emissões da categoria podem ser observadas no Gráfico 7.2. Os óxidos de nitrogênio ficam a cargo da queima do cavaco na caldeira, das emissões na etapa de transporte e da etapa agrícola, especialmente pelo uso de fertilizante e queima de diesel em operações mecanizadas. As emissões de amônia se devem especialmente pelo uso de fertilizantes nitrogenados na etapa agrícola. O MP_{<2,5µm} emitido se deve à queima de madeira na caldeira. No conjunto, a etapa agrícola apresentou maior contribuição para a Formação de Material Particulado.

Gráfico 7.2 - Resultados para as categorias de impacto Formação de Material Particulado (FMP), Formação de Oxidação Fotoquímica (FOF) e Acidificação Terrestre (AT) e principais processos contribuintes por categoria para a produção de 1 m³ de etanol hidratado de sorgo

Pieragostini, Aguirre e Mussati (2014) encontraram valores semelhantes para o desempenho de etanol de milho na Argentina. Para eles, também a etapa agrícola apresentou maiores contribuições para a categoria (54% do total), com ênfase ao uso de fertilizantes.

Na categoria Formação de Oxidação Fotoquímica, o etanol de sorgo apresenta emissões potenciais de 12,3 kg NMVOC. As principais substâncias que somam este total são NO_x , com 44,8% das emissões; $\text{CO}_{\text{biogênico}}$, com 33,4%; NMVOC, com 12%; e etanol, com 9,27% da emissão (Tabela 7.12).

Tabela 7.12 - Principais emissões contribuintes para a categoria Formação Oxidação Fotoquímica para a produção de 1m^3 de etanol hidratado de sorgo

Emissões	Formação de Oxidação Fotoquímica	
	kg NMVOC	%
NO_x	5,51	44,8%
CO , biogênico	4,11	33,4%
NMVOC	1,47	12,0%
Etanol	1,14	9,27%
Outros	0,07	0,569%
Total	12,3	100%

A etapa do processo que contribuiu com as maiores emissões foi a geração de calor na caldeira através da queima do cavaco de madeira, conforme Gráfico 7.2. Esta etapa contribuiu principalmente através das emissões de $\text{CO}_{\text{biogênico}}$, mas também de NO_x e NMVOC. A segunda maior contribuição se deu pela etapa de transporte, gerando emissões de NO_x . Na sequência, a etapa de destilação influenciou os resultados devido às perdas por evaporação de etanol. A etapa agrícola, neste caso, contribuiu com emissões de NO_x por aplicação de fertilizantes e queima de diesel nas operações mecanizadas. Por fim, a etapa de produção do fertilizante ureia contribui com emissões de NMVOC.

Muñoz et al. (2014) encontraram emissões menores para FOF para a produção de etanol de milho nos EUA, resumidas a 2,43 kg NMVOC por m^3 de etanol produzido. Enquanto Pieragostini, Aguirre e Mussati (2014) tampouco encontraram relações semelhantes às encontradas para o etanol de sorgo brasileiro, já que no estudo argentino a colheita do milho mostrou maior importância do que a etapa de geração de energia. Tanto Muñoz et al. quanto Pieragostini, Aguirre e Mussati consideraram o gás natural como fonte energética do processo de produção de etanol, o que pode indicar que a caldeira movida a cavaco de madeira pode levar o processo a um desempenho pior do ponto de vista de geração de oxidação fotoquímica.

Para a categoria de Acidificação Terrestre, o etanol de sorgo apresenta emissões potenciais de 12 kg SO₂ eq por m³ produzido. As principais substâncias que compõem esta emissão são amônia e NO_x, com 70,8% e 25,8% da emissão total, respectivamente (Tabela 7.13).

Tabela 7.13 - Principais emissões contribuintes para a categoria Acidificação Terrestre para a produção de 1m³ de etanol hidratado de sorgo

Emissões	Acidificação Terrestre	
	kg SO ₂ eq	%
NH ₃	8,5	70,8%
NO _x	3,09	25,8%
Outros	0,410	3,42%
Total	12,0	100%

Conforme mostra o Gráfico 7.2, a etapa agrícola contribui majoritariamente para o desempenho da produção do etanol de sorgo nesta categoria, com cerca de 75% da emissão total. Tal participação se deve, principalmente, à emissão de amônia, causada pela aplicação de ureia como fertilizante. Na sequência, as emissões provenientes da queima de madeira na caldeira e provenientes da etapa de transporte são as maiores contribuintes e ocorrem na forma de NO_x.

Os resultados obtidos por Muñoz et al. (2014) para milho americano são novamente inferiores aos encontrados para acidificação terrestre do etanol de sorgo brasileiro. No entanto, Pieragostini, Aguirre e Mussati (2014) mostram semelhanças entre os resultados obtidos para esta categoria. Também para o etanol de sorgo argentino as emissões causadas pela aplicação de fertilizantes apresentam o maior impacto em AT.

7.3.1.4 Ecotoxicidade Terrestre, Ecotoxicidade de Água Doce, Toxicidade Humana e Eutrofização de Água Doce

Tratando especificamente da categoria de Ecotoxicidade Terrestre, para o etanol de sorgo, 34,7 kg 1,4-DB eq, são potencialmente emitidos para a produção de cada m³ de combustível (Tabela 7.14). Desta emissão, 99,1% corresponde ao composto atrazina, contribuindo quase exclusivamente para o desempenho na categoria. A etapa que contribui majoritariamente para este impacto potencial é a etapa agrícola para a produção do sorgo.

Além disso, as principais substâncias contribuintes provêm de fitossanitários, aplicados para o controle de pragas.

Tabela 7.14 - Principais emissões contribuintes para a categoria Ecotoxicidade Terrestre para a produção de 1m³ de etanol hidratado de sorgo

Emissões	Ecotoxicidade Terrestre	
	kg 1,4DB eq	%
Atrazina	34,4	99,1%
Lambda-cialotrina	0,188	0,5%
Outros	0,112	0,3%
Total	34,7	100%

Os resultados encontrados por Pieragostini, Aguirre e Mussati (2014) se assemelham aos demonstrados na Tabela 7.14 do ponto de vista de contribuições. O etanol de milho argentino apresenta a etapa agrícola como responsável por 99% das emissões potenciais para Ecotoxicidade Terrestre.

A categoria Ecotoxicidade de Água Doce acompanha o perfil da categoria Ecotoxicidade Terrestre e a principal substância contribuinte para ambas as emissões é a mesma. A produção de etanol de sorgo apresenta a emissão potencial de 27,8 kg 1,4-DB eq para o ambiente dulcícola. Tal qual a categoria de Ecotoxicidade Terrestre, esta emissão se deve especialmente à aplicação de atrazina, correspondendo a 98,2% da emissão total para etanol de sorgo (Tabela 7.15).

Tabela 7.15 - Principais emissões contribuintes para a categoria Ecotoxicidade de Água Doce para a produção de 1m³ de etanol hidratado de sorgo

Emissões	Ecotoxicidade de Água Doce	
	kg 1,4DB eq	%
Atrazina	27,3	98,2%
Manganês	0,134	0,5%
Outros	0,366	1,3%
Total	27,8	100,0%

Assim como para a categoria anterior, Pieragostini, Aguirre e Mussati (2014) também encontraram na etapa agrícola o *hotspot* de emissões contribuintes para a ecotoxicidade de água doce na produção de etanol de milho, cuja participação chega a 96% das emissões.

A categoria de Toxicidade Humana foi a que obteve emissões potenciais de maior distribuição entre etapas do processo. Para a produção de 1 m³ de etanol de sorgo, contabilizou-se uma emissão de 41 kg 1,4DB eq (Tabela 7.16). A substância que mais influenciou este resultado foi o manganês, sendo responsável por 55,7% das emissões da categoria, cuja origem está na disposição de cinzas pela queima do cavaco de madeira. Na sequência, a atrazina, o chumbo e o zinco contribuem com pouco mais de 5% cada um e estão relacionados à etapa agrícola, queima de cavaco na caldeira e etapas de transporte. Por fim, as substâncias mercúrio, vanádio e cloro estão relacionadas aos processos de produção de insumos, com destaque para o glifosato, a amônia e a atrazina, respectivamente.

Tabela 7.16 - Principais emissões contribuintes para a categoria Toxicidade Humana para a produção de 1m³ de etanol hidratado de sorgo

Emissões	Toxicidade Humana	
	kg 1,4DB eq	%
Manganês	22,84	55,7%
Atrazina	2,22	5,4%
Chumbo	2,21	5,4%
Zinco	2,15	5,2%
Mercúrio	1,92	4,7%
Vanádio	1,65	4,0%
Cloro	1,21	3,0%
Outros	6,8	16,6%
Total	41	100%

Para a categoria de Eutrofização de Água Doce, o etanol de sorgo apresenta emissão potencial de 0,028 kg P eq. Neste caso, as emissões se dividem entre duas substâncias principais, o fosfato e o fósforo, ambas empatando com cerca de 43% da emissão total de P eq (Tabela 7.17). O processo de produção de etanol de sorgo apresenta a produção de glifosato como principal etapa contribuinte do resultado total desta categoria. A etapa agrícola não se destaca aqui porque, uma vez que não há aporte de fertilizante fosfatado para essa cultura, não aparecem emissões decorrentes de sua produção e não foram contabilizadas emissões de fósforo por erosão.

Tabela 7.17 - Principais emissões contribuintes para a categoria Eutrofização de Água Doce para a produção de 1m³ de etanol hidratado de sorgo

Emissões	Eutrofização de Água Doce	
	kg P eq	%
Fosfato	0,0122	43,6%
Fósforo	0,0121	43,2%
Outros	0,004	13,2%
Total	0,028	100%

O desempenho do etanol de milho norte-americano estudado por Muñoz et al. (2014) não se mostrou tão bom quanto o apresentado pelo etanol de sorgo brasileiro. Este comportamento se deve ao fato de ocorrerem aplicações de fertilizantes fosfatados nos EUA, sendo esta a principal fonte de emissões de P eq para o meio aquático. Tal atividade não é observada no plantio ou condução de sorgo safrinha no MT, considerado neste estudo. Além disso, alguns autores afirmam que as características físicas do solo brasileiros diminuem a mobilidade de fosfatos no solo, dificultando o alcance de tal poluente aos corpos d'água por lixiviação ou *run-off*.

Para esta categoria, Pieragostini, Aguirre e Mussati (2014) não encontraram para o etanol de milho resultados semelhantes aos encontrados para etanol de sorgo brasileiro. Para o estudo argentino, as contribuições para a categoria estão divididas entre aplicação e produção de fertilizantes fosfatados. Por não ter sido observada a aplicação de fertilizante fosfatado no processo de produção de sorgo, a origem das emissões para esta categoria diferiram entre os dois estudos.

7.3.1.5 Ocupação de Terras Agrícolas e Transformação de Área Natural

A ocupação de terra necessária para a produção de 1m³ de etanol de sorgo é 3.050 m².ano. Dentre estes, são ocupados 2.720 m².ano na forma de “*Occupation, arable, irrigated*”, que representam a ocupação da área plantada com sorgo e é responsável por 89,2% na área total na categoria. Em seguida, são ocupados 305 m².ano por “*Occupation, forest, intensive, normal*”, ou 10% do total, que se devem à plantação de madeira para a produção de cavacos utilizados como fonte de energia do processo.

A categoria Transformação de Área Natural é expressa em m² e, em nível *midpoint*, não há diferenciação entre os tipos de uso da terra, sendo contabilizados apenas os usos de

terra natural. Com isso, o resultado se dá pela diferença entre a soma das áreas naturais que precederam a implementação de determinada atividade e a soma das áreas naturais que resultaram da implementação da mesma atividade.

Dessa forma, a produção de 1m³ de etanol de sorgo é responsável por transformar 55,1 m² de área natural. Para o etanol de sorgo, a área total de transformação é extremamente influenciada por um único aspecto: a transformação de área natural, “*Transformation, from forest*”, na etapa de cultivo agrícola do sorgo. É importante ressaltar que estes resultados são diretamente influenciados pelo critério de alocação adotado para a definição da expansão da cultura e, portanto, poderiam ser diferentes caso outros critérios fossem adotados. A análise de sensibilidade para os diferentes critérios de alocação para as áreas de expansão das culturas será apresentada no capítulo 8.

Não foram obtidos dados específicos para as categorias de ocupação de terras agrícolas e transformação de área natural passíveis de comparação com os resultados obtidos por este trabalho. Evitou-se a comparação dos resultados destas categorias de impacto com resultados de estudos de etanol de milho pelo fato de apresentarem características diferentes do ponto de vista de produtividades e períodos de ocupação da terra, intrínsecas às espécies vegetais analisadas.

7.3.2 Desempenho Energético da produção de etanol de sorgo

Tal como nos outros dois estudos, o perfil energético da produção de etanol de sorgo foi obtido pela aplicação do método de avaliação de impacto Demanda Cumulativa de Energia (CED), cujos resultados são expressos na forma de energia primária consumida. O desempenho energético da produção de 1 m³ de etanol hidratado de sorgo, produzido em Usina Autônoma Integrada no estado do MT, está apresentado na Tabela 7.18. Em seguida, serão apresentados os desempenhos por categoria de impacto do método e, também, o balanço energético de cada combustível, calculado pela razão entre a energia disponível renovável e a energia consumida não renovável.

O método de avaliação de impacto CED conta com oito categorias de impacto que classificam os consumos de energia primária do processo entre fontes de energia não renováveis e renováveis e suas subclassificações. Por se tratarem de categorias expressas em uma mesma unidade, é possível obter um indicador único que represente o consumo total de energia pela simples soma dos resultados das categorias. A produção de 1 m³ de etanol

hidratado de sorgo consumiu 26,9 GJ de energia. Na sequência serão descritos os resultados e contribuições de cada categoria analisada.

Tabela 7.18 - Perfil energético da produção de 1m³ de etanol hidratado de sorgo em Usina Autônoma Integrada no estado do MT, Brasil

Subcategoria de impacto	Unidade	/1m ³ de etanol hidratado de sorgo
Não renovável, fóssil		6.880
Não renovável, nuclear	MJ	112
Não renovável, biomassa primária		0,0577
Renovável, biomassa secundária		19.800
Renovável, alternativas (eólica, solar, geotérmica)	MJ	2,7
Renovável, hídrica		143
Pontuação única	MJ	26.938

7.3.2.1 Fontes de energia não renováveis: fóssil, nuclear e biomassa de origem primária

Considerando as fontes não renováveis de energia, a produção de 1 m³ de etanol de sorgo consome 6.880 MJ na forma de energia fóssil, 112 MJ na forma de energia nuclear e 0,06 MJ na forma de biomassa com origem em floresta primária. Os consumos de energia fóssil se destacam expressivamente na categoria de fontes não renováveis, carregando mais de 98% do consumo desta origem e mais de 25% do consumo energético total. Como citado anteriormente, o fato de a energia nuclear apresentar pouca participação da matriz energética nacional corrobora a sua baixa expressividade no estudo. Os 112 MJ consumidos na forma de energia nuclear representam menos de 0,5% do consumo energético total do processo. A energia por biomassa primária, por sua vez, apresenta representatividade ainda menor na categoria.

Conforme o Gráfico 7.3, na subcategoria de energia *Não Renovável, fóssil*, dos 6.880 MJ consumidos, 5.520 MJ se devem ao consumo de petróleo (80,2%). Na sequência, 1.260 MJ são consumidos na forma de gás natural (18,3%). O petróleo é utilizado especialmente nas etapas de produção de diesel para transporte e para consumo nas atividades mecanizadas da etapa agrícola. O gás natural é consumido nas cadeias de produção de ureia, produção de glifosato e produção de diesel utilizado tanto para transporte como para atividades agrícolas mecanizadas.

Gráfico 7.3 - Participação das fontes energéticas de origem fóssil na categoria "Não-renovável, fóssil" para a produção de etanol hidratado de sorgo

7.3.2.2 Fontes de energia renováveis: biomassa, alternativas e hídrica

São consideradas como subcategorias de fontes de energia renováveis do método CED a biomassa produzida pelo cultivo de florestas secundárias, energia eólica, solar e geotérmica que, neste método, são agrupadas e somadas em uma mesma categoria denominada 'energias alternativas'; e energia hídrica, gerada nas usinas hidrelétricas.

A Tabela 7.18 mostra que a categoria de energia renovável é muito mais expressiva em termos de consumos energéticos do que a não renovável, sendo consumidos 19,8 GJ na forma biomassa secundária, 2,7 MJ por fontes alternativas e 143 MJ por energia hídrica. A subcategoria biomassa renovável se mostrou a mais relevante, representando 73,5% do consumo energético total do processo. O consumo de biomassa renovável está associado ao consumo de cavacos de madeira para cogerar energia térmica e elétrica que alimentam a etapa industrial de produção de etanol. Estando todo o processo industrial fundamentado nesta fonte de energia, é natural que esta categoria ganhe destaque no desempenho energético.

A segunda categoria, dentre as fontes renováveis, listada na Tabela 7.18 é a de fontes alternativas e reúne as fontes primárias de energia na forma de energia eólica, solar e geotermal. O etanol de sorgo consome 2,7 MJ por m³ de combustível, dentre os quais 2,67 MJ são consumidos como energia eólica, que está presente na matriz elétrica nacional. A fonte energética solar apresenta uma contribuição bastante pequena nesta subcategoria e geotermal não apresenta contribuições.

