



UNIVERSIDADE ESTADUAL DE CAMPINAS
FACULDADE DE ENGENHARIA AGRÍCOLA

CINDY JOHANNA SARMIENTO ARDILA

**AVALIAÇÃO TÉCNICO-ECONÔMICA E AMBIENTAL DA
PRODUÇÃO DE ETANOL DE CANA-DE-AÇÚCAR NA
REGIÃO DO “VALLE DEL RÍO CAUCA”, COLÔMBIA.**

CAMPINAS

2016

CINDY JOHANNA SARMIENTO ARDILA

**AVALIAÇÃO TÉCNICO-ECONÔMICA E AMBIENTAL DA
PRODUÇÃO DE ETANOL DE CANA-DE-AÇÚCAR NA
REGIÃO DO “VALLE DEL RÍO CAUCA”, COLÔMBIA.**

Dissertação apresentada à Faculdade de Engenharia Agrícola da Universidade Estadual de Campinas como parte dos requisitos exigidos para a obtenção do título de Mestra em Engenharia Agrícola, na Área de Concentração Construções Rurais e Ambiente.

Orientador: Prof. Dr. Luis Augusto Barbosa Cortez

Coorientador: Prof. Dr. Manoel Regis Lima Verde Leal

ESTE EXEMPLAR CORRESPONDE À VERSÃO FINAL DA DISSERTAÇÃO DEFENDIDA PELA ALUNA CINDY JOHANNA SARMIENTO ARDILA, E ORIENTADA PELO PROF. DR. LUIS AUGUSTO BARBOSA CORTEZ.

CAMPINAS

2016

Agência(s) de fomento e nº(s) de processo(s): CAPES

Ficha catalográfica
Universidade Estadual de Campinas
Biblioteca da Área de Engenharia e Arquitetura
Elizangela Aparecida dos Santos Souza - CRB 8/8098

Sa74a Sarmiento Ardila, Cindy Johanna, 1988-
Avaliação técnico-econômica e ambiental da produção de etanol de cana-de-açúcar na região do "Valle del Río Cauca", Colômbia / Cindy Johanna Sarmiento Ardila. – Campinas, SP : [s.n.], 2016.

Orientador: Luis Augusto Barbosa Cortez.
Coorientador: Manoel Regis Lima Verde Leal.
Dissertação (mestrado) – Universidade Estadual de Campinas, Faculdade de Engenharia Agrícola.

1. Etanol 2G. 2. Avaliação do ciclo de vida. 3. Carvão - Combustão. 4. Mitigação de gases de efeito estufa. 5. Taxa interna de retorno. I. Cortez, Luis Augusto Barbosa, 1957-. II. Leal, Manoel Regis Lima Verde. III. Universidade Estadual de Campinas. Faculdade de Engenharia Agrícola. IV. Título.

Informações para Biblioteca Digital

Título em outro idioma: Technical-economic and environmental assessment of ethanol production from sugarcane in the Cauca River Valley region, Colombia

Palavras-chave em inglês:

Ethanol 2G

Life cycle assessment

Coal - Combustion

GHG mitigation

Rate of return

Área de concentração: Construções Rurais e Ambiente

Titulação: Mestra em Engenharia Agrícola

Banca examinadora:

Luis Augusto Barbosa Cortez [Orientador]

Manoel Regis Lima Verde Leal

Joaquim Eugênio Abel Seabra

Antonio Maria Francisco Luiz José Bonomi

Data de defesa: 24-02-2016

Programa de Pós-Graduação: Engenharia Agrícola

Este exemplar corresponde à redação final da **Dissertação de Mestrado** defendida por **Cindy Johanna Sarmiento Ardila**, aprovada pela Comissão Julgadora em 24 de fevereiro de 2016, na Faculdade de Engenharia Agrícola da Universidade Estadual de Campinas.

FEAGRI

Dr. Manoel Regis Lima Verde Leal – Presidente e Coorientador
NIPE/UNICAMP

Dr. Antonio Maria Francisco Luiz José Bonomi – Membro Titular
CTBE/Campinas

Prof. Dr. Joaquim Eugênio Abel Seabra – Membro Titular
FEM/UNICAMP

Faculdade de
Engenharia Agrícola
Unicamp

A Ata da defesa com as respectivas assinaturas dos membros encontra-se no processo de vida acadêmica da discente.

DEDICATÓRIA

*Dedico este trabalho à minha bela mãe, minha
inspiração constante e a razão do meu ser. Ao
meu pai, meu exemplo de perseverança.*

AGRADECIMENTOS

A minha família pela sua motivação e apoio na busca da minha formação acadêmica e pessoal. Ao meu namorado pelo apoio incondicional, pelo imenso carinho e pelos momentos juntos.

As minhas velhas e novas amizades pelos momentos agradáveis compartilhados no Brasil.

Aos professores e funcionários (Rita, Claudio e Fabio) da Faculdade de Engenharia Agrícola (FEAGRI) pelo grande apoio durante meu estudo, e ao Prof. Cortez pela oportunidade oferecida para continuar meus estudos acadêmicos.

Igualmente, ao meu co-orientador o Prof. Regis pelo constante apoio, dedicação e disposição no desenvolvimento desta dissertação.

Ao Laboratório Nacional de Ciência e Tecnologia do Bioetanol (CTBE), especialmente ao programa de Avaliação Integrada de Biorrefinarias (AIB). Particularmente, a Otávio Cavalett, Mateus Chagas, Isabelle Sampaio e Thayse Hernandes pela ajuda, compreensão e constante disposição para resolver minhas dúvidas.

Ao Núcleo Interdisciplinar de Planejamento Energético (NIPE), em especial, ao Prof. Mauro Berni, João Dal Belo Leite, Klaus Dalgaard, Simone Pereira de Souza e Marcia de Jesus Rogério.

Aos membros da banca, o Prof. Antonio Bonomi e o Prof. Joaquim Seabra pelas contribuições e sugestões no desenvolvimento do projeto.

Às demais pessoas que, de alguma forma, me apoiaram e acompanharam nesta experiência e contribuíram no desenvolvimento deste trabalho.

Finalmente, à Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior (CAPES) pelo apoio financeiro.

*“Words have no power to impress the mind
without the exquisite horror of their reality”*

Edgar Allan Poe

RESUMO

No mundo, diversos países estão adotando programas com políticas energéticas que incentivam a bioenergia como fonte renovável e sustentável para diversificar a matriz energética, entre eles estão os biocombustíveis. A demanda de biocombustíveis cresceu consideravelmente nos últimos anos, de modo que os impactos relacionados com a sua intensificação se tornaram uma questão crucial.

Nesse sentido, a Colômbia adotou o programa de etanol em 2001 sendo atualmente o terceiro produtor de etanol de cana na América Latina com uma das maiores produtividades de cana do mundo. A produção de etanol de cana-de-açúcar na Colômbia está concentrada na região do Vale do Rio Cauca em seis das 13 plantas, cuja capacidade total é de 24 milhões de toneladas de cana por ano. Em 2014, a produção de etanol superou os 400 milhões de litros, suficiente para alcançar uma ordem de mistura nacional de 8% (v/v). Uma vez que o governo e o setor privado esperam um aumento significativo da produção de bioenergia no país, nos próximos anos, é necessário avaliar os impactos da produção atual e futura de etanol. Este estudo apresenta uma avaliação técnico-econômica e ambiental de três cenários para a produção de etanol de cana, utilizando a plataforma Biorrefinaria Virtual de Cana-de-açúcar (BVC), desenvolvida pelo Laboratório Nacional de Ciência e Tecnologia de Bioetanol do Brasil (CTBE). Os cenários adotados neste trabalho foram: (a) a produção de etanol atual no Vale do Rio Cauca (cenário atual), (b) o cenário atual sem queima de carvão na caldeira e, c) um cenário de produção integrada de primeira e segunda geração (1G2G) (cenário futuro). Considerou-se uma usina de açúcar com destilaria anexa para representar a configuração tecnológica atualmente utilizada na região, com produção de açúcar, etanol e eletricidade. Além disso, a cogeração foi simulada considerando uma mistura de carvão e bagaço para o cenário atual, e bagaço e palha para o cenário futuro.

Os resultados indicam que o cenário atual apresenta impactos econômicos e ambientais favoráveis em comparação com a gasolina, e ainda mais quando não ocorre combustão de carvão na caldeira. Com base nos resultados obtidos nesta pesquisa, o bagaço e a palha da cana tornam-se bons substitutos para o carvão, como biomassas a serem queimadas na caldeira. Os resultados da produção integrada

1G2G mostram que é um cenário potencial para aumentar a produção de etanol e diminuir as emissões de CO₂ eq em 60% quando comparado com o cenário atual.

Palavras-chave: Etanol de segunda geração, avaliação do ciclo de vida, mitigação de GEE, taxa interna de retorno, combustão de carvão.

ABSTRACT

Worldwide, several countries are implementing programs with energy policies that encourage bioenergy as a renewable and sustainable source to diversify the energy matrix, among them are biofuels. Demand for biofuels has grown considerably in recent years and the impacts related to its intensification have become a crucial issue.

In this regard, Colombia adopted the ethanol program since 2001 and is currently the third highest producer of sugarcane ethanol in Latin America with one of the world's largest sugarcane yields. The production of sugarcane ethanol in Colombia is concentrated in the Cauca River Valley region in 6 of the 13 plants, whose total capacity is 24 million tons of sugarcane per year. In 2014, ethanol production has exceeded 400 million liters, enough to achieve a national blending mandate of 8% (v/v). Since the government and the private sector expect a significant increase in bioenergy production in the country in the coming years, it is necessary to assess the impact of current and future ethanol production. This study presents a technical-economic and environmental assessment of three scenarios for the sugarcane ethanol production, by using the Virtual Sugarcane Biorefinery Platform (BVC), developed by the Brazilian Bioethanol Science and Technology Laboratory (CTBE). The scenarios adopted in this research were: (a) the current ethanol production in the Cauca River Valley (current scenario), (b) current scenario without coal combustion in the boiler and (c) an integrated first and second generation ethanol production (1G2G) (future scenario). It was considered an annexed distillery to the sugar plant to represent the technological configuration currently used in the region with production of sugar, ethanol and electricity. In addition, the CHP was simulated considering a mixture of coal and bagasse in the current scenario, and bagasse and straw for the future scenario.

The results indicate that the current scenario presents favorable economic and environmental impacts in comparison with gasoline and even more when there is no coal combustion in the boiler. Based on the results obtained from this study, bagasse and sugarcane straw become good substitutes for coal, as a biomass to be burned in the boiler. The results of the integrated 1G2G ethanol production showed

that it is a potential scenario for increasing the production of ethanol and decreases GHG emissions by 60% compared with the current scenario.

Key-words: Second generation ethanol, life cycle assessment, GHG mitigation, internal rate of return, coal combustion.

RESUMEN

Mundialmente varios países están adoptando programas con políticas energéticas que fomentan la bioenergía como fuente renovable y sostenible para la diversificación de la matriz energética, entre ellos los biocombustibles. La demanda de biocombustibles ha crecido, considerablemente, en los últimos años por lo que los impactos relacionados con su intensificación se han convertido en un tema crucial.

En este sentido, Colombia adoptó el programa de etanol desde 2001 y es actualmente el tercer mayor productor de etanol de caña de azúcar en América Latina con uno de los mayores rendimientos de caña de azúcar del mundo. La producción de etanol de caña de azúcar en Colombia se concentra en la región del Valle del Río Cauca, en seis de las 13 plantas, cuya capacidad total es de 24 millones de toneladas de caña por año. En 2014, la producción de etanol superó los 400 millones de litros, suficientes para lograr un mandato de mezcla nacional de 8% (v/v). El gobierno y el sector privado esperan un aumento significativo en la producción de bioenergía en el país en los próximos años, de esta manera, es necesario evaluar el impacto de la producción actual y futura de etanol. Este estudio presenta una evaluación técnico-económica y ambiental de tres escenarios para la producción de etanol de caña de azúcar, a través de la plataforma Biorrefinería Virtual de Caña de Azúcar (BVC) desarrollada por el Laboratorio de Ciencia y Tecnología del Bioetanol de Brasil (CTBE). Los escenarios considerados en este trabajo fueron: (a) la producción de etanol actual en el Valle del Río Cauca (escenario actual), (b) el escenario actual sin quema de carbón en la caldera y, c) la producción integrada de primera y segunda generación (1G2G) (escenario futuro). Se consideró un ingenio de azúcar con destilería anexa para representar la configuración tecnológica utilizada actualmente en la región con producción de azúcar, etanol y electricidad. Además, la cogeneración se simuló considerando una mezcla de carbón y bagazo para el escenario actual y de bagazo y residuos agrícolas de la caña (RAC) para el escenario futuro.

Los resultados indican que el escenario actual presenta impactos económicos y ambientales favorables en comparación con la gasolina y, aún más, cuando no se considera la combustión de carbón en la caldera. Con base en los resultados obtenidos en este estudio, el bagazo y RAC son buenos sustitutos para el carbón, como biomásas a quemar en la caldera. Los resultados de la producción

integrada 1G2G muestran que es un escenario potencial para aumentar la producción de etanol y disminuye las emisiones de CO₂ eq en 60% en comparación con el escenario actual.

Palabras-clave: Etanol de segunda generación, evaluación del ciclo de vida, emisiones de GEI, tasa interna de retorno, combustión de carbón.

LISTA DE ILUSTRAÇÕES

Figura 1 – Produção de etanol e biodiesel na Colômbia.	22
Figura 2 – Evolução temporal da mistura de etanol na gasolina com o programa de biocombustíveis na Colômbia.....	23
Figura 3 – Oferta interna de energia primaria (38,2 Mtep) na Colômbia em 2012. ...	24
Figura 4 – Regiões produtoras de cana-de-açúcar na Colômbia.	26
Figura 5 – Área plantada e área colhida de cana-de-açúcar entre 2000 e 2014.....	27
Figura 6 – Localização das 13 usinas na região produtora.	28
Figura 7 – Produção de cana-de-açúcar, açúcar e etanol na Colômbia.....	29
Figura 8 – Produtividade da cana e rendimento de sacarose na Colômbia.	30
Figura 9 – Evolução das principais variedades de cana cultivadas na Colômbia.	31
Figura 10 – Exportações, importações, produção e demanda de açúcar entre 2000 e 2015.	31
Figura 11 – Diagrama de fluxo do processo de fabricação de açúcar.....	35
Figura 12 – Diagrama de fluxo da produção de etanol.....	36
Figura 13 – Logística da cadeia de etanol na Colômbia.....	37
Figura 14 – Localização da área de cana-de-açúcar no Brasil.....	40
Figura 15 – Preço da cana-de-açúcar ao produtor na Colômbia e no Brasil.....	47
Figura 16 – Preço do açúcar ao consumidor na Colômbia, no Brasil e no mundo. ...	48
Figura 17 – Exportações de melaço na Colômbia.....	49
Figura 18 – Estrutura de custo do etanol na Colômbia.	50
Figura 19 – Preço de etanol ao produtor e ao consumidor na Colômbia e no Brasil.	50
Figura 20 – Composição de preços ao consumidor no Brasil e na Colômbia.	51
Figura 21 – Metodologia utilizada para o desenvolvimento do projeto.....	55
Figura 22 – Processo de produção de etanol na Colômbia.....	57
Figura 23 – Hierarquias do processo industrial de processamento de cana-de-açúcar.	59
Figura 24 – Preparo da cana e extração dos açúcares.....	59
Figura 25 – Fluxograma para o tratamento de caldo.....	60
Figura 26 – Fluxograma do cozimento, cristalização, centrifugação e secagem do açúcar.	61
Figura 27 – Fluxograma da produção de etanol.....	61

Figura 28 – Simulação do carvão em Aspen Plus.....	63
Figura 29 – Balanço de massa produção de composto.	64
Figura 30 – Balanço de massa do tratamento de efluentes líquidos (PTAR).	64
Figura 31 – Simulação da produção integrada 1G2G.	65
Figura 32 – Processo de fermentação separada.....	66
Figura 33 – Diagrama do ciclo de vida de um biocombustível.	70
Figura 34 – Sistema de produto para a ACV considerada.	72
Figura 35 – Participação dos custos de produção de cana-de-açúcar para o cenário 1 e 2 (esq.) e o cenário 3 (dir.).	77
Figura 36 – Participação dos custos nas operações mecanizadas para o cenário 1 e 2 (esq.) e o cenário 3 (dir.).	77
Figura 37 – Resultados da avaliação econômica para os 3 cenários.....	81
Figura 38 – Análise de sensibilidade para a TIR (% a.a.) no cenário 1 em função da variação de 5 parâmetros individualmente.	82
Figura 39 – Custo da produção de etanol para os cenários 1 e 3.	83
Figura 40 – Análise de sensibilidade em função da variação do custo da enzima, da cana e o investimento.	83
Figura 41 – Emissões de GEE da produção de etanol 1G.....	86
Figura 42 – Fluxograma da categoria de mudanças climáticas para o cenário 1.....	87
Figura 43 – Emissões da produção de etanol 1G sem queima de carvão na caldeira.	88
Figura 44 – Emissões da produção de etanol 1G2G.....	91
Figura 45 – Fluxograma das emissões da categoria mudanças climáticas para o cenário 3.....	92
Figura 46 – Análise de sensibilidade da emissão de CO ₂ eq em função da produtividade agrícola da cana-de-açúcar.	93
Figura 47 – Comparação das emissões de GEE nos cenários considerados.	94
Figura 48 – Redução de emissões de GEE para os cenários avaliados.....	95

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 – Características das usinas na Colômbia.	29
Tabela 2 – Capacidade unidades de compostagem.	38
Tabela 3 – Características básicas do composto.	39
Tabela 4 – Estratificação dos fornecedores de cana do estado de São Paulo na safra 2013/2014.	40
Tabela 5 – Consumo de combustível na caldeira na produção de etanol (% base energética).	55
Tabela 6 – Principais diferenças entre os cenários avaliados.	56
Tabela 7 – Dados básicos para a produção de cana.	58
Tabela 8 – Dados adotados para a simulação do preparo da cana e extração do caldo.	59
Tabela 9 – Composição das biomassas utilizadas no estudo (base úmida).	60
Tabela 10 – Dados da produção de açúcar e etanol.	62
Tabela 11 – Composição do carvão betuminoso do Valle del Cauca (base seca).	63
Tabela 12 – Parâmetros adotados na simulação da cogeração.	63
Tabela 13 – Parâmetros utilizados na produção de etanol 2G.	67
Tabela 14 – Categorias de impacto intermediário do método ReCiPe.	71
Tabela 15 – Emissões para a água da descarga do PTAR (kg/m ³).	73
Tabela 16 – Emissões atmosféricas consideradas na combustão de carvão (g/kg de carvão).	74
Tabela 17 – Dados inseridos na fase agrícola em CanaSoft.	75
Tabela 18 – Detalhamento dos custos de produção da cana-de-açúcar (valores em US\$/ha.ano).	76
Tabela 19 – Palha disponível e recolhida para os dois cenários (ton/ha.ano).	77
Tabela 20 – Resultados obtidos da simulação para os três cenários.	78
Tabela 21 – Resultados da simulação para os principais resíduos do processo (kg/TC).	78
Tabela 22 – Resultados obtidos na Cogeração (valores em kg/TC).	79
Tabela 23 – Composição da compostagem utilizada na simulação dos cenários (valores em kg/TC).	79
Tabela 24 – Premissas econômicas utilizadas na avaliação econômica.	80

Tabela 25 – Preços utilizados na avaliação econômica.	80
Tabela 26 – Resumo das despesas de capital associadas às principais áreas industriais.	81
Tabela 27 – Resultados econômicos dos cenários avaliados.	81
Tabela 28 – Fatores de alocação econômica para o cenário 1.	84
Tabela 29 – Inventário de ciclo de vida selecionado para o cenário 1 (valores por 1 MJ de etanol produzido).....	85
Tabela 30 – Impactos ambientais nos cenários 1 e 2 avaliados por 1 MJ de etanol produzido.....	85
Tabela 31 – Fatores de alocação econômica para o cenário 3.	89
Tabela 32 – Inventário de ciclo de vida selecionado para o cenário 3 (valores por 1 MJ de etanol produzido).....	90
Tabela 33 – Impactos ambientais no cenário 3 por 1 MJ de etanol produzido.....	90
Tabela 34 – Impactos ambientais nos cenários avaliados por 1 MJ de etanol produzido.	93
Tabela 35 – Redução das emissões de GEE para os diferentes cenários.....	95
Tabela 36 – Parâmetros relevantes utilizados na simulação em Aspen Plus.	108
Tabela 37 – Composição do combustível equivalente.	110
Tabela 38 – Método para estimar a eficiência da caldeira.	110
Tabela 39 – Método CAPM para estimar a TMA real.....	111
Tabela 40 – Cálculos para o fluxo de caixa para o cenário 1, 2 e 3.	112
Tabela 41 – Fluxo de caixa para o cenário 1.....	113
Tabela 42 – Fluxo de caixa para o cenário 2.....	114
Tabela 43 – Fluxo de caixa para o cenário 3.....	115
Tabela 44 – ICV selecionado para o cenário 2 (valores por 1 MJ de etanol produzido).	116

LISTA DE ABREVIATURAS/SIGLAS

1G – Etanol de primeira geração

1G2G – Produção de etanol de segunda geração integrada à primeira geração

2G – Etanol de segunda geração

ACV – Avaliação de Ciclo de Vida

AT – Acidificação terrestre

BS – Base seca

BU – Base úmida

BVC – Biorrefinaria Virtual de cana-de-açúcar

CUE – Centro Nacional de Producción Más Limpia, Universidad Pontificia Bolivariana e EMPA.

DCF – Depleção de combustíveis fósseis

EAD – Eutrofização na água doce

FMP – Formação de material particulado

GEE – Gases de efeito estufa

GL – °Gay Lussac (%V)

MC – Mudanças climáticas

OTA – Ocupação da terra agrícola

PTAR – Planta de tratamento de águas residuais

RCO – Redução da camada de ozônio

TC – Tonelada de colmos de cana-de-açúcar

TH – Toxicidade humana

TIR – Taxa interna de retorno

VPL – Valor presente líquido

SUMÁRIO

CAPITULO 1	21
1. INTRODUÇÃO	21
1.1 CONTEXTO GERAL	21
1.2 OBJETIVO GERAL.....	25
1.2.1 <i>Objetivos específicos</i>	25
CAPÍTULO 2	26
2. PRODUÇÃO DE CANA-DE-AÇÚCAR, AÇÚCAR, ETANOL E ELETRICIDADE	
26	
2.1 PERFIL DA PRODUÇÃO NA COLÔMBIA	26
2.1.1 <i>Programa de biocombustíveis</i>	32
2.2 FABRICAÇÃO DE AÇÚCAR	34
2.3 FABRICAÇÃO DO ETANOL.....	35
2.4 RESÍDUOS AGROINDUSTRIAIS.....	37
2.4.1 <i>Compostagem</i>	37
2.4.2 <i>Tratamento de efluentes líquidos</i>	39
2.5 COMPARAÇÃO DOS SETORES SUCROENERGÉTICOS COLOMBIANO E BRASILEIRO	39
2.5.1 <i>Irrigação e fertirrigação</i>	42
2.5.2 <i>Índice de mecanização</i>	45
2.5.3 <i>Sistema de pagamento, custo da cana-de-açúcar e preço do açúcar</i>	46
2.5.4 <i>Uso do melaço</i>	48
2.5.5 <i>Custo e preço do etanol</i>	49
2.5.6 <i>Energia elétrica excedente e etanol de segunda geração</i>	51
CAPÍTULO 3	54
3. METODOLOGIA	54
3.1 CENÁRIO 1: ATUAL	56
3.1.1 <i>Fase agrícola</i>	57
3.1.2 <i>Fase industrial</i>	58
3.2 CENÁRIO 2: PRODUÇÃO INTEGRADA DE ETANOL 1G2G	64
3.2.1 <i>Fase industrial</i>	65

3.3 AVALIAÇÃO ECONÔMICA.....	67
3.4 AVALIAÇÃO DO CICLO DE VIDA	69
CAPITULO 4.....	75
4. RESULTADOS E DISCUSSÕES.....	75
4.1 AVALIAÇÃO TÉCNICO-ECONÔMICA.....	75
4.1.1 Fase agrícola.....	75
4.1.2 Fase industrial.....	77
4.1.3 Avaliação econômica.....	79
4.2 AVALIAÇÃO AMBIENTAL.....	84
4.2.1 Cenário 1 e 2.....	84
4.2.2 Cenário 3.....	89
4.2.3 Interpretação do Ciclo de Vida	92
4.2.4 Comparação dos cenários selecionados.....	93
CAPITULO 5.....	97
5. CONCLUSÕES E SUGESTÕES PARA PRÓXIMOS TRABALHOS	97
5.1 SUGESTÕES PARA PRÓXIMOS TRABALHOS	99
REFERÊNCIAS.....	100
APÊNDICES	108
APÊNDICE 1 – PARÂMETROS UTILIZADOS NA SIMULAÇÃO	108
APÊNDICE 2 – EFICIÊNCIA ESTIMADA DA CALDEIRA	110
APÊNDICE 3 – TAXA MÍNIMA DE ATRATIVIDADE (TMA)	111
APÊNDICE 4 – FLUXO DE CAIXA.....	112
APÊNDICE 5 – INVENTÁRIO DE CICLO DE VIDA	116

CAPITULO 1

1. INTRODUÇÃO

1.1 Contexto geral

Nos últimos anos a produção de biocombustíveis para diminuir a dependência dos combustíveis fósseis, as emissões de gases de efeito estufa e aumentar o desenvolvimento agrícola tem sido uma tendência no setor energético. Devido a essa dependência mundial da energia, o interesse de diversificar as fontes que compõem as matrizes energéticas tem aumentado. Uma destas fontes são os biocombustíveis, etanol e biodiesel principalmente. Na América Latina, o etanol produzido provém, principalmente, da cana-de-açúcar que têm uma área plantada de 11 milhões de hectares representando quase a metade da área plantada no mundo e uma produção de 862 milhões de toneladas em 2013 (FAO, 2014). Desta área, a maioria é utilizada para a produção de açúcar e o restante para a produção de etanol. Em 2014, a produção de etanol na América Latina representou 30% (28 bilhões de litros) da produção mundial de etanol, sendo o Brasil o segundo maior produtor do mundo e o primeiro na América Latina, assim como o maior exportador mundial de etanol de cana-de-açúcar (REN 21, 2015).