A última subcategoria dentre as renováveis é a energia de fonte hídrica, que pode representar a energia elétrica produzida em usinas hidrelétricas. Apesar de esta fonte ser bastante representativa na matriz elétrica brasileira, como indicado anteriormente, os consumos energéticos desta origem se resumem a menos de 1% do consumo global do processo. Isso se deve ao fato de a usina possuir um sistema de cogeração e, com isso, se tornar autossuficiente do ponto de vista de geração elétrica. Os consumos de energia hídrica se resumem aos vinculados aos processos de produção de insumos.

7.3.2.3 Índice de Retorno Energético sobre o Investimento (EROI)

O balanço energético foi calculado pela estimativa do EROI seguindo a terminologia descrita por Hammerschlag (2006), conforme indicado no capítulo de Revisão Bibliográfica. Assim como definido para os estudos do etanol de cana e do milho, o valor usado como $E_{\text{disponível}}$ foi o poder calorífico inferior do etanol hidratado, definido pela ANP (2013) como 6.300 kcal/kg ou 21,35 GJ/m³.

O valor usado como $E_{\text{consumida, não renovável}}$ foi obtido do resultado da subcategoria “Fontes de energia não renováveis, fóssil” do método CED, já que as outras fontes não renováveis se mostraram pouco representativas para o estudo e esse pressuposto foi observado em trabalhos de diferentes autores. O resultado do Índice de Retorno Energético sobre o Investimento está na Tabela 7.19.

Tabela 7.19 - Valores de energias disponível e consumida, não-renovável por 1m³ de etanol hidratado de sorgo, em GJ, e Índice de Retorno Energético sobre o Investimento (EROI)

$E_{\text{disponível}}$	$E_{\text{consumida, não renovável}}$	EROI (rE)
GJ		
21,35	6,88	3,10

Cai et al. (2013) conduziram estudo para avaliar o desempenho energético do etanol de sorgo de diferentes variedades. Os diversos cenários tratados combinaram as variedades do sorgo com seus sistemas de produção mais comuns e diferentes fontes energéticas para suprir a demanda da produção. Para o sorgo granífero, foram considerados a produção de fertilizantes, da matéria-prima agrícola e seu transporte, a produção de enzimas e fermentos, a produção industrial de etanol pelo processo *dry milling*, o transporte e distribuição do etanol e sua etapa de uso. Em relação ao suprimento energético da etapa industrial, foram avaliados

dois cenários. O primeiro cenário considerou a utilização de gás natural fóssil como fonte de energia para a geração de calor e eletricidade da rede. O segundo utilizou gás natural renovável, obtido a partir da digestão anaeróbica de dejetos de animais, para alimentar um sistema de cogeração e, assim, produzir calor e eletricidade. Nos dois casos, foi considerada a produção de WDGS (*“wet distillers grains with solubles”* ou grãos úmidos de destilaria com solúveis) e foi utilizado o método de expansão de fronteira para tratar dos coprodutos. Além disso, as fronteiras do sistema incluíram a etapa de transporte e distribuição do etanol para o consumidor final.

Os valores de EROI encontrados por Cai et al. (2013) (considerando o PCI do etanol como quantidade de energia disponibilizada pelo biocombustível) foram 2,0 para o etanol de sorgo com uso de gás natural fóssil e 4,9 para o etanol de sorgo com uso de gás natural renovável. Os autores não apresentaram dados suficientemente detalhados que permitissem desconsiderar a etapa de transporte e distribuição do etanol. Utilizando fonte energética fóssil ou renovável, os dois tipos de etanol de sorgo americano estudados por Cai et al. (2013) demonstraram o consumo menor de energia fóssil do que aquele disponibilizado pelo combustível renovável, tornando-os combustíveis viáveis do ponto de vista energético. Apesar disso, o desempenho do etanol quando baseado energeticamente em gás natural renovável mais do que dobra em relação ao gás de fonte fóssil.

Wang et al. (2008) também realizaram estudo sobre etanol de sorgo nos EUA, mas com foco na comparação de genótipos e híbridos em relação aos desempenhos técnicos de bioconversão da matéria-prima em combustível. Como complemento, os autores realizaram um estudo de avaliação energética do ciclo de vida do biocombustível de sorgo a fim de se verificar sua viabilidade energética. Para tanto, os autores consideraram as etapas de produção agrícola do sorgo, a colheita, secagem e transporte dos grãos, o processamento industrial para produção de etanol e o coproduto DDGS e a etapa de transporte até o consumidor final.

Dos resultados apresentados pelos autores é possível realizar o cálculo de r_E segundo a metodologia utilizada neste trabalho. Neste caso, ao considerar o conteúdo energético do coproduto DDGS somado ao PCS do etanol e considerar o consumo energético da etapa de distribuição do combustível, conforme os resultados descritos por Wang et al., o r_E resultaria em 1,38. No entanto, seguindo o padrão estabelecido para a comparação de resultados, com a adaptação dos resultados às condições de exclusão do coproduto, exclusão da etapa de distribuição do produto final e adoção do PCI como energia disponibilizada pelo etanol, o r_E se apresenta em valor menor, de 1,15.

O Gráfico 7.4 compara os valores de balanço energético obtido para a Usina Autônoma Integrada no MT com os encontrados pela literatura analisada, após adequação à metodologia.

Gráfico 7.4 - Comparação entre os EROIs encontrados na literatura para o etanol de sorgo

O EROI encontrado para o etanol de sorgo produzido no Mato Grosso foi o segundo maior entre os levantados em literatura encontrada no tema. O maior EROI encontrado foi o do combustível estudado por Cai et al. (2013), produzido a partir do consumo de fontes energéticas renováveis, assim como o processo de produção de etanol brasileiro. A impossibilidade de se reanalisar os resultados de Cai et al. (2013) desconsiderando as contribuições dos coprodutos no desempenho do etanol prejudica a comparação de desempenhos e pode explicar uma eventual vantagem para este combustível. No entanto, outra justificativa plausível para o melhor desempenho deste combustível é o melhor desempenho do combustível renovável, uma vez que o gás natural renovável considerado é produzido a partir de rejeitos animais e, dependendo da abordagem metodológica considerada, pode não ter consumos energéticos atribuídos, ou os consumos podem ser menores do que os exigidos para a produção de cavacos de madeira, que também se trata de uma produção agrícola.

Os dois piores desempenhos do ponto de vista de EROI, novamente estão relacionados aos produtos que utilizam combustíveis fósseis como base da sua produção. Isso indica que a substituição de fontes fósseis por fontes renováveis tendem a melhorar o retorno energético dos combustíveis renováveis.

8 ANÁLISE DE SENSIBILIDADE

Segundo a norma ABNT NBR ISO 14044 (ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS, 2009b), a análise de sensibilidade é um dos itens da etapa de Interpretação do Ciclo de Vida e tem como objetivo “[...] determinar a influência de variações nos pressupostos, métodos e dados sobre os resultados.” Para isso, utiliza-se como procedimento a comparação dos resultados obtidos ao considerar diferentes pressupostos, métodos ou dados. É verificada, principalmente, a sensibilidade dos aspectos mais significativos identificados no estudo.

A produção agrícola de milho e de sorgo no estado do Mato Grosso foram consideradas em sistema de plantio direto com rotação de culturas. Tal tecnologia determina que duas culturas diferentes ocupem um mesmo espaço em períodos diferentes ao longo no ano e compartilhem recursos comuns. Seguindo a indicação da norma, foram realizadas análises de sensibilidade a fim de se testar a influência dos fatores de alocação escolhidos entre os recursos compartilhados entre as culturas de primeira e segunda safra, que foram: uso da terra, mudança de uso da terra e suas emissões e aplicação de calcário como corretivo no solo.

Os critérios de alocação testados entre as duas culturas rotacionadas foram econômico, mássico ou por paridade. Nas Tabelas 8.1 e 8.2, estão apresentados os fatores de alocação a serem testados na análise para o sistema soja-milho e soja-sorgo, respectivamente. Para o estabelecimento dos fatores econômicos foram utilizados os parâmetros descritos na Tabela 6.1 para milho e 7.1 para sorgo. Para os fatores mássicos foram consideradas as produtividades das culturas de soja (2,99 t/ha), de milho (7,54 t/ha) e de sorgo (3,83 t/ha). Para os fatores de paridade considerou-se 50% para cada cultura. Nos casos relacionados à mudança de uso da terra e suas emissões, as emissões foram corrigidas para o valor correspondente apenas à área de soja que apresentou rotação com o milho ou o sorgo e, então, foram aplicados os fatores de alocação, conforme demonstrado nas Tabelas 6.2 e 7.2. A análise de sensibilidade verificou a influência da variação dos critérios de alocação nos resultados indicados para as categorias de impacto.

Tabela 8.1 - Critérios de Alocação adotados para análise de sensibilidade para ocupação do solo entre soja e milho safrinha

Critérios de Alocação	Fatores de Alocação	
	milho	soja
Econômico	36,5%	63,4%
Mássico	71,6%	28,4%
Paridade	50,0%	50,0%

Tabela 8.2 - Critérios de Alocação adotados para análise de sensibilidade para ocupação do solo entre soja e sorgo safrinha

Critérios de Alocação	Fatores de Alocação	
	sorgo	soja
Econômico	23,0%	77,0%
Mássico	56,2%	43,8%
Paridade	50,0%	50,0%

8.1 Alocação entre Uso da Terra

Na condução deste estudo, o critério econômico foi considerado como critério base de alocação para o recurso uso do solo. Em relação à variação dos critérios de alocação para o fluxo elementar “ocupação de terra arável, irrigada” para o ICV de milho, a única categoria de impacto que mostrou sensibilidade foi Ocupação de Terras Agrícolas. Os resultados para cada critério de alocação estão mostrados na Tabela 8.3, assim como os desvios entre os resultados. Ao adotar o critério mássico, o resultado para Ocupação de Terras Agrícolas foi 21,7% maior do que o encontrado segundo o critério econômico. Neste caso, a produtividade do milho é quase o dobro da produtividade da soja e, portanto, o milho carrega mais impactos do que a soja para este aspecto. Ao considerar o critério de paridade, os resultados variaram apenas 8,59% em relação ao critério econômico, sendo que o desempenho do milho também piorou com a escolha desse critério.

Tabela 8.3 - Verificação de sensibilidade com relação aos critérios de alocação do uso do solo para os resultados da categoria Ocupação de Terras Agrícolas para o ICV de produção de milho

Ocupação de Terras Agrícolas	Critérios de Alocação		
	Econômico	Mássico	Paridade
Resultado da categoria, m ² .a/m ³ etanol	1.980	2.410	2.150
Desvio em função do critério econômico		+ 430	+ 170
Desvio, %		+ 21,7%	+ 8,59%

Para o ICV de sorgo, os resultados da análise de sensibilidade para os critérios de alocação do recurso uso do solo estão na Tabela 8.4. Os resultados variaram entre 21,6 % e 26,6% de acréscimo para ocupação de áreas agrícolas. A variação entre os resultados obtidos pela aplicação do critério mássico e por paridade foi pequena, pois a cultura de soja e de sorgo apresentam produtividades semelhantes, com fatores de alocação próximos aos fatores por paridade. A diferença de mais de 20% entre os critérios de alocação se devem aos fatores econômicos de soja e sorgo apresentarem uma diferença grande, já que a cultura de sorgo apresenta pouco retorno econômico.

Tabela 8.4 - Verificação de sensibilidade com relação aos critérios de alocação do uso do solo para os resultados da categoria Ocupação de Terras Agrícolas para o ICV de produção de sorgo

Ocupação de Terras Agrícolas	Critérios de Alocação		
	Econômico	Mássico	Paridade
Resultado de AICV, m ² .a/m ³ etanol	3.050	3.860	3.710
Desvio em função do critério econômico		+ 810	+ 660
Desvio, %		+ 26,6%	+ 21,6%

Em termos de comparações de desempenhos entre os processos, a análise de sensibilidade indica que, apesar de o processo do etanol de milho e do sorgo apresentarem variações de desempenho quando são considerados outros critérios de alocação, nenhum dos produtos ganha em desempenho em relação aos outros. Para qualquer critério, o etanol de cana-de-açúcar continua apresentando o melhor desempenho para a categoria Ocupação de Terras Agrícolas, seguido pelo etanol de milho e, com o pior desempenho, pelo etanol de sorgo.

8.2 Alocação entre Mudança do Uso da Terra

Também pelo fato de as culturas de milho e sorgo sofrerem rotação com a cultura de soja, os recursos relacionados à expansão de área plantada e, conseqüentemente, à mudança de uso do solo foram alocadas entre a cultura principal e a cultura de inverno, ou safrinha. Também foram alocadas as emissões de CO₂ por MUT. Como critério base, foi selecionado o critério por paridade com a correção para a área efetivamente ocupada pelos sistemas de rotação analisados no estado. As categorias de impacto que se mostraram sensíveis à variação

dos critérios de alocação foram Mudanças Climáticas e Transformação de Terra Natural. As Tabelas 8.5 e 8.6 apresentam as variações nos resultados das categorias de impacto Mudanças Climáticas e Transformação de Área Natural em função dos critérios de alocação para a produção de milho.

Para a análise do etanol de milho, a variação do critério de alocação influenciaram os resultados tanto da categoria de Mudanças Climáticas, quanto da categoria de Transformação de Terra Natural. Para ambas as categorias, o critério mássico acarretou maior penalização no desempenho do processo de produção de etanol de milho. Ao considerar o critério mássico, a participação da produção de milho nos impactos gerados é maior, pois o milho apresenta maior produtividade que a soja. Para o critério econômico, o desempenho da produção de etanol de milho apresenta melhorias para as categoria Mudanças Climáticas e Transformação de Terra Natural, já que a soja receberá a maior participação nos impactos pois é a cultura principal e é um produto mais valorizado comercialmente no mercado.

Tabela 8.5 - Verificação de sensibilidade com relação aos critérios de alocação da mudança no uso do solo para os resultados da categoria Mudanças Climáticas para o ICV de produção de milho

Mudanças Climáticas	Critérios de Alocação		
	Paridade	Econômico	Mássico
Resultado de AICV, kg CO ₂ eq/m ³ etanol	1.650	1.450	1.960
Desvio em função do critério de paridade		- 200	+ 310
Desvio, %		- 12,1%	+ 18,8%

Tabela 8.6 - Verificação de sensibilidade com relação aos critérios de alocação da mudança no uso do solo para os resultados da categoria Transformação de Área Natural para o ICV de produção de milho

Transformação de Terra Natural	Critérios de Alocação		
	Paridade	Econômico	Mássico
Resultado de AICV, m ² /m ³ etanol	562	409	805
Desvio em função do critério de paridade		- 153	+ 243
Desvio, %		- 27,2%	+ 43,2%

Para o processo de produção de etanol de sorgo, os resultados para as categorias Mudanças Climáticas e Transformação de Terra Natural também variaram em função dos critérios de alocação (Tabelas 8.7 e 8.8). Para a categoria Mudanças Climáticas, a escolha pelo critério de alocação econômico acarretou em uma redução das emissões em 4%. O critério mássico aumentou as emissões do etanol de sorgo, com aumento de apenas 1%, já que

as produtividades da soja e do sorgo são parecidas e, portanto, os resultados se assemelham àqueles apresentados para o critério de paridade.

Para a categoria Transformação de Terra Natural, a variação dos critérios de alocação resultaram em variações mais significativas nas emissões para o etanol de sorgo, com redução de 54% quando o critério econômico é utilizado e aumento de 12% quando é o critério mássico o selecionado.

Tabela 8.7 -Verificação de sensibilidade com relação aos critérios de alocação da mudança no uso do solo para os resultados da categoria Mudanças Climáticas para o ICV de produção de sorgo

Mudanças Climáticas	Critérios de Alocação		
	Paridade	Econômico	Mássico
Resultado de AICV, kg CO ₂ eq/m ³ etanol	877	840	866
Desvio em função do critério econômico		- 37	+ 9
Desvio, %		- 4%	+ 1%

Tabela 8.8 -Verificação de sensibilidade com relação aos critérios de alocação da mudança no uso do solo para os resultados da categoria Transformação de Área Natural para o ICV de produção de sorgo

Transformação de Terra Natural	Critérios de Alocação		
	Paridade	Econômico	Mássico
Resultado de AICV, m ² /m ³ etanol	55,1	25,4	61,9
Desvio em função do critério econômico		- 30	+ 7
Desvio, %		- 54%	+ 12%

Em se tratando de comparações entre os produtos analisados, para as categorias Mudanças Climáticas e Transformação de Terra Natural, qualquer das alternativas de critérios de alocação não alterariam as posições de desempenhos dos produtos analisados. Ao considerar o critério econômico ou o critério mássico para alocação, o etanol de cana-de-açúcar continuaria apresentando o melhor desempenho, o etanol de sorgo apresentaria a segunda posição, continuando o etanol de milho com o pior desempenho.

8.3 Alocação entre aplicação de Calcário

Por fim, como último recurso compartilhado entre as duas culturas de um sistema de rotação, testou-se a influência dos fatores de alocação para aplicação de calcário entre a soja e

a cultura em safrinha. O critério base escolhido foi o de paridade, considerando que ambas as culturas beneficiam-se igualmente do recurso. Testou-se, então, os efeitos causados pela substituição do critério de paridade pelos critérios econômico e mássico.