Conseguir energia renovável e sustentável para o futuro implica aumentar a segurança energética, reduzir as emissões de gases de efeito estufa (GEE) e diminuir outros impactos ambientais provenientes da produção e consumo de energia (SHEINBAUM-PARDO; RUIZ, 2012). No caso das emissões de GEE em América Latina em 2012, as emissões totais excluindo mudanças no uso da terra foram em torno de 3,1 Gt de CO₂eq, representando 7% das emissões de GEE totais do mundo (CAIT, 2015). Embora a contribuição da América Latina nas emissões relacionadas com a energia seja baixa, é importante entender que esta redução requer esforços para melhorar sua eficiência energética e uso de fontes de energia renováveis. Houve uma tendência de aumento das emissões de GEE a partir da década de 1970 nos países latino-americanos, sendo maior no México e no Brasil. Em contraste, na Argentina e na Colômbia, o crescimento foi mais moderado e com um ligeiro decréscimo (KUNTSI-REUNANEN, 2007). Apesar das políticas para mitigar as emissões de GEE, aumentar a eficiência energética e os programas de combustíveis

mais limpos, as emissões globais de carbono produzidos pela queima de combustíveis fósseis continuam aumentando, atingindo 31.700 MtCO₂ em 2012, um aumento de 51,3% em relação a 1990 (IEA, 2014). No ranking mundial de emissões de GEE derivadas da queima de combustíveis, o Brasil ocupa o 12º lugar (440 Mt de CO₂eq), México o 13º lugar (435 Mt de CO₂eq), Argentina o 28º (188 Mt de CO₂eq) e a Colômbia o 48º lugar (67 Mt de CO₂eq), enquanto China é o maior gerador destas emissões (8,21 Gt de CO₂eq) (IEA, 2014).

Nesse contexto, a Colômbia é um país que está acumulando esforços no desenvolvimento da indústria dos biocombustíveis. O programa começou em 2001 com o estabelecimento da Lei 693 que estabeleceu as regras e incentivos no uso dos biocombustíveis, principalmente etanol carburante. Os principais objetivos do programa foram incrementar a produção sustentável dos biocombustíveis, geração de emprego e desenvolvimento rural e diversificar a matriz energética do país (CONPES, 2008). Desta forma, em 2014, a produção de etanol de cana-de-açúcar atingiu 400 milhões de litros, assim como o biodiesel de óleo de palma chegou a 600 milhões de litros (Figura 1).

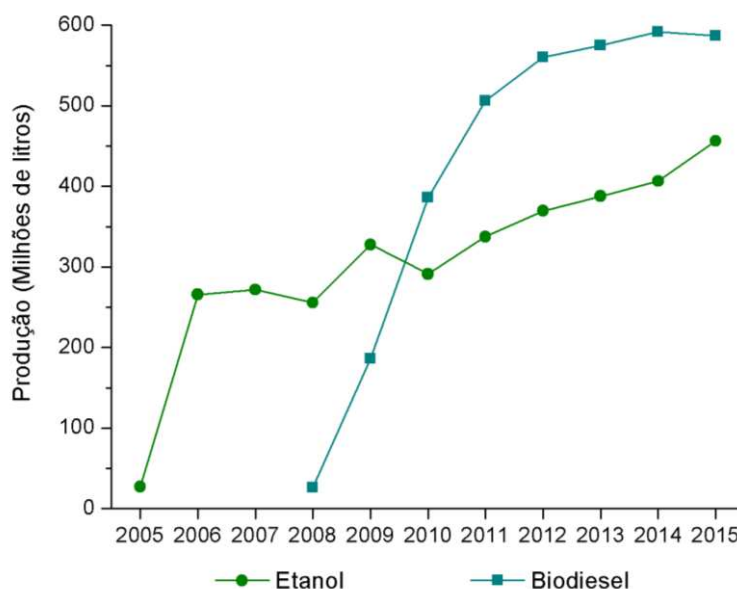


Figura 1 – Produção de etanol e biodiesel na Colômbia.

Fonte: Baseado em (ASOCAÑA, 2016; FEDEBIOCOMBUSTIBLES, 2016).

No caso do etanol, a Colômbia é o décimo produtor do mundo e o terceiro na América Latina atrás de Brasil e Argentina (REN 21, 2015). Além disso, a Colômbia é um dos países com maior produtividade agrícola média para a cana-de-açúcar do

mundo (cerca de 120 toneladas de cana/ha.ano) e o segundo maior produtor de cana-de-açúcar da América Latina depois do Brasil. No país, é adotada a produção conjunta de açúcar e etanol (com destilarias anexas à produção de açúcar) somando um total de seis (6) usinas concentradas no Vale geográfico do Rio Cauca. Os produtores de etanol são empresas privadas, principalmente usinas de açúcar com mais de 150 anos de experiência nesta atividade. A partir de 2014, a Colômbia implementou uma mistura de 8% v/v de etanol na gasolina, chamada de E8 e com perspectivas de aumentá-la. No começo do programa, 70% do país tinha uma mistura de 10%, não obstante, e desde 2011, o Decreto 4892/2011 modificou a mistura nacional para que estivesse entre 8% e 10% segundo a oferta nacional de etanol anidro (Figura 2).

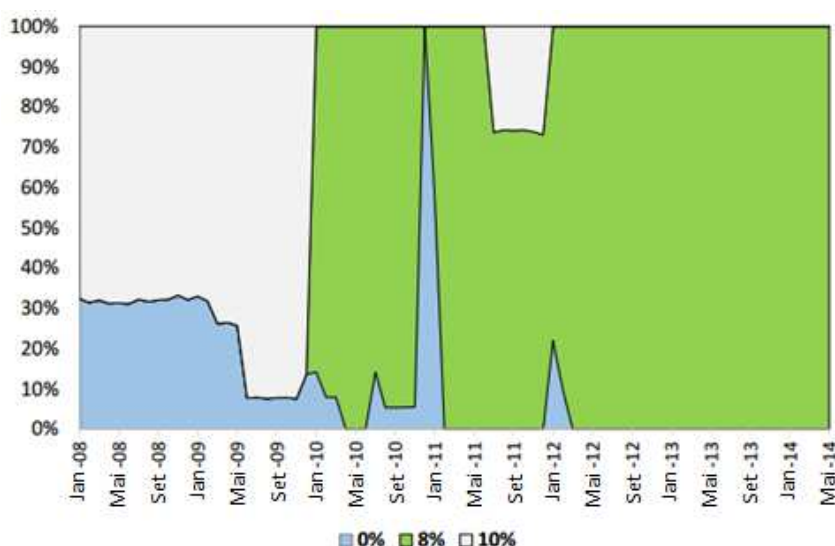


Figura 2 – Evolução temporal da mistura de etanol na gasolina com o programa de biocombustíveis na Colômbia.

Fonte: (UPME, 2014).

A Colômbia teve, em 2012, uma oferta total de energia primária de 38,2 Mtep (milhões de toneladas equivalentes ao petróleo) em sua maioria a partir de fontes não renováveis como os combustíveis fósseis (principalmente petróleo e gás natural) que representam 78% do total (UPME, 2012a) (Figura 3). Em 2012, o consumo final de energia foi 26,13 Mtep consumidos na maior parte pelo setor transporte (44%) seguido pelo setor industrial (21%). O petróleo representou o 46% do consumo nacional, assim como os biocombustíveis representaram 2,48%, mas com uma tendência crescente (UPME, 2012b). Desta maneira, observa-se a entrada dos biocombustíveis na matriz energética nacional com um grande potencial de expansão.

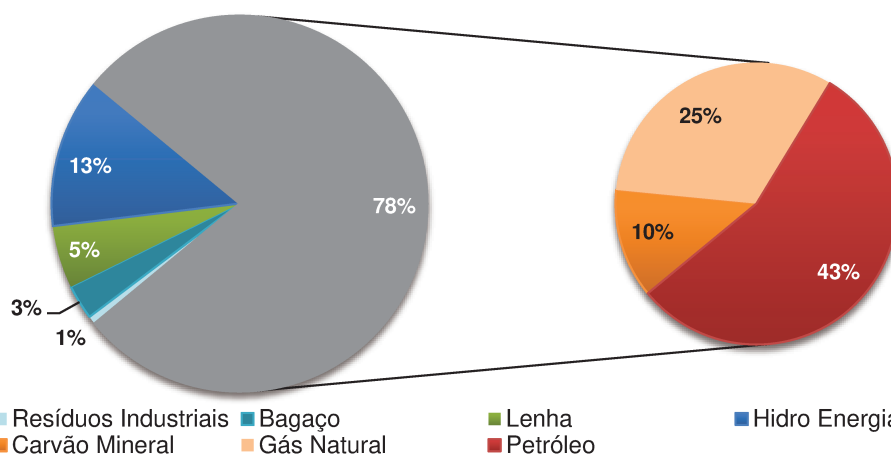


Figura 3 – Oferta interna de energia primária (38,2 Mtep) na Colômbia em 2012.
Fonte: Baseado em (UPME, 2012b).

Neste sentido, o setor sucroalcooleiro colombiano conta hoje com boas possibilidades de ampliar a sua produção nos próximos anos, considerando a demanda crescente em seus três mercados (açúcar, etanol e eletricidade). Nesse caso, e com a disponibilização de novas tecnologias agrícolas e industriais nos próximos anos será importante identificar e avaliar os possíveis impactos ambientais e econômicos no contexto das usinas atuais colombianas. Portanto, a hipótese adotada é que a ferramenta Biorrefinaria Virtual de Cana-de-açúcar (BVC)¹ adaptada às condições colombianas permite simular satisfatoriamente o processo de produção atual do setor sucroenergético colombiano, assim como diversos cenários futuros que permitam deduzir os possíveis impactos do seu processo agroindustrial.

Finalmente, neste trabalho discutem-se os impactos técnico-econômicos e ambientais produzidos pela produção de etanol atual e futura (com a integração de etanol de segunda geração) na região do Vale geográfico do Rio Cauca na Colômbia. Embora não existam comercialmente estas tecnologias no país, é possível que as usinas atuais possam ser as precursoras das futuras biorrefinarias com a produção integrada de diferentes produtos, incluído o etanol de segunda geração, produzido a partir do excedente de material lignocelulósico (MLC) da cana-de-açúcar (palha e bagaço de cana).

¹ (BONOMI et al., 2016). A BVC foi desenvolvida pelo Laboratório Nacional de Ciência e Tecnologia do Bioetanol (CTBE).

1.2 Objetivo geral

Considerando o anterior, este estudo tem os seguintes objetivos:

- Avaliar técnica, econômica e ambientalmente através da Biorrefinaria Virtual de Cana-de-açúcar (BVC) (BONOMI et al., 2016), o cenário representativo da indústria sucroenergética atual na região tradicional produtora de cana-de-açúcar na Colômbia.
- Identificar e avaliar técnica, econômica e ambientalmente o cenário futuro da produção integrada de etanol de primeira e segunda geração (1G2G).

1.2.1 Objetivos específicos

- Adaptar a ferramenta BVC às condições da indústria sucroenergética colombiana.
- Comparar as características colombianas da produção de etanol com as da produção brasileira e estabelecer as principais diferenças.
- Avaliar os principais impactos econômicos e ambientais do cenário atual e futuro de produção de etanol na Colômbia e sugerir possíveis alternativas para a redução destes impactos.
- Contribuir com o projeto *Bioenergy Contribution of Latin America, Caribbean and Africa to the GSB² Project - LACAf-Cane I* (CORTEZ, 2013), que avalia as condições de produção de bioenergia em países selecionados na América Latina, Caribe e África com o propósito de construir uma base para tomar decisões e oferecer subsídios para a expansão da produção e uso de bioenergia nestes países.

²Global Sustainable Bioenergy Project: Iniciado em 2009 por um grupo de cientistas, engenheiros e especialistas em políticas com o objetivo geral de fornecer orientação em relação à viabilidade do uso intensivo de bioenergia sustentável no futuro.

CAPÍTULO 2

2. PRODUÇÃO DE CANA-DE-AÇÚCAR, AÇÚCAR, ETANOL E ELETRICIDADE

2.1 Perfil da produção na Colômbia

Colômbia é o segundo maior produtor de cana-de-açúcar na América do Sul depois do Brasil com uma produção de 24 milhões de toneladas em 2014. A produção de cana-de-açúcar e açúcar desempenha um papel importante na economia da região do Vale geográfico do Rio Cauca, que está distribuída em 4 departamentos (Valle del Cauca, Cauca, Risaralda e Caldas) (Figura 2.1). A produção de cana-de-açúcar está concentrada principalmente no Valle del Cauca com uma participação de 80% da produção nacional seguida pelo Cauca (17,4%), Caldas (1,2%) e Risaralda (1,2%) (COLÔMBIA.MINAGRICULTURA, 2014a).

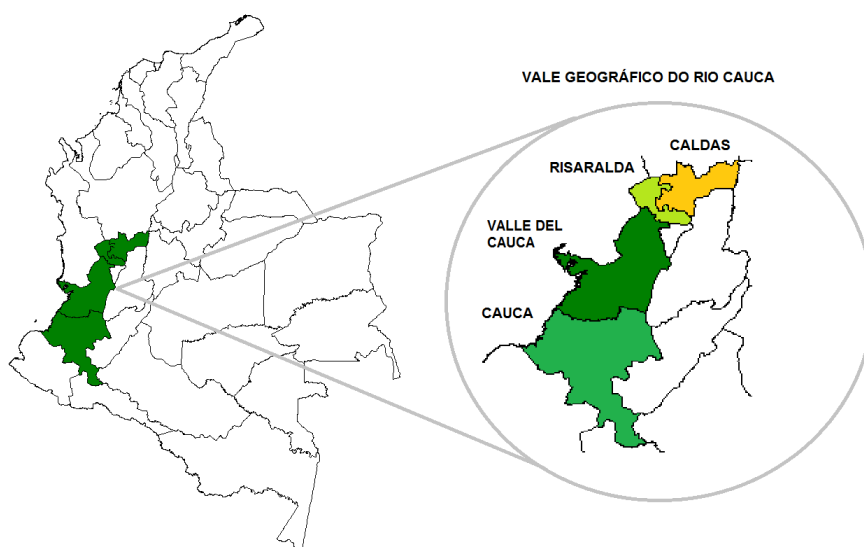


Figura 4 – Regiões produtoras de cana-de-açúcar na Colômbia.

A cadeia sucroenergética está formada em um primeiro nível por aproximadamente 2750 fornecedores de cana, mais de 100 cooperativas de trabalho e cerca de 50 fornecedores especializados. Existem 3362 unidades rurais, onde aproximadamente 79% dessas unidades são menores que 100 hectares e cerca de 22% são menores que 10 hectares (PROCAÑA, 2013). O núcleo da cadeia envolve 13 usinas de açúcar, as quais trabalham com 24% de cana proveniente de terras próprias e 26% de terras arrendadas enquanto o 50% restante é fornecido pelos produtores independentes (PROCAÑA, 2013). Seis dessas usinas também produzem

etanol combustível, uma produz álcool industrial e 12 têm cogeração com exportação de energia elétrica. No último nível da cadeia, encontram-se 40 empresas de alimentos, 8 de bebidas, 3 indústrias de refrigerantes, um produtor de papel e uma indústria sucroquímica (ARANGO et al., 2011).

A área cultivada de cana-de-açúcar em 2013 foi da ordem de 227 mil hectares enquanto a área colhida foi 166 mil; plantada principalmente no Valle del Cauca (176.244 ha) seguido pelo Cauca (43.000 ha). Enquanto a distribuição das terras no departamento do Valle del Cauca, a área plantada está representada por 47,5% de cana-de-açúcar, 11,3% de café, 10,5% de milho e 30,7% para outros usos da terra. Da mesma forma, no departamento do Cauca, a cana-de-açúcar teve uma participação na área plantada equivalente a 24,6%, café 20,6%, cana para rapadura 9,7%, milho 8,3% e outras culturas 36,8% (COLÔMBIA.MINAGRICULTURA, 2014b). Sendo estes dois departamentos os mais representativos da região. A área equivalente destinada à produção de etanol representou 41 mil hectares, aproximadamente 18% da área cultivada. Na Figura 5, observa-se uma diminuição na área colhida em 2008 devido à greve realizada pelos cortadores da região que bloqueou a produção em 8 usinas por um período de 56 dias, aproximadamente, e pelas variações climáticas atípicas (inverno severo e alta precipitação) (ASOCAÑA, 2008a).

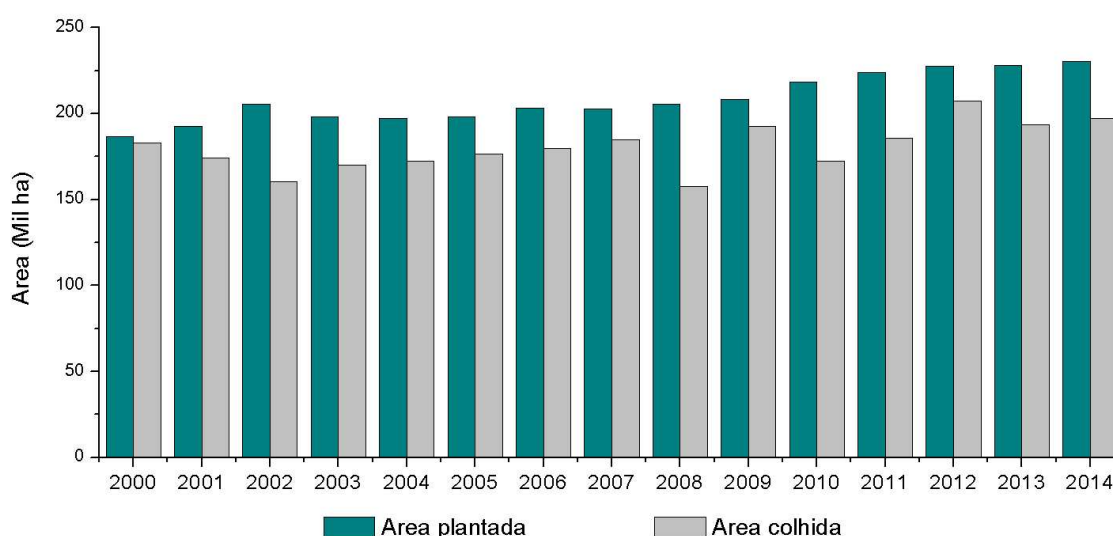


Figura 5 – Área plantada e área colhida de cana-de-açúcar entre 2000 e 2014.

Fonte: Baseado em (COLÔMBIA. MINAGRICULTURA, 2013).

A produção de açúcar é realizada pelas 13 usinas (Figura 6) com capacidades entre 200 mil a 5 milhões de toneladas de cana-de-açúcar processada por ano (Tabela 1), com uma produção de 2 milhões de toneladas de açúcar em 2014 (Figura 7) (COLÔMBIA. MINAGRICULTURA, 2013). Seis dessas usinas (Incauca, Providencia, Manuelita, Mayagüez, Risaralda e Riopaila recentemente) possuem produção de açúcar, etanol e eletricidade. No caso do etanol, em 2014, teve uma produção de 400 milhões de litros, atingindo uma média de mais de 1 milhão de litros por dia. A produção de etanol, em 2013, foi equivalente à produção de 399 mil toneladas de açúcar (COLÔMBIA. MINAGRICULTURA, 2013).

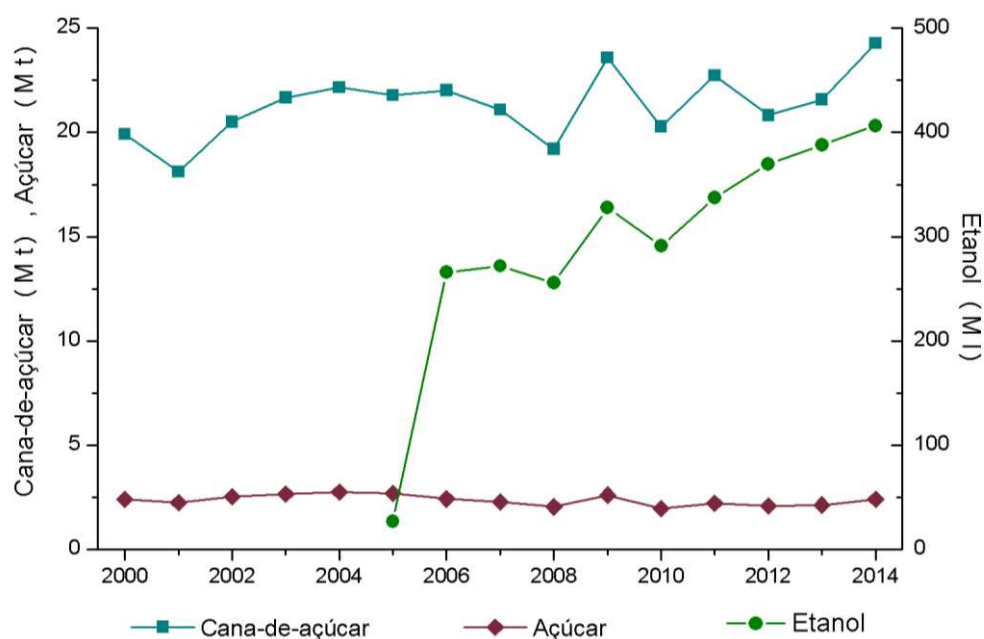


Figura 6 – Localização das 13 usinas na região produtora.
Fonte: (ARBELÁEZ et al., 2010).

Tabela 1 – Características das usinas na Colômbia.

Usina	Capacidade moenda (TC/dia)	Área total (ha)	Capacidade etanol (l/dia)
Incauca	14.000	37.048	350.000
Manuelita	10.800	23.277	300.000
Providencia	10.000	23.132	250.000
Rio Paila	8.000	22.949	400.000
Castilla	7.000	20.722	-
Mayagüez	6.500	19.600	250.000
Cabaña	5.000	16.921	-
Risaralda	5.000	12.315	100.000
Pichichí	4.400	14.500	-
Carmelita	2.500	7.302	-
San Carlos	2.000	7.579	-
Central Tumaco	2.000	3.742	-
María Luisa	800	2.190	-
Total		211.277	1.650.000

Fonte: (PROCAÑA, 2013).

**Figura 7** – Produção de cana-de-açúcar, açúcar e etanol na Colômbia.

Fonte: Baseado em (COLÔMBIA.MINAGRICULTURA, 2013; ASOCAÑA, 2016).

Além disso, a Colômbia tem expressiva produção de cana-de-açúcar para rapadura com uma área colhida de 212 mil hectares distribuídas na região Andina (nas encostas das três Cordilheiras que atravessam o país), com uma produção de 1 milhão de toneladas e uma produtividade média entre 6 e 15 TC/ha, devido às condições socioeconômicas e tecnológicas do processo e às diversas variedades de cana (COLÔMBIA.MINAGRICULTURA, 2014b). A rapadura é considerada como um alimento tradicional na cesta básica dos colombianos.

Devido às condições climáticas favoráveis, as boas práticas agrícolas e avanços tecnológicos, o plantio e a colheita de cana ocorrem o ano todo (330 dias). As usinas trabalham 24 horas por dia e seu abastecimento depende do local da colheita, que varia geralmente entre 3 a 100 km. O sistema de transporte é baseado em tratores (distâncias menores de 25 km) e caminhões, cuja capacidade de carga varia de 8-50 toneladas. Além disso, o setor possui 57 carregadeiras, 103 colhedoras e 243 tratores para colheita (CENICAÑA, 2014). O ciclo completo da cana-de-açúcar na Colômbia é geralmente de seis anos e ocorrem cinco cortes. A idade média de corte entre o plantio e a colheita foi 12,9 meses em 2014 (CENICAÑA, 2014). Em média, a produtividade anual está entre 100 e 130 TC/ha (produtividade média nacional em torno de 120 TC/ha) sendo uma das maiores produtividades do mundo. Entretanto, de 2007 a 2008, o aumento da produtividade ocorreu devido à demora na colheita (dois meses) gerada pela greve dos cortadores da região. O rendimento de açúcar encontra-se entre 10 e 16 toneladas de açúcar por hectare, com uma média nacional em 2014 de 13,8 t/ha (Figura 8).