Para o etanol de milho, a análise de sensibilidade demonstrou que a utilização do fator de alocação econômico não alterou os resultados para nenhuma das categorias de impacto. Quando o fator de alocação mássico foi testado a única categoria de impacto que se mostrou timidamente sensível à análise foi a Formação de Material Particulado, porém com uma variação de apenas 0,25%, que pode ser considerada irrisória.

Da mesma forma, a análise de sensibilidade para a alocação do uso de calcário para o etanol de sorgo demonstrou pouca variação em função dos critérios variados. Dessa vez, mostraram-se sensíveis três categorias de impacto: a Formação de Material Particulado, porém com variação apenas para o critério econômico, com acréscimos de 0,38% nas emissões; Mudanças Climáticas, com redução em 0,11% das emissões de CO₂ eq quando utilizado o critério econômico, e aumento de 0,11% das emissões quando utilizado o critério mássico; e Toxicidade Humana com decréscimo de 0,24% das emissões para o critério econômico e nenhuma variação quando o critério mássico é utilizado.

Sendo todas as variações, quando ocorrem, menores do que 0,5%, pode-se concluir que o fator de alocação para a aplicação de calcário entre as culturas rotacionadas não interfere no desempenho final dos produtos avaliados.

9 AVALIAÇÃO COMPARATIVA EM TERMOS AMBIENTAIS E ENERGÉTICOS DA PRODUÇÃO DE ETANOL

9.1 Comparação dos desempenhos ambientais de etanol de cana-de-açúcar, milho e sorgo

Seguindo o cumprimento dos objetivos deste trabalho, após a avaliação do desempenho ambiental e energético da produção de etanol hidratado com cada uma das matérias-primas analisadas, neste capítulo é apresentada uma comparação entre os produtos analisados. Busca-se confrontar os sistemas de produção de cada produto a fim de estabelecer relações de causa e consequência e compreender as melhores aplicações ou possíveis melhorias para cada um dos processos de produção dos biocombustíveis estudados. A comparação será discutida para cada uma das categorias de impacto analisadas.

Na Tabela 9.1 estão apresentados os perfis ambientais dos produtos comparados com os resultados absolutos obtidos da etapa de caracterização da AICV. No Gráfico 9.1 está apresentada a comparação dos desempenhos ambientais da produção de 1 m³ de etanol hidratado a partir de cana-de-açúcar, milho e sorgo.

Tabela 9.1 - Perfis ambientais das produções de 1 m³ de etanol hidratado de cana-de-açúcar, milho e sorgo, obtidos pela aplicação do método de AICV ReCiPe Midpoint (H) V1.10 World Recipe H

Categoria de impacto	Unidade	Produção de 1m ³ de etanol de		
		cana-de-açúcar	milho	sorgo
Mudanças Climáticas	kg CO ₂ eq	456	1.650	877
Depleção de Água	m ³	23,9	16,6	15,0
Formação de material Particulado	kg PM ₁₀ eq	41	3,96	2,65
Formação de Oxidação Fotoquímica	kg NMVOC	19,7	12,2	12,3
Acidificação Terrestre	kg SO ₂ eq	10,2	21,4	12,0
Ecotoxicidade Terrestre	kg 1,4-DB eq	1,01	21,1	34,7
Ecotoxicidade de Água Doce	kg 1,4-DB eq	0,694	17,2	27,8
Eutrofização de Água Doce	kg P eq	0,759	0,124	0,028
Toxicidade Humana	kg 1,4-DB eq	35	133	41,0
Ocupação de Terras Agrícolas	m ² .a	1.436	1.980	3.050
Transformação de Terra Natural	m ²	1,71E-03	562	55,1

Gráfico 9.1 - Comparação dos desempenhos ambientais das produções de 1 m³ de etanol hidratado de cana-de-açúcar, milho e sorgo, segundo os resultados obtidos pelo método de AICV ReCiPe Midpoint (H) V1.10 World Recipe H

9.1.1 Mudanças Climáticas

Para a categoria Mudanças Climáticas, o processo de produção do etanol de cana-de-açúcar apresentou o melhor desempenho (456 kg CO₂ eq), seguido pelo etanol de sorgo (877 kg CO₂ eq), ficando o etanol de milho com o pior desempenho, com quase o dobro de emissões potenciais (1.650 kg CO₂ eq) (Gráfico 9.2).

Gráfico 9.2 - Comparação entre os desempenhos das produções de etanol de cana-de-açúcar, milho e sorgo para a categoria Mudanças Climáticas

As emissões que mais influenciaram o mau desempenho do milho para a categoria foram as provenientes da mudança de uso da terra. Quase metade das emissões se deve à expansão da área ocupada pelo sistema soja e milho, que, no caso do estado do Mato Grosso, ocorreu sobre área de cerrado nos últimos 20 anos. A supressão de mata nativa para o plantio de culturas anuais carrega expressivas emissões de GEE por desmobilizar uma grande quantidade de carbono que estava fixado no solo e na vegetação para a atmosfera. As emissões se intensificam quando se trata de paisagens com árvores de grande porte, como é o caso de grande parte dos biomas brasileiros, incluindo o cerrado encontrado no Mato Grosso.

A produção de etanol de sorgo apresenta emissões menos expressivas para MUT porque, apesar de também ser rotacionada com a cultura de soja, ainda é uma cultura de menor importância no estado se comparado ao milho e, consequentemente, apresenta menores áreas plantadas e menor expansão. Dessa forma, a maneira mais eficiente de reduzir essas emissões está na redução da supressão de mata nativa em função do aumento de áreas plantadas, tema diretamente relacionado à categoria Transformação de Área Natural, discutida adiante.

A produção de etanol de cana-de-açúcar não apresentou expansão de área plantada sobre mata nativa no estado e as emissões por MUT foram pormenorizadas. Ainda assim, uma pequena emissão de GEE é contabilizada por MUT devido à expansão da cultura da cana

sobre culturas anuais que, segundo as diretrizes da Comissão Europeia (2010), apresentam maiores teores de carbono orgânico no solo do que a cultura da cana-de-açúcar.

No entanto, por não existir uma metodologia consolidada para o estabelecimento de mudanças no uso da terra e os resultados dessa emissão variarem muito de estudo para estudo, muitos autores ainda deixam de considerá-la em estudos de ACV. O desenvolvimento de metodologias consensuais para a definição das MUT tornarão os resultados mais facilmente comparáveis.

As emissões de CO₂ fóssil também aparecem como uma das principais emissões para os processos e estão associadas às etapas de transporte. Para esta emissão, o etanol de cana-de-açúcar apresenta o melhor desempenho. Isso ocorre porque a cana-de-açúcar é mais perecível e deve ser plantada à menor distância possível da usina de etanol. Com isso, tanto os transportes da matéria-prima do campo para a usina, quanto os dos coprodutos industriais aplicados no campo, percorrem distâncias menores do que os mesmos processos para o etanol de milho e sorgo.

Por fim, o etanol de cana-de-açúcar apresentou a emissão de CH₄ biogênico em quantidades muito superiores aos outros biocombustíveis. Essa emissão se deve principalmente à queimada da palhada da cana que ocorre antes da colheita manual. Neste estudo, 75% da área de cana colhida ainda receberam esse tratamento pré-corte, sendo os outros 25% da área colhidos por colheitadeiras, sem queima prévia. No entanto, a mecanização da colheita da cana cresce a cada ano no estado do Mato Grosso, impulsionada pela Lei Estadual Nº 8.817, de 15 de janeiro de 2008 (ESTADO DE MATO GROSSO, 2008), que determina o fim da queima de cana em áreas mecanizáveis até o ano 2024. Na safra 2011/12, a área colhida mecanicamente chegava a 75,1% da área colhida total no estado (COMPANHIA NACIONAL DE ABASTECIMENTO, 2013a). Cabe lembrar que a mecanização não impede necessariamente a queima prévia da palhada da cana, alguns produtores associam a queimada à colheita mecanizada a fim de aumentar a eficiência da operação.

Também é importante ressaltar que neste estudo foram utilizados dados secundários para a produção de cavacos de madeira utilizados como combustível. Essas informações podem variar em função da localização geográfica e podem influenciar aspectos importantes de consumos e emissões. A substituição por um inventário de produção de cavacos de madeira específico para o Brasil, ou ainda para a região do Mato Grosso, deve trazer maior completeza ao estudo.

9.1.2 Depleção de Água

Os resultados para a categoria de Depleção de Água indicam a produção de etanol de cana-de-açúcar como o processo que mais consome água (23,9 m³), seguido pela produção de etanol de milho (16,6 m³) e de sorgo (15 m³). Para os três produtos analisados, o maior consumo de água se dá na forma de água de poço, que participa com 98%, 87% e 97% da água consumida, respectivamente (Gráfico 9.3).

Gráfico 9.3 - Comparação entre os desempenhos das produções de etanol de cana-de-açúcar, milho e sorgo para a categoria Depleção de Água

Os processos de produção de etanol de fonte sacarina e fonte amilácea diferem em diversas etapas que poderiam influenciar o consumo de água. A começar pelas etapas iniciais de extração dos açúcares fermentescíveis: o processo de obtenção de etanol de cana-de-açúcar consome água para lavagem e para embebição dos colmos na moagem. A água utilizada na lavagem sofre reciclo, ou seja, recebe tratamento de higienização e retorna ao início da lavagem para realizar a mesma função e, dessa forma, não apresenta expressividade quanto ao consumo de água. Já a embebição da cana no processo de moagem otimiza a extração de açúcares e incorpora água ao produto, no caso o caldo a ser fermentado. Apesar de parte dessa água ser recuperada posteriormente, na concentração do caldo, esta etapa se destaca em relação ao consumo total de água. No entanto, o milho e o sorgo também apresentam

consumo semelhante na embebição da farinha, cuja função também é otimizar a extração dos açúcares.

A etapa que define o etanol de cana como maior consumidor de água está relacionada ao ciclo de fermento, que não ocorre no processo de etanol amiláceo. Para a reutilização do fermento, o vinho fermentado passa por centrifugação, onde é separada a levedura concentrada. Na sequência, é adicionada água limpa para a diluição e reutilização do fermento.

Para a produção de etanol de amido, o fermento é propagado antes da fermentação e não existe recuperação de leveduras após a fermentação. A propagação do fermento ocasiona um aumento do tempo necessário para a produção de etanol, mas, por outro lado, diminui o consumo de água no processo. Ao fim da fermentação, as células de levedura seguem com o vinho para a destilação e compõem a vinhaça que será tratada para a retirada dos sólidos (a maior parte tendo origem no fermento), conforme a tecnologia mais comum para plantas *dry milling*. Neste estudo, considerou-se que a água da vinhaça é aplicada nas culturas de milho e sorgo como fertirrigação. No entanto, dependendo do tipo de tratamento utilizado para a separação dos sólidos e resíduos orgânicos, a fração líquida da vinhaça pode ser reutilizada no próprio processo industrial, reduzindo o consumo de água para embebição da farinha, por exemplo (AHMETOVIC; MATÍN; GROSSMANN, 2010). Otimizações deste tipo permitiriam um consumo de água ainda menor para a produção de etanol de milho e de sorgo.

9.1.3 Formação de Material Particulado, Formação de Oxidação Fotoquímica e Acidificação Terrestre

Para a categoria de Formação de Material Particulado o etanol de cana-de-açúcar apresenta os piores resultados entre as alternativas estudadas. Os outros dois produtos apresentam performances muito superiores às do primeiro (Gráfico 9.4). Enquanto o etanol de cana emite potencialmente 41 kg PM₁₀ eq, o etanol de milho e de sorgo emitem 3,96 e 2,65 kg PM₁₀ eq, respectivamente.

Gráfico 9.4 - Comparação entre os desempenhos das produções de etanol de cana-de-açúcar, milho e sorgo para a categoria Formação de Material Particulado

Na obtenção do etanol de milho, a etapa agrícola é quem recebe o maior destaque para a formação de material particulado, causados, principalmente, pelas emissões de amônia. A queima de cavaco de madeira para a alimentação da caldeira é responsável pela maior parte das emissões de óxidos de nitrogênio e material particulado $<2,5\mu\text{m}$, porém em quantidade bastante inferior às emissões causadas pela queima do bagaço de cana.

O processo de etanol de sorgo acompanha o comportamento do etanol de milho para esta categoria. Seu melhor desempenho em relação à outra matéria-prima amilácea se deve a menores emissões de amônia pelo uso de fertilizante nitrogenado que, neste caso, é aplicado em quantidade menor do que a usada no cultivo do milho.

No processo de obtenção de etanol de cana, as etapas que se destacam por suas emissões são a queima de bagaço na caldeira e a queima de palha na etapa de colheita manual da cana-de-açúcar. Por ser este o único processo que conta com queima de biomassa no campo, o desempenho pior para esta categoria não surpreende. No entanto, a expressividade da contribuição da etapa de queima de combustível na caldeira pode indicar que o cavaco de madeira é uma opção melhor que o bagaço de cana ao se considerar suas emissões. Muito embora tal comportamento não deva se repetir em outras categorias, por exemplo, as que considerem consumo de recursos fósseis, já que a produção de cavaco de madeira exige uma etapa de produção agrícola de árvores.

Na categoria Formação de Oxidação Fotoquímica, a produção de etanol de cana-de-açúcar também apresenta o pior desempenho, com emissões totais de 19,7 kg NMVOC. As

produções de etanol de milho e sorgo quase empatam com emissões de 12,2 e 12,3 kg NMVOC, respectivamente (Gráfico 9.5). Tal como a categoria de Formação de Material Particulado, esta categoria está intimamente ligada às atividades de combustão e suas consequentes emissões.

Gráfico 9.5 - Comparação entre os desempenhos das produções de etanol de cana-de-açúcar, milho e sorgo para a categoria Formação de Oxidação Fotoquímica

As emissões geradas na queima de biomassa para geração de calor na caldeira são semelhantes para os três produtos, e independe de o combustível ser bagaço ou madeira. No entanto, as emissões causadas pela queima da palhada da cana no campo, definem o pior resultado do etanol de cana. Essa combustão gera emissões consideráveis de CO e NO_x que não são contabilizadas nos processos de produção de etanol de milho e sorgo.

Para as duas categorias, o desempenho do etanol de cana tende a apresentar melhores desempenhos nos próximos anos, conforme os produtores progridam nas adequações de seus sistemas de colheita a fim se adequar à Lei Estadual Nº 8.817, de 15 de janeiro de 2008 (ESTADO DE MATO GROSSO, 2008). A Lei determina o fim da queima de cana em áreas mecanizáveis até o ano 2024, devendo ser reduzida a uma taxa mínima de 6% ao ano.

Por fim, para a categoria de Acidificação Terrestre, o etanol de cana mostrou melhor desempenho, seguido pelo etanol de sorgo e, por último, o etanol de milho (Gráfico 9.6). Duas substâncias principais contribuíram para o desempenho dos três produtos para essa categoria, a emissões de amônia e de óxidos de nitrogênio.

Gráfico 9.6 - Comparação entre os desempenhos das produções de etanol de cana-de-açúcar, milho e sorgo para a categoria Acidificação Terrestre

Os óxidos de nitrogênio são emitidos principalmente na etapa de combustão da biomassa na caldeira. Nesta etapa, a queima de bagaço apresenta emissões ligeiramente maiores do que as da queima do cavaco. No entanto, pode-se considerar um empate técnico entre as emissões da caldeira.

A substância que realmente define os desempenhos dos processos para a categoria Acidificação Terrestre é a amônia. A amônia é contabilizada na etapa agrícola e se deve à atividade de adubação. A produção de milho é a que recebe maior aporte de fertilizantes nitrogenados, com cerca de 36 kg de ureia/m³ de etanol. Teoricamente, o sistema de plantio direto com rotação de culturas apresenta como uma de suas vantagens a redução da necessidade de aplicação de fertilizantes, justamente por alternar culturas com necessidades nutricionais diferentes e, geralmente, incluir uma espécie com fixação biológica de nitrogênio, aumentando a oferta deste macronutriente no solo. No entanto, na prática, apesar do uso de rotação de culturas, muitos produtores não reduzem as aplicações de fertilizante mineral buscando garantir os índices de produtividade.

O etanol de sorgo, por sua vez, demonstra melhor resultado para a categoria devido ao baixo aporte de fertilizantes na etapa agrícola, recebendo cerca de 14 kg de ureia/m³ de etanol. Porém, o baixo aporte de fertilizantes do sorgo não está diretamente ligado às necessidades nutricionais da cultura, mas sim às práticas de condução. Apesar do crescimento de produção de sorgo, o produtor brasileiro ainda investe pouco nesta cultura, já que o sorgo apresenta algumas desvantagens de comercialização para o produtor. Isso ocorre porque o sorgo é uma

cultura marginal ao milho e, com isso, o preço de venda do sorgo está atrelado ao do milho, variando em cerca de 80% do preço deste último. Porém, para que bons índices de produtividade agrícola sejam alcançados, a tecnologia e os custos de produção do sorgo devem se equiparar aos do milho (RODRIGUES, 2012). A título de comparação, Menezes (2015) indica como recomendações de adubação a aplicação mínima (ou seja, para solos de boa fertilidade) de 80 kg de N/ha em cobertura, quando os valores considerados neste estudo não chegam a 20 kg de N/ha e a aplicação média no país resume-se a 22 kg de N/ha. Esse fato explica a grande diferença entre a produtividade média para a cultura no país de 3,0 t/ha e o potencial produtivo de 12,0 t/ha.