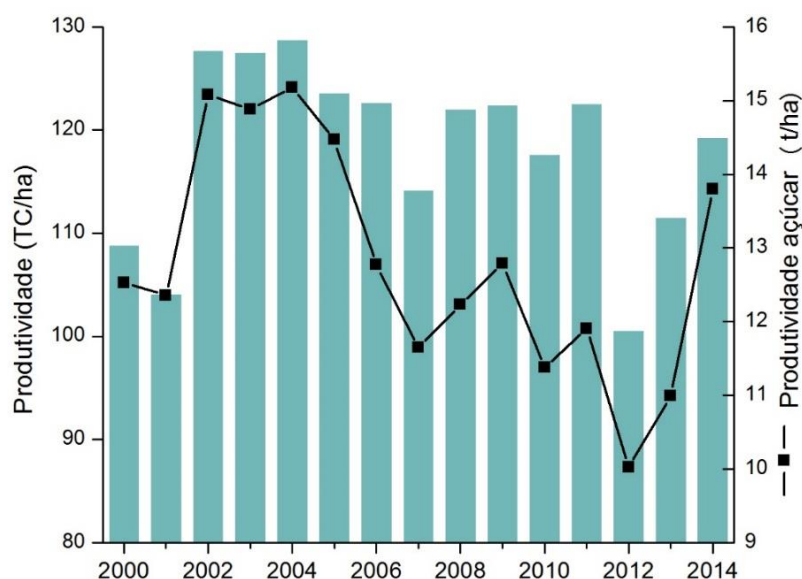


Figura 8 – Produtividade da cana e rendimento de sacarose na Colômbia.
Fonte: Baseado em (COLÔMBIA.MINAGRICULTURA, 2014b).

A disponibilidade de variedades geneticamente melhoradas é um fator importante para o incremento da produtividade nacional. Em 2013, foram cultivadas diversas variedades, sendo que as 4 variedades principais ocuparam 84% da área plantada. A distribuição das variedades foi: a variedade CC 85-92 ocupou 60,5%, a

CC 93-4418 ocupou 12,1%, a CC 84-75 ocupou 5,7% e a CC 01-1940 ocupou 5,5% dessa área (Figura 9).

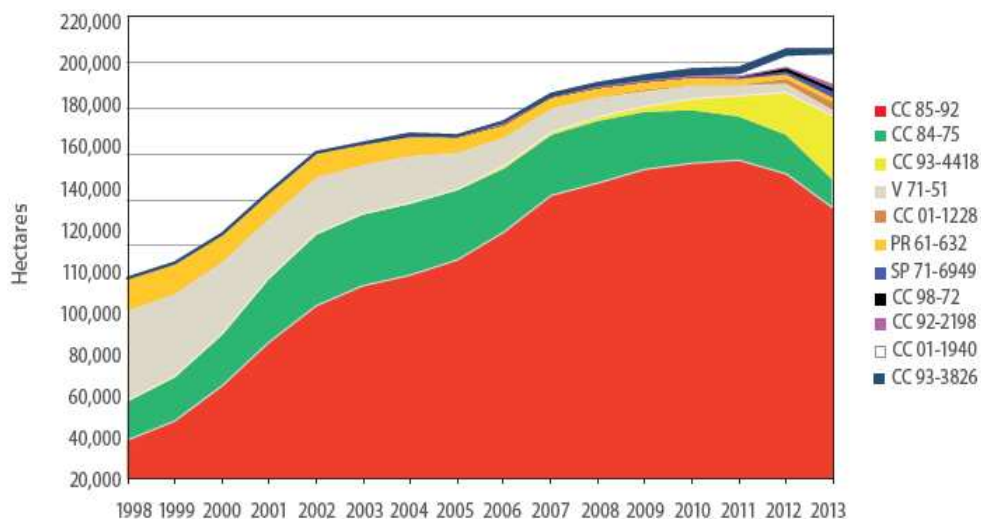


Figura 9 – Evolução das principais variedades de cana cultivadas na Colômbia.
Fonte: (CENICAÑA, 2014).

Por último, o crescimento da produção de etanol combustível na Colômbia foi produto, principalmente, do aproveitamento do superávit da produção de açúcar (AYARZA, 2012). Isto resultou em uma redução das exportações colombianas de açúcar a partir do ano 2003 (Figura 10).

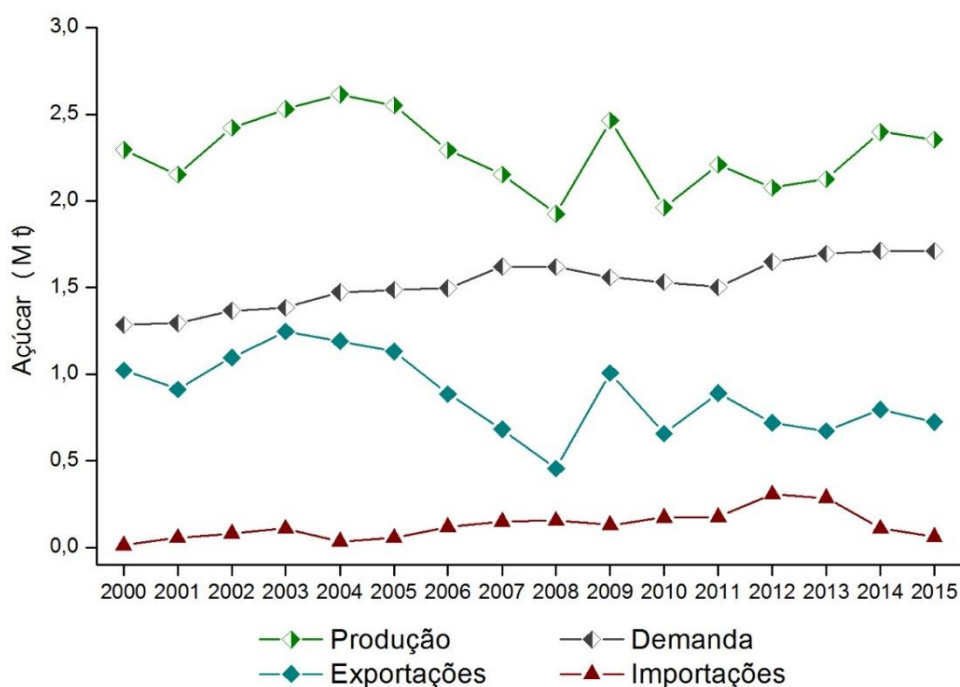


Figura 10 – Exportações, importações, produção e demanda de açúcar entre 2000 e 2015.
Fonte: Baseado em dados de ASOCAÑA (2016).

2.1.1 Programa de biocombustíveis

Desde 2001, devido à queda nas reservas de petróleo foi incentivada a produção de etanol para o fortalecimento da matriz energética com fontes renováveis. A iniciativa começou com a Lei 693 que estabeleceu regras e incentivos no uso dos biocombustíveis, principalmente etanol. Depois do estabelecimento da indústria, foi criado o documento CONPES 3510/2008 oferecendo as diretrizes para promover a produção sustentável de biocombustíveis na Colômbia (CONPES, 2008). Além disso, foi introduzida a GTC 213: "Guia de Sustentabilidade na Produção de Biomassa e Processamento na Cadeia de biocombustíveis na Colômbia", mostrando um progresso na questão do desenvolvimento dos biocombustíveis.

Como resultado deste programa, os biocombustíveis colombianos foram e continuam sendo estimulados através de incentivos e mandatos de mistura a fim de atender a demanda doméstica atual. A cana-de-açúcar está isenta do imposto de venda. O etanol está isento de imposto global, de venda e sobretaxa que são normalmente aplicados aos combustíveis fósseis (Lei 788/2002) (CONPES, 2008). Além disso, existem zonas especiais para a produção de biocombustíveis, as regiões onde forem construídas as plantas produtoras de etanol podem ser declaradas como permanentes *customs zones*, reduzindo o imposto de renda de 35% para 15% (AYARZA, 2012). Além disso, uma dedução do imposto de renda de até 40% do valor dos investimentos feitos em ativos fixos produtivos em projetos agroindustriais é aplicável (Lei 1111/2006). Existem empréstimos em condições favoráveis para o investimento e subsídios (FINAGRO, 2015). O Ministério de Minas e Energia (MME) regula o preço e o nível de mistura gasolina-etanol, assim como a fórmula do cálculo do preço de etanol, para garantir o preço mínimo aos produtores.

Socialmente, a cadeia da cana-de-açúcar na parte agrícola gera aproximadamente 7.400 empregos diretos e na parte industrial 30.000 empregos diretos (PROCAÑA, 2013). Em 2012, o Valle del Cauca representou o 10% do PIB nacional e o setor representou o 4,7% do PIB agrícola nacional e 68% do PIB agrícola da região (DANE, 2014; COLÔMBIA.MINAGRICULTURA, 2015).

Ambientalmente, a maior parte das emissões de CO₂ da Colômbia está relacionada ao uso do petróleo (KUNTSI-REUNANEN, 2007). O etanol de cana-de-açúcar da Colômbia, de acordo com uma análise de ciclo de vida (ACV) feita pelo CONSORCIO CUE (2012) (*Centro Nacional de Producción más Limpia, Universidad*

Pontifícia Bolivariana e EMPA) reduz em 74% a emissão de GEE por quilômetro percorrido em relação à gasolina.

A produção e uso de bioenergia está crescendo no mundo enquanto os países procuram diversificar suas fontes de energia de forma que ajude a promover o desenvolvimento econômico, a segurança energética e a qualidade ambiental (FAO; GBEP, 2014). Para o caso da produção de etanol, ao realizar avaliações é importante integrar os aspectos econômicos, sociais e ambientais às práticas mais limpas e uso de tecnologias mais sustentáveis.

No caso colombiano, Quintero et al. (2008) realizaram uma comparação do desempenho econômico e ambiental do processo de produção de etanol de cana-de-açúcar e milho nas condições colombianas e encontraram que a produção de etanol de cana-de-açúcar é a melhor opção em relação aos aspectos econômicos e ambientais quando comparado com o milho. No entanto, os autores destacam que é importante considerar também as condições sociais ao escolher a matéria-prima mais apropriada na produção de etanol em novas usinas.

Moncada, El-Halwagi, e Cardona (2013) realizaram uma análise técnico-econômica para uma biorrefinaria de cana-de-açúcar para o caso colombiano avaliando três cenários. Os resultados mostraram que a configuração mais sustentável (econômica, ambiental e social) foi a produção integrada de açúcar, etanol, PHB (biopolímero) e eletricidade como os produtos de maior valor agregado, já que esta configuração contribui com a segurança alimentar, possui níveis consideráveis de GEE e gera aspectos sociais positivos.

Valencia e Cardona (2014) realizaram uma ACV para comparar diversas alternativas para aumentar a produção e uso dos biocombustíveis na Colômbia. As matérias primas analisadas foram a cana-de-açúcar, mandioca, óleo de palma e pinhão manso. Os resultados mostraram que a produção e uso atual dos biocombustíveis mitigam os impactos ambientais em comparação com os combustíveis fósseis. No caso do etanol de cana-de-açúcar, em mistura E10, os resultados mostraram uma redução de 5% das emissões comparado com a gasolina, enquanto o etanol de mandioca gera 31% a mais do que as emissões de etanol de cana-de-açúcar. Em mistura E100, o etanol de cana e mandioca representam reduções significativas nas emissões de GEE (81% e 73% respectivamente).

Moncada, Tamayo e Cardona, (2014), discutiram os efeitos da integração de uma biorrefinaria de cana-de-açúcar tradicional na Colômbia com a produção de microalgas. Através de uma análise técnico-econômica e ambiental de dois cenários, os resultados indicaram que o melhor resultado foi a biorrefinaria integrada com a produção de açúcar, etanol, eletricidade, biodiesel e glicerol, com uma redução das emissões de CO₂ eq de 39% em comparação com o cenário da biorrefinaria de cana-de-açúcar base.

2.2 Fabricação de açúcar

Uma vez na usina, a cana segue para o sistema de preparo e lavagem através de picadores e desfibradores que rompem as fibras dos colmos (Figura 2.8). Na moenda, o caldo é separado da fibra da cana (bagaço). O bagaço segue para a planta de geração de energia (vapor de alta pressão), enquanto que o caldo segue para o tratamento químico (sulfitação e calagem). Com a sulfitação espera-se diminuir o pH, a cor e a viscosidade do caldo, e com a calagem eliminar a maior quantidade de impurezas e elevar o pH. Após o tratamento químico, o caldo é aquecido até uma temperatura próxima a seu ponto de ebulição e segue para o decantador que separa os sólidos insolúveis do caldo. O lodo retirado é misturado com bagacilho e filtrado para recuperar açúcar e a torta de filtro residual é utilizada como matéria prima na produção de composto. O caldo clarificado segue para o processo de evaporação dando origem ao xarope e em seguida é enviado aos cozedores onde serão formadas as massas cozidas. Dependendo se a usina produz somente açúcar ou açúcar e etanol, se utilizam três ou duas massas cozidas, respectivamente. Cada massa segue para o cristalizador onde será recuperada mais sacarose, e logo é descarregada nas centrífugas. Na centrífuga, são retidos os cristais de sacarose e é removido o mel que será enviado ao próximo cozedor até que se atinja um maior esgotamento. O açúcar que sai da centrífuga é enviado para a secagem. O mel da última centrífuga é denominado mel final (melaço) e é enviado para a fabricação de etanol.

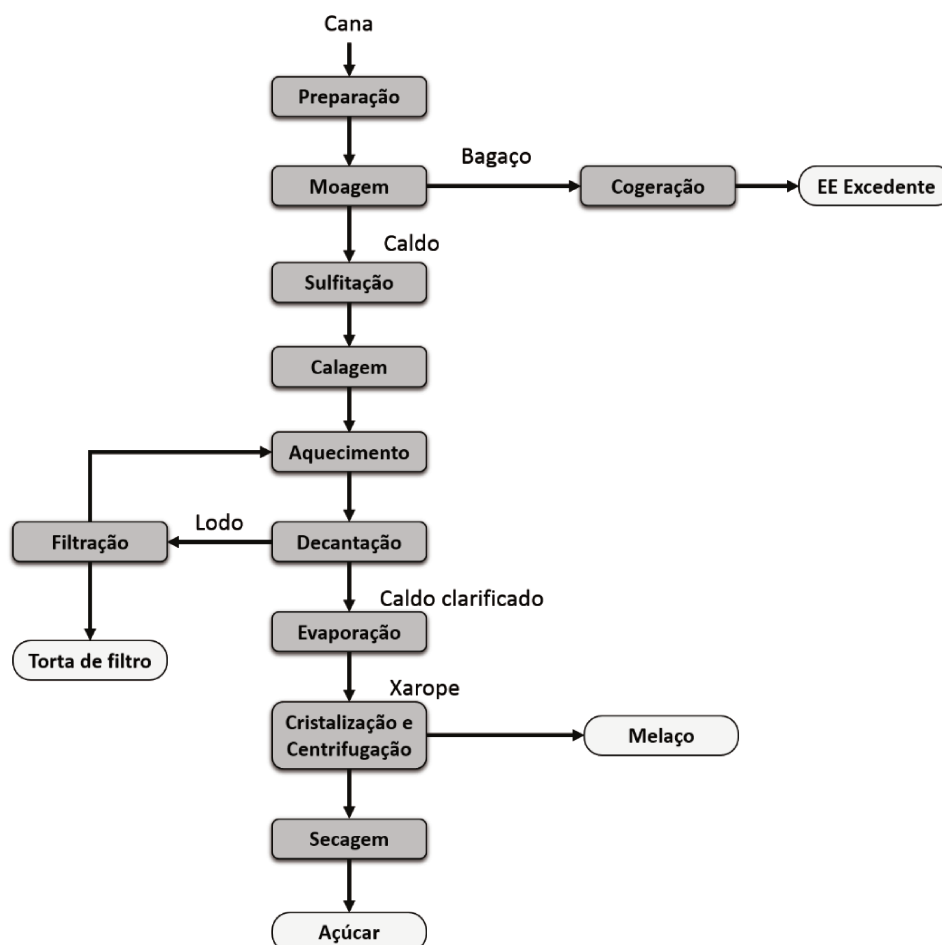


Figura 11 – Diagrama de fluxo do processo de fabricação de açúcar.
Fonte: Baseado em (CENICAÑA, 2008a).

2.3 Fabricação do etanol

Na Colômbia, a produção de etanol é baseada na fermentação da mistura do xarope, mel A (obtido na primeira centrífuga) e do melaço. O processo começa com a adequação de matérias-primas (além de um resfriamento até 29-32 °C) (Figura 12).

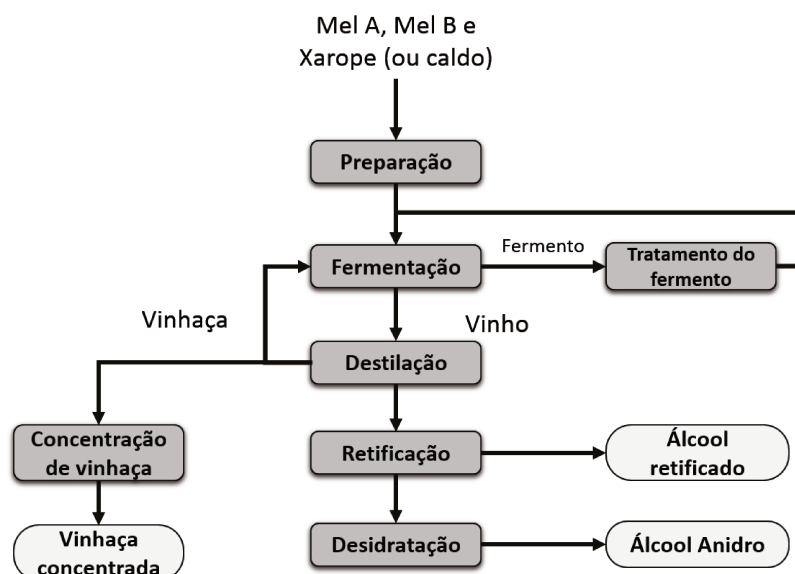


Figura 12 – Diagrama de fluxo da produção de etanol.
Fonte: Baseado em (CENICAÑA, 2008b).

O mosto segue para as dornas de fermentação onde são adicionadas as leveduras (*Saccharomyces cerevisae*). Nesta fase, ocorre uma intensa liberação de CO₂ que é levado até um lavador para recuperar o etanol por meio de água. Quando o processo de fermentação termina, o vinho possui um teor médio de etanol de 7 a 9,9% (v/v). A levedura é recuperada através da sedimentação, saindo pela parte inferior do separador e em seguida direcionada para o tanque de ativação de levedura (onde é regenerada) e finalmente retorna aos tanques de fermentação (CENICAÑA, 2008b). O vinho segue ao processo de destilação onde diferentes substâncias voláteis contidas no vinho são retiradas pela evaporação. Na primeira etapa, o etanol é separado do vinho (vapores com 40-50% v/v). O produto do fundo é a vinhaça com uma concentração de sólidos de 8-15% p/p. A vinhaça é recirculada (60% do total) ao processo de fermentação, enquanto o restante vai para o processo de concentração de vinhaça. Através de evaporadores Flubex, a vinhaça é concentrada entre 25-55% por meio da evaporação de água para logo ser enviada ao processo de compostagem. O processo de recirculação de vinhaça é utilizado para reduzir os efluentes e o consumo de água e promover o reciclo de nutrientes. Usualmente, são produzidos de 9 a 14 litros de vinhaça *in natura* por litro de etanol na destilação, mas com o processo de recirculação e concentração da vinhaça somente são produzidos de 1 a 3 litros de vinhaça por litro de etanol.

O etanol retificado constituído pela mistura de etanol com um teor de aproximadamente 94-96º GL e água, segue ao processo de desidratação onde através da adsorção por peneiras moleculares é atingido um teor maior que 99,6º GL. Do fundo da coluna de retificação, retira-se uma solução aquosa chamada flegmaça que é enviada para o sistema de tratamento de águas residuais junto com os condensados da vinhaça. O óleo fúsel é resfriado e decantado para posterior comercialização. Finalmente, o etanol anidro é desnaturado com uma quantidade inicial de gasolina para evitar outros usos. Depois é transportado até o centro de abastecimento de gasolina onde será misturado com 92% de gasolina e distribuído até o posto (Figura 13).

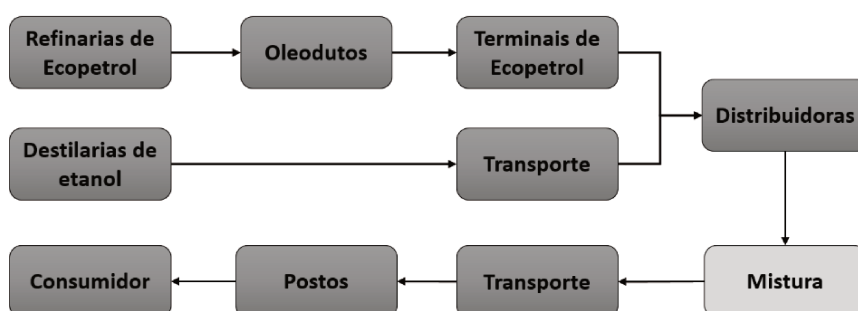


Figura 13 – Logística da cadeia de etanol na Colômbia.

2.4 Resíduos Agroindustriais

O setor sucroenergético na Colômbia possui uma cadeia de produção integrada desde o cultivo da cana-de-açúcar até a disposição dos resíduos. O processamento da cana gera resíduos como: torta de filtro, cinzas da caldeira, vinhaça e seus condensados e flegmaça. O aproveitamento destes resíduos para diminuir seus impactos ambientais e econômicos resultou na produção de compostagem e o tratamento de efluentes líquidos.

2.4.1 Compostagem

Este processo minimiza os impactos ambientais causados pelo descarte inadequado de resíduos agrícolas e industriais e promove um modelo de produção sustentável. A compostagem é realizada em 5 usinas com unidades de tratamento de resíduos da cana-de-açúcar com capacidade de produção de 24.500 toneladas ao mês de composto (Tabela 2) (LIBREROS; SALAMANCA, 2012).

Tabela 2 – Capacidade unidades de compostagem.

Usina	Capacidade (t/mês)
Incauca	8.500
Ingenio Providencia	6.000
Mayagüez	5.500
Riopaila	2.500
Castilla	2.000
Total	24.500

Fonte: (LIBREROS; SALAMANCA, 2012).

O processo de compostagem utiliza como matérias primas o bagaço e outros resíduos agrícolas do pátio de preparo e limpeza (folhas picadas), a torta de filtro, as cinzas da caldeira e a vinhaça concentrada da produção de etanol (TECNICAÑA, 2009). A vinhaça é transportada por tubos até a planta de compostagem e finalmente até reservatórios para seu armazenamento enquanto é utilizada nas leiras. Usualmente, as leiras de composto são de 420 toneladas e misturadas na sua maioria com 70% de torta de filtro, 12% de folhas picadas, 10% de cinzas e 3% de bagaço (TECNICAÑA, 2009).

O processo começa com a montagem das leiras e a mistura por meio de uma revolvedora. Depois, é realizado um controle do processo para conhecer a umidade, a matéria orgânica, e sua relação carbono/nitrogênio (C/N). A temperatura durante o processo deve estar entre 55 e 65°C, deste modo, se usa ar e vinhaça em dias alternados durante 30 dias para manter esta temperatura. No ciclo de maturação, o composto atinge temperaturas superiores a 70°C e perdas de humidade. Finalmente, o ciclo dura entre 60-70 dias com uma relação final de C/N de 15 a 16 (CONSORCIO CUE, 2012).

O composto com alto teor de potássio é utilizado como adubo no sulco de plantio de cana-de-açúcar com uma dose de aplicação de 10-20 toneladas por hectare ao ano, dependendo do requerimento de potássio do solo. Este composto deve apresentar características de acordo com a norma técnica Icontec CTC 5167/2004. Na Tabela 3, mostra-se um exemplo das características do composto comercializado no Valle del Cauca. Finalmente, o composto é transportado por meio de tratores e caminhões até o campo.

Tabela 3 – Características básicas do composto.

Parâmetro	Provicomp	BioCane
Temperatura	40°C	40°C
Umidade	30%	15%
C/N	15	10
N	1%	1%
P ₂ O ₅	1,3%	1%
K ₂ O	2,5%	2,6%

Fonte: (LIBREROS; SALAMANCA, 2012).

2.4.2 Tratamento de efluentes líquidos

O tratamento de águas residuais (PTAR) se realiza para os condensados da evaporação da vinhaça e a flegmaça da destilação. O método de tratamento mais utilizado é por meio de um reator anaeróbio e uma lagoa aeróbia. A digestão anaeróbia é feita através de um reator tipo UASB (Reator Anaeróbio de Manta de Lodo de Fluxo Ascendente) com uma remoção de DQO (demanda química de oxigênio) média de 60%. Além disso, os efluentes do reator são tratados aerobiamente para obter uma maior redução de DQO (94%) (CONSORCIO CUE, 2012). O biogás produzido no reator é direcionado a um sistema de queima, que consiste de um pequeno condensador e uma chaminé (cerca de 75% corresponde a metano) (BOHÓRQUEZ; LUGO, 2010). Finalmente, é utilizada uma lagoa de sedimentação para separar os lodos, que serão enviados ao processo de compostagem, e água tratada que se envia aos rios da região.