O etanol de cana recebe um aporte ainda menor de fertilizantes nitrogenados, cerca de 5,5 kg de ureia/m³ de etanol e, mesmo recebendo a aplicação de vinhaça como fertirrigação, que também resulta em emissões de amônia, as emissões são menores e garante a este combustível o melhor desempenho para a categoria.

Neste estudo, foi considerada a fertirrigação de vinhaça nos campos de milho e de sorgo e contabilizadas as emissões causadas pelas etapas de transporte. No entanto, a falta de parâmetros específicos não permitiu o cálculo das emissões provenientes da aplicação da vinhaça. Caso fossem contabilizados, os resultados para esta categoria poderiam variar e o etanol de milho e sorgo poderiam apresentar resultados piores. Também não foram considerados os possíveis aumentos de produtividade que as culturas de milho e sorgo poderiam alcançar com a fertirrigação. Neste sentido, o etanol de milho e sorgo poderiam melhorar seus desempenhos para diversas categorias.

9.1.4 Ecotoxicidade Terrestre, Ecotoxicidade de Água Doce, Toxicidade Humana e Eutrofização de Água Doce

Para as categorias de Ecotoxicidade Terrestre e Ecotoxicidade de Água Doce os melhores desempenhos estão estabelecidos nessa ordem: etanol de cana-de-açúcar, etanol de milho e etanol de sorgo.

Tratando especificamente da categoria de Ecotoxicidade Terrestre, para os três produtos analisados, a etapa que contribui majoritariamente para este impacto potencial é a etapa agrícola para a produção da matéria-prima. Além disso, em todos os casos estudados, as principais substâncias contribuintes provêm de fitossanitários, aplicados para o controle de pragas. Este resultado não surpreende, uma vez que o processo agrícola tem suas fronteiras

intimamente relacionadas aos compartimentos da natureza, apresentando muito mais fluxos elementares do que as etapas industriais e de transporte, que costumam ter fluxos mais bem controlados.

O etanol de cana-de-açúcar apresenta um desempenho bastante superior aos outros produtos em termos de Ecotoxicidade Terrestre, emitindo potencialmente apenas 1,01 kg 1,4-DB eq. O etanol de milho emite 21,1 kg 1,4-DB eq e o etanol de sorgo emite 34,7 kg 1,4-DB eq (Gráfico 9.7).

Gráfico 9.7 - Comparação entre os desempenhos das produções de etanol de cana-de-açúcar, milho e sorgo para a categoria Ecotoxicidade Terrestre

Os fitossanitários costumam ser aplicados de forma relativamente específica para cada cultura a ser protegida. Apesar de a cana-de-açúcar receber uma variedade muito maior de fitossanitários - cerca de 18 substâncias, enquanto o milho recebe 9 e o sorgo apenas 4 substâncias – o etanol produzido de fonte sacarina obteve um desempenho ambiental muito melhor do que os dos produtos alternativos. Isso se deve aos tipos de substâncias aplicadas, uma vez que diferentes compostos químicos recebem diferentes pesos para a etapa de caracterização destas categorias.

As emissões encontradas na produção do etanol de cana estão relacionadas principalmente à substância fipronil – inseticida usado para prevenir cupins e brocas na fase inicial do crescimento da cana – e ao diuron, hexazinona e clomazona – herbicidas com fins de controle de plantas daninhas. Essas aplicações concentram-se nas etapas iniciais de plantio ou rebrota, enquanto as plantas de cana ainda apresentam um porte baixo e o solo se mantém

relativamente exposto. Conforme as plantas se desenvolvem, o próprio crescimento da cana e aumento de suas folhagens passam a inibir o desenvolvimento de plantas espontâneas, reduzindo o espaço disponível no solo e a oferta de luz que alcança o interior da plantação.

Para a produção de etanol de milho, 97,6% dessa quantidade advém da aplicação de um único produto, o herbicida atrazina. O mesmo ocorre para o etanol de sorgo, 99,1% das emissões correspondem ao composto atrazina. Embora sejam aplicados poucos produtos para a fitossanidade da produção agrícola do milho e do sorgo, a atrazina é um composto que possui um fator de caracterização alto em comparação aos demais produtos aplicados nesse sistema. A atrazina é um composto classificado como *classe II, muito perigoso ao meio ambiente*, e provoca a inibição da fotossíntese para as plantas infestantes. A substituição deste único produto por outro com efeitos potencialmente menos deletérios ao meio, provavelmente melhoraria o desempenho ambiental para as alternativas amiláceas nesta categoria de impacto. A diferença entre os desempenhos do etanol de milho e do etanol de sorgo, nesta categoria, se deve à diferença entre as produtividades de cada sistema. Apesar de as doses de atrazina aplicadas por hectare não diferirem muito, as doses aplicadas por tonelada se distanciam, já que em um hectare de sorgo é produzido pouco mais que a metade do que é produzido em um hectare de milho. Novamente, a busca por melhores produtividades para a cultura do sorgo, apesar de carregar um maior aporte de recursos, poderia melhorar o desempenho do etanol de sorgo nestas categorias.

A categoria Ecotoxicidade de Água Doce acompanha o perfil da categoria Ecotoxicidade Terrestre e as emissões são, em sua maioria, causadas pelos mesmos produtos. Para o etanol de cana de açúcar, as emissões potenciais são 0,694 kg 1,4-DB eq, para o etanol de milho são 17,2 kg 1,4-DB eq e para o etanol de sorgo, 27,8 kg 1,4-DB eq (Gráfico 9.8).

O desempenho do etanol de cana-de-açúcar para esta categoria também é influenciado pela aplicação de fipronil e diuron, mas também por emissões de metais pesados que ocorram na etapa de produção de fertilizantes. Os desempenhos do etanol de milho e de sorgo, tal qual a categoria de Ecotoxicidade Terrestre, são influenciados especialmente pela aplicação de atrazina, correspondendo a 94,8% da emissão total para etanol de milho e 98,2% para etanol de sorgo.

Gráfico 9.8 - Comparação entre os desempenhos das produções de etanol de cana-de-açúcar, milho e sorgo para a categoria Ecotoxicidade de Água Doce

Na categoria de Toxicidade Humana, o etanol de cana apresenta um desempenho ligeiramente melhor do que o de sorgo e o etanol de milho tem desempenho bastante pior do que os dois primeiros (Gráfico 9.9). O impacto potencial para o etanol de cana soma a emissão de 35 kg 1,4-DB eq, para o etanol de sorgo, 41 kg 1,4-DB eq e para o etanol de milho soma 133 kg 1,4-DB eq.

Gráfico 9.9 - Comparação entre os desempenhos das produções de etanol de cana-de-açúcar, milho e sorgo para a categoria Toxicidade Humana

As substâncias que mais influenciaram esta categoria de impacto, para os três produtos analisados, foram os metais pesados. Para o etanol de cana-de-açúcar e de milho, o cádmio foi o metal que mais contribuiu nas emissões finais. Para ambos os casos, sua origem está nos fertilizantes e corretivos aplicados na etapa agrícola. Os metais pesados são encontrados na natureza nas rochas e solos. Sendo os fertilizantes insumos geralmente de origem mineral, ao serem extraídos costumam carregar consigo traços de metais pesados. Para o etanol de sorgo, cuja etapa agrícola recebe a aplicação das menores quantidades de fertilizantes, não houve contribuições expressivas deste tipo.

Nos processos de obtenção de etanol de milho e sorgo, a emissão de manganês se mostrou relevante, porém com a origem em outra etapa que não a agrícola. A queima de cavacos de madeira na caldeira produz cinzas como resíduo. Esta cinza retorna para o campo com a vinhaça diluída e pode ser considerada benéfica para a produção dos grãos, no entanto acarreta a emissão de Mn no solo, contribuindo para a Toxicidade Humana.

Por fim, para a categoria de Eutrofização de Água Doce, comparativamente, o etanol de cana-de-açúcar apresentou o pior desempenho, seguido com grande diferença pelo etanol de milho e o melhor desempenho é apresentado pelo etanol de sorgo (Gráfico 9.10). Em números, o etanol de cana, milho e sorgo apresentaram, respectivamente, emissões potenciais de 0,759 kg P eq, 0,124 kg P eq e 0,028 kg P eq.

Gráfico 9.10 - Comparação entre os desempenhos das produções de etanol de cana-de-açúcar, milho e sorgo para a categoria Eutrofização de Água Doce

No processo de produção do etanol de cana este impacto potencial é responsabilidade da etapa agrícola de produção de colmos de cana-de-açúcar. A principal substância que gera esse impacto é o fósforo, contribuindo com 98,4% das emissões de P eq. Cabe lembrar que o fósforo é escasso em solos brasileiros e o que existe dele é encontrado de forma não solubilizada. Portanto, essa emissão é resultante exclusivamente do efeito de erosão do solo causado pela chuva que, ao atingir os corpos d'água, carregam o elemento que provoca eutrofização.

Para o etanol de milho, tal como o etanol de cana, o fósforo corresponde à maior contribuição na emissão potencial total da categoria, resultando em 65,2% dela. O fósforo é emitido principalmente na etapa agrícola, pelos mesmos motivos justificados para o etanol de cana. O fator que influencia a diferença entre as emissões de fósforo pela produção de cana-de-açúcar e milho é a quantidade de solo erodido por ano para cada uma das culturas. A erosão do solo está relacionada às características edafoclimáticas da região e às características da cultura, mas também ao sistema de produção e tecnologias agrícolas aplicadas. O sistema de plantio convencional utilizado na produção de cana tende a ocasionar mais erosão do que o plantio direto do milho, em que a palhada protege o solo de intemperismo.

Somada à emissão de fósforo por erosão do solo, a cadeia de produção do etanol de milho também apresenta emissões de fosfato. Essa emissão concentra-se na etapa de produção do fertilizante fosfatado e se justifica pelo grande aporte de fertilizantes.

A produção do etanol de sorgo apresenta a produção de glifosato como principal etapa contribuinte do resultado total desta categoria. A etapa agrícola não aparece aqui porque, uma vez que não há aporte de fertilizante fosfatado para essa cultura, não aparecem emissões decorrentes de sua produção e não foram contabilizadas emissões de fósforo por erosão. Por este motivo o etanol de sorgo apresenta comparativamente o melhor desempenho nesta categoria.

9.1.5 Ocupação de Terras Agrícolas e Transformação de Área Natural

Comparativamente, para a categoria Ocupação de Terras Agrícolas, o desempenho do etanol de cana-de-açúcar se mostrou superior ao desempenho do etanol de milho, que por sua vez, foi superior ao do de sorgo (Gráfico 9.11). Enquanto a ocupação necessária para a produção de 1m³ de etanol de cana é 1.436 m².ano, para a mesma quantidade de etanol de

milho devem-se ocupar 1.980 m².ano e para etanol de sorgo a ocupação passa a ser 3.050 m².ano.

Gráfico 9.11 - Comparação entre os desempenhos das produções de etanol de cana-de-açúcar, milho e sorgo para a categoria Ocupação de Terras Agrícolas

A principal razão para a diferença do desempenho da produção de etanol de cana em relação aos outros produtos está na origem dos combustíveis utilizados para geração de energia para o processo. Enquanto o processo com cana-de-açúcar utiliza bagaço de cana como combustível, um coproduto gerado na etapa de extração do caldo, os processos com milho e com sorgo utilizam cavaco de madeira. A produção da madeira ocorre em “área de floresta intensiva”, que o método considera como parte da área de ocupação agrícola.

Outro fator que justifica esses desempenhos é a produtividade agrícola de cada cultura. Neste caso, as melhores eficiências de conversão de biomassa em etanol na etapa industrial não foram capazes de amortizar a imensa diferença de produtividade agrícola no campo. Com produtividades de 82,2 t/ha para cana-de-açúcar contra 7,5 t/ha e 3,83 t/ha para milho e sorgo, respectivamente, a cana-de-açúcar necessita de áreas menores do que o milho e o sorgo para produzir a mesma quantidade de etanol. No entanto, tanto a melhora da produtividade agrícola do milho e o do sorgo, quanto a seleção de cultivares e variedades com maiores teores de amido e, consequentemente, conversões mais eficientes em etanol, poderiam aproximar os desempenhos dos três produtos.

Para a categoria Transformação de Área Natural, as diferenças entre os desempenhos dos três processos são bastante distintos. O processo de produção de etanol de cana-de-açúcar apresenta transformação de paisagem natural para uma área irrisória (Gráfico 9.12).

Gráfico 9.12 - Comparação entre os desempenhos das produções de etanol de cana-de-açúcar, milho e sorgo para a categoria Ocupação de Transformação de Área Natural

Para produzir etanol de milho e etanol de sorgo, a área total de transformação é extremamente influenciada por um único aspecto, a transformação de área de natural “*Transformation, from forest*”, na etapa de cultivo da principal matéria-prima agrícola, milho ou sorgo. Para a produção de 1m^3 de etanol de milho, ocorre a redução de 562m^2 de área natural para a produção de grãos de milho e, para a produção desta quantia de etanol de sorgo, ocorre a redução de $55,1\text{m}^2$ de área natural para produzir grãos de sorgo. É importante ressaltar que estes resultados são influenciados pelo critério de alocação adotado para a definição da expansão da cultura, conforme descrito no item 8.2. Neste caso, tanto o milho quanto o sorgo são culturas de inverno, rotacionadas com a cultura da soja plantada no verão e, por isso, cada uma das culturas recebe um fator de alocação para a expansão de área plantada. Como descrito nos capítulos de Procedimentos de Alocação (capítulos 6.1.2.4 e 7.1.2.3), o fator selecionado está atrelado à área total de plantio da cultura como rotação. O sistema mais comum é a rotação entre milho e soja, com isso, o fator de alocação do milho é maior do que o fator de alocação do sorgo, que representa uma porcentagem muito pequena das áreas de rotação. No entanto, os resultados também dependem do padrão de crescimento de área plantada adotado. Conforme citado anteriormente, os resultados para essa categoria

poderiam variar consideravelmente caso fossem adotados padrões que representassem a pior situação possível – como por exemplo, 100% do crescimento da área plantada ocorre sobre mata nativa -, ou a melhor situação possível - como 100% do crescimento ocorre sobre culturas anuais, ou mesmo, não leva carga por se tratar de 2ª safra, no caso do milho e sorgo.

A Transformação de Áreas Naturais é uma categoria relevante e bastante discutida por alguns motivos, como por exemplo, indicar impactos potenciais de perda de biodiversidade causada pela supressão de habitats. Além disso, dependendo do tipo de ecossistema que compõe a área natural, sua supressão pode gerar grandes emissões de carbono, conforme discutido nos capítulos da categoria Mudanças Climáticas. Para reduzir os impactos causados pela transformação de áreas naturais, é importante que se desenvolvam tecnologias agrícolas que visam o aumento da produtividade, de forma a aumentar a produção sem a necessidade de expandir as áreas de plantio.

A melhor abordagem para a redução deste impacto potencial seria, em primeiro lugar, o acréscimo das produtividades médias das lavouras para o país que, tanto para milho quanto para sorgo, encontram-se em valores abaixo da média mundial. Em segundo lugar, existem diferentes formas de ampliar as áreas de cultivos das matérias-primas sem, no entanto, repercutir na abertura de novas áreas agrícolas, mas apenas pela realocação no uso da terra. Uma delas é a própria rotação de culturas, mas existem possibilidades ainda mais eficientes, como a integração Lavoura-Pecuária (ILP). Segundo Miranda e Lício (2014), a ILP consiste na diversificação, rotação, consorciação ou sucessão das atividades agrícolas e pecuárias constituídas em um mesmo sistema dentro da propriedade rural, de forma a gerar benefícios para ambas as atividades. Dessa forma, diversas áreas de pastagem em degradação ocupadas por pecuária extensiva, cujo retorno econômico tende a ser baixo, poderão ser exploradas durante todo o ano, favorecendo o aumento da oferta de grãos, fibras, carne, leite e agroenergia. Desta forma, o sinergismo criado entre lavoura e pastagem reduzem os custos de produção e aumentam a oferta de produtos, sem pressionar pelo avanço sobre áreas naturais e suas consequentes emissões.

9.2 Comparação dos desempenhos energéticos de etanol de cana-de-açúcar, milho e sorgo

A comparação entre os desempenhos energéticos dos processos de produção de etanol de cana-de-açúcar, milho e sorgo está dividida em duas análises. A primeira confronta os

resultados obtidos pela avaliação que utilizou o método CED e a segunda compara os índices de retorno energético sobre o investimento (EROI) obtidos para cada processo.

9.2.1 CED – Demanda Cumulativa de Energia

A Tabela 9.2 mostra os resultados da aplicação do método CED para os produtos analisados e o gráfico 9.13 apresenta a comparação entre os consumos energéticos necessários para a produção de 1 m³ de etanol de cana-de-açúcar, de milho e de sorgo, separando os resultados em duas categorias, fontes de energia não renovável e fontes de energia renovável.