Entre as legislações que as usinas devem seguir estão: o decreto 1594 de 1984 e a lei 2811/1974 sobre o uso de água e resíduos líquidos. O acordo 14/1976 da *Corporación Autónoma Regional del Valle del Cauca (CVC)* sobre as normas do controle da contaminação das águas da Bacia do Rio Cauca.

2.5 Comparação dos setores sucroenergéticos colombiano e brasileiro

O Brasil é o maior produtor de cana-de-açúcar, açúcar e de etanol de cana do mundo conquistando, cada vez mais, o uso do biocombustível como alternativa energética. Em 2012, o setor foi responsável por um PIB de mais de US\$40 bilhões e exportações anuais da ordem de US\$ 15 bilhões (UNICA, 2012)

A produção de cana-de-açúcar se concentra nas regiões Centro-Sul e Nordeste do país. A Figura 14, mostra em vermelho as áreas onde se concentram as plantações de cana no Brasil.

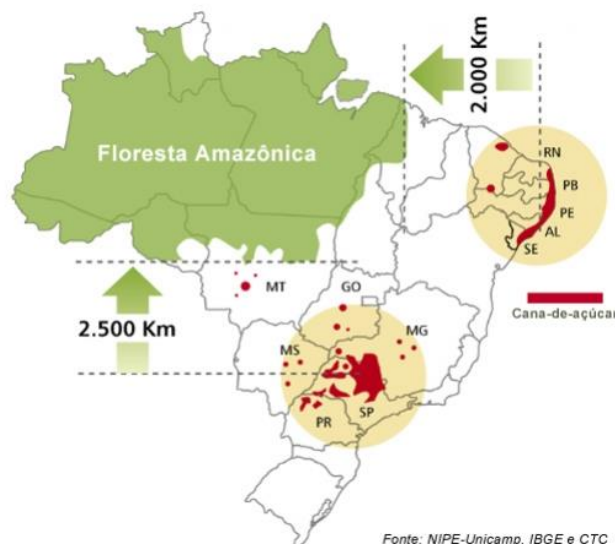


Figura 14 – Localização da área de cana-de-açúcar no Brasil.
Fonte: NIPE-Unicamp, IBGE e CTC.

Em 2014, existiam mais de 400 usinas localizadas principalmente nos estados de São Paulo (40%), Minas Gerais, Goiás e Paraná, as quais trabalham, em média com 64% da cana proveniente de terras próprias e arrendadas. O restante, é fornecido por cerca de 70 mil produtores independentes. Na região Centro-Sul, a quantidade de fornecedores de cana das associações ligadas à Orplana foram, na safra 2013/14, de mais de 15.000 produtores, sendo que 89% destes possuíam propriedades com área até 150 hectares enquanto que somente 1,4% deles possuía áreas acima de 1.000 ha (Tabela 4).

Tabela 4 – Estratificação dos fornecedores de cana do estado de São Paulo na safra 2013/2014.

Área (ha)	Fornecedores	Quantidade de cana entregue (t)	Participação (%)
Até 150	13.612	Até 12.000	27,3
151 até 1.000	1.484	12.001 a 75.000	33
Maior que 1.001	210	Acima de 75.001	39,6
Total	15.306		100

Fonte: Organização de Produtores de Cana da Região Centro-sul, citado pela (SECRETARIA DO MEIO AMBIENTE, 2014).

A capacidade de produção das usinas é variada, de 1 milhão a 10 milhões de toneladas de cana processada por ano, das quais 78% trabalham com a moagem de até 2 milhões de toneladas. Em 2012, a grande maioria das unidades eram usinas de açúcar com destilarias anexas (64% do total), seguida pelas destilarias autônomas (32%) e algumas de produção exclusiva de açúcar (4%) (CONAB, 2013).

A cultura pode ser plantada em três épocas diferentes: sistema de ano e meio (18 meses), sistema de ano (12 meses) ou plantio de inverno. No sistema de ano e meio, a cana é plantada entre janeiro e março. No sistema de ano, esta pode ser plantada em outubro a novembro, mas apresenta menor produtividade. Existem mais de 500 variedades comerciais de cana, porém as 20 principais ocupam 80% da área plantada (BNDES; CGEE, 2008). A colheita da cana ocorre em períodos distintos para as regiões Centro-Sul e Nordeste. No Centro-Sul, o período se concentra nos meses de abril/maio até novembro/dezembro, e no caso do Nordeste é de agosto/setembro até março/abril. Em média, as usinas operam de 180-210 dias por ano (safra da cana), em um regime de 24 horas por dia e sete dias por semana com uma eficiência entre 80% e 90% por conta de chuvas, falhas ou manutenção (SEABRA, 2008).

Após ser colhida, a cana é transportada de modo adequado para reduzir os custos e evitar a perda de qualidade. O transporte tem evoluído ao longo do tempo e são muitos os tipos de transporte utilizados, entre eles, os caminhões romeu e julieta (com dois reboques), o treminhão (três reboques) e o rodotrem (mais de dois semirreboques), cuja capacidade de carga varia de 15 a 60 toneladas. Em 2012, a distância média do canavial à usina na Região Centro-Sul e na Região Norte-Nordeste foi 25 km e 19 km, respectivamente, ficando em uma distância média geral de 24,4 km (CONAB, 2013).

Na safra de 2013/2014 teve uma produção de 12 bilhões de etanol anidro, 16 bilhões de etanol hidratado, 38 milhões de toneladas de açúcar e 659 milhões de toneladas de cana-de-açúcar processadas (UDOP, 2015). A área plantada e colhida foi 9 e 8 milhões de hectares respectivamente. Em média, a produtividade anual está entre 60 e 100 toneladas por hectare, ficando a média nacional em torno de 74 t/ha.ano. O ATR médio obtido na safra foi 134,4 kg/t de cana-de-açúcar. O percentual de ATR destinado à produção de açúcar foi 43% do total e o restante foi para etanol (CONAB, 2014).

A produção de etanol brasileiro é baseada na fermentação tanto do caldo da cana como de misturas de caldo e melaço. No caso do caldo e melaço, o caldo pode ser utilizado em quantidades que variam de usina a usina em função das condições de preço, demanda e perspectivas do mercado (BNDES; CGEE, 2008). Normalmente, 50% do caldo é para o açúcar e 50% para o etanol. As primeiras etapas do processo de fabricação até o tratamento inicial do caldo, são semelhantes ao processo de fabricação de açúcar. A desidratação pode ser feita pela adição do ciclohexano ou por adsorção com peneiras moleculares. Os resíduos do processo consistem na vinhaça (800-1000 litros/TC), na torta de filtro (35-40 kg/TC) e nas cinzas das caldeiras (BNDES; CGEE, 2008).

O etanol pode ser usado como combustível em motores de combustão interna com ignição por centelha de duas maneiras: em misturas de gasolina como etanol anidro; ou como etanol hidratado puro, geralmente para veículos com motores dedicados a etanol ou, mais recentemente, nos motores flex-fuel (BNDES; CGEE, 2008). Os veículos flex-fuel permitem o uso de gasolina ou etanol e de misturas em qualquer proporção. No Brasil, quase 90% dos veículos novos vendidos atualmente são flex-fuel. A maneira mais frequente e imediata para utilizar o etanol é mediante o uso de misturas com gasolina nos veículos já existentes sem necessidade de efetuar modificações nos motores, sendo este último o caso colombiano. Em 2009, o Ministério de Minas e Energia (MME) da Colômbia expediu o decreto 1135 pelo qual se determinava o uso do etanol carburante e a entrada progressiva no mercado colombiano de carros flex-fuel a partir do ano 2012. Não obstante, este foi derogado a partir do ano 2011 (decreto 4892) como resultado da falta da infraestrutura das empresas automotivas para a implementação desta tecnologia.

A continuação, seguem algumas diferenças relevantes entre os dois países considerados.

2.5.1 Irrigação e fertirrigação

Apesar de que a irrigação no Brasil é uma tecnologia ainda pouco disseminada e bem inicial em sua curva de aprendizagem, existem esforços para o alcance de níveis de produção satisfatórios e rentáveis. Entre os principais desafios encontram-se os altos custos de implantação e de operação e as altas quantidades

de água utilizada (BERNARDO, 2008). Devido às secas consecutivas ocorridas nos três últimos anos a produtividade foi afetada e a irrigação vem se tornando cada vez mais uma alternativa relevante.

No Brasil há três tipos de irrigação de cana sendo implementados: a irrigação de salvamento, a suplementar e a plena (NETO, 2015). A primeira consiste em aplicar água após o plantio ou a cada corte anual e utilizando tecnologias de aspersão com hidroroll, montagem direta e caminhões pipas. A irrigação suplementar visa complementar o déficit hídrico na condição de estiagem, mas com um alto consumo de água (2.000-4.000 m³/ha ou 23,5-27 m³/tc). A irrigação plena consiste em aplicar água em regiões com déficit hídrico elevado, principalmente no Nordeste brasileiro, para aumentar a produtividade de 40 ton/ha até 90 ton/ha próxima à da região Centro-Sul (NETO, 2015).

A técnica de fertirrigação destaca-se como destino da vinhaça (vinhoto) que é aplicada na área de cultivo na busca de maior produtividade agrícola, benefícios químicos, biológicos e físicos ao solo, na disponibilidade de água e redução do uso de fertilizantes químicos. Entretanto, se aplicada em excesso pode causar sérias alterações na qualidade da matéria-prima. Doses inferiores a 300 m³/ha indicam que não há impactos danosos ao solo, mas o uso controlado e a fiscalização são medidas essenciais para garantir a sustentabilidade (BNDES; CGEE, 2008). Com o teor alcoólico médio final obtido nas usinas (8,5 °GL) tem-se de 7-14 litros de vinhaça por litro de etanol produzido. A vinhaça caracteriza-se por alta demanda bioquímica de oxigênio (DBO), rica em potássio e enxofre e quantidades consideráveis de fósforo, nitrogênio, cálcio e magnésio. Com a utilização da vinhaça em 40% da área cultivada e considerando-se a aplicação de 120 kg de K₂O/ha, se obteve uma economia de mais de 500 mil toneladas de cloreto de potássio (KCL) (MUTTON et al., 2010).

No Brasil, não existe uma legislação específica para a utilização de resíduos agroindustriais, no entanto, devem ser obedecidas várias leis ou decretos, entre eles (MUTTON et al., 2010):

Decreto n. 24.643/1934 que resguarda os corpos de água contra a disposição de poluentes. Portaria Minter n. 124/1978 que proíbe o lançamento direto ou indireto da vinhaça em mananciais superficiais. Lei n 7.641/91 que permitiu a fertirrigação de solo por meio da aplicação de efluentes líquidos industriais de origem orgânica, não havendo presença de compostos orgânicos metálicos. Norma técnica

PA.231 da CETESB, que disciplinou a aplicação da vinhaça no solo agrícola do Estado de São Paulo.

Além da distribuição da vinhaça por meio de canais, outros modais vêm sendo adotados pelas usinas signatárias no Protocolo Agroambiental, como tubulação, caminhões e hidrorolls.

Na Colômbia, a irrigação é uma técnica de rotina utilizada há muito tempo. A maioria da área plantada com cana-de-açúcar recebe irrigação suplementar (VIVEROS, 2011). Na região do Vale do Rio Cauca, a precipitação varia entre 800 e 2.600 mm ao ano, com uma média de 1.224 mm (CENICAÑA, 2014). Apresenta dois períodos de chuvas, de março até maio e de outubro até novembro. Os requerimentos de água por ciclo de cultivo de 13 meses, oscilam entre 1.000 e 2.500 mm. A água para irrigação vem principalmente de fontes superficiais e subterrâneas. Em 2008, no Valle del Cauca, o uso da água superficial e subterrânea foi 64% e 88%, respectivamente (PÉREZ et al., 2011).

A cana-de-açúcar faz parte das 5 culturas que consomem mais água irrigada no país. Da pegada hídrica total do setor agrícola na Colômbia, a cana representou o 11% do total depois do arroz, milho e café (22%) (URIBE; WWF COLOMBIA, 2012). Além disso, o Valle del Cauca tem uma grande participação da pegada hídrica nacional com 3.000 Mm³/ano, principalmente verde e cinza. O setor sucroalcooleiro foi responsável por 2% da carga poluidora no rio Cauca em 2008 (ASOCAÑA, 2008b).

No caso da fertirrigação com efluentes e vinhaça é uma prática pouco usada no país, mas existe fertirrigação com vinhaça *in natura* misturada com uréia em relação 3:1 e com dose de aplicação entre 2 a 15 m³/ha, aplicada em uma área de 50.000 hectares localizadas em 3 usinas da região (Manuelita, Providencia e Mayaguez). O sistema de aplicação é por meio da carreta tanque agrícola com até 4 injetores (PÁEZ, 2001). Na usina Ingenio Providencia, a utilização de vinhaça como adubo orgânico diminuiu a utilização de cloreto de potássio (KCL) de 299 ton/ano de K₂O em 2004 a 11 ton/ano em 2010 (INGENIO PROVIDENCIA, 2011). Não obstante, o principal uso da vinhaça no país é para a produção de composto orgânico, junto com a torta de filtro, as cinzas da caldeira, resíduos de cana da usina e o lodo da planta de tratamento de efluentes líquidos. O composto final é utilizado como fertilizante no campo. A capacidade mensal de 5 usinas da região é de 24.500 toneladas

(LIBREROS; SALAMANCA, 2012). Desta maneira, o composto se tornou uma alternativa de produção limpa com benefícios ambientais e econômicos.

2.5.2 Índice de mecanização

No Brasil, na safra 2006/07, cerca de 66% dos canaviais do estado de São Paulo eram queimados, mas na safra 2013/14 somente 16,3% deles ainda eram queimados. Devido a que isso representava danos ambientais e para a saúde da população mais próxima, foram criados mecanismos para estimular e consolidar o desenvolvimento sustentável da produção da cana. Segundo a Lei 11.241/2002 se elimina de maneira gradativa a queima da palha da cana-de-açúcar (como método facilitador do corte) para os plantadores de cana que a utilizem como método de pré-colheita. Inicialmente estava prevista a erradicação da queima em áreas mecanizáveis para o ano 2021 e em áreas não mecanizáveis para o ano 2031. Não obstante, segundo o Protocolo agroambiental do setor sucroenergético Paulista (dispõe diretrizes técnicas ambientais a serem implementadas pelas usinas e fornecedores) houve uma redução do prazo legal de queima da palha de cana em áreas mecanizáveis para 2014 e para áreas não mecanizáveis no ano de 2017 (SECRETARIA DO MEIO AMBIENTE, 2014).

Do total de área em produção na safra 2013/2014, o índice de mecanização foi 84,8% com um aumento de 3,5 pontos percentuais em relação à safra anterior. Este índice permite também mensurar o impacto da colheita mecânica sobre o emprego de cortadores de cana-de-açúcar. A demanda por trabalhadores na colheita foi estimada em 51,7 mil cortadores, cerca de 18 mil a menos em relação à safra 2012/13 (INSTITUTO DE ECONOMIA AGRÍCOLA, 2015).

Na Colômbia, o índice de mecanização é de 51% em 2015 com um aumento de 50% comparado com 2008. Em 2007, a mecanização foi 15% da área plantada, as colhedoras tinham um rendimento de 25 a 30 toneladas por hora de operação, com um consumo médio de 1,6 litros de diesel por tonelada de cana verde (TECNICAÑA, 2007). A prática disseminada da queima da cana-de-açúcar na Colômbia começou a partir de 1973, mas devido aos seus impactos ambientais a queima tem diminuído e a requeima de cana foi eliminada. Além disso, Cenicaña criou um manual de procedimento para efetuar a queima da cana de acordo com as características da região e as condições meteorológicas.

2.5.3 Sistema de pagamento, custo da cana-de-açúcar e preço do açúcar

No Brasil, os produtores independentes estabelecem com as indústrias contratos de fornecimento, em sua maioria, onde o pagamento é feito pela qualidade da matéria prima em termos de qualidade e quantidade de açúcares totais recuperáveis (ATR) com cálculos definidos pela metodologia do Conselho dos produtores de cana-de-açúcar do estado de São Paulo (Consecana-SP) (CONAB, 2013). Na safra 2013/14 a qualidade média da matéria prima foi 133,32 kg de ATR/TC e o preço médio do ATR foi 0,4576 R\$/kg de ATR (UNICA, 2014).

Na safra 2013/14 os custos médios de produção de fornecedores de cana-de-açúcar na região Centro-Sul tradicional e de expansão foi 76,56 e 64,40 R\$/TC respectivamente e na região Nordeste foi 95,31 R\$/TC. Os custos da cana própria na região Centro-Sul foram de 81,24 e 79,73 R\$/TC na região tradicional e de expansão respectivamente (BIGATON et al., 2015). Observa-se que as operações realizadas pelos fornecedores foram menos onerosas que as realizadas pelas usinas. A formação do canavial, o arrendamento e remuneração da terra tiveram a maior participação no custo.

Na Colômbia, existem três tipos de contratos para o pagamento da cana-de-açúcar, os quais podem ser modificados segundo as relações da usina e o fornecedor de cana (GERARDO; TORRES, 2000).

- No contrato de compra-venda (usina assume custos de colheita e transporte de cana), fica acordado o pagamento de 58 kg de açúcar por tonelada de cana ao produtor. O que é equivalente a um rendimento de 11.6% de sacarose na cana, sendo que 50% ficam com o produtor e o restante com a indústria. Também pode ser através do rendimento de açúcar na cana ou uma combinação deles. O preço é estimado de acordo com um cálculo de ponderação que leva em consideração o preço nacional, internacional e a relação entre as vendas ao mercado local e exportações.

- No caso de contas com participação (a usina ou fonte externa assume todas as despesas relacionadas à produção e administração da terra) fica acordado o pagamento de 27 kg de açúcar por tonelada de cana ao fornecedor da terra.

- No caso de arrendamento, a usina realiza o pagamento de um valor fixo (quilogramas por área arrendada) por mês e assume o plantio da cana.

Quanto aos custos, a disponibilidade das informações é limitada e a divulgação de qualquer tipo de informação fica a critério das próprias usinas. As atividades de preparação e adequação de terras representam de 25-30% dos custos enquanto que as atividades de plantio até colheita representam de 65-70% dos custos, sendo o plantio o mais representativo (FEDESARROLLO; IQUARTIL, 2012). Em 2010, os custos de produção para um produtor com mais de 100 hectares foi 82 R\$/TC e para o produtor com menos de 50 hectares foi 77 R\$/TC. Além disso, na produção de um hectare de cana as atividades de irrigação representam 22% do custo total e os insumos 19%, em média o custo por hectare em 2014 foi R\$ 5.970 (COLÔMBIA.MINAGRICULTURA, 2015).

Na Figura 15, são apresentados os preços da cana no Brasil e na Colômbia ao longo do tempo. Observa-se que o preço ao produtor colombiano é maior que o brasileiro, mas seguindo quase a mesma tendência.

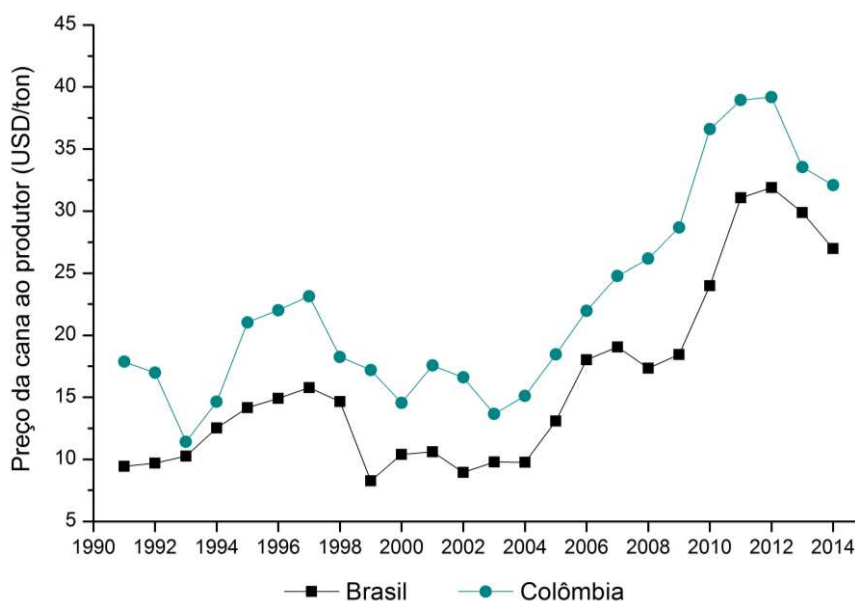


Figura 15 – Preço da cana-de-açúcar ao produtor na Colômbia e no Brasil.
Fonte: Baseado em (FAO, 2014).

Enquanto ao preço do açúcar, no estado de São Paulo o preço ao consumidor foi 1,88 R\$/kg e em Bogotá foi 1,84 R\$/kg, enquanto o preço internacional de açúcar branco foi 1,17 R\$/kg (Figura 16).

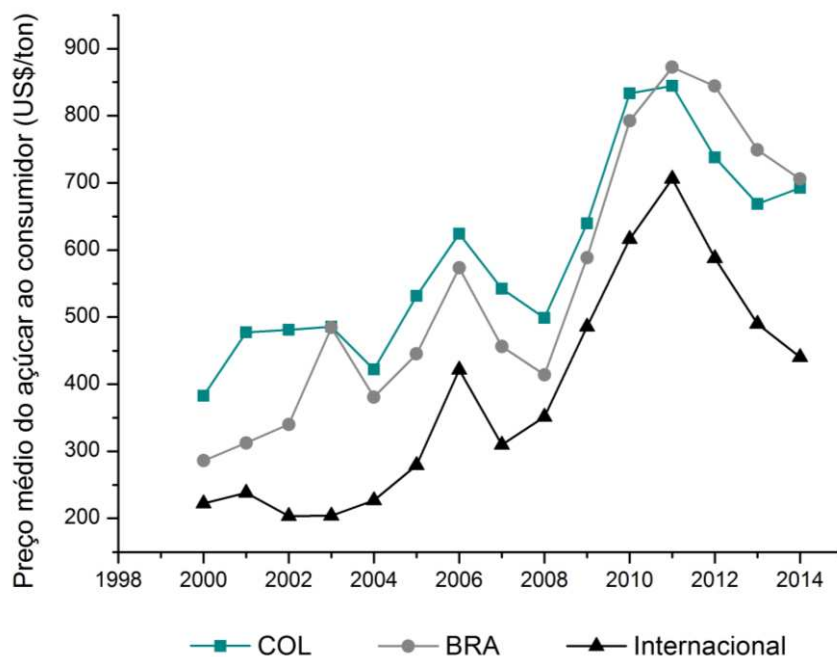


Figura 16 – Preço do açúcar ao consumidor na Colômbia, no Brasil e no mundo.
 Fonte: Baseado em (ASOCAÑA, 2014; CORABASTOS, 2014; INSTITUTO DE ECONOMIA AGRÍCOLA, 2014).

2.5.4 Uso do melaço

No Brasil, o melaço constitui uns dos principais subprodutos da indústria. O melaço é utilizado principalmente na fabricação de etanol, assim como matéria prima para produzir cachaça e em outros processos biotecnológicos para a produção de rações, levedura prensada, antibióticos, entre outros (ALCARDE, 2012).

Na Colômbia, em 2013, foram produzidas mais de 240 mil toneladas de melaço, utilizadas para consumo pecuário, leveduras, álcoois, ração animal, entre outros. Aproximadamente, 40 mil toneladas de melaço foram exportadas no mesmo ano (Figura 17) (ASOCAÑA, 2016). Além disso, é produzido ácido cítrico, um aditivo utilizado em alimentos, ao qual são destinados 2.000 toneladas de açúcar e 7.500 toneladas de melaço por mês (ARANGO et al., 2011).

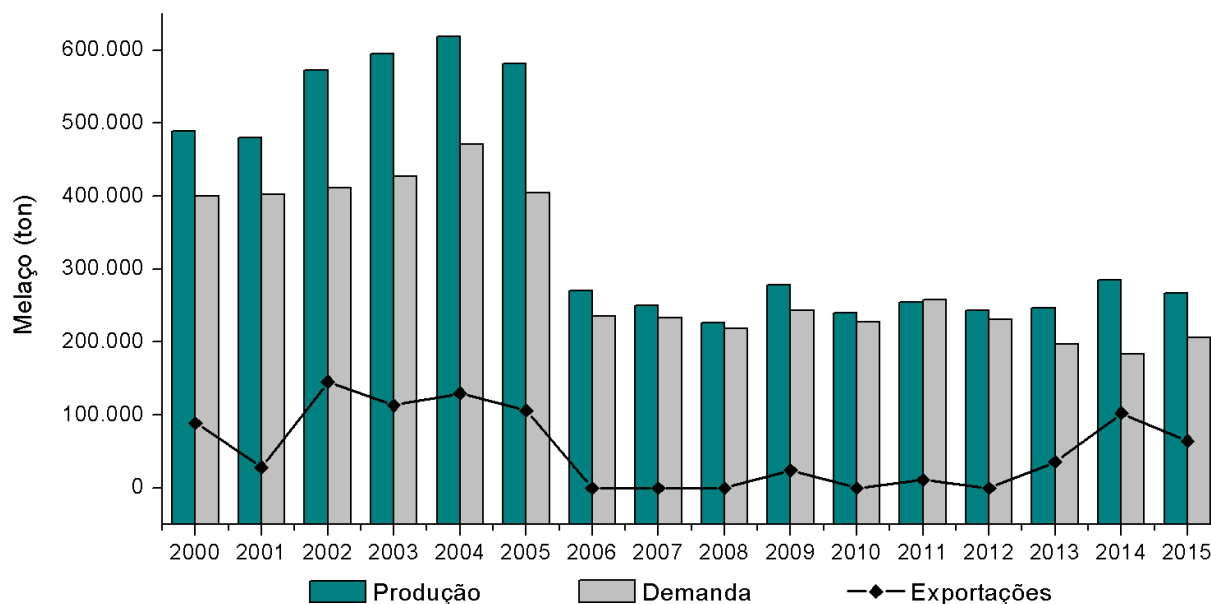


Figura 17 – Exportações de melaço na Colômbia.

Fonte: Baseado em (ASOCAÑA, 2016).

2.5.5 Custo e preço do etanol

No Brasil, o custo de produção de etanol anidro e hidratado na região Centro-Sul na safra 2011/12 foi 1,25 e 1,14 R\$/litro de etanol respectivamente (PECEGE, 2012). O preço do etanol ao produtor na safra 2013/14 no estado de São Paulo foi 1,25 R\$/litro de etanol hidratado e 1,40 R\$/litro de etanol anidro (UNICA, 2014). O preço do etanol hidratado ao consumidor no ano de 2014 foi 2,067 R\$/litro.

No caso colombiano, no começo do programa de biocombustíveis (em 2006) o custo de produção de etanol foi 491 USD/tonelada (63,3 USD/barril), ainda alto quando comparado com os demais produtores de etanol no mundo, já que foi aproximadamente 92% maior ao custo de produção no Brasil (CONPES, 2008).

Na Figura 18, observa-se que cerca de 70% dos custos são devidos à matéria prima. Em 2014, o preço do etanol ao produtor e ao consumidor foi 1,89 e 2,53 R\$/litro, respectivamente (Figura 19) (FEDEBIOCOMBUSTIBLES, 2015).

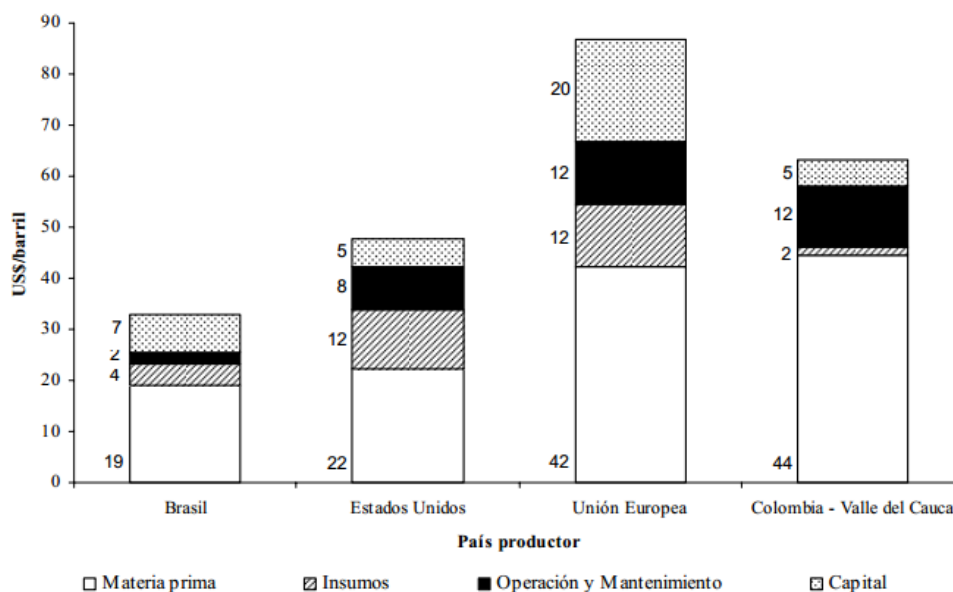


Figura 18 – Estrutura de custo do etanol na Colômbia.

Fonte: (CONPES, 2008).

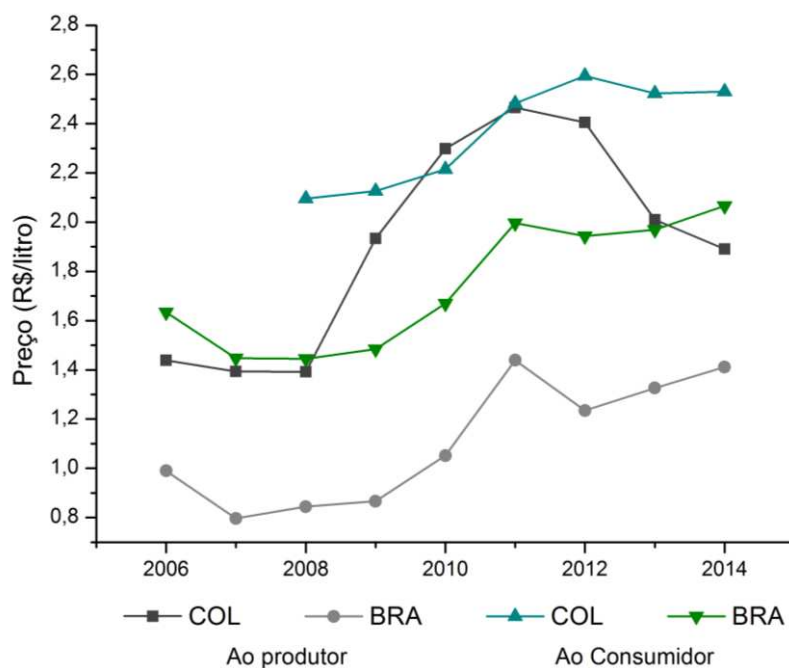


Figura 19 – Preço de etanol ao produtor e ao consumidor na Colômbia e no Brasil.

Fonte: Baseado em (CEPEA, 2014; FEDEBIOCOMBUSTIBLES, 2015).

Segundo a Figura 20, a composição de preços ao consumidor no Brasil e na Colômbia difere na proporção de impostos aplicados, assim como a renda do produtor de gasolina e etanol.

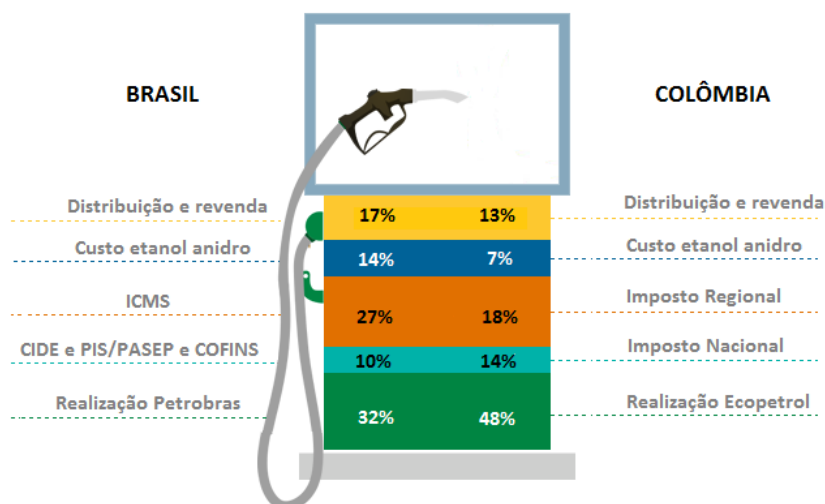


Figura 20 – Composição de preços ao consumidor no Brasil e na Colômbia.
 Fonte: (COLÔMBIA.MME, 2015; PETROBRAS, 2015).

2.5.6 Energia elétrica excedente e etanol de segunda geração

A matriz elétrica brasileira está composta na sua maioria (74,6%) pelas energias renováveis, principalmente, a geração hidráulica que teve uma proporção de 65,2% no ano 2014. Na biomassa, o recurso de maior potencial para geração de energia elétrica no país é o bagaço de cana-de-açúcar e mais recentemente a palha de cana-de-açúcar. Como consequência da diminuição da queima na pré-colheita da palha, um grande volume de palha deverá ficar disponível e seu uso como recurso energético tornou-se uma opção atrativa para as usinas (SEABRA, 2008). Em 2014, o setor sucroenergético brasileiro gerou 32,3 TWh, sendo 13,2 TWh destinados ao consumo próprio e 19,4 TWh (4,1% do consumo de energia elétrica no Brasil) como oferta para a rede nacional e que representa 13% de água poupada nos reservatórios das hidroelétricas do Sudeste e Centro-Oeste. Com a utilização de bagaço e palha o potencial técnico de oferta seria de 129 TWh (UNICA, 2015).

A palha representa aproximadamente um terço da energia primária total de cana no campo, mas usualmente é deixada no campo ou queimada antes da colheita perdendo assim a sua potencialidade (LEAL et al., 2013). Esse potencial no país é cerca de 14% da massa do colmo, quer dizer que cada tonelada de colmo produz, em média, 140 kg de palha base seca (MACEDO et al., 2001; HASSUANI et al., 2005). Nesse sentido, existe uma grande quantidade de material lignocelulósico (MLC) que poderia ser recuperado e utilizado para geração de eletricidade ou etanol de segunda geração, além de melhorar o equilíbrio global de energia (LEAL et al., 2013). Nesse

contexto, estratégias eficientes de recolhimento, transporte e armazenamento estão sendo desenvolvidas. São destacados dois sistemas de recolhimento de palha, através de fardos e através da colheita integral (MACEDO et al., 2001). No primeiro, a palha permanece no solo por um período de 8 a 15 dias até que atinja umidade de 12%-15%. Depois, a palha é enleirada e enfardada em forma cilíndrica ou prismática que facilita o seu carregamento e transporte até a usina (CARDOSO, 2014). O recolhimento através de colheita integral é realizado por meio da redução da velocidade de rotação dos ventiladores das colhedoras e consiste no transporte da palha junto com a cana picada até a usina onde será separada em estações de limpeza a seco. No país existem usinas que utilizam os dois sistemas e recentemente o Palha Flex, inovação tecnológica para o recolhimento e processamento da palha de cana para cogeração ou etanol de segunda geração (LINERO, 2015).

A capacidade instalada de geração elétrica nas 387 usinas em operação foi 9.881 MW, com uma potência média por usina de 26 MW. Em 2014 existiam 177 unidades sucroenergéticas exportando excedentes de bioeletricidade para a rede. A eletricidade de cana detém, atualmente, 7,4% da potência outorgada no Brasil e quase 79% da fonte de biomassa, sendo assim a terceira fonte de geração mais importante da matriz elétrica. A participação é importante não só para a diversificação da matriz elétrica, mas também porque a safra coincide com o período de estiagem na região Sudeste/Centro-Oeste, onde está concentrada a maior potência instalada em hidrelétricas do país (ANEEL, 2013).

A matriz de energia elétrica colombiana está constituída em 65,54% pela energia hidráulica, 28,61% energia térmica, a cogeração teve uma participação de 0,73% e o restante de outras fontes (UPME, 2012a). Em 2014, existiam 21 usinas de cogeração no país com uma capacidade instalada de 351 MW, com participação de 59% das usinas do setor sucroalcooleiro. O principal combustível foi a biomassa com uma participação de 65%, seguido pelo carvão com 19% (ANDI, 2014). Em 2014, a capacidade instalada das usinas esteve em torno de 215 MW que representa 0,53% da capacidade nacional e teve excedentes de 68 MW. A projeção é apresentar uma capacidade de 369 MW para 2018. Além disso, são produzidos 6 milhões de toneladas de bagaço, das quais 80% são utilizados para geração de eletricidade (215 MW), 15% como matéria-prima para produzir papel de diversas características e o restante é usado para a produção de painéis de aglomerado e na indústria de móveis (ARANGO

et al., 2011). O consumo médio de carvão de uma usina está entre 10 mil e 15 mil toneladas ao ano. O consumo de vapor e energia nas usinas na Colômbia, em 2007 foi em média de 580 kg/TC e de 24 kWh/TC respectivamente (CASTILLO M, 2007).

Na busca para a expansão da produção de etanol sem comprometer a segurança alimentar e assegurar o fornecimento de combustível, o uso de materiais lignocelulósicos como o bagaço excedente, palha e outros resíduos agrícolas para produção de etanol têm sido incentivada (DIAS et al., 2011). No Brasil, o etanol celulósico ou de segunda geração (2G) já atingiu o estágio de plantas comerciais com uma capacidade instalada de produção de cerca de 140 milhões de litros por ano (MILANEZ et al., 2015). Isto como resultado de um longo período de desenvolvimento tecnológico em nível mundial, embora a produção comercial ainda não foi atingida. Diversos estudos têm sido realizados para avaliar às condições apropriadas para a produção de etanol E2G no Brasil. No Laboratório Nacional de Ciência e Tecnologia do Bioetanol (CTBE) destacam-se os seguintes:

- DIAS et al. (2012a) compararam a produção independente de etanol 2G e a produção integrada de etanol 1G2G. Os resultados mostraram que a produção integrada de etanol 1G2G possui os melhores resultados econômicos.

- MILANEZ et al. (2015) avaliaram o potencial de melhoria de eficiência e redução de custos de produção 2G em diversos cenários tecnológicos no Brasil para uma faixa de tempo de curto a longo prazo. Concluíram que o etanol 2G pode ser mais competitivo que o etanol convencional (1G) e pode ser uma alavanca para exportações, desde que exista investimento em novas usinas e em P&D.

Na Colômbia a produção de etanol de segunda geração ainda está em período de pesquisa e desenvolvimento.

CAPÍTULO 3

3. METODOLOGIA

Para o desenvolvimento do projeto foi utilizada a ferramenta Biorrefinaria Virtual de cana-de-açúcar (BVC) desenvolvida pelo CTBE como ferramenta de avaliação de cenários atuais da produção de açúcar, etanol e eletricidade na Colômbia. A BVC é uma plataforma de modelagem matemática e simulação computacional de processos integrada a outras ferramentas analíticas para mensurar o estágio de desenvolvimento e o potencial de sucesso de uma nova tecnologia no setor sucroenergético (BONOMI et al., 2016).

Entre os componentes da BVC estão incluídos:

- CanaSoft: Modelo desenvolvido para a simulação dos parâmetros mais importantes para a avaliação técnica e de impactos de sustentabilidade das práticas agrícolas de produção de cana-de-açúcar e de outras biomassas.
- Simulação da biorrefinaria (AspenPlus®): Utilizado para representar e estimar os balanços de massa e energia do processamento na parte industrial da biorrefinaria, permitindo a avaliação das diferentes tecnologias.

Esta metodologia foi dividida em quatro fases (Figura 21), a primeira foi a definição dos cenários de estudo e a coleta de dados da literatura e de comunicações com o setor. A segunda, foi a definição dos parâmetros técnicos e econômicos adotados na parte agrícola e na parte industrial para os dois cenários. A terceira fase destina-se à realização e análise da simulação (agrícola e industrial) dos cenários e finalmente, a quarta fase está constituída pela análise dos impactos ambientais através da metodologia de Avaliação de Ciclo de Vida (ACV) com utilização do método ReCiPe (GOEDKOOPE et al., 2013) no software comercial SimaPro®, e a avaliação econômica através de conceitos baseados na engenharia econômica.

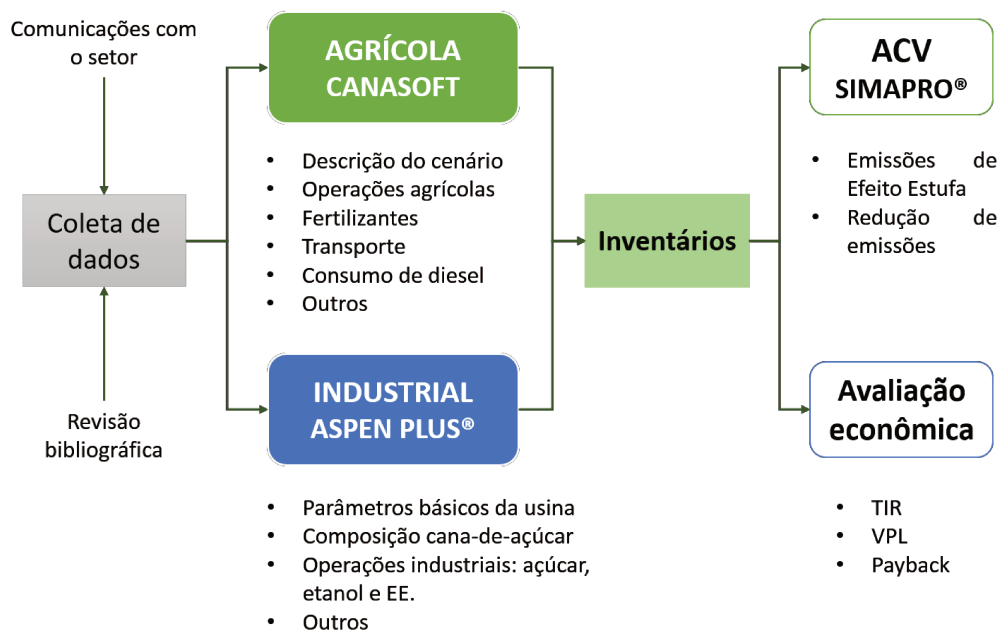


Figura 21 – Metodologia utilizada para o desenvolvimento do projeto.

Fonte: Baseado na BVC, (BONOMI et al., 2016).

Para o desenvolvimento do estudo foram selecionados três cenários para a região do Vale do Rio Cauca. O primeiro cenário caracteriza-se pela produção de açúcar, etanol e eletricidade nas condições atuais médias na região. Consideramos a queima de carvão e bagaço na caldeira, devido ao seu consumo em 3 das 6 usinas com produção de etanol (Tabela 5).

Tabela 5 – Consumo de combustível na caldeira na produção de etanol (% base energética).

Usina	Combustível na Caldeira	Eletricidade produzida (MWh)
Providencia	10,6% carvão e 89,4% bagaço	276
Incauca	27,5% carvão e 72,5% bagaço	248
Mayaguez	28,4% carvão e 71,6% bagaço	193
Risaralda	100% Bagaço	82

Fonte: (XM, 2015a)

O segundo cenário inclui as mesmas características do cenário 1, mas não considera a combustão de carvão na caldeira. O terceiro cenário representa um caso futuro considerando a integração da produção de etanol de segunda geração na primeira geração (1G2G). A Tabela 6, apresenta as principais diferenças entre os três cenários considerados.

Tabela 6 – Principais diferenças entre os cenários avaliados.

Item	Cenário 1	Cenário 2	Cenário 3
Queima de cana na colheita mecanizada (%)	6	6	-
Queima de carvão na caldeira	Sim	Não	Não
Queima de palha na caldeira	Não	Não	Sim
Recolhimento de palha	Não	Não	Sim
Método de recolhimento	-	-	Enfardamento
Redução consumo de vapor (%)	-	-	20%
Eficiência caldeira (%)	75,17	75,17	87,2

Na etapa agrícola, foi utilizado o modelo CanaSoft segundo os parâmetros da produção de cana-de-açúcar colombiana. Na etapa industrial, o software Aspen Plus® foi utilizado para a simulação do processo industrial colombiano a partir de diversas simulações feitas pelo CTBE (BONOMI et al., 2016). Depois da coleta e compilação de dados foram gerados os inventários de ciclo de vida respectivos, quantificando-se as entradas e saídas do sistema de produção analisado. Após esta geração de inventários (agrícola e industrial), foi realizada uma análise ambiental usando a metodologia de Avaliação do Ciclo de Vida (ACV). O método de avaliação de impacto ambiental de ciclo de vida considerado neste trabalho foi ReCiPe e por meio do software SimaPro®. Finalmente, uma análise de viabilidade econômica para os dois cenários foi realizada. A coleta de dados incluiu informações de literatura científica, comunicações com o *Centro de Investigación de la Caña de Azúcar de Colômbia* (Cenicaña) e adaptações do processo brasileiro.

3.1 Cenário 1: Atual

Foi selecionado o cenário médio atual de uma usina processando 3 milhões de toneladas ao ano com a tecnologia convencional que produz açúcar, etanol anidro e eletricidade. A produção de etanol diferencia-se do processo brasileiro, principalmente, pela recirculação e concentração de vinhaça, pela cogeração com queima de bagaço e carvão e pelo processo de compostagem e tratamento de águas residuais. A simulação computacional do processo inclui todas as operações agrícolas da cana desde o campo até a sua chegada na usina e todas as operações industriais da fábrica de açúcar, da destilaria e da unidade de cogeração (Figura 22).

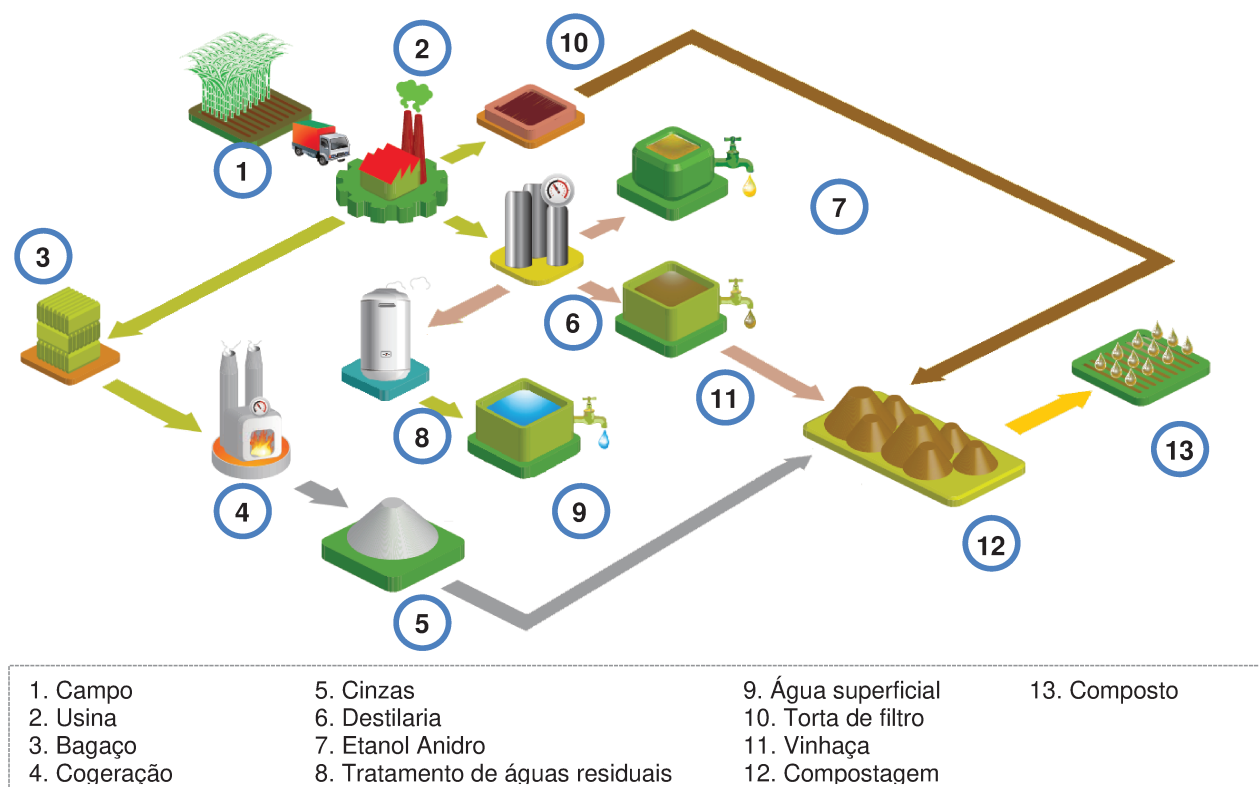


Figura 22 – Processo de produção de etanol na Colômbia.

Fonte: Baseado em (MORNADINI; QUAIA, 2013).

3.1.1 Fase agrícola

Na fase agrícola, foi considerada a produção e colheita de cana o ano todo (330 dias), assim como irrigação por meio de canal aberto (gravidade) com um consumo de água aproximado de 1500 m³/ha realizado 5 vezes ao ano. A quantidade de água requerida para o processo de irrigação foi calculada considerando a evapotranspiração média anual da cana (1023 mm), a percolação média da região (750 mm) e a precipitação média anual (1224 mm). A área com irrigação representou 95% da área total e com captação de 50% de água superficial e 50% de água subterrânea. A colheita é realizada de forma manual e mecanizada. Considera-se que 59% da colheita mecanizada utiliza o transporte tipo bate-e-volta. O tipo de transporte mais utilizado são os caminhões, com 5 reboques de 12 toneladas, 4 reboques de 20 toneladas e 3 reboques de 32 toneladas (CENICAÑA, 2014). Na Tabela 7, são apresentados os demais parâmetros agrícolas utilizados.

Tabela 7 – Dados básicos para a produção de cana.