Tabela 9.2 - Perfis energéticos das produções de 1 m³ de etanol hidratado de cana-de-açúcar, milho e sorgo, obtidos pela aplicação do método Demanda Cumulativa de Energia (CED)

Categoria de impacto	Subcategoria de impacto	Unidade	etanol de cana-de-açúcar	etanol de milho	etanol de sorgo
Não Renovável	fóssil	MJ	2185	7980	6880
	nuclear		23,4	113	112
	biomassa primária		0,032	0,156	0,0577
Renovável	biomassa secundária	MJ	1,75	18700	19800
	alternativas (eólica, solar, geotérmica)		0,492	2,98	2,7
	hídrica		38,7	210	143
Pontuação única		MJ	2.249	27.006	26.938

Gráfico 9.13 - Comparação dos desempenhos energéticos das produções de 1 m³ de etanol hidratado de cana-de-açúcar, milho e sorgo, segundo os resultados obtidos pelo método de AICV Demanda Cumulativa de Energia (CED)

De uma forma geral, os resultados indicam que o processo de produção de etanol de cana necessita de consumos energéticos muito menores do que os combustíveis alternativos. O fato de a produção de cana-de-açúcar fornecer não apenas a matéria-prima para a conversão em etanol, mas, também, o combustível necessário para gerar energia a partir da combustão na caldeira dá ao etanol de cana-de-açúcar uma enorme vantagem em termos energéticos.

Os processos de produção dos etanóis amiláceos, tanto de milho quanto de sorgo, são mais energo-intensivos. No entanto, apesar de consumirem grandes quantidades de energia, a maior parte é fornecida por fontes renováveis, o que melhora o desempenho de seus processos em comparação com a produção de etanol amiláceo em outros países, como os dos EUA, por exemplo, que atualmente é o país com as maiores produções de etanol do mundo.

Conforme discutido anteriormente, das seis subcategorias consideradas na avaliação para os três estudos, no máximo duas se mostraram relevantes. Para os três processos a categoria de fontes fósseis de energia demonstraram relevância. Para os processos de produção de etanol de milho e de sorgo, as fontes energéticas de biomassa secundária mostraram-se as mais importantes.

As etapas de produção que consomem petróleo são comuns aos três processos analisados. A etapa agrícola de todos os insumos é mecanizada e consome diesel, cuja origem é o petróleo, assim como o diesel consumido nas etapas de transporte. Conforme analisado anteriormente, as etapas de transporte para o etanol de cana-de-açúcar percorrem menores distâncias que os transportes dos concorrentes, devido à área de cana estar situada nas proximidades da usina. Esse fato é a primeira justificativa para os menores consumos por parte do etanol de cana.

Outra etapa que consome recursos fósseis, neste caso em forma de gás natural, e ocorre nos três processos é a produção do fertilizante nitrogenado ureia. Neste caso, ao receber um aporte maior de ureia em relação às outras culturas, o milho apresenta maiores consumos de gás natural que, somados aos consumos de petróleo, garantem o pior desempenho ao etanol desta matéria-prima. O etanol de sorgo, cuja etapa de transporte é semelhante à do etanol de milho, apresenta melhor desempenho em consumo energético fóssil pelo simples fato de consumir menor quantidade de fertilizante nitrogenado.

Em relação ao consumo de fontes energéticas provenientes de biomassa secundária, apenas os processos de produção de etanol de milho e de sorgo se mostraram intensivos. Neste caso, o etanol de milho apresentou alguma vantagem sobre o etanol de sorgo, justificada pela diferença de rendimento industrial dos processos. Atualmente, os grãos de

sorgo apresentam menor teor de amido do que os grãos de milho, diminuindo sua eficiência na produção de etanol.

A utilização e desenvolvimento de variedades de plantas de sorgo que contenham um teor maior de amido nos grãos, bem como a aplicação de técnicas agrícolas que aumentem sua produtividade, poderiam aproximar os desempenhos energéticos dos processos de obtenção de etanol de sorgo e de milho. É importante lembrar, no entanto, que provavelmente os consumos se aproximariam tanto pela redução de consumo de cavaco pelo etanol de sorgo, quanto pelo aumento de seu consumo de gás natural, causados pelo aumento do aporte de fertilizante nitrogenado.

Seguindo o processo de etanol de cana como exemplo, as produções de etanol de milho e sorgo poderiam ter seus consumos energéticos diminuídos caso fosse reaproveitada parte dos restos culturais que são deixados no campo. As palhadas, sabugos etc. poderiam servir como combustível para a caldeira e gerar pelo menos parte da energia necessária para a cogeração na usina. Ainda assim, seria necessário outro tipo de combustível como complemento, já que a palhada não pode ser totalmente retirada do campo por cumprir um papel importante no sistema de plantio direto.

9.2.2 EROI - Índice de Retorno Energético sobre o Investimento

A Tabela 9.3 compara os valores de Índices de Retorno Energético sobre o Investimento obtidos para os três produtos analisados. O processo que mostra melhor retorno energético é aquele que utiliza cana-de-açúcar como matéria-prima para a produção do combustível.

Tabela 9.3 Valores de energias fornecidas e consumidas por 1m³ de etanol de cana-de-açúcar, de milho e de sorgo, em GJ, e Índice de Retorno Energético sobre o Investimento (EROI)

	E disponível	E consumida, não renovável	EROI (r _E)
	GJ/m ³ etanol		
Etanol de cana-de-açúcar	21,35	2,18	9,77
Etanol de milho	21,35	7,98	2,68
Etanol de sorgo	21,35	6,88	3,10

Para os diversos estudos levantados no tema e descritos nas discussões (capítulos 5.3.2.3, 6.3.2.3 e 7.3.2.3), o etanol de fonte sacarina sempre apresentou retorno energético

maior do que os de fonte amilácea. Sua alta produtividade em campo e a geração de um combustível como coproduto do processo são fatores decisivos para este resultado.

O etanol de milho apresentou o pior retorno energético dentre as opções. O resultado foi bastante influenciado pelo alto consumo de fertilizantes nitrogenados, além das necessidades energéticas para o processo industrial de produção de etanol, já que esta alternativa não gera coprodutos energéticos como a cana-de-açúcar.

Com base nas referências bibliográficas, um menor índice de retorno já era esperado para o etanol de milho. No entanto, o desempenho do etanol de milho foi uma grata surpresa, superando os desempenhos de estudos que utilizaram modelos norte-americanos. Apesar de os EUA, que é o país que mais produz etanol no mundo e tem o milho como principal matéria-prima de seu processo, trazerem tradição e apresentarem maiores eficiências de conversão do etanol, o desempenho energético do etanol de milho brasileiro mostrou um retorno energético maior. A escolha do combustível definiu os resultados. O Brasil apresenta reservas de gás natural menores do que os EUA e, ao mesmo tempo, mais disponibilidade de áreas para a produção de biomassa de origem secundária. A alternativa de combustível mais viável para o processo brasileiro foi quem acarretou melhorias no desempenho do produto em relação ao produto norte-americano.

Neste estudo, optou-se por avaliar os três processos separadamente, no entanto, a usina integrada possibilita outros arranjos que poderiam melhorar ainda mais o processo. Um dos exemplos é o consumo de bagaço de cana-de-açúcar excedente (da produção de etanol de cana) como combustível para a produção de etanol de milho. Dessa forma, o consumo de cavacos de madeira que, apesar de ser uma fonte renovável, apresenta consumos de energia fóssil nas etapas de transporte, fertilizantes etc, seria reduzido. Além disso, os restos culturais da etapa agrícola do milho poderiam ser parcialmente aproveitados. Neste caso, no entanto, as etapas de transporte da palhada do campo até a usina aumentariam o consumo de energia fóssil e poderiam influenciar os resultados.

O etanol de sorgo alcançou a posição intermediária entre as opções estudadas em relação ao seu retorno energético. Esta matéria-prima também apresentou um resultado melhor do que o esperado, já que, segundo a literatura, seria capaz de alcançar índices semelhantes aos do milho. Devido ao fato de apresentar menor conteúdo de amido nos grãos e, com isso, uma eficiência menor na conversão de etanol, esperava-se um resultado inferior para o sorgo em comparação ao milho. No entanto, atualmente no Brasil, os baixos índices de amido no grão e baixas produtividades alcançadas pelo sorgo, se comparadas com o potencial da cultura, se justificam pelo pouco investimento que os produtores destinam à produção. Por

ser uma cultura marginal e de menor interesse que o milho, os produtores destinam menos recursos, como fertilizantes, por exemplo, para a produção de sorgo. O menor aporte de recursos e, conseqüentemente, menor aporte de energia, foi o que concedeu melhor desempenho energético ao etanol de sorgo em comparação ao etanol de milho. Segundo Resende et al. (2009), a cultura do sorgo destaca-se pela rusticidade e tolerância ao déficit hídrico, tornando-o atrativo para o plantio em regiões de baixa pluviosidade. Com isso, na maioria das vezes, o plantio ocorre sob condições edafoclimáticas desfavoráveis, que não são suficientes para o desenvolvimento de outras culturas. Dessa forma, apesar de viável, as produtividades alcançadas pelo sorgo nessas condições ficam muito aquém do seu potencial produtivo, que é de 12 t/ha. Entretanto, o sorgo responde intensamente a incrementos no suprimento de água e à adubação, alcançando ou superando a produção de grãos normalmente obtida com a cultura do milho.

No entanto, a busca por melhores produtividades na produção de sorgo pode aumentar os consumos energéticos do processo e, assim, aproximar o desempenho energético do processo de etanol de sorgo ao desempenho do etanol de milho. Por outro lado, as mesmas possíveis melhorias observadas para o etanol de milho, como reaproveitamento de bagaço de cana-de-açúcar e restos culturais da etapa agrícola, podem ser aplicadas ao etanol de sorgo e melhores desempenhos podem ser obtidos.

Outro tipo de integração possível para os processos de produção de etanol de milho e sorgo, e não tratada neste estudo, é o aproveitamento do DDGS. A maioria dos estudos levantados na literatura considera o DDGS como coproduto e aplica alocação dos impactos da produção entre este produto e o etanol, melhorando o desempenho dos produtos. No entanto, não apenas pela alocação existiria melhora no processo. O DDGS é um produto de alto teor proteico utilizado para alimentação animal. A integração entre usinas de etanol de fonte amilácea e a pecuária poderia confinar ou intensificar a produção de gado (mais cabeças em uma área menor e, conseqüentemente, menor expansão da atividade sobre áreas naturais) tornando a atividade menos impactante ao meio ambiente. No sentido contrário, a produção de gado poderia fornecer biogás a partir de rejeitos animais para suprir as necessidades energéticas da usina de etanol, conforme descrito por Cai et al. (2013).

9.3 Comparação Geral

As comparações entre os desempenhos ambiental e energético dos processos de produção de etanol de cana-de-açúcar, de milho e de sorgo demonstram que, em uma análise global, o etanol de cana-de-açúcar produzido no estado do Mato Grosso é a alternativa que apresenta menos impactos ambientais e energéticos potenciais. Das onze categorias analisadas pelo estudo ambiental, o etanol de cana obteve o melhor desempenho em sete, além do melhor desempenho do ponto de vista energético. O etanol de sorgo foi apontado como a melhor opção para três das categorias analisadas. O etanol de milho, por sua vez, apresentou o melhor desempenho em apenas uma das categorias.

Também foi possível observar as etapas do processo que ocasionaram maiores impactos potenciais e ajudaram a definir os maus desempenhos dos combustíveis em cada categoria. O processo de etanol de milho apresentou o pior desempenho em quatro das onze categorias ambientais e o pior desempenho em termos de retorno energético. O grande aporte de fertilizantes para a cultura de milho influenciou o mau desempenho de seu combustível em, pelo menos, três das quatro categorias, sendo elas Mudanças Climáticas, Acidificação Terrestre e Toxicidade Humana, e também contribuiu para a redução do retorno energético do combustível. A expansão da cultura de milho e consequente mudança de uso da terra também foi um aspecto chave para gerar maus desempenhos nas categorias Mudanças Climáticas e Transformação de Área Natural.

O etanol de sorgo apresentou o pior desempenho para três categorias de impacto ambientais. A aplicação do herbicida atrazina foi responsável pelo desempenho ruim nas categorias de Ecotoxicidades Terrestre e de Água Doce. A baixa produtividade de grãos de sorgo associada ao uso de cavacos de madeira como fonte energética para o processo industrial levaram o etanol de sorgo ao pior desempenho para Ocupação de Terras Agrícolas.

Em relação ao etanol de cana-de-açúcar, seu processo apresentou pior desempenho em quatro das categorias de impacto ambiental. Em duas delas, Formação de Material Particulado e Formação de Oxidação Fotoquímica, as etapas de queima da palhada pré-colheita e queima de bagaço na caldeira definiram o mau desempenho do biocombustível. Além disso, o sistema de plantio convencional da cana-de-açúcar ocasionou o maior índice de erosão e, com ele, o pior desempenho para Eutrofização de Água Doce. O processo também teve o pior desempenho em Depleção de Água por apresentar maiores consumos na etapa de reaproveitamento do fermento.

Dessa forma, os resultados desse trabalho possibilitaram a identificação de prioridades para a melhoria dos desempenhos dos três processos estudados. O fim da colheita da cana com queima prévia da palhada, conforme é preconizado por lei estadual, melhoraria o desempenho ambiental do combustível dessa matéria-prima. A redução do uso de fertilizantes químicos na cultura do milho, possibilitada pelo sistema de plantio direto com rotação de culturas, reduziria os impactos potenciais causados pela produção de etanol de milho. O investimento em pesquisa de melhoramento genético e técnicas agrícolas que melhorem a produtividade da cultura do sorgo, aproximando-a de seu potencial produtivo, e a substituição dos fitossanitários mais agressivos por opções que causem menos impacto ao ambiente também traria melhores desempenhos ao etanol de sorgo.

10 CONSIDERAÇÕES FINAIS

Este trabalho teve por objetivo a avaliação e comparação dos desempenhos ambientais e energéticos dos processos de produção de etanol a partir de três diferentes matérias-primas vegetais no contexto de uma usina autônoma integrada. A aplicação da metodologia da Avaliação de Ciclo de Vida permitiu uma análise sistêmica e resultou no cumprimento dos objetivos propostos.

Respondendo à pergunta deste trabalho, pode-se concluir que os diferentes arranjos produtivos analisados, que incluem diferentes matérias-primas para a produção de etanol, são viáveis do ponto de vista ambiental e energético. Tanto isto se confirma que dois dos processos analisados – o etanol de milho e o de sorgo - apresentaram desempenhos semelhantes ou melhores do que processos levantados em literatura para outros contextos geográficos. O terceiro processo analisado, o etanol de cana-de-açúcar, embora não tenha apresentado o melhor desempenho em relação aos levantados em literatura, apresentou melhor desempenho se comparado aos processos que utilizam fontes amiláceas.

A integração dos processos com diferentes matérias-primas possibilita o aumento da produção de etanol em uma usina, reduzindo a ociosidade das instalações e, consequentemente, os custos agregados à produção. Além disso, a diversificação de culturas reduz a dependência por uma única matéria-prima para o processo e, com isso, aumenta a segurança da produção, protegendo-a de oscilações de mercado ou mesmo de oscilações climáticas e ecológicas.

O estudo conduzido também atingiu seus objetivos complementares, identificando as etapas críticas de cada processo e as oportunidades de melhoria, bem como fornecendo informações técnicas e ICVs acerca do processo de produção de etanol de cana-de-açúcar, milho e sorgo em uma usina integrada no estado do Mato Grosso.

Analisado individualmente, o etanol de cana-de-açúcar do Mato Grosso ainda tem baixa representatividade no contexto nacional. Apesar de ser um dos estados com maior crescimento em produção de cana-de-açúcar, sua produção representa apenas 2,7% do total do país, ficando em 7º lugar entre os maiores estados produtores de cana-de-açúcar no Brasil em 2013.

Em relação ao desempenho da produção de cana-de-açúcar no MT, a queimada da cana na etapa de pré-colheita influenciou diversas das categorias ambientais, depreciando o desempenho ambiental desta produção vegetal em relação à produção de outros estados.

Apesar de o estado do Mato Grosso já apresentar um marco legislativo para o fim das queimadas em áreas de cana-de-açúcar, quanto antes esse processo seja banido, antes os desempenhos ambientais do etanol de cana do MT se equipararão aos desempenhos do etanol paulista.

Neste contexto, foi possível observar que não é apenas o desempenho agrícola que interfere nos desempenhos finais do combustível. Apesar de os dados deste estudo considerarem uma produtividade agrícola acima da média para o estado do MT – e próxima às melhores produtividades médias encontradas para a cultura no estado de SP –, os desempenhos ambientais e energéticos tenderam a ser piores para o combustível produzido no estado do centro-oeste. Isso ocorre pelo fato de a tradição histórica de produção de etanol no estado de SP estar atrelada à curva de aprendizado na produção do combustível e, principalmente, aos investimentos em eficiência industrial, tanto pelas escalas de produção quanto pelo uso eficiente da energia gerada no processo.

A atualização tecnológica dos processos industriais das usinas do Mato Grosso, especialmente em termos de modernização do processo de cogeração, aumentariam a eficiência energética do processo e resultariam em melhores desempenhos ambientais e energéticos, possibilitando o aumento de retorno energético para além do índice de 6,51 encontrado.

Além disso, a possibilidade de integração com outras matérias-primas é um novo incentivo para esse investimento. Se, anteriormente, a competição por área com outras culturas e a baixa viabilidade da cana-de-açúcar em cerca de 50% da área do estado pudessem desincentivar a modernização da estrutura industrial, agora a variação de matérias-primas – e, consequentemente, o aumento da disponibilidade de biomassa para a conversão em etanol – podem proporcionar as razões para o investimento necessário.