Item	Unidades	Valor
Produtividade média	t/ha	120
Distância de transporte	km	23,27
Número de cortes		5
Plantio semi-mecanizado	%	100
Aplicação de mudas	t mudas/ha	10
Uso de fertilizantes		
P ₂ O ₅	kg/ha.ano	50
K ₂ O	kg/ha.ano	50
Nitrogênio	kg/ha.ano	350
Colheita mecanizada total	%	51
Colheita manual total	%	49
Colheita cana crua mecanizada	%	45
Colheita cana crua manual	%	6
Colheita cana queimada manual	%	43
Colheita cana queimada mecanizada	%	6
Aplicação de composto	kg/ha.ano	9.000
Recolhimento de palha		Não

Fonte: Baseado em (CONSORCIO CUE, 2012; CENICAÑA, 2014).

3.1.2 Fase industrial

Na fase industrial, foi selecionada a composição da cana-de-açúcar para simular o processo produtivo, assim como foram definidas as operações a serem incluídas na simulação. A simulação está baseada em uma usina anexa brasileira, na qual foram realizadas as adaptações necessárias e inseridos os dados da produção colombiana. Os parâmetros mais relevantes da simulação se encontram no Apêndice 1.

A simulação inclui quatro hierarquias: Preparo da cana e extração do caldo, produção de açúcar, produção de etanol e cogeração (CHP) (Figura 23). Dentro de cada hierarquia se encontram as operações unitárias realizadas para cada processo. As operações que foram agregadas para representar as condições colombianas são: sulfitação do caldo, recirculação e concentração de vinhaça e a queima de carvão na caldeira.

Na hierarquia de preparação e extração de cana, recebe-se a cana que passa pelo processo de lavagem com água e depois a cana é enviada a moenda (Figura 24). Na Tabela 8, encontram-se os dados do preparo. A composição da cana-de-açúcar utilizada foi: umidade de 70%, açúcares com 14% e fibra de 13.5% (Tabela

9) (QUINTERO et al., 2008). Além disso, foram consideradas as impurezas vegetais (6,9%) e minerais (0,7%) da cana após a colheita (REBOLLEDO C, 2006).

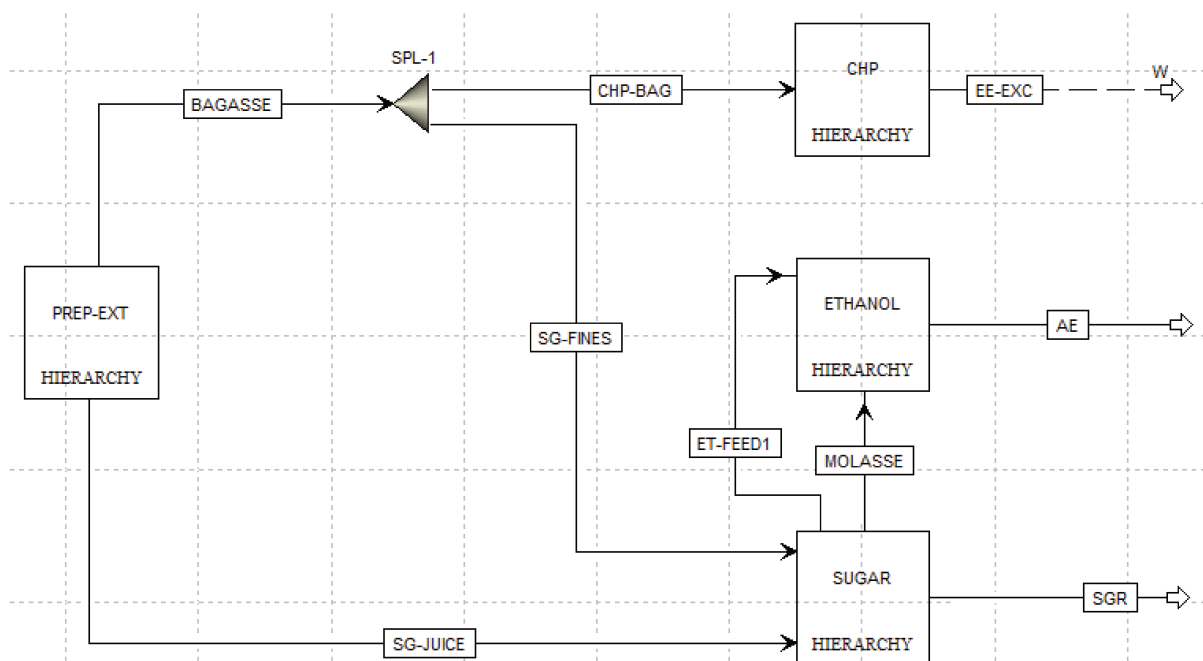


Figura 23 – Hierarquias do processo industrial de processamento de cana-de-açúcar.

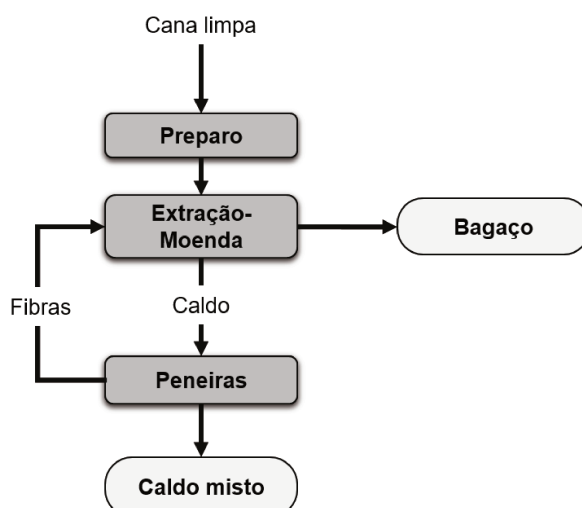


Figura 24 – Preparo da cana e extração dos açúcares.

Tabela 8 – Dados adotados para a simulação do preparo da cana e extração do caldo.

Item	Unidades	1G
Moagem	Toneladas	3.000.000
Operação efetiva	Dias	330
Vazão de água de embebição	% cana	26,8
Eficiência média de extração de açúcares	%	96,24
Umidade do bagaço	%	47,9

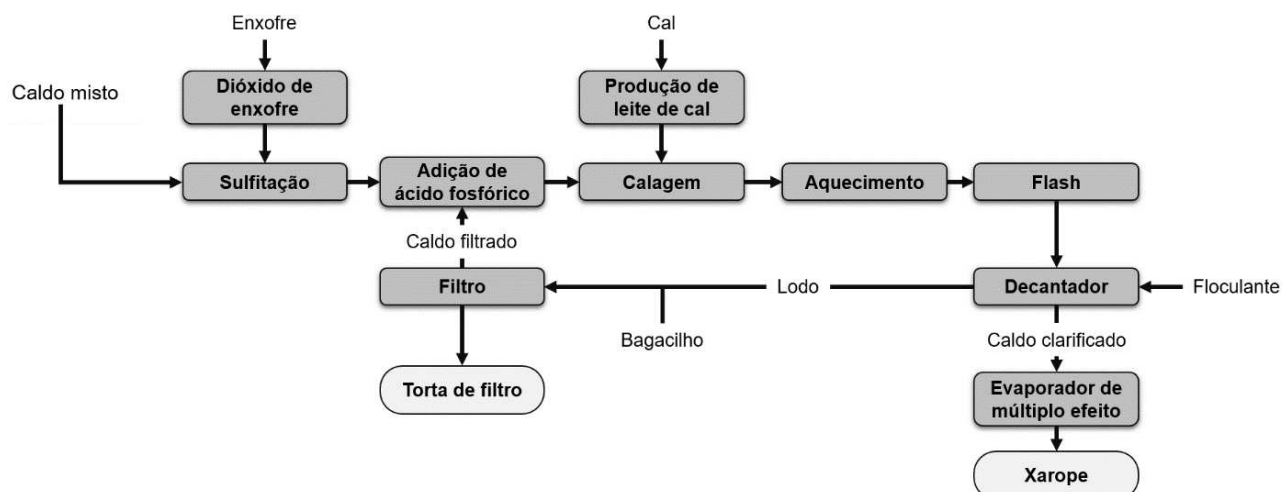
Fonte: Baseado em (CENICAÑA, 2014).

Tabela 9 – Composição das biomassas utilizadas no estudo (base úmida).

Composição biomassas (%)	Colmos	Bagaço	Palha 2G
Água	70,0	47,9	15,0
Sacarose	14,0	1,7	4,3
Açúcares redutores	0,6	0,1	0,2
Fibras	13,2	49,1	77,9
Celulose	6,2	22,7	32,4
Hemicelulose	3,7	13,9	24,8
Lignina	3,3	12,5	20,6
Outros	2,2	1,2	2,6

Fonte: Baseado em (QUINTERO et al., 2008; MILANEZ et al., 2015).

Na hierarquia de açúcar, encontra-se o tratamento e concentração do caldo (Figura 25), o cozimento, cristalização, centrifugação e secagem do açúcar (Figura 26). No tratamento de caldo, além da operação de calagem e adição de flocculante, a corrente de caldo passa primeiro pela operação de sulfitação, na qual o dióxido de enxofre será absorvido pela água. O enxofre é adicionado a um reator (RStoic) e a conversão da reação é de 100% segundo a Equação 1.

**Figura 25** – Fluxograma para o tratamento de caldo.

Fonte: Baseado em (CENICAÑA, 2008a).

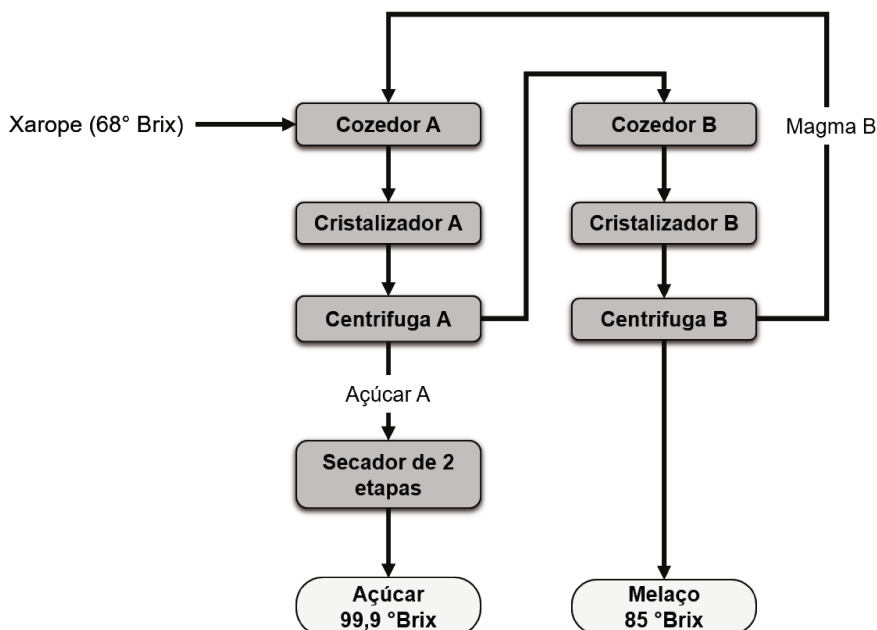


Figura 26 – Fluxograma do cozimento, cristalização, centrifugação e secagem do açúcar.
Fonte: Baseado em (CENICAÑA, 2008a).

Na hierarquia do etanol, encontram-se os processos de fermentação, destilação, recirculação e concentração de vinhaça e desidratação (Figura 27).

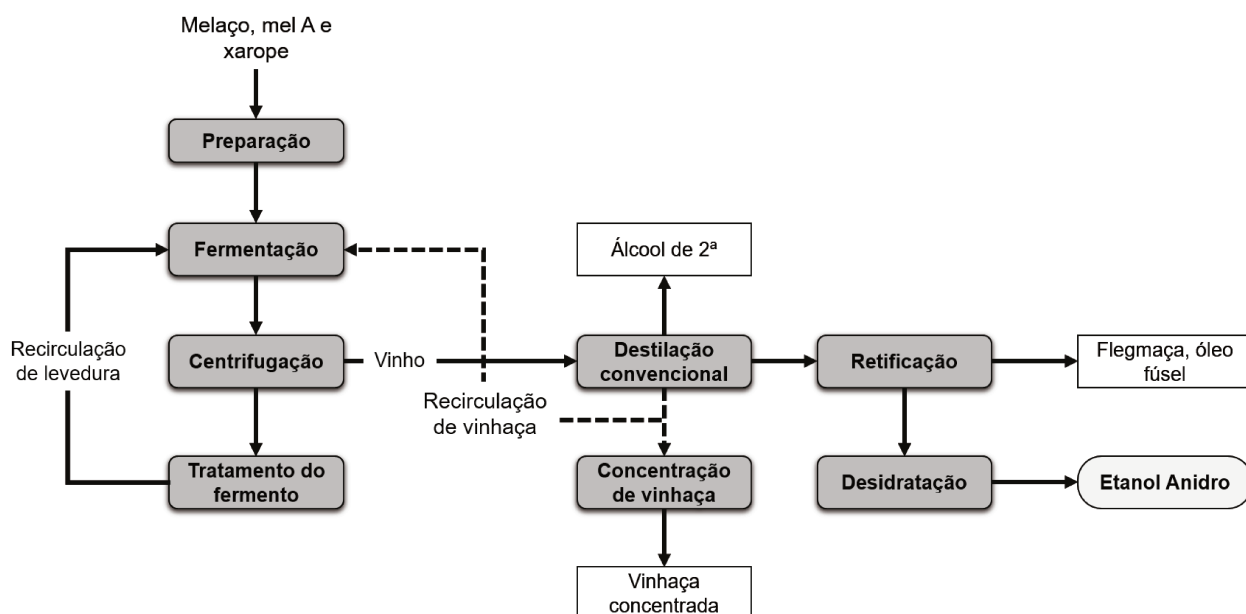


Figura 27 – Fluxograma da produção de etanol.
Fonte: Baseado em (CENICAÑA, 2008b).

Foi considerado o processo de fermentação brasileiro (com centrifuga) devido à falta de informações disponíveis na literatura sobre o processo colombiano. A diferença do processo brasileiro, o processo colombiano inclui a propagação de

levedura, de aproximadamente 4% dos açúcares fermentescíveis, e utiliza uma levedura auto-floculante que é separada a través de um decantador com eficiência de 70%; e não uma centrífuga devido aos maiores custos. Além disso, foi considerada uma recirculação de vinhaça de 60% para o processo de fermentação e o restante segue para o processo de concentração. Este processo é realizado por meio de um sistema de evaporadores de múltiplo efeito para concentrar a vinhaça até 45 °Brix. Na Tabela 10, encontram-se os parâmetros adotados para a produção de açúcar e etanol.

Finalmente, na hierarquia de cogeração (CHP), o processo começa com a queima de bagaço e carvão para a produção de vapor necessário para atender a demanda de energia do processo. O processo foi simulado a través do método de simulação de sólidos incluído no software Aspen Plus (ASPENTECH, 2013). Este método seca o carvão alimentado, realiza uma decomposição dos elementos e após a combustão, as cinzas são separadas dos produtos gasosos (Figura 28).

Tabela 10 – Dados da produção de açúcar e etanol.

Item	Unidades	1G
Açúcar		
Cal	kg CaO/TC	0,8
Sulfitação	kg/TC	0,2
Pureza do açúcar	% massa	99,4
Umidade do açúcar produzido	% massa	0,1
Etanol		
Eficiência de fermentação	%	91,6
Eficiência da centrífuga	%	99
Recirculação de vinhaça	%	60
Concentração de vinhaça	% sólidos	45
Teor de etanol no vinho	% v/v	9,9
Desidratação	Peneira molecular	
Pureza do etanol anidro	% massa	99,6

Para simular a corrente de carvão úmido se utilizou a análise imediata, a composição elementar e o poder calorífico inferior (PCI) do carvão. Consideramos o carvão betuminoso do Valle del Cauca utilizado pelas usinas (Tabela 11). Esse carvão é procedente da troca de bagaço excedente com a indústria de papel e celulose da região (CARVAJAL PULPA Y PAPEL, 2015). Para fins da simulação, foi considerada a queima de bagaço e carvão com uma eficiência de 75,17%. Esta foi calculada segundo o método da ASME Performance Test Code PTC 4 (BABCOCK & WILCOX

COMPANY, 2005). Os cálculos são apresentados no Apêndice 2. Na Tabela 12, são apresentados os parâmetros adotados no sistema de cogeração.

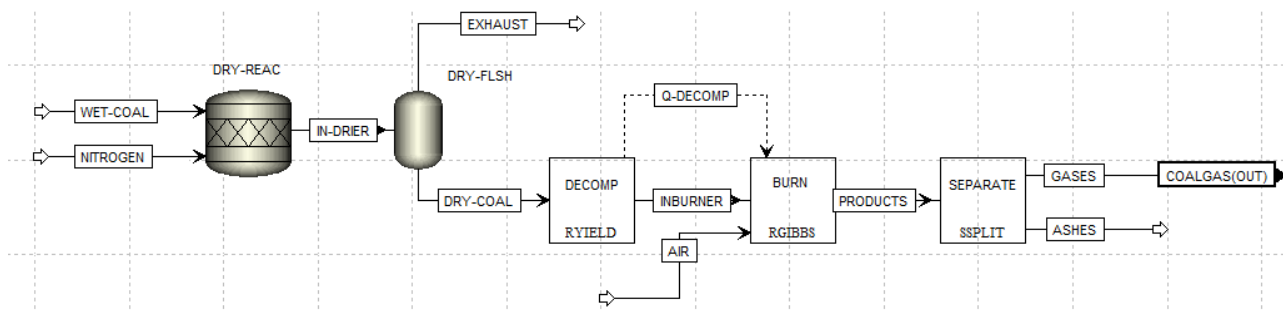


Figura 28 – Simulação do carvão em Aspen Plus.

Tabela 11 – Composição do carvão betuminoso do Valle del Cauca (base seca).

Parâmetro	Unidade	Carvão
Análise imediata		
Umidade	%	2,69
Carbono fixo (FC)	%	40,67
Matéria volátil (VM)	%	32,48
Cinzas	%	20,9
Análise elementar		
C	%	63,7
H	%	4,8
O	%	8,8
S	%	0,8
N	%	1,1
Cinzas	%	20,9
PCI	MJ/kg	26,105

Fonte: (PEÑA URUEÑA, 2011).

Tabela 12 – Parâmetros adotados na simulação da cogeração.

Cogeração	Unidade	Valor
Aproveitamento do bagaço		Cogeração e compostagem
Recolhimento de palha		Cenário 2
Pressão da caldeira	bar	65
Eficiência de caldeira (PCI)	%	75,17
Eficiência isentrópica da turbina	%	85
Eficiência do gerador	%	95
Demanda de energia elétrica	kWh/TC	30
Demanda de EE adicional para irrigação (bomba)	kWh/TC	13,8

Fonte: Baseado em (CONSORCIO CUE, 2012; SANZ, 2014).

O processo de compostagem e tratamento de efluentes líquidos (PTAR) não foi incluído na simulação em Aspen Plus devido à disponibilidade de dados, mas

utilizamos o balanço de massa disponível na literatura (CONSORCIO CUE, 2012). No caso da compostagem, 111 kg/TC produzem aproximadamente 53 kg/TC de composto (Figura 29).

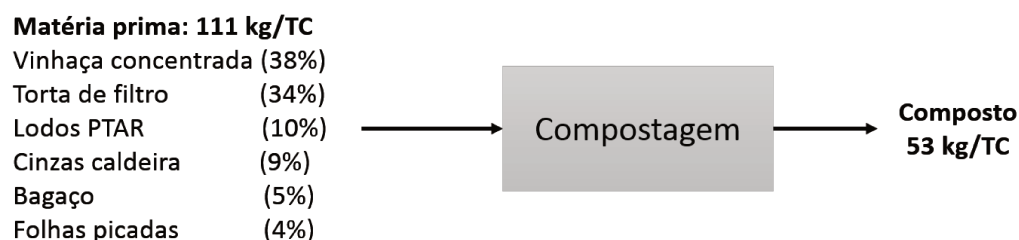


Figura 29 – Balanço de massa produção de composto.

O tratamento de efluentes líquidos recebe as flegmaças da produção de etanol e os condensados da vinhaça. Neste caso, 0,143 m³/TC de resíduos geram aproximadamente 0,127 m³ de água por tonelada de cana (Figura 30). Desta maneira com os resultados obtidos dos resíduos do processo estimamos uma produção de composto e tratamento de efluentes líquidos.



Figura 30 – Balanço de massa do tratamento de efluentes líquidos (PTAR).

3.2 Cenário 2: Produção integrada de etanol 1G2G

Neste caso, a metodologia a seguir está baseada no estudo realizado por MILANEZ et al. (2015). Na fase agrícola são assumidos os mesmos dados do cenário 1, mas incluindo o recolhimento de 50% da palha de cana-de-açúcar (folhas verdes, folhas secas e ponteiros) disponível no campo, a aplicação de fertilizantes adicionais após a retirada da palha (N: 25,39; P₂O₅: 3,83; K₂O: 26,39; dados do CanaSoft) e foi considerado que a colheita mecanizada não apresenta queima.

O processo de recolhimento de palha está baseado em CARDOSO (2014). O recolhimento é realizado através de fardos, onde a palha é lançada ao solo, enleirada e enfardada. Considerou-se que a quantidade de palha produzida

corresponde a, aproximadamente, 140 kg de palha (base seca) por tonelada de colmo produzido, baseada na produção brasileira (MACEDO et al., 2001; HASSUANI et al., 2005; LEAL et al., 2013).

3.2.1 Fase industrial

Na fase industrial, o processo de produção de etanol 2G é realizado através do uso do material lignocelulósico (MLC) excedente do processo 1G2G (Figura 31).

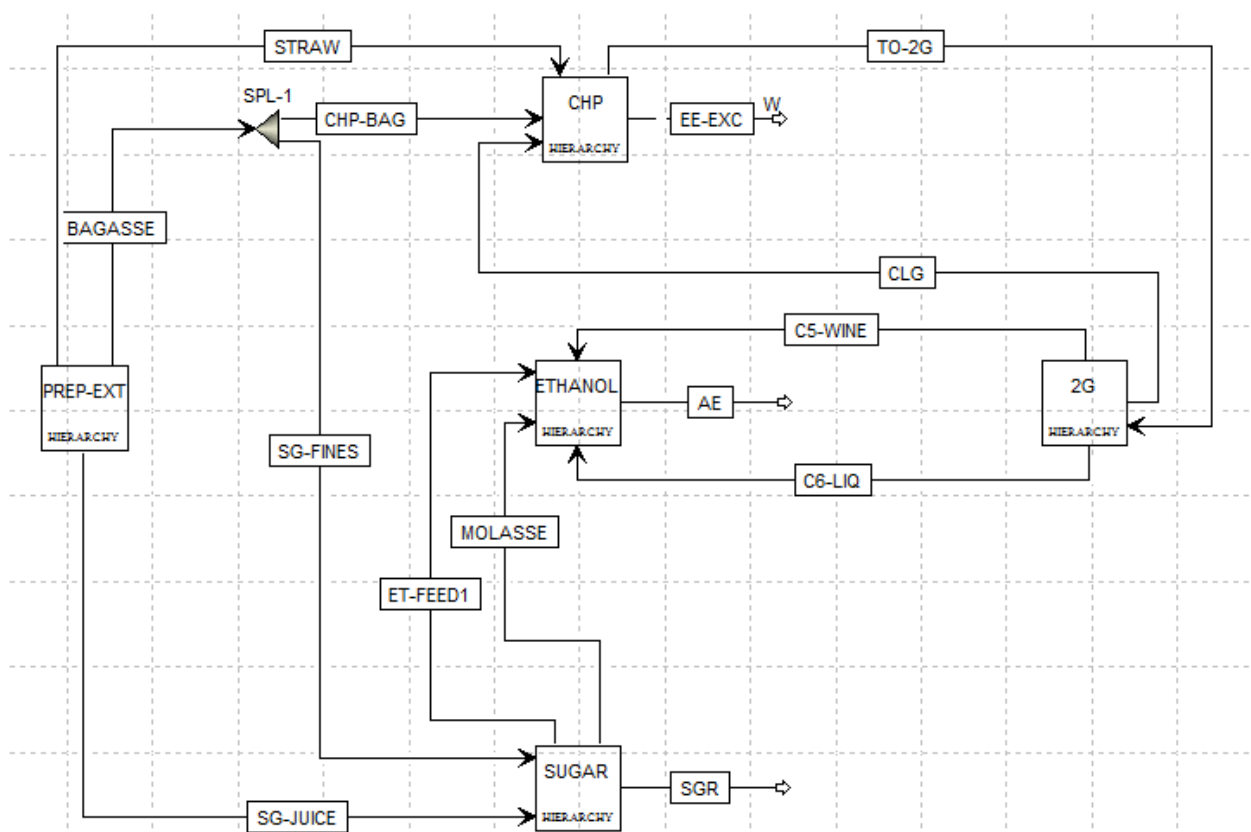


Figura 31 – Simulação da produção integrada 1G2G.

O processo 1G é exatamente o mesmo do cenário 1 na produção de açúcar, etanol e cogeração, mas considera somente a queima de bagaço, de palha e dos sólidos residuais da hidrólise (na sua maioria lignina) (DIAS et al., 2014). Além disso, foi considerada uma eficiência de 87,2% na caldeira e uma redução de 20% do consumo de vapor, já que foi considerado a produção ao longo prazo e com processos otimizados (BONOMI et al., 2016).

A rota tecnológica selecionada foi a fermentação separada de C5 (xilose), apresentada na Figura 32, onde o MLC (bagaço e palha) é pré-tratado em um

processo de explosão a vapor para aumentar a acessibilidade à celulose e permitir a atuação de enzimas específicas na próxima fase.