O milho entra nesse contexto como uma matéria-prima promissora para a complementação da produção de etanol. Se, por um lado, o MT não apresenta grande tradição na produção de cana-de-açúcar, ele é o estado que mais produz milho no Brasil atualmente. E o faz com uma grande vantagem: sua produção majoritária ocorre em sistema de plantio direto, um dos sistemas consolidados mais sustentáveis atualmente, com rotação de culturas e compartilhamento de recursos. Além disso, o estado do MT apresenta índices pluviométricos que não exigem irrigação da cultura, o que não ocorre nos EUA, por exemplo, dando enorme vantagem ao produto brasileiro em relação ao consumo de água.

No entanto, a maior desvantagem ambiental encontrada para o processo de produção de milho no estado concentra-se no avanço das áreas de plantio sobre áreas de mata nativa.

Tradicionalmente, a soja é o principal produto agrícola do estado, apresenta maior valor agregado e, conseqüentemente, maior retorno econômico para o produtor. Nesse sentido, nos últimos 20 anos, a produção de soja foi quem impulsionou o aumento de áreas agrícolas sobre áreas naturais, carregando junto a expansão das áreas de plantio das culturas rotacionadas. No entanto, no sistema de rotação de culturas, ao gerar dois ou mais produtos em um mesmo ano agrícola, as conseqüências da implantação do sistema devem ser divididas entre os produtos. Ainda que a divisão dessas cargas possa variar segundo o critério de alocação, a substituição de áreas de mata nativa por áreas agrícolas gera impactos importantes para todas as culturas envolvidas e se destaca entre as outras categorias de impacto.

A mitigação desses impactos está diretamente relacionada ao fim da supressão de mata nativa, sem que ocorra, no entanto, a redução da produção agrícola. A própria rotação de culturas atua dessa forma, utilizando a mesma área duas ou mais vezes ao ano. Porém, cabe lembrar que a rotação entre milho e soja ocorre em apenas 42% das áreas de soja, o que permite um crescimento considerável das áreas de plantio de milho sem que nenhuma área nativa seja suprimida. Além disso, outras integrações mais complexas podem ser realizadas, como a Integração Lavoura-Pecuária ou mesmo Integração Lavoura-Pecuária-Floresta, com a possibilidade de produção de biomassa lenhosa para ser usada como fonte energética.

Outro aspecto que se mostrou relevante, tanto para o desempenho ambiental quanto para o energético, foi o uso de fertilizantes. A cultura de milho pode ser considerada exigente em termos nutricionais, especialmente em relação ao nutriente nitrogênio. O sistema de plantio direto com rotação de culturas considera as exigências nutricionais ao selecionar culturas complementares nesse sentido. Pode-se citar como exemplo a alternância entre leguminosas, que apresentam fixação biológica de nitrogênio, com gramíneas, que necessitam nitrogênio e apresentam alta relação C:N, fornecendo C na forma de matéria orgânica para o solo. Dessa forma, a aplicação de fertilizantes químicos deve sempre acompanhar os estudos de solo. Na prática, porém, muitos agricultores aplicam doses excessivas de fertilizantes visando assegurar a produtividade da cultura. O uso eficiente de fertilizantes químicos, inclusive com a complementação de fertilizantes orgânicos, é um conceito-chave para a redução do consumo energético da produção de etanol de milho.

Outro aspecto importante do ponto de vista energético foi a utilização de fonte renovável de energia para o consumo direto no processo de produção de etanol de milho. Aparentemente, este fator definiu o melhor desempenho do etanol de milho brasileiro em relação ao etanol de milho norte-americano e argentino, que utilizam gás natural como combustível no processo. Por outro lado, o uso de cavaco de madeira como combustível para

o processo pode acarretar em outros aspectos e impactos ambientais que devem ser considerados. Caso a produção de madeira resulte em supressão de mata nativa, por exemplo, as vantagens em se utilizar essa fonte energética podem ser questionadas. Sendo esta uma etapa importante do processo, a utilização de dados primários para o ICV da produção de cavacos de madeira seria uma possível melhoria para este estudo.

Outro aspecto não considerado neste trabalho foi a inclusão da produção de DDG ou DDGS como produto gerado pelo sistema. O coproduto proteico originado no tratamento da vinhaça pode ser comercializado para a alimentação animal nos setores de pecuária e suinocultura, mas ainda não apresenta um mercado consolidado no Brasil. A pecuária é majoritariamente extensiva no país. No entanto, o adensamento e confinamento do gado são estratégias para a diminuição dos impactos ambientais causados pela atividade e a disponibilidade em grande escala de um coproduto que sirva como ração animal pode incentivar este processo. Além disso, a inclusão do DDG como coproduto do processo e dos procedimentos de alocação podem melhorar o desempenho do etanol de milho brasileiro, conforme observado para o etanol de milho dos EUA.

O levantamento bibliográfico para estudos de etanol de sorgo possibilitou a observação de que o sorgo ainda é pouco explorado como matéria-prima para a produção de combustíveis. No entanto, as publicações norte-americanas encontradas demonstram que o produto começa a ser considerado como complemento ao milho para a produção de etanol amiláceo em grande escala. Dada a sua semelhança com o milho, tanto por aspectos morfológicos da espécie, quanto tecnológicos do processo, o sorgo tem sido considerado viável como matéria-prima para etanol.

Em relação aos desempenhos ambientais do etanol de sorgo, os aspectos observados assemelham-se aos do processo de etanol de milho. Cabem, para o processo de etanol de sorgo, os mesmos destaques e observações do etanol de milho relacionados aos impactos por MUT e os benefícios demonstrados pelo uso de fontes energéticas renováveis no processo industrial. As vantagens do uso de combustível renovável para a caldeira ficaram, inclusive, mais evidentes nas comparações realizadas entre processos de produção de etanol de sorgo, ao verificar-se que o único processo americano com ganhos energéticos maiores que o brasileiro ocorreu sob a influência do uso de gás natural renovável.

O fator que se destaca pela diferença entre as culturas de sorgo e milho são os índices de rendimento inferiores da cultura de sorgo, tanto por produtividade quanto por teor de amido nos grãos. Entretanto, o sorgo responde intensamente a incrementos no suprimento de

água e à adubação, alcançando ou superando a produção de grãos normalmente obtida com a cultura do milho.

Por outro lado, o baixo investimento em termos de recursos nutricionais na forma de fertilizantes foi decisivo no melhor desempenho energético do etanol de sorgo em relação ao de milho. Dessa forma, um maior aporte de recursos para o sorgo pode não garantir um melhor desempenho energético e ambiental. O estudo deveria ser repetido sob as novas condições de manejo da cultura.

Como é de costume, a introdução de novas espécies agrícolas em qualquer processo exige um período de adaptação da produção, com o desenvolvimento de tecnologias agrícolas específicas e melhoramento genético que adequem as características daquela cultura à sua nova função. Este processo se faz necessário à cultura do sorgo, visando ao desenvolvimento e popularização entre os produtores. Uma nova demanda de consumo do produto, como a produção de biocombustíveis, serve de incentivo para maiores investimentos na cultura. Soma-se a isso o fato que a variedade de matérias-primas reduz os riscos das usinas de etanol, já que o milho é uma commodity e a disponibilidade do produto encontra-se constantemente sujeita a flutuações no mercado internacional.

Cabe ressaltar, no entanto, que os arranjos estudados neste trabalho têm seus desempenhos relacionados às condições regionais em que se enquadram. A replicação destes modelos e da integração de matérias-primas para a produção de etanol em outros estados brasileiros carecem de estudos específicos que considerem a disponibilidade de matérias-primas regionais. Também seria importante associar o fator econômico nas avaliações, de forma a ampliar a análise, o que permitiria o estabelecimento de prioridades para a localização das usinas integradas.

Como continuação deste trabalho, poderiam ser estudados os desempenhos ambientais e energéticos da integração dos três processos em uma mesma planta, que possa operar de forma contínua ao longo do ano, sem paradas de entressafras, tal qual estudado por Donke et al. (2013), Nogueira et al. (2014) e Milanez et al. (2014). A integração de processos permite a otimizações sob os pontos de vista energético e ambiental, conforme discutido nos capítulos anteriores. Considerando a integração, é possível, ainda, testar e analisar a proporção ótima de cada uma das matérias-primas para a produção de etanol ao longo do ano, obtendo-se o melhor desempenho ambiental e energético possível para uma usina.

A partir dos modelos aqui gerados, também podem ser desenvolvidas modelagens que incluam outras tecnologias de integração, considerando operações de diferentes matérias-

primas em paralelo ou o compartilhamento de etapas, conforme descrito por Callofski (item 3.2.3).

11 REFERÊNCIAS

ABBRUZZINI, Thalita Fernanda. **Qualidade e quantidade da matéria orgânica do solo em cultivo convencional e orgânico de cana-de-açúcar**. 2011. 92p. Dissertação (Mestrado em Ciências) - Programa de Pós-Graduação em Solos e Nutrição de Plantas, Escola Superior de Agricultura “Luiz de Queiroz”, Universidade de São Paulo, Piracicaba, 2011.

ADORNA, Jaqueline Cristiane. **Adubação com micronutrientes no plantio da cultura da cana-de-açúcar**. 2011. 56p. Dissertação (Mestrado em Agronomia) – Programa de Pós Graduação, Faculdade de Ciências Agrônomicas, Universidade Estadual Paulista, Botucatu, 2011.

AGÊNCIA NACIONAL DE ÁGUAS (BRASIL) et al. **Manual de conservação e reúso de água na agroindústria sucroenergética**. Brasília: ANA, 2009. 288p. ISBN 978-85-89629-61-4.

AGÊNCIA NACIONAL DE ENERGIA ELÉTRICA (BRASIL). **Resolução Normativa 414/2010: atualizada até REN 499/2012**, Brasília: ANEEL, 2012, 202 p.

AGÊNCIA NACIONAL DO PETRÓLEO, GÁS NATURAL E BIOCOMBUSTÍVEIS (BRASIL). **Anuário estatístico brasileiro do petróleo, gás natural e biocombustíveis: 2013**. Rio de Janeiro, 2013.

AGUIAR, A.T.E. et al. (Eds.). **Boletim 200: Instruções Agrícolas para as Principais Culturas Econômicas**. 7ª edição. Campinas: Instituto Agrônômico (IAC), jun.2014. 452p. ISSN 0375-1538

AHMETOVIC, E.; MATÍN, M.; GROSSMANN, I.E. Optimization of Energy and Water Consumption in Corn-based Ethanol Plants. **Industrial & Engineering Chemistry Research**, v.49, n.17, p. 7972-7982, mai.2010.

ALVARENGA, R.C. et al. **Perdas de Solo e Água em um Latossolo Vermelho-Escuro sob Diferentes Sistemas de Manejo**. [1998?] Disponível em: <<http://ainfo.cnptia.embrapa.br/digital/bitstream/item/39350/1/Perdas-solo.pdf>>.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **ABNT NBR ISO 14040: Gestão Ambiental - Avaliação do Ciclo de Vida - Princípios e estrutura**. Rio de Janeiro: ABNT, 2009a.

_____. **ABNT NBR ISO 14044: Gestão Ambiental - Avaliação de ciclo de vida - Requisitos e orientações**. Rio de Janeiro: ABNT, 2009b.

BARCELOS, Carolina Araujo. **Aproveitamento das frações sacarínea, amilácea e lignocelulósica do sorgo sacarino [*Sorghum bicolor* (L.) Moench] para produção de bioetanol.** 2012. 334p. Tese (Doutorado em Ciências) – Programa de Pós Graduação em Tecnologia de processos Químicos e Bioquímicos, Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 2012.

BAUMANN, H.; TILLMAN, A.M. **The Hitch Hiker's Guide to LCA: An orientation in life cycle assessment methodology and application.** Lund, Suécia: Studentlitteratur AB, 2004, 526p.

BOUSTEAD I.; HANCOCK G. F. **Handbook of Industrial Energy Analysis.** Chichester, Eng.: E. Horwood New York: Halsted Press, 1979. 422p.

BRASIL. Decreto nº 76.593, de 14 de novembro de 1975. Institui o Programa Nacional do Álcool e dá outras Providências. **Diário Oficial da União**, Brasília, DF, 14 nov. 1975. Seção 1, p. 15257.

BROCH, D.L.; RANNO, S.K. Fertilidade do Solo, Adubação e Nutrição da Cultura do Milho Safrinha (Capítulo 2). In: FUNDAÇÃO MS PARA A PESQUISA E DIFUSÃO DE TECNOLOGIAS AGROPECUÁRIAS. **Tecnologia e Produção: Milho Safrinha e Culturas de Inverno 2012.** 2012. Disponível em: <<http://www.fundacaoms.org.br/publicacoes>>

BUCKERIDGE, M.S. **Comparação entre os sistemas fotossintéticos C3 e C4.** Disponível em: <<http://felix.ib.usp.br/pessoal/marcos/minhawe3/PDFs/Pratica%20fotossintese.pdf>>. Acesso em: 19 out 2015.

CAI, H. et al. Life-cycle energy use and greenhouse gas emissions of production of bioethanol from sorghum in the United States. **Biotechnology for Biofuels**, v.6, n.141, p. 1-15, out.2013.

CAMILOTTI, F. et al. Avaliação dos teores de metais pesados no solo e na planta de cana-de-açúcar sob adubação com lodo de esgoto e vinhaça. **Bioscience Journal**, v.25, n.6, p. 23-31, nov/dez.2009.

CANALS, Llorenç Milà i. **Contributions to LCA methodology for agricultural systems. Site-dependency and soil degradation impact assessment.** 2003. 250 p. Tesis (Doutorat en Ciències Ambientals) – Unitat de Química Física, Departament de Química, Universitat Autònoma de Barcelona, Barcelona, 2003.

CAVALETT, O. et al. Comparative LCA of ethanol versus gasoline in Brazil using different LCIA methods. **International Journal of Life Cycle Assessment**, v.18, n.3, p. 647-658, jul.2013.

CHEHEBE, J.R.B. **Análise do Ciclo de Vida de Produtos: Ferramenta Gerencial da ISO 14000**. Rio de Janeiro: Qualitymark Ed., CNI, 2002. 120 p.

CLEAN FUELS DEVELOPMENT COALITION. **Ethanol Blended Fuels**. Disponível em: <http://www.nrel.gov/education/pdfs/educational_resources/high_school/teachers_guide_ethanol.pdf>. Acesso em: set 2015.

CLEVELAND, C. J. Energy quality and energy surplus in the extraction of fossil fuels in the U.S. **Ecological Economics**, v.6, n.2 , p. 139-162, out.1992.

COELHO, A.M. et al. (Editor). **Sistema de Produção Cultivo do Milho**. Embrapa Milho e Sorgo. Versão Eletrônica. 4ª edição, set.2008.

COLTRO, L. **Avaliação do Ciclo de Vida como Instrumento de Gestão**. Campinas: CETEA/ITAL 2007. 75 p.

COMISSÃO EUROPEIA. Decisão da Comissão de 10 de junho de 2010 relativa a directrizes para o cálculo das reservas de carbono nos solos para efeitos do anexo V da Directiva 2009/28/CE. **Jornal Oficial da União Europeia**, L151/19 de 17 jun 2010.

COMISSÃO EUROPEIA. Directiva 2009/28/CE do Parlamento Europeu e do Conselho de 23 de abril de 2009 relativa à promoção da utilização de energia proveniente de fontes renováveis que altera e subsequentemente revoga as Directivas 2001/77/CE e 2003/30/CE, **Jornal Oficial da União Europeia**, L140/16 de 5 jun 2009.

COMPANHIA AMBIENTAL DO ESTADO DE SÃO PAULO – CETESB. **Inventário de Emissões das Fontes Estacionárias do Estado de São Paulo: Manual de Preenchimento**. CETESB, nov.2009.

COMPANHIA NACIONAL DE ABASTECIMENTO (BRASIL). **Acompanhamento da safra brasileira: Grãos – Safra 2012/2013, décimo segundo levantamento, setembro/2013**. Brasília: Conab, 2013c. 29p.

_____. **Acompanhamento da safra brasileira: Grãos – Safra 2013/14, Terceiro Levantamento, Dezembro/2013** – v.1, n.3. Brasília: Conab, 2013b. 72p.

_____. **Os fundamentos da crise do setor sucroalcooleiro do Brasil**. Superintendência de Informações do Agronegócio. 2010.

_____. **Perfil do Setor do Açúcar e do Etanol no Brasil - Volume 5 - Safra 2011/2012**. Diretoria de Política Agrícola e Informações e Superintendência de Informações do Agronegócio. Brasília: Conab: 2013a. 88 p.

_____. **Séries históricas. Séries Históricas de Área Plantada, Produtividade e Produção, Relativas às Safras 1976/77 a 2014/15 de Grãos, 2001 a 2014 de Café, 2005/06 a 2014/15 de Cana-de-Açúcar**. 2015. Disponível em: <<http://www.conab.gov.br/conteudos.php?a=1252&>>. Acesso em: set 2015.

CORN REFINERS ASSOCIATION. **Brochures - Tapping the Treasure**. 2011. Disponível em: < <http://www.corn.org/wp-content/uploads/2009/12/Tapping.pdf> >. Acesso em: 7 mai 2014.

DIAS, F.P.M. et al. Biomassa Vegetal, estoques de carbono e Macronutrientes de Adubos Verdes Usados na Produção Orgânica de Abacaxi na Chapada Diamantina, BA. In: Congresso Brasileiro de Ciência do Solo, 34., Florianópolis, 2 de agosto de 2013, **Anais...** Florianópolis: ago.2013.

DIAS, M. O. S. et al. Improving bioethanol production from sugarcane: evaluation of distillation, thermal integration and cogeneration systems. **Energy**, v. 36, n. 6, p. 3691-3703, jun.2011.

DÍAZ, M.A.D.; CARVALHO, V.C.H.A.; GOMES, M.S.P. Análise do Ciclo de Vida e Balanço Energético do Etanol da Cana-de-Açúcar Brasileira. In: Congresso Nacional de Engenharia Mecânica, 6., **Anais...** 2010, Campina Grande.

DÖHNE, Daniel Georg. ***Sorghum bicolor* (Moench), grain type panicle, in a field in Saxony-Anhalt, Germany**. 13 set 2008. Disponível em: <https://commons.wikimedia.org/wiki/File%3ASorghum_bicolor.JPG>.

DONKE, A.C.G. et al. Energo and exergo-environmental analysis of a multipurpose process for ethanol production from sugarcane and corn. In: INTERNATIONAL EXERGY, LIFE CYCLE ASSESSMENT, AND SUSTAINABILITY WORKSHOP & SYMPOSIUM, 3., 2013, Nisyros. **Proceedings...** Nisyros: COST, 2013, p. 437-448.

EGGEMAN, T.; VERSER, D. The importance of Utility Systems in Today's Biorefineries and a Vision for Tomorrow. **Applied Biochemistry and Biotechnology**, v.130, n.1, p. 361-381, mar.2006.

_____. **Balanço Energético Nacional 2013: Ano base 2012**. Rio de Janeiro: EPE: 2013. 288 p.

_____. **Balanço Energético Nacional 2014: Ano base 2013**. Rio de Janeiro: EPE: 2014. 288 p.

ESTADO DE MATO GROSSO. Lei Estadual nº 8.817, de 15 de janeiro de 2008. Dispõe sobre a eliminação gradativa da queima da palha da cana-de-açúcar e dá outras providências. **Diário Oficial do Estado de Mato Grosso**, Cuiabá, MT, 15 jan 2008, p. 30.

FERREIRA, A.S. et al. Alterações de Atributos Químicos e Biológicos de Solo e Rendimento de Milho e Soja pela Utilização de Resíduos de Curtume e Carbonífero. **Revista Brasileiro de Ciências do Solo**, v.27, n.4, p. 755-763, jul/ago.2003.

FLURY, K. et al. **Recommendation for Life Cycle Inventory Analysis for Water Use and Consumption – Working Paper**. Zürich: ESU-services Ltd., fair consulting in sustainability, 16p., out.2012.

FOOD AND AGRICULTURE ORGANIZATION OF UNITED NATIONS STATISTICS DIVISION. **FAOSTAT**. 2015. Disponível em: < <http://faostat3.fao.org/faostat-gateway/go/to/home/E> >. Acesso em: set 2015.

GARBIATE, M.V. et al. Erosão entre sulcus em área cultivada com cana crua e queimada sob colheita manual e mecanizada. **Revista Brasileira de Ciências do Solo**, v.35, n. 6, p. 2145-2155, nov/dez .2011.

GARCIA, J.C.C.; SPERLING, E.V. 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, jul-set.2010.

GIL, A. C. **Métodos e Técnicas de Pesquisa Social**. 5ª. São Paulo: Editora Atlas S.A., 1999. 206p.

GOEDKOOOP M.J. et al. **ReCiPe 2008, A life cycle impact assessment method which comprises harmonised category indicators at the midpoint and the endpoint level. Report I: Characterisation**, 1ª edição (revisada), jul.2012. Disponível em: <<http://www.lcia-recipe.net/publications>>.

GOLDEMBERG, J. The Brazilian biofuels industry. **Biotechnology for Biofuels**, v.1:6, p.1-7, mai.2008.

GOLDEMBERG, J.; COELHO, S.T.; GUARDABASSI, P. The sustainability of ethanol production from sugarcane. **Energy Policy**, v.36, n.6, p.2086-2097, jun.2008.

GOMES, Jorge Fernando Fávaro. **Produção de colmos e exportação de macronutrientes primários por cultivares de cana-de-açúcar (*Saccharum* spp.)**. 2003. 65p. Dissertação (Mestrado em Agronomia) - Programa de Pós-Graduação em Solos e Nutrição de Plantas, Escola Superior de Agricultura "Luiz de Queiroz", Universidade de São Paulo, Piracicaba, 2011.

GRANDA, C.B.; ZHU, L.; HOLTZAPPLE, M.T. Sustainable Liquid Biofuels and Their Environmental Impacts. **Environmental Progress**, v.26, n.3, p.233-250, out.2007.

GUERRA, J. P. M. et al. Comparative analysis of electricity cogeneration scenarios in sugarcane production by LCA. **International Journal of Life Cycle Assessment**, v. 19, n. 4, p. 814-825, abr.2014.

HAMMERSCHLAG, R. Ethanol's Energy Return on Investment: A Survey of the Literature 1990-Present. **Environmental Science & Technology**, v.40, n.6, p. 1744-1750, fev.2006.

IGLESIAS, C.; SESMERO, J.P. Economic Analysis of Supplementing Sugarcane with Corn for Ethanol Production in Brazil: A Case Study in Uberaba. **Bioenergy Resource**, v.8, p. 627-643, 2015.

INSTITUTO BRASILEIRO DE GEOGRAFIA E ESTATÍSTICA. **Censo Agropecuário 1995-1996 - Número 24 - Mato Grosso**. Rio de Janeiro: IBGE, 1997.

_____. **Indicadores IBGE: Estatística da Produção Agrícola - Outubro de 2013** 2013a.

_____. **Lavoura Temporária 2013**. In: **IBGE Estados MATO GROSSO**, 2013b. Disponível em: <<http://www.ibge.gov.br/estadosat/index.php>>. Acessado em: abr 2015.

INSTITUTO MATO-GROSSENSE DE ECONOMIA AGROPECUÁRIA. **Agronegócio no Brasil e em Mato Grosso**. 2014. Disponível em: <http://www.imea.com.br/site/upload/pdf/arquivos/R405_Apresentacao_MT_Portugues_Nova_26_11_2014.pdf>. Acesso em: abr 2015.

_____. **Boletim Semanal Milho-Análise N°264, 02 de julho de 2013**. 2013a. Disponível em: <<http://www.imea.com.br/site/publicacoes.php?categoria=3&subcategoria=2>>.

_____. **Boletim Semanal Soja-Análise N°245, 22 de março de 2013**. 2013b. Disponível em: <<http://www.imea.com.br/site/publicacoes.php?categoria=3&subcategoria=2>>.

INTERGOVERNMENTAL PANEL ON CLIMATE CHANGES (IPCC). Guidelines for National Greenhouse Gas Inventories, Prepared by the National Greenhouse Gas Inventories Programme. Hayana, Japan: IGES, 2006. Disponível em: <<http://www.ipcc-nggip.iges.or.jp/public/2006gl/>>.

JUNGBLUTH, N.; FRISCHKNECHT, R. Cumulative Energy Demand. In: HISCHIER, R.; WEIDEMA, B. (Ed.) **Implementation of Life Cycle Impact Assessment Methods**. Ecoinvent report No. 3, v.2.1, St Gallen: mai.2009.

KIM, S.; DALE, B.E. Life cycle assessment of various cropping systems utilized for producing biofuels: Bioethanol and biodiesel. **Biomass & Bioenergy**, v. 29, n.6, p. 426-439, dez.2005.

KULAY, L. A.; SEO, E. S. M. Orientações conceituais para elaboração de inventários de ciclo de vida. **INTERFACEHS – Revista de Gestão Integrada em Saúde do Trabalho e Meio Ambiente**, v. 5, n. 1, 2010.

MACEDO, I.C. (Org.) **A Energia da Cana-de-Açúcar: Doze estudos sobre a agroindústria da cana-de-açúcar no Brasil e sua sustentabilidade**. 2ª edição, São Paulo: Berlendis & Vertecchia: UNICA – União da Agroindústria Canavieira do Estado de São Paulo, 2007.

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 and Bioenergy**, v.32, n.7, p. 582-595, jul.2008.

MALÇA, J.; FREIRE, F. Renewability and life-cycle energy efficiency of bioethanol and bio-ethyl tertiary butyl ether (bioETBE): Assessing the implications of allocation. **Energy**, v.31, n.15, p. 3362-3380, dez.2006.

MARQUES, T.A. et al. Queima do canavial: aspectos sobre a biomassa vegetal, fertilidade do solo e emissão de CO₂ para atmosfera. **Bioscience Journal**, v.25, n.1, p. 83-89, jan/fev.2009.

MCALOON, A. et al. **Determining the Cost of Producing Ethanol from Corn Starch and Lignocellulosic Feedstocks**. NREL – National Renewable Energy Laboratory, out.2000. Disponível em: <<http://www.doe.gov/bridge>>.

MENEZES, C.B. (Editor). **Documentos 176: Sorgo Granífero: Estenda sua Safrinha com Segurança**. Sete Lagoas: Embrapa Milho e Sorgo, 2015. 102p. Documentos / Embrapa Milho e Sorgo, ISSN 1518- 4277; 176.

MENEZES, T. J. D. B. **Etanol, o combustível do Brasil**. São Paulo: Ed. Agronômica Ceres, 1980. 223p.

MILANEZ, A.Y. et al. A produção de etanol pela integração do milho-safrinha às usinas de cana-de-açúcar: avaliação ambiental, econômica e sugestões de política. **Revista do BNDES**, v.41, n.1, p. 147-208, jun.2014.

MIRANDA, R.A.; LÍCIO, A.M.A. (Editores). **Documentos 168: Diagnóstico dos Problemas e Potencialidades da Cadeia Produtiva do Milho no Brasil**. Sete Lagoas: Embrapa Milho e Sorgo, 2014. 102p. Documentos / Embrapa Milho e Sorgo, ISSN 1518-4277; 168.

MUÑOZ, I. et al. Life cycle assessment of bio-based ethanol produced from different agricultural feedstocks. **International Journal of Life Cycle Assessment**, v.19, n.1, p. 109-119, jan.2014.

NAVEZ, B. **Canes of Saccharum officinarum os Réunionisland**. 5 set 2007. Disponível em: <https://commons.wikimedia.org/wiki/File%3ASaccharum_officinarum_red_canes.JPG>.

NEMECEK, T.; KÄGLI, T. **Life Cycle Inventories of Agricultural Production Systems**. Ecoinvent Report v.2.0, n.15. Zürich and Dübendorf: Agroscope Reckenholz-Tänikon Research Station ART, Swiss Centre for Life Cycle Inventories, 2007.

NEMECEK, T.; SCHNETZER, J. **Methods of assessment of direct field emissions for LCIs of agricultural production systems**. Data v.3.0. Zürich: Agroscope Reckenholz-Tänikon Research Station ART, ago.2011.

NEMECEK, T.; SCHNETZER, J.; REINHARD, J. Updated and harmonised greenhouse gas emissions for crop inventories. **International Journal of Life Cycle Assessment**, The Ecoinvent Database V3, p. 1-18, fev.2014.

NOGUEIRA, Alex Rodrigues. **Modelagem de Sistemas de Produto em Estudos de ACV Abrangendo o Reaproveitamento de Rejeitos**. 2012. 86 p. Dissertação (Mestrado em Engenharia) – Programa de Pós-Graduação em Engenharia Química, Departamento de Engenharia Química, Escola Politécnica, Universidade de São Paulo, São Paulo, 2012.

NOGUEIRA, A.R. et al. Use of Environmental and Thermodynamic Indicators to Assess the Performance of an Integrated Process for Ethanol Production. **Environmental and Natural Resources Research**, v.4, n.4, p. 59-74, set.2014.

NOGUEIRA, L. A. H.; COSTA, J. C. **Opções tecnológicas em energia: uma visão brasileira**: Fundação Brasileira para o Desenvolvimento Sustentável: 51p. 2012.

NOVAIS, R.F.; SMYTH, T.J. **Fósforo em solo e planta em condições tropicais**. Viçosa: Universidade de Viçosa, 1999, 399p.

PALACIO, José Carlos Escobar. **Análise Termoeconômica Integrada das Plantas de Cogeração e Etanol em uma Destilaria Autônoma**. 2010. 286 p. Tese (Doutorado em Engenharia Mecânica) – Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica, Instituto de Engenharia Mecânica, Universidade Federal de Itajubá, Itajubá, 2010.

PAVINATO, Aurélio. **Teores de carbono e nitrogênio do solo e produtividade de milho afetados por sistemas de culturas**. 1993. 122p. Dissertação (Mestrado em Ciência do Solo) – Programa de Pós-Graduação em Agronomia - Ciências do Solo, Faculdade de Agronomia, Universidade federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 1993.

PEREIRA FILHO, I.A. (Editor). **Sistema de Produção Cultivo do Milho**. Embrapa Milho e Sorgo. Versão Eletrônica. 9ª edição, nov.2015.

PEREIRA JUNIOR, N., BON, E. P. D. S. & FERRARA, M. A. **Tecnologia de Bioprocessos**. Rio de Janeiro: Escola de Química - UFRJ, 2008.

PIERAGOSTINI, C.; AGUIRRE, P.; MUSSATI, M.C. Life cycle assessment of corn-based ethanol production in Argentina. **Science of the Total Environment**, v.472, n.15, p. 212-225, fev.2014.

PIMENTEL, D.; PATZEK, T. W. Ethanol Production Using Corn, Switchgrass, and Wood; Biodiesel Production Using Soybean and Sunflower. **Natural Resources Research**, v. 14, n. 1, p. 65-76, mar.2005.

PITTELKOW, F.K. et al. Produção de biomassa e acúmulo de nutrientes em plantas de cobertura sob diferentes sistemas de preparo do solo, **Revista Agrarian**, v.5, n.17, p. 212-222, jul.2012.

PORTAL MATO GROSSO. Campos de Julio – Geografia. 29 jul 2008. Disponível em: <<http://www.mtseusmunicipios.com.br/municipios/campos-de-julio/geografia/731>>. Acesso em: jul 2015.

RANGEL, O.J.P. et al. Efeito de aplicações de lodos de esgoto sobre os teores de metais pesados em folhas e grãos de milho. **Revista Brasileira de Ciências do Solo**, v.30, n.3, p. 583-594, mai/jun.2006.

RESENDE, A.V. et al. **Circular Técnica 119: Adubação maximiza o potencial produtivo do sorgo**. Sete Lagoas: Ministério da Agricultura, Pecuária e Abastecimento, Embrapa, 8p, dez.2009.

REVOREDO, M.D.; MELO, W.J. Disponibilidade de níquel em solo tratado com lodo de esgoto e cultivado com sorgo. **Bragantia**, v.65, n.4, p. 679-685, 2006.

RODRIGUES, J.A.S (Editor). **Sistemas de Produção: Cultivo do Sorgo**. Embrapa Milho e Sorgo. Versão Eletrônica. 4ª edição, set.2008. ISSN 1679-012X

_____. **Sistemas de Produção: Cultivo do Sorgo**. Embrapa Milho e Sorgo. Versão Eletrônica. 8ª edição, out.2012. ISSN 1679-012X

SALLA, D.A.; CABELLO, C. Análise Energética de Sistemas de Produção de Etanol de Mandioca, Cana-de-Açúcar e Milho. **Revista Energia na Agricultura, Botucatu**, v.25, n.2, p.32-53, 2010.

SEABRA, J.E.A. et al. Life cycle assessment of Brazilian sugarcane products: GHG emissions and energy use. **Biofuels, Bioproducts & Biorefining**, v.5, n.5, p. 519-532, out.2011.

SHAPOURI, H.; DUFFIELD, J. A.; WANG, M. **The Energy Balance of Corn Ethanol: An Update**. Agriculture Economic Report 813. Washington, DC: US Department of Agriculture, Office of the Chief Economist, Office of Energy Policy and New Uses, 2002, 16 p.

SHAPOURI, H.; GALLAGHER, P. **USDA's 2002 Ethanol Cost-of-Production Survey**. Agriculture Economic Report 841. Washington, DC: Office of Energy Policy and New Uses, US Department of Agriculture, jul.2005, 19 p.

SILVA, G. A.; KULAY, L. A. Avaliação do Ciclo de Vida. In: VILELA, A. e DEMAJOROVIC, J. (Ed.). **Modelos e ferramentas de gestão ambiental: desafios e perspectivas para as organizações**. São Paulo: Editora SENAC, 2006.

SINDALCOOL – MT. **Setor Sucroenergético: O Setor no Mato Grosso**. 2011. Disponível em: <http://www.sindalcool-mt.com.br/setor.php?texto=casasindalcool_setor_3setor_mt>. Acessado em: 20 mai 2016.

SINGH, V. **Corn Fraction for Dry Grind Ethanol Production**. Near-term Opportunities for Biorefineries Symposium I-Hotel and Conference Center, Champaign, IL. 11-12 out 2010.

SOBRINHO, P. **Mato Grosso – Processo (simplificado) de produção de Etanol de Milho – Destilaria/Usina Flex – Abordagem Descritiva de um Novo Potencial**: relatório técnico. Cuiabá: CONAB – Superintendência regional de Mato Grosso, 2012, 9 p.