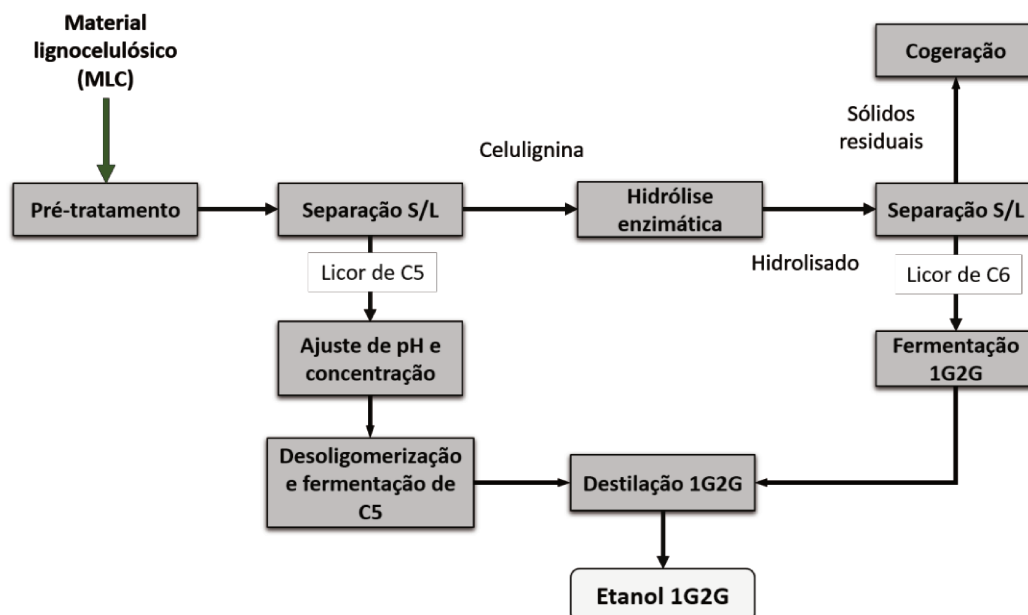


Figura 32 – Processo de fermentação separada.
Fonte: Baseado em (MILANEZ et al., 2015).

Após um processo de separação se originam a celulignina e o licor de C5. A primeira é submetida a um processo de hidrólise enzimática para liberação de açúcares, e logo separada em sólidos residuais (na sua maioria lignina) e licor de C6. Os sólidos são enviados para a cogeração e o licor de C6 segue para os tanques de fermentação do processo 1G. O C5 é concentrado e enviado para o processo de fermentação dos açúcares C5, onde também ocorre a quebra dos oligômeros (desoligomerização) na forma de açúcares fermentescíveis. No processo são utilizados microrganismos geneticamente modificados (*saccharomyces cerevisiae modificada*), que são parcialmente reciclados para compensar a diminuição por morte e a perda de eficiência. Finalmente, o vinho produzido é enviado às colunas de destilação do processo 1G (MILANEZ et al., 2015). A Tabela 13, contém todas as informações utilizadas na simulação 2G. O processo representa um cenário ao longo prazo considerando uma melhoria tecnológica devido à curva de aprendizado.

Tabela 13 – Parâmetros utilizados na produção de etanol 2G.

Item	Unidades	2G
Explosão a vapor		
Temperatura	°C	210
Tempo de residência	min	5
Conversão de celulose a glicose	%	1,0
Conversão de celulose a oligômeros de glicose	%	3,0
Degradação de celulose a Hidroximetilfurfural (HMF)	%	1,5
Conversão de xilana a xilose	%	60
Conversão de xilana a oligômeros de xilose	%	20
Degradação de xilana a furfural	%	10
Solubilização de lignina	%	10
Conversão do grupo acetil a ácido acético	%	90
Hidrólise enzimática		
Temperatura	°C	65
Pressão	bar	1,0
Tempo de residência	h	36
Teor de sólidos	%	25
Conversão de celulose a glicose	%	80
Conversão de xilana a xilose	%	80
Conversão do grupo acetil a ácido acético	%	80
Conversão de oligômeros de xilose a xilose	%	80
Separações sólido-líquido		
Água adicionada	% fibras	180
Retenção de sólidos	%	99,5
Sólidos solúveis recuperados do licor	%	99
Umidade da celulignina	%	50
Desoligomerização e fermentações		
Temperatura	°C	33
Tempo de residência	h	24
Conversão de oligômeros de xilose a xilose	%	90
Conversão de oligômeros de glicose a glicose	%	90
Conversão de C6 a etanol	%	91,6
Conversão de C5 a etanol	%	90
Concentração alcoólica máxima	g/l	70
Reciclo de células	%	95
Conversão de C6/C12 a etanol	%	91,6
Concentração alcoólica máxima	g/l	85

Fonte: Baseado em (MILANEZ et al., 2015).

3.3 Avaliação econômica

A avaliação econômica foi realizada através de uma análise de viabilidade econômica de projetos, baseada em conceitos da Engenharia Econômica, considerando um fluxo de caixa projetado para a determinação da taxa interna de retorno (TIR), valor presente líquido (VPL), payback (retorno) e os custos de produção.

Através do fluxo de caixa projetado a 25 anos, considerando o investimento e despesas em um determinado período são avaliados os impactos para cada cenário selecionado. As premissas adotadas neste trabalho podem ser consideradas otimistas.

A metodologia para o cálculo das estimativas de investimento industriais é baseada no banco de dados do investimento contido na BVC, na qual são considerados os resultados das simulações e informações de equipamento, catalogadas a partir de diferentes cotações de equipamentos, dados de custo de áreas de processo, da literatura e de outras fontes públicas (MILANEZ et al., 2015). Uma vez que o investimento calculado se adapta a realidade brasileira, foi necessário utilizar um fator de localização para calcular o valor do investimento na Colômbia. Este fator foi calculado segundo o fator de localização do setor petrolífero colombiano (1,385) e inclui as despesas do frete internacional e interno, taxas e impostos de entrada e armazenamento, entre outros.

Os preços ao produtor considerados para o etanol e a eletricidade correspondem às médias aritméticas de séries históricas disponíveis na Colômbia (2005-2014). No caso do etanol, estão disponíveis nas resoluções do Ministério de Minas e Energia (MME) para biocombustíveis. No caso da eletricidade, estão disponíveis no site da *Compañía Expertos en Mercados* (XM S.A E.S.P) (XM, 2015b). Estes preços foram corrigidos de acordo com o índice de preços ao consumidor (IPC) colombiano com data de atualização de dezembro de 2014, e logo foram calculadas as médias móveis de cada produto. No caso do açúcar, devido à pouca disponibilidade de preços ao produtor, foi considerado um preço (atualizado à data do projeto) baseado na literatura (MONCADA, 2013; MONCADA, 2014).

O custo do etanol é calculado como a soma dos custos operacionais e o custo do capital investido. Os custos operacionais se referem ao custeio da biomassa, da manutenção, mão de obra e insumos. Estes custos de produção foram definidos como os preços que correspondem a uma TIR igual à TMA ou VPL igual a zero.

O custo da enzima para o cenário 2 foi baseado no cenário futuro (longo prazo) de produção integrada de etanol 1G2G (MILANEZ et al., 2015).

O custo da palha foi calculado como a diferença entre os custos do cenário com recolhimento e sem recolhimento de palha, dividido entre as toneladas de palha recolhida.

O custo do etanol 2G foi calculado por meio de um critério de alocação dos custos de produção (MILANEZ et al., 2015). O custo da produção 2G pode ser calculado, de acordo com a Eq. 2, por meio da participação percentual de cada um deles no volume total produzido de etanol (1G:50,49%). Os custos 1G e 1G2G (C_{1G} , C_{1G2G}) são fixados como os custos do cenário 1 e o cenário 3.

$$P_{1G} * C_{1G} + P_{2G} * C_{2G} = C_{1G2G} \quad (2)$$

O custo de capital é calculado considerando o desembolso anual necessário para remunerar o investimento a uma taxa mínima de atratividade (TMA) de 15,30% ao ano por um período de 25 anos. Essa TMA foi calculada através do método CAPM (Capital Asset Pricing Model) segundo a Eq. 3, donde R_f é a taxa de juros livre de risco, β é o risco de um determinado setor, R_m é o risco do mercado e o R_p é o risco do país (DAMODARAN, 2004; SÁNCHEZ, 2010). Nesta avaliação, somente consideramos o risco próprio, quer dizer, sem endividamento.

$$K_e = R_f + \beta * (R_m - R_f) + R_p \quad (3)$$

Para a taxa de juros livre de risco e o prêmio pelo risco de mercado foi considerada uma média geométrica (2005-2014) dos T-bonds dos Estados Unidos de 4,88% e 2,73% respectivamente. O risco do país selecionado foi 5,43% considerando um desvio padrão relativo de 2,40. O β alavancado considerado para a indústria do açúcar colombiano foi 1,83 baseado na literatura (CAICEDO, 2004). Os dados utilizados para a taxa de juros livre, o prêmio pelo risco e o risco do país foram obtidos do site do Professor Aswath Damodaran da New York University (DAMODARAN, 2015). Os cálculos são apresentados no Apêndice 3.

3.4 Avaliação do Ciclo de Vida

A Avaliação do Ciclo de Vida (ACV) é uma das várias técnicas de gestão ambiental mais utilizada para a realização dos balanços energéticos e das emissões de GEE dos biocombustíveis. Caracteriza-se por ser uma técnica que aborda os aspectos ambientais e potenciais impactos ao longo do ciclo de vida de um produto, desde a aquisição de matéria-prima até a produção, uso e disposição final (ISO 14040,

2006). O método de ACV considera o delineamento de fronteiras para o sistema seguido pela identificação, quantificação e avaliação de todos os recursos, emissões e produtos que cruzam as fronteiras delimitadas. No caso dos biocombustíveis, o diagrama de ciclo de vida é mostrado na Figura 33.

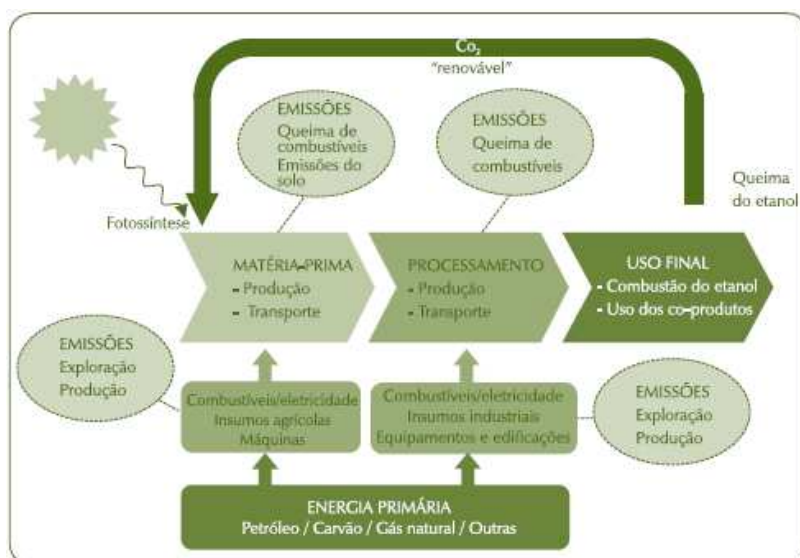


Figura 33 – Diagrama do ciclo de vida de um biocombustível.
Fonte: (BNDES; CGEE, 2008).

A ACV é realizada em quatro etapas principais: 1) Definição do objetivo e escopo do estudo; 2) análise de inventário de ciclo de vida; 3) avaliação dos impactos ambientais associados ao sistema e 4) interpretação dos resultados em função dos objetivos expressos na primeira etapa (ISO 14044, 2006).

Devido à extensa quantidade de informações para realização da ACV, os softwares são amplamente utilizados no mundo. Neste trabalho, foi utilizado um software comercial (SimaPro®) como ferramenta básica para a realização da ACV com a finalidade de avaliar o ciclo de vida dos diversos cenários selecionados. Nesse contexto, a ACV permitirá uma análise científica sobre as questões ambientais ligadas ao processo produtivo do etanol de cana-de-açúcar.

O método ReCiPe® é um método que considera abordagens de ponto intermediário e de ponto final (baseados nos métodos CML e Eco-Indicator 99) para a avaliação de impactos do ciclo de vida (Tabela 14). Este método define dois conjuntos de categorias de impacto a serem avaliadas, 18 categorias de ponto intermediário (mudanças climáticas, acidificação, toxicidade humana, etc.) e 3 categorias de ponto final (danos à saúde humana, à diversidade do ecossistema e à disponibilidade de

recursos) (GOEDKOOPE et al., 2013). A modelagem destes indicadores é feita através de fatores de caracterização para cada conjunto.

Tabela 14 – Categorias de impacto intermediário do método ReCiPe.

Categoria de ponto intermediário	Abrev.	Unidade
Mudanças climáticas	MC	kg (CO ₂ para o ar)
Redução da camada de ozônio	RCO	kg (CFC-11 para o ar)
Acidificação terrestre	AT	kg (SO ₂ para o ar)
Eutrofização na água doce	EAD	kg (P para a água doce)
Eutrofização marinha	EM	kg (N para a água doce)
Toxicidade humana	TH	kg (14DCB para o ar urbano)
Formação de oxidantes fotoquímicos	FOF	kg (NMVOC para o ar)
Formação de material particulado	FMP	kg (PM ₁₀ para o ar)
Ecotoxicidade terrestre	ETT	kg (14DCB para o solo industrial)
Ecotoxicidade da água doce	ETD	kg (14DCB para a água doce)
Ecotoxicidade marinha	ETM	kg (14-DCB para a água salgada)
Radiação Ionizante	RI	kg (U ²³⁵ para o ar)
Ocupação de terra agrícola	OTA	m ² ×ano (terra agrícola)
Ocupação de solo urbano	OSU	m ² ×ano (solo urbano)
Transformação de área natural	TAN	m ² (área natural)
Depleção hídrica	DH	m ³ (água)
Depleção de Recursos minerais	DRM	kg (Fe)
Depleção de combustíveis fósseis	DCF	kg (óleo), 42MJ por kg

Fonte: (GOEDKOOPE et al., 2013).

Neste estudo, a produção de etanol de cana-de-açúcar é a saída de interesse, portanto é uma análise do berço ao portão (*cradle-to-gate*) com unidade funcional de 1 MJ de etanol anidro. A fronteira do sistema incluiu todos os processos e emissões desde o campo até o seu processo industrial, assim como o aproveitamento dos resíduos como se mostra na Figura 34.

O critério utilizado para a alocação dos diferentes outputs do processo industrial foi o econômico, baseado no mesmo preço de mercado dos produtos utilizado na avaliação econômica. A análise de inventário foi realizada através da coleta e quantificação de entradas e saídas envolvidas durante o ciclo de vida da produção de etanol. A avaliação de impacto ambiental foi realizada através do método ReCiPe, considerando as 8 categorias de ponto intermediário mais relevantes para o sistema de produção avaliado: mudanças climáticas (MC), redução da camada de ozônio (RCO), toxicidade humana (TH), formação de material particulado (FMP), acidificação terrestre (AT), eutrofização na água doce (EAD), ocupação de terra agrícola (OTA) e depleção de combustíveis fósseis (DCF).

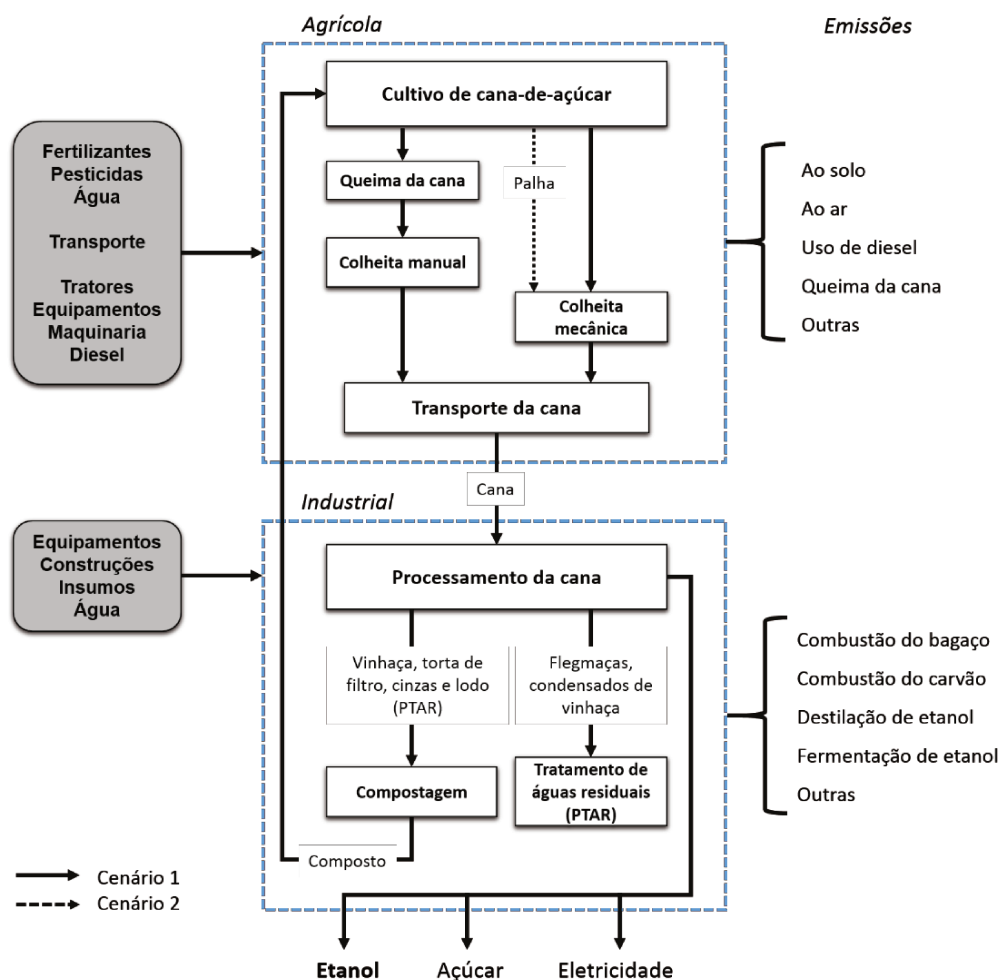


Figura 34 – Sistema de produto para a ACV considerada.

Além disso, os cálculos das emissões agrícolas e industriais foram realizados segundo os fatores de emissão considerados na BVC (BONOMI et al., 2016). Em adição, foram incluídas as emissões da compostagem e do tratamento de efluentes líquidos (PTAR). Estas foram calculadas da seguinte maneira: as emissões da produção de compostagem foram calculadas segundo o método do IPCC (2006), na qual M é a massa de composto e FE é o fator de emissão (4 g CH_4 /kg composto base úmida e 0,24 g N_2O /kg composto base úmida) (Eq. 4 e Eq. 5).

$$\text{emissões de } CH_4 = M * FE * 10^{-3} \quad [\text{kg de } CH_4] \quad (4)$$

$$\text{emissões de } N_2O = M * FE * 10^{-3} \quad [\text{kg de } N_2O] \quad (5)$$

As emissões do tratamento de efluentes líquidos foram baseadas no estudo da RTI (2010), considerando as emissões de CO_2 do tratamento de água (Eq. 6), CO_2

e CH₄ do tratamento dos lodos (Eq. 7 e 8), e do CO₂ recuperado da queima de metano (Eq. 9).

$$\text{emissões de CO}_2 = 10^{-6} * Q_{ww} * OD * Eff_{OD} * CF_{CO2} * [(1 - MCF_{ww} * BG_{CH4})(1 - \lambda)]$$

[ton de CO₂/hr] (6)

$$\text{emissões de CO}_2 = 10^{-6} * Q_{ww} * OD * Eff_{OD} * CF_{CO2} * [\lambda(1 - MCF_{ww} * BG_{CH4})]$$

[ton de CO₂/hr] (7)

$$\text{emissões de CH}_4 = 10^{-6} * Q_{ww} * OD * Eff_{OD} * CF_{CO2} * [\lambda(MCF_{ww} * BG_{CH4})]$$

[ton de CH₄/hr] (8)

$$R_{CO2} = A * CE * \frac{44}{16} \text{ [ton de CO}_2\text{/hr]} \quad (9)$$

Onde, Q_{www}= fluxo de água em m³/hr; OD= DQO (demanda química de oxigênio) em g/m³; Eff_{OD}= remoção de oxigênio; CF_{CO2}=1,375 gCO₂/g demanda oxigênio; MCF_{ww}=fator correção metano (0,2); BG_{CH4}= fração de carbono como CH₄ (0,65) e; λ=produtividade biomassa (0). A= metano gerado na Eq. 8; CE= eficiência de coleta (0,85).

Além disso, foram incluídas as emissões para a água das descargas do tratamento de águas residuais segundo à vazão e a composição de água tratada (Tabela 15).

Tabela 15 – Emissões para a água da descarga do PTAR (kg/m³).

Emissões para a água	Valor
DQO (Demanda química de oxigênio)	4,84E-01
DBO5 (Demanda biológica de oxigênio)	7,11E-02
COD (Carbono orgânico dissolvido)	7,50E-03
COT (Carbono orgânico total)	7,30E-03
P	2,03E-02
N	7,00E-04

Fonte: (CONSORCIO CUE, 2012).

Finalmente, foram incluídas as emissões geradas pela combustão do carvão na caldeira como mostrado na Tabela 16.

Tabela 16 – Emissões atmosféricas consideradas na combustão de carvão (g/kg de carvão).

Emissões ao ar	Valor
CO	2,5
CO ₂	2374,02
NO	5,5
NO ₂	0,02
SO	20,9
CH ₄	0,03
VOC	0,04
PM> 2.5 um, e < 10um	6,6
PM< 2.5 um	33

Fonte: (BREU et al., 2008).

CAPITULO 4

4. RESULTADOS E DISCUSSÕES

Neste capítulo são apresentados sequencialmente os resultados relacionados com a avaliação técnico-econômica e ambiental.

4.1 Avaliação técnico-econômica

4.1.1 Fase agrícola

Na fase agrícola foi considerada uma produção total de cana-de-açúcar de 3 Mt/ano e uma produtividade média de 120 TC/ha, são cultivados 25.338 ha de cana-de-açúcar, onde a área de plantio equivale a 20% da área total. Na Tabela 17, são apresentados os exemplos de dados de entrada da fase agrícola inseridos no CanaSoft para a simulação dos cenários.

Tabela 17 – Dados inseridos na fase agrícola em CanaSoft.

Item	Unidade	Valor
Raio médio (campo-usina)	km	23,27
Área cultivada	ha	25.338
Área plantio	ha	5.068
Fração da área total com aplicação de compostagem	%	66 (Cenário 1); 84 (Cenário 2)
Água para irrigação	m ³ /ha.ano	7.259

Os principais resultados econômicos gerados pelo CanaSoft estão relacionados, principalmente, ao custo da cana-de-açúcar. Os custos obtidos para os dois cenários são apresentados na Tabela 18. Observa-se que o custo do cenário 2 foi menor ao cenário 1, devido à maior aplicação de composto que evitou a aplicação de fertilizantes e a diminuição da mão de obra nas operações manuais pela colheita mecanizada. Os custos obtidos são muito parecidos ao custo por hectare reportado na literatura em 2014 que foi US\$ 2.248 (COLÔMBIA.MINAGRICULTURA, 2015).

Tabela 18 – Detalhamento dos custos de produção da cana-de-açúcar (valores em US\$/ha.ano).

Custos	Cenário 1	Cenário 3
Operações agrícolas	957,98	946,50
<i>Operações mecanizadas</i>	697,59	702,49
Maquinário	284,20	287,30
Implementos	80,78	80,83
Diesel	129,27	129,75
Mão de obra	47,42	47,64
Manutenção	146,11	147,15
Lubrificantes	6,92	6,93
Garagem e seguros	2,89	2,89
<i>Operações manuais</i>	260,40	244,01
Mão de obra	260,40	244,01
Insumos	192,41	165,22
Mudas	94,14	94,14
Agroquímicos	46,71	46,71
Fertilizantes (NPK)	51,56	24,37
Transporte	196,50	198,44
Transporte de Cana	184,75	184,75
Transporte de Insumos	11,76	13,69
Caminhões	35,33	35,68
Reboques	22,66	22,82
Diesel	80,37	81,27
Mão de obra	24,00	24,20
Pneus e Lubrificantes	27,18	27,45
Manutenção	5,80	5,85
Garagem e seguros	1,16	1,17
Irrigação	330,45	330,45
Terra	442,08	442,08
Impostos	134,54	134,54
Custo total da cana (US\$/ha.ano)	2.254	2.217
Custo cana (US\$/TC)	19,10	18,79

Observa-se que nos dois cenários os custos estão relacionados, principalmente, com as operações agrícolas, o custo da terra e a irrigação (Figura 35).

Além disso, as operações mecanizadas tiveram uma participação nas operações agrícolas superior a 70% para os dois cenários, produto dos custos do maquinário, manutenção e o combustível (diesel) (Figura 36).