SUGAWARA, Eduardo Toshio. **Comparação dos Desempenhos Ambientais do B5 Etílico de Soja e do Óleo Diesel, por meio da Avaliação do Ciclo de Vida (ACV)**. 2012. 238 p. Dissertação (Mestrado em Engenharia) – Programa de Pós-Graduação em Engenharia Química, Departamento de Engenharia Química, Escola Politécnica, Universidade de São Paulo, São Paulo, 2012.

TOMAZ, P.A. et al. Determinação de minerais em diferentes cultivares de sorgo (*Sorghum bicolor*). In: Simpósio de Iniciação Científica, 19. **Resumos**. Viçosa: Universidade Federal de Viçosa, 2009.

TRIVELIN, P.C.O.; FRANCO, H.C.J. Balanço de nitrogênio de fertilizantes e a sustentabilidade de agrossistemas: o estado da arte e necessidade de pesquisas. In: Congresso Brasileiro de Ciência do Solo, 32., 2009, Fortaleza. **ANAIS: O Solo e a Produção de Bionergia Perspectivas e Desafios**. Fortaleza: SBSC-UFC, 2009, p.1-14.

TUBS. **Location of state of Mato Grosso In Brazil**. 18 out 2011. Disponível em: <https://commons.wikimedia.org/wiki/File%3AMato_Grosso_in_Brazil.svg>.

TURCO, Giselle Maria Seleme. **Produção e composição Física da Planta de Milho para Silagem, Cultivado em dois níveis de adubação, dois espaçamentos entre linhas e duas densidades de plantio**. 2011. 65 p. Dissertação (Mestrado) – Programa de Pós-Graduação em Agronomia, área de concentração em Produção Vegetal, Universidade Estadual do Centro-Oeste, Guarapuava, 2011.

UNITED NATIONS FOR ENVIRONMENT PROGRAMME. **Why take a life cycle approach?** ISBN: 92-807-24500-9. 2004.

VITTI, G.C. et al. **Nutrição e Adubação da Cana-de-Açúcar**. Palestra apresentada a equipe técnica da Stoller, Bebedouro, SP, 2 fev 2005.

WANG, D. et al. Grain sorghum is a viable feedstock for ethanol production. **Journal of Industrial Microbiology & Biotechnology**, v.35, n.5, p.313-320, mai.2008.

WANG, M.; WU, M.; HUO H. Life-cycle energy and greenhouse gas emission impacts of different corn ethanol plant types. **Environmental Research Letters**, v.2, n.2, p. 1-13, mai.2007.

ZELL, H. **Zea mays, Poacea, Maize, infrutescence. Karlsruhe, Germnay**. 12 set 2010. Disponível em: < https://commons.wikimedia.org/wiki/File%3AZea_mays_004.JPG>.

12 APÊNDICE A - INVENTÁRIO DO CICLO DE VIDA DA PRODUÇÃO DE ETANOL HIDRATADO DE CANA-DE-AÇÚCAR

Entradas/Saídas	unidade	quantidade
Produtos		
Hydrate sugarcane ethanol (95% ww), to storage / BR NO	m ³	1,00E+00
Fusel oil, to storage/BR NO	kg	2,40E+01
Bagasse at milling, surplus/BR NO	kg	5,63E+02
Entradas da Natureza		
Carbon dioxide, in air	kg	6,13E+03
Water, well, in ground	kg	2,26E+04
Transformation, from arable, non-irrigated, extensive	m ²	4,18E+02
Transformation, from arable, non-irrigated	m ²	1,20E+03
Transformation, from pasture and meadow, extensive	m ²	0,00E+00
Transformation, from forest	m ²	0,00E+00
Transformation, to arable, irrigated, extensive	m ²	1,61E+03
Occupation, arable, irrigated	m ² .a	1,48E+03
Trinexapac-ethy	kg	2,59E-03
Sulfometuron metil	kg	1,95E-04
Etefon	kg	9,68E-03
Cobalt	kg	4,14E-05
Molybdenum	kg	1,66E-04
Entradas da Tecnosfera		
Urea, as N, at regional storehouse - BR	kg	5,76E+00
Triple superphosphate, as P ₂ O ₅ , at regional storehouse - BR	kg	5,55E+00
Potassium chloride, as K ₂ O, at regional storehouse - BR	kg	7,87E+00
Limestone, milled, loose, at plant - BR	kg	8,52E+01
Gypsum, mineral, at mine - BR	kg	1,73E+01
Glyphosate, at regional storehouse - BR	kg	5,20E-02
Herbicides, at regional storehouse - BR	kg	7,86E-02
2,4-D, at regional storehouse - BR U	kg	3,66E-02
Propylene glycol, liquid, at plant - BR U	kg	3,28E-04
Pyridine-compounds, at regional storehouse - BR U	kg	7,41E-03
Fungicides, at regional storehouse - BR U	kg	4,62E-03
Triazine-compounds, at regional storehouse - BR U	kg	7,41E-03
Cyclic N-compounds, at regional storehouse/RER U	kg	2,96E-02
Diuron, at regional storehouse - BR	kg	8,56E-03
Triazine-compounds, at regional storehouse - BR U	kg	8,56E-03
Insecticides, at regional storehouse - BR	kg	1,17E-02
Diesel, at refinery/BR	L	7,78E+00
Hydrate ethanol (95% ww), to storage / BR NO	kg	1,61E-01
Transport, lorry 7.5-16t, EURO3/RER U	t.km	1,93E+01
Transport, lorry 16-32t, EURO4/RER U	t.km	8,48E-01

water transportation, at pipeline/BR U	t.km	2,26E+00
--	------	----------

Emissões para a Atmosfera

Water	kg	6,00E+03
Carbon dioxide, fossil	kg	2,99E+01
Carbon dioxide, biogenic	kg	3,80E+03
Carbon dioxide, land transformation	kg	6,56E+01
Dinitrogen monoxide	kg	4,35E-01
Nitrogen oxides	kg	6,32E+00
Ammonia	kg	2,32E+00
NMVOC, non-methane volatile organic compounds, unspecified origin	kg	1,27E+00
Carbon monoxide, fossil	kg	3,58E-02
Carbon monoxide, biogenic	kg	2,29E+02
Sulfur dioxide	kg	6,70E-03
Sulfur oxides	kg	5,58E-01
Nitrogen dioxide	kg	7,18E-03
Methane, fossil	kg	8,56E-04
Methane, biogenic	kg	4,52E+00
Benzene	kg	4,85E-05
Cadmium	kg	6,64E-08
Chromium	kg	3,32E-07
Copper	kg	1,13E-05
Nickel	kg	4,65E-07
Zinc	kg	6,64E-06
Benzopyrene, methyl-	kg	1,99E-07
Selenium	kg	6,64E-08
Benz[a]anthracene,12-methyl-	kg	5,31E-07
Benzo(a)fluoranthene	kg	3,32E-07
Cresol	kg	1,33E-06
Dibenz(a,h)anthracene	kg	6,64E-08
Fluoranthene	kg	2,99E-06
Phenanthrene	kg	1,66E-05
VOC, volatile organic compounds	kg	9,76E+00
Particulates, < 2.5 um	kg	5,44E+00
Particulates, < 10 um	kg	3,36E+01
Ethanol	kg	1,73E+00

Emissões para a Água

Phosphorus	kg	7,70E-01
Cadmium	kg	3,03E-08
Nickel	kg	3,50E-08
Chromium	kg	2,48E-07

Emissões para o Solo

Cadmium	kg	3,03E-04
Nickel	kg	3,50E-04

Chromium	kg	2,48E-03
Glyphosate	kg	5,20E-02
Imazapic	kg	3,89E-03
2,4-D	kg	3,66E-02
Florasulam	kg	1,83E-04
Propylene glycol	kg	3,28E-04
Fipronil	kg	7,41E-03
Pyraclostrobin (prop)	kg	4,62E-03
Sulfentrazone	kg	3,39E-02
Hexazinone	kg	7,41E-03
Clomazone	kg	2,96E-02
Triazoxid	kg	3,39E-02
Isoxaben	kg	3,11E-03
Diuron	kg	8,56E-03
Triazine, 1,3,5-	kg	8,56E-03
Mesotrione	kg	8,56E-03
Pesticides, unspecified	kg	1,09E-02
Triflumuron	kg	7,47E-04
Trinexapac-ethyl	kg	2,59E-03
Sulfometuron methyl	kg	1,95E-04
Ethephon	kg	9,68E-03

13 APÊNDICE B – INVENTÁRIO DO CICLO DE VIDA DA PRODUÇÃO DE ETANOL HIDRATADO DE MILHO

Entradas/Saídas	unidade	quantidade
Produtos		
Hydrate corn ethanol (95% ww), to storage / BR* NO	m ³	1,00E+00
Fusel oil, to storage/BR* NO	kg	3,02E+01
DDGS, to storehouse/BR* NO	kg	6,09E-01
Entradas da Natureza		
Water, well, in ground	kg	1,43E+04
Carbon dioxide, in air	kg	8,83E+03
Transformation, from arable, non-irrigated, extensive	m ²	1,64E+02
Transformation, from arable, non-irrigated	m ²	4,88E+01
Transformation, from pasture and meadow, extensive	m ²	0,00E+00
Transformation, from forest	m ²	5,62E+02
Transformation, to arable, irrigated, extensive	m ²	7,75E+02
Occupation, arable, irrigated	m ² a	1,67E+03
Entradas da Tecnosfera		
Maize seed organic, at farm/CH U	kg	4,62E+00
Urea, as N, at regional storehouse - BR	kg	3,46E+01
Triple superphosphate, as P ₂ O ₅ , at regional storehouse - BR	kg	1,77E+01
Potassium chloride, as K ₂ O, at regional storehouse - BR	kg	1,77E+01
Limestone, milled, loose, at plant - BR	kg	7,39E+01
Glyphosate, at regional storehouse - BR	kg	1,08E+00
Atrazine, at regional storehouse - BR U	kg	5,92E-01
Insecticides, at regional storehouse - BR	kg	2,28E-02
Pyretroid-compounds, at regional storehouse - BR U	kg	6,78E-03
Organophosphorus-compounds, at regional storehouse - BR U	kg	5,59E-02
Cyclic N-compounds, at regional storehouse - BR U	kg	1,38E-02
Fungicides, at regional storehouse - BR U	kg	3,68E-02
yeast, to fermentation/BR* NO	kg	2,95E-01
Wood chips, from industry, hardwood, burned in furnace 300kW/BR* NO	kg	1,85E+03
Diesel, at refinery/BR	L	1,78E+01
Electricity, diesel, at power plant/BR U	kWh	2,45E+00
Vinasse + ashes, at transportation/BR* NO	kg	7,66E+03
Transport, lorry 16-32t, EURO4/RER U	tkm	3,03E+00
Transport, lorry 7.5-16t, EURO3/RER U	tkm	1,37E+01
water transportation, at pipeline/BR U	tkm	1,43E+00
Emissões para a Atmosfera		
Water	kg	7,13E+03
Carbon dioxide, fossil	kg	1,02E+02
Carbon dioxide, land transformation	kg	7,19E+02
Carbon dioxide, biogenic	kg	3,34E+03

Dinitrogen monoxide	kg	1,16E+00
Nitrogen oxides	kg	3,07E+00
Ammonia	kg	6,97E+00
NMVOC, non-methane volatile organic compounds, unspecified origin	kg	1,15E+00
Carbon monoxide, fossil	kg	8,08E-02
Carbon monoxide, biogenic	kg	8,84E+01
Sulfur dioxide	kg	1,51E-02
Methane, fossil	kg	1,93E-03
Methane, biogenic	kg	6,63E-01
Particulates, < 10 um (stationary)	kg	6,88E-05
Benzene	kg	1,09E-04
Cadmium	kg	1,49E-07
Chromium	kg	7,47E-07
Copper	kg	2,54E-05
Nickel	kg	1,05E-06
Zinc	kg	1,49E-05
Benzopyrene, methyl-	kg	4,48E-07
Selenium	kg	1,49E-07
Benz[a]anthracene, 12-methyl-	kg	1,20E-06
Benzo(a)fluoranthene	kg	7,47E-07
Cresol	kg	2,99E-06
Dibenz(a,h)anthracene	kg	1,49E-07
Fluoranthene	kg	6,72E-06
Phenanthrene	kg	3,73E-05
Ethanol	kg	1,70E+00

Emissões para a Água

Phosphorus	kg	6,78E-02
Cadmium	kg	8,94E-08
Chromium	kg	4,59E-07

Emissões para o Solo

Cadmium	kg	8,94E-04
Chromium	kg	4,59E-03
Glyphosate	kg	1,08E+00
Atrazine	kg	5,92E-01
Triasulfuron	kg	8,63E-03
Lambda-cyhalothrin	kg	6,78E-03
Lufenuron	kg	5,31E-03
Propiconazole	kg	5,59E-02
Diflubenzuron	kg	8,85E-03
Epoxiconazole	kg	1,38E-02
Pyraclostrobin (prop)	kg	3,68E-02

14 APÊNDICE C – INVENTÁRIO DO CICLO DE VIDA DA PRODUÇÃO DE ETANOL HIDRATADO DE SORGO

Entradas/Saídas	unidade	quantidade
Produtos		
Hydrate ethanol from sorghum (95% ww), to storage / BR** NO	m ³	1,00E+00
Fusel oil, to storage/BR** NO	kg	2,39E+01
DDGS, to storehouse/BR** NO	kg	6,35E-01
Entradas da Natureza		
Water, well, in ground	m ³	1,46E+01
Carbon dioxide, in air	kg	6,75E+03
Transformation, from arable, non-irrigated, extensive	m ²	1,61E+01
Transformation, from arable, non-irrigated	m ²	4,80E+00
Transformation, from pasture and meadow, extensive	m ²	0,00E+00
Transformation, from forest	m ²	5,51E+01
Transformation, to arable, irrigated, extensive	m ²	7,59E+01
Occupation, arable, irrigated	m ² .a	2,72E+03
Entradas da Tecnosfera		
Urea, as N, at regional storehouse - BR	kg	1,40E+01
Limestone, milled, loose, at plant - BR	kg	1,56E+02
Maize seed organic, at farm/CH U	kg	5,90E+00
Glyphosate, at regional storehouse - BR	kg	1,04E+00
Atrazine, at regional storehouse - BR U	kg	9,88E-01
Insecticides, at regional storehouse - BR	kg	2,01E-02
Pyretroid-compounds, at regional storehouse - BR U	kg	1,58E-02
yeast, to fermentation/BR** NO	kg	3,01E-01
Diesel, at refinery/BR	L	2,19E+01
Electricity, diesel, at power plant/BR U	kWh	3,33E+00
Wood chips, from industry, hardwood, burned in furnace 300kW/BR** NO	kg	1,95E+03
Transport, lorry 16-32t, EURO4/RER U	tkm	3,13E+00
Transport, lorry 7.5-16t, EURO3/RER U	tkm	6,22E+00
water transportation, at pipeline/BR U	tkm	1,46E+00
Emissões para a Atmosfera		
Water	kg	7,20E+03
Carbon dioxide, fossil	kg	8,07E+01
Carbon dioxide, land transformation	kg	7,00E+01
Carbon dioxide, biogenic	kg	3,34E+03
Dinitrogen monoxide	kg	1,06E+00
Nitrogen oxides	kg	3,25E+00
Ammonia	kg	3,33E+00
NMVOC, non-methane volatile organic compounds, unspecified origin	kg	1,18E+00

Carbon monoxide, fossil	kg	1,01E-01
Carbon monoxide, biogenic	kg	9,02E+01
Sulfur dioxide	kg	1,89E-02
Methane, fossil	kg	2,41E-03
Methane, biogenic	kg	6,77E-01
Particulates, < 10 um (stationary)	kg	7,02E-05
Benzene	kg	1,37E-04
Cadmium	kg	1,87E-07
Chromium	kg	9,34E-07
Copper	kg	3,19E-05
Nickel	kg	1,31E-06
Zinc	kg	1,87E-05
Benzopyrene, methyl-	kg	5,62E-07
Selenium	kg	1,87E-07
Benz[a]anthracene, 12-methyl-	kg	1,50E-06
Benzo(a)fluoranthene	kg	9,34E-07
Cresol	kg	3,73E-06
Dibenz(a,h)anthracene	kg	1,87E-07
Fluoranthene	kg	8,41E-06
Phenanthrene	kg	4,69E-05
Ethanol	kg	1,70E+00

Emissões para a Água

Cadmium	kg	4,66E-11
Copper	kg	7,57E-08
Zinc	kg	8,67E-08
Lead	kg	1,01E-09
Chromium	kg	1,48E-07

Emissões para o Solo

Cadmium	kg	4,66E-07
Copper	kg	7,57E-04
Zinc	kg	8,67E-04
Lead	kg	1,01E-05
Chromium	kg	1,48E-03
Glyphosate	kg	1,04E+00
Atrazine	kg	9,88E-01
Thiamethoxam	kg	2,01E-02
Lambda-cyhalothrin	kg	1,58E-02
Lufenuron	kg	5,31E-03
Propiconazole	kg	5,59E-02
Diflubenzuron	kg	8,85E-03
Epoxiconazole	kg	1,38E-02
Pyraclostrobin (prop)	kg	3,68E-02