No caso do recolhimento de palha para o cenário 2, foi considerada a técnica de enfardamento e uma produção de 140 kg palha (base seca) por tonelada de colmo de cana-de-açúcar. Analisamos fardos prismáticos com enfardadoras tracionadas por tratores e que serão transportados por caminhões até a usina. Estes

fardos permitem o recolhimento da palha com menor umidade e de forma adensada, facilitando o transporte (CARDOSO, 2014). A quantidade de palha recolhida para este cenário foi 4,02 ton/ha.ano (Tabela 19).

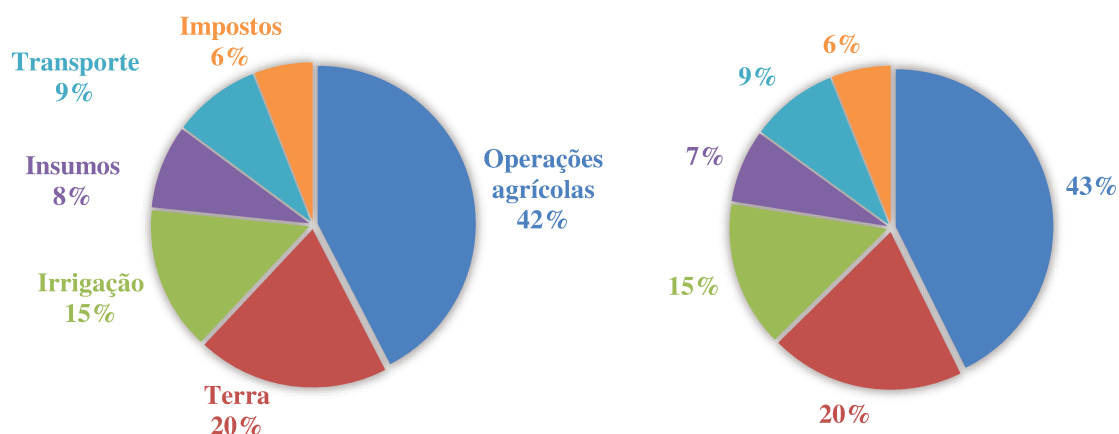


Figura 35 – Participação dos custos de produção de cana-de-açúcar para o cenário 1 e 2 (esq.) e o cenário 3 (dir.).

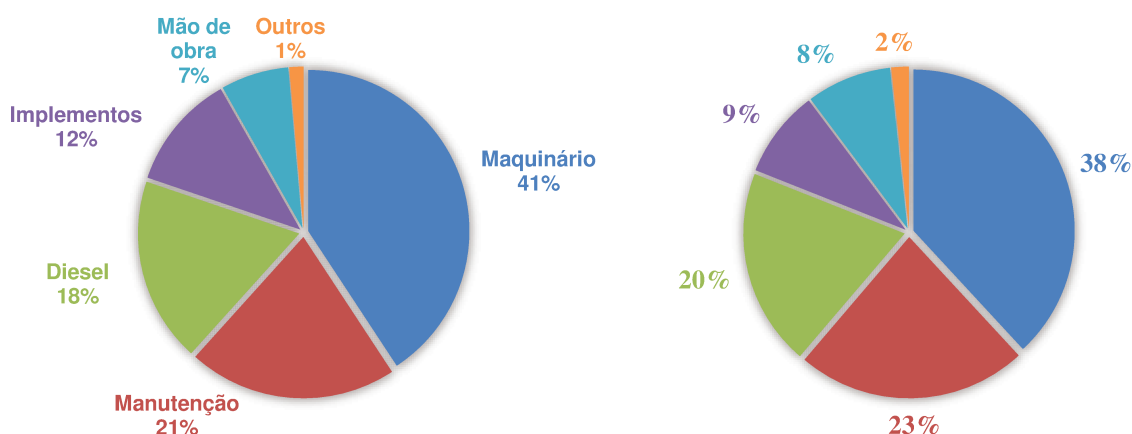


Figura 36 – Participação dos custos nas operações mecanizadas para o cenário 1 e 2 (esq.) e o cenário 3 (dir.).

Tabela 19 – Palha disponível e recolhida para os dois cenários (ton/ha.ano).

Item	Cenário 1 e 2	Cenário 3
Palha disponível no campo ^a	15,77	15,77
Palha recolhida no campo ^b	-	4,02
Palha queimada	7,73	7,73
Palha deixada no campo	8,04	4,02

^a Foi subtraída a perda de palha aderida nos colmos (2,9 ton/ha.ano).

^b Cerca de 50% da palha disponível no campo é levada para a indústria.

4.1.2 Fase industrial

A tabela 20, mostra os resultados da simulação obtidos para a produção de etanol, açúcar e eletricidade nos três cenários. Os principais dados são comparados

com o estudo da ACV do etanol na Colômbia realizado pelo CONSORCIO CUE (2012).

Tabela 20 – Resultados obtidos da simulação para os três cenários.

Produtos	Unidade	Cenário 1	Cenário 2	Cenário 3	CUE (2012)
Etanol	l/TC	26,53	26,53	52,44	15
Açúcar	kg/TC	97,78	97,78	97,78	93
Eletricidade-Venda	kWh/TC	46,80	46,80	62,67	24-70
Bagaço excedente (bs)	kg/TC	28,32	5,2	-	-

A produção de açúcar e eletricidade por tonelada de cana obtida para os cenários corresponde à média obtida industrialmente na região. Quanto ao etanol produzido no cenário 1, este teve um valor semelhante ao valor da literatura representando a média da produção nacional. No caso do cenário 3, a produção total de etanol anidro é de 52,4 l/TC, sendo que cerca de 26 litros são produzidos através da tecnologia de produção de etanol 2G.

Os principais resíduos do processo obtidos da simulação como a torta de filtro, a flegmaça e a vinhaça concentrada são apresentados na Tabela 21.

Tabela 21 – Resultados da simulação para os principais resíduos do processo (kg/TC).

Resíduos industriais	Cenário 1	Cenário 2	Cenário 3	CUE (2012)
Torta de filtro	26,87	26,87	26,87	41,7
Flegmaça	21,67	21,67	43,55	74,10
Vinhaça concentrada	44,28	44,28	71,49	49,8
Folhas (preparo)	14,55	14,55	14,55	5,8
Cinzas	5,23	2,85	3,73	4,4

Observa-se que o cenário 1 apresentou valores próximos para a vinhaça concentrada e as cinzas, no entanto, os resultados para a torta de filtro e a flegmaça foram inferiores aos encontrados na literatura, devido principalmente as eficiências adotadas. O processo de recirculação e concentração de vinhaça significou uma diminuição do consumo de água equivalente a 1.740 m³ ao dia.

No caso do consumo de bagaço a Tabela 22, mostra a quantidade de bagaço produzido e consumido na indústria, assim como o consumo de vapor para

cada cenário. O consumo de vapor para o cenário 1 foi aproximadamente 532 kg de vapor/TC, que representa o consumo médio das usinas.

Tabela 22 – Resultados obtidos na Cogeração (valores em kg/TC).

Item	Cenário 1	Cenário 2	Cenário 3
Bagaço produzido (base úmida)	304,11	304,11	304,11
Carvão consumido	15,84	-	-
Material lignocelulósico queimado	229,18	229,18	157,3 ^a
Consumo de vapor	532	532	667

^a Inclui o bagaço, a palha e os sólidos residuais do processo 2G.

A partir desses resultados foi possível estimar a produção de compostagem para o cenário 1-2 e 3 que foi 49,75 e 64,04 kg/TC, respectivamente, valores próximos para a produção média na região do estudo. A composição da compostagem está apresentada na Tabela 23.

Tabela 23 – Composição da compostagem utilizada na simulação dos cenários (valores em kg/TC).

Composição	Cenário 1-2	Cenário 3
Matéria prima	103,12	132,73
Cinzas caldeira	5,26	3,76
Resíduos de cana	14,55	14,55
Bagaço	5,13	-
Lodos (PTAR)	7,03	15,67
Torta de filtro	26,87	26,87
Vinhaça	44,28	71,89
Composto (base úmida)	49,75	64,04

A quantidade de água tratada no tratamento de efluentes líquidos estimada foi 0,043 e 0,094 m³/TC para o cenário 1-2 e 3, respectivamente.

4.1.3 Avaliação econômica

A avaliação financeira foi realizada utilizando como base as premissas econômicas mostradas na Tabela 24. Os preços utilizados para a avaliação são apresentados na Tabela 25.

Tabela 24 – Premissas econômicas utilizadas na avaliação econômica.

Parâmetros	Valor
Taxa mínima de atratividade (% a.a.)	15,30
Duração do projeto	25 anos
Depreciação linear	10 anos
Manutenção anual (% Investimento-Capex)	3
Necessidade de capital de giro (%)	10
Salário + encargos (US\$/mês)	1.309 (Cenário 1-2); 1.474 (Cenário 3)
Empregos	286 (Cenário 1-2); 308 (Cenário 3)
Custo da cana-de-açúcar (US\$/TC)	19,10 (Cenário 1-2); 18,79 (Cenário 3)
Custo da enzima (US\$/L etanol 2G)	0,05 (Cenário 3)
Custo da palha (US\$/t)	17,78 (Cenário 3)
Imposto sobre a renda (%)	33
Data de referência (preços)	Dezembro de 2014
Taxa de câmbio (R\$/COP\$)	0,001112
Taxa de câmbio (US\$/R\$)	2,6556

Tabela 25 – Preços utilizados na avaliação econômica.

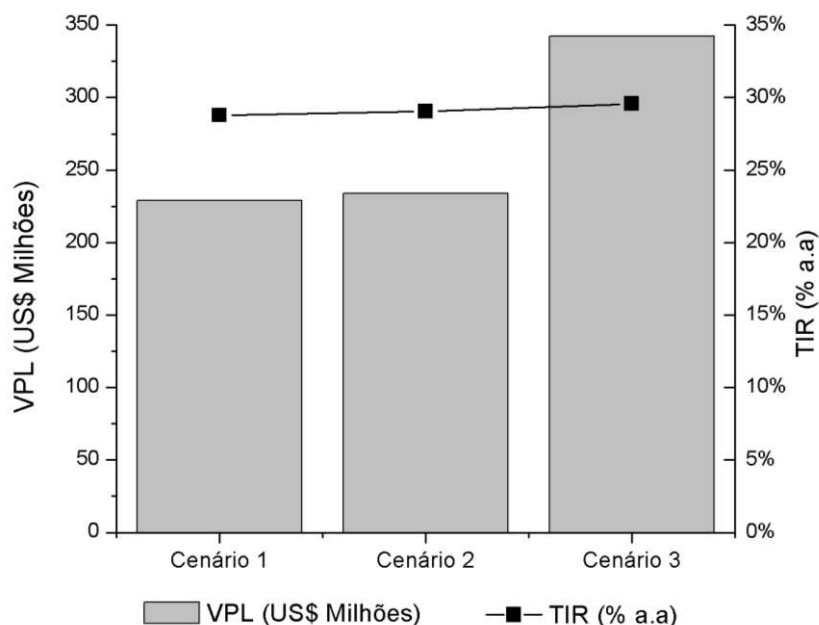
Preços	Valor	Referência
Etanol anidro (US\$/l)	0,85	MME, média móvel (2006-2014)
Açúcar (US\$/kg)	0,44	Moncada, et al (2014)
Eletricidade (US\$/MWh)	50,60	XM, média de contratos (2006-2014)
Bagaço excedente (US\$/t)	50,86	Custo oportunidade do preço do carvão

A estimativa de investimento baseada na BVC foi US\$ 227 milhões e US\$ 318 milhões para o cenário 1-2 e 3, respectivamente. Observa-se que a cogeração e a moenda da cana são as áreas mais representativas na estimativa de investimento (Tabela 26). Para o cenário 3, o aumento da produção de etanol e a integração da produção de etanol 2G representam um investimento adicional de aproximadamente 40%.

Com as premissas adotadas foi realizado um fluxo de caixa para um período de 25 anos (Apêndice 4). Para o cenário 1, obteve-se uma TIR de 28,77% e um VPL de cerca de 229 milhões de dólares. Para os demais cenários os valores foram maiores que o cenário 1, mostrando um grande potencial da indústria (Figura 37). Os resultados econômicos obtidos são mostrados na Tabela 27.

Tabela 26 – Resumo das despesas de capital associadas às principais áreas industriais.

CAPEX (US\$ milhões)	Cenário 1 e 2	Cenário 3
1G + áreas comuns		
Infraestrutura	47,07	59,44
Recepção de cana, extração e tratamento de caldo	57,75	54,55
Produção de açúcar	32,64	32,64
Produção de etanol (inclui a concentração de vinhaça)	18,45	33,15
Cogeração (Vapor e eletricidade)	67,38	79,39
Compostagem e PTAR	3,81	3,81
2G		
Pré-tratamento, separação e concentração de C5		34,01
Hidrólise enzimática e separação C6		12,33
Fermentação separada de C5		7,67
Propagação de levedura		0,89
Investimento total	227,12	317,88

**Figura 37** – Resultados da avaliação econômica para os 3 cenários.**Tabela 27** – Resultados econômicos dos cenários avaliados.

	Unidade	Cenário 1	Cenário 2	Cenário 3
Estimativa de investimento total	US\$ milhões	259,8	259,8	363,7
Taxa interna de retorno (TIR)	%	28,77	29,03	29,57
Valor presente líquido (VPL)	US\$ milhões	228,94	233,95	342,12
Payback simples	Anos	4,69	4,66	4,60
Payback descontado	Anos	6,50	6,43	6,29
Custo do etanol anidro	US\$/l	0,553	0,549	0,518
Custo do açúcar	US\$/kg	0,283	0,281	0,265
Custo da eletricidade	US\$/MWh	32,79	32,54	30,73
Custo do etanol 2G	US\$/l	-	-	0,483

A TIR obtida nos cenários apesar de ser um pouco alta, quando comparada com os projetos no Brasil, é semelhante à encontrada na literatura (QUINTERO et al., 2008). Por conseguinte, para identificar os parâmetros com maior influência na TIR, foi realizada uma análise de sensibilidade para o cenário 1, com variação de 30% para o preço do etanol, do açúcar, da eletricidade, da cana e do investimento. Como mostra a Figura 38, o preço do açúcar e o investimento são os parâmetros de maior impacto para a variação da TIR. Além disso, foi possível observar que devido ao efeito combinado de uma maior produção de açúcar, ao alto preço do etanol e o baixo custo da cana (maior produtividade) a TIR se encontra acima de 20%.

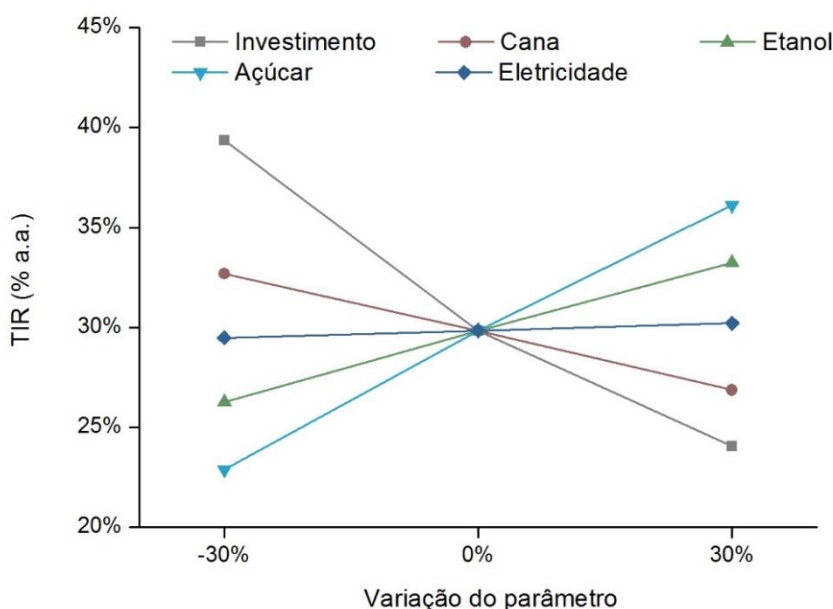


Figura 38 – Análise de sensibilidade para a TIR (% a.a.) no cenário 1 em função da variação de 5 parâmetros individualmente.

Em relação ao custo de produção do etanol, foi obtido um custo de 0,553, 0,549 e 0,518 dólares por litro para o cenário 1, 2 e 3, respectivamente. Em 2006, o custo foi 63,3 US\$/barril ou 0,398 US\$/litro (preço corrente) segundo a Figura 18. Para comparar os custos, atualizamos o custo de 2006 à data de dezembro de 2014 (preço constante) e foi 0,535 US\$/litro. Este valor é 3,3% mais baixo quando comparado com o custo obtido para o cenário 1 nesta avaliação, principalmente, pelo menor custo da cana e um maior investimento (Figura 39). Além disso, observa-se que os custos do cenário 3 foram menores ao cenário 1, devido principalmente à maior quantidade de etanol produzido.

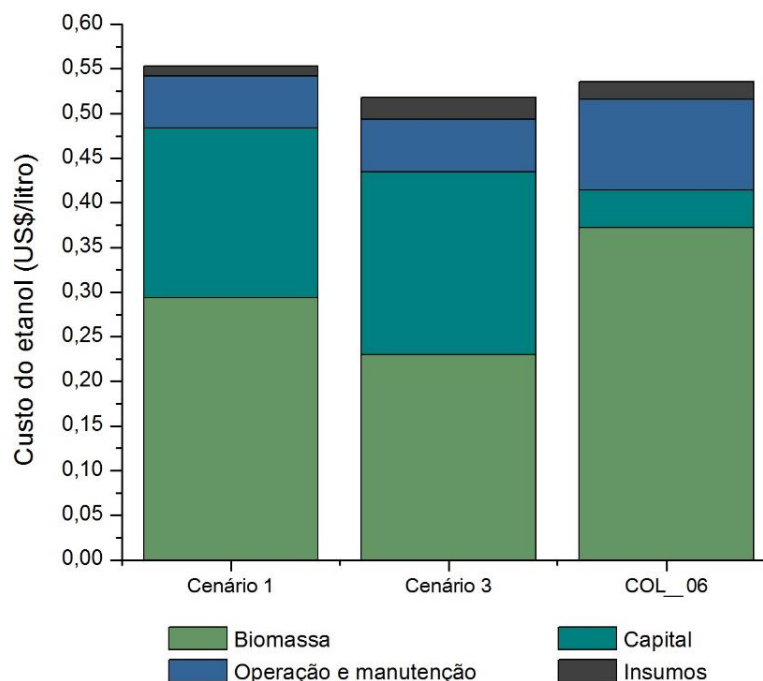


Figura 39 – Custo da produção de etanol para os cenários 1 e 3.

Entre tanto, uma vez a simulação do cenário 3 foi considerada ao longo prazo e que foram assumidas diversas premissas otimistas, o custo do etanol 2G estimado foi inferior ao etanol 1G e 1G2G. Por tanto, realizamos uma análise de sensibilidade para mostrar o impacto de possíveis variações no custo da cana, das enzimas e no investimento no custo total do etanol 2G (Figura 40). Observa-se que o investimento teve um maior impacto no custo do etanol 2G, enquanto o custo da enzima teve um impacto menor.

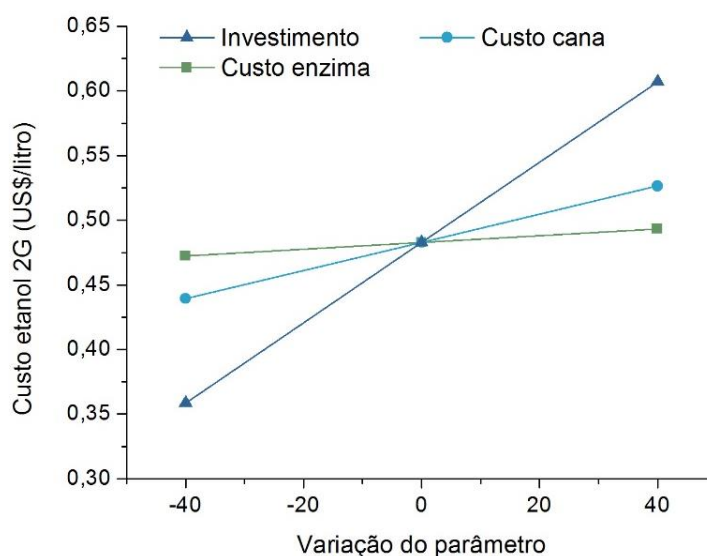


Figura 40 – Análise de sensibilidade em função da variação do custo da enzima, da cana e o investimento.

4.2 Avaliação Ambiental

A avaliação ambiental foi feita para cada cenário considerado, assim como uma comparação entre as emissões entre os cenários incluindo a produção de etanol no Brasil.

4.2.1 Cenário 1 e 2

O processo de alocação é necessário devido a que o sistema envolve vários produtos, por isso os materiais, fluxos de energia e as emissões devem ser atribuídos aos diferentes produtos de acordo com a sua contribuição no processo. A alocação econômica utilizada neste cenário é apresentada na Tabela 28.

Tabela 28 – Fatores de alocação econômica para o cenário 1.

Produto	Preços	Fator de alocação	
		Cenário 1	Cenário 2
Etanol anidro (US\$/l)	0,85	32,7%	33,3%
Açúcar (US\$/kg)	0,44	61,8%	62,8%
Eleticidade (US\$/kWh)	50,60	3,4%	3,5%
Bagaço excedente (US\$/t bs)	50,86	2,1%	0,4%

Inventário do Ciclo de vida (ICV):

O inventário envolve a compilação e quantificação das entradas e saídas do sistema de produto durante o ciclo de vida. O inventário é apresentado em forma de lista com as emissões para o solo, água, ar e a extração de matérias primas que serão utilizadas na avaliação do impacto do ciclo de vida. Devido à quantidade de informação fornecida, usualmente, é utilizado um inventário selecionado com os recursos e emissões mais relevantes. Na Tabela 29, apresenta-se o inventário de ciclo de vida selecionado para o cenário 1.

Tabela 29 – Inventário de ciclo de vida selecionado para o cenário 1 (valores por 1 MJ de etanol produzido).

	Unidade	Emissões do processo	Cana-de-açúcar	Insumos	Combustão de carvão	Total
Consumo recursos materiais						
Água	m3	-	3,42E-02	1,08E-03	-	3,53E-02
Combustíveis fósseis		-	8,57E-02	2,61E-01	-	3,47E-01
Carvão	MJ	-	6,66E-03	2,37E-01	-	2,44E-01
Gás Natural	MJ	-	1,92E-02	4,71E-03	-	2,39E-02
Petróleo	MJ	-	5,97E-02	1,49E-02	-	7,46E-02
Emissões atmosféricas						
CH4	kg	1,68E-04	1,08E-04	6,88E-05	2,63E-07	3,45E-04
CO	kg	7,25E-05	3,35E-03	7,04E-06	2,19E-05	3,45E-03
CO2, fóssil	kg	1,13E-04	5,33E-03	2,22E-03	2,08E-02	2,85E-02
CO2, biogênico	kg	-6,74E-02	-1,50E-03	2,60E-05	-	-6,88E-02
PM10	kg	-	2,01E-06	2,36E-05	-	2,56E-05
PM2.5	kg	8,15E-05	1,44E-04	1,32E-06	3,48E-04	5,74E-04
N2O	kg	1,06E-05	1,73E-05	7,72E-08	1,76E-07	2,82E-05
NM VOC	kg	1,92E-05	6,09E-06	1,92E-06	-	2,72E-05
NOx	kg	7,35E-05	1,27E-04	1,22E-05	4,83E-05	2,61E-04
SOx	kg	1,49E-05	2,27E-05	1,99E-05	-	5,74E-05
Outros						
Cádmio	kg	-	2,99E-09	8,94E-13	-	2,99E-09
Zinco	kg	3,62E-11	7,83E-09	2,97E-09	-	1,08E-08
Uso da terra	m2.ano	2,48E-06	4,70E-02	7,92E-04	-	4,78E-02

Avaliação do impacto do ciclo de vida (AICV):

Constitui-se como a fase que visa compreender e avaliar a magnitude e significância dos potenciais impactos ambientais de um sistema produto. Os resultados obtidos para os impactos ambientais utilizando categorias de impacto selecionadas do método ReCiPe são apresentados na Tabela 30.

Tabela 30 – Impactos ambientais nos cenários 1 e 2 avaliados por 1 MJ de etanol produzido.

Categorias de impacto	Unidade	Cenário 1	Cenário 2
Mudanças Climáticas	g CO ₂ eq	44,730	21,835
Redução da Camada de Ozônio	kg CFC-11 eq	8,56E-10	7,87E-10
Toxicidade Humana	kg 1,4-DB eq	6,94E-03	1,72E-03
Formação de Material Particulado	kg PM10 eq	1,04E-03	6,72E-04
Acidificação Terrestre	kg SO ₂ eq	6,31E-04	4,20E-04
Eutrofização na Água Doce	kg P eq	1,02E-05	1,92E-06
Ocupação de terra agrícola	m2a	4,76E-02	4,77E-02
Depleção de combustíveis fósseis	kg oil eq	8,26E-03	2,40E-03

Na Figura 41, é representada a contribuição relativa dos principais processos para o cenário 1 nas 8 categorias de impacto selecionadas, assim como a participação das diferentes áreas do processo nas emissões. Observa-se que a produção de cana se apresenta em todas as categorias de impacto, sendo este o processo mais relevante na grande maioria dos impactos selecionados.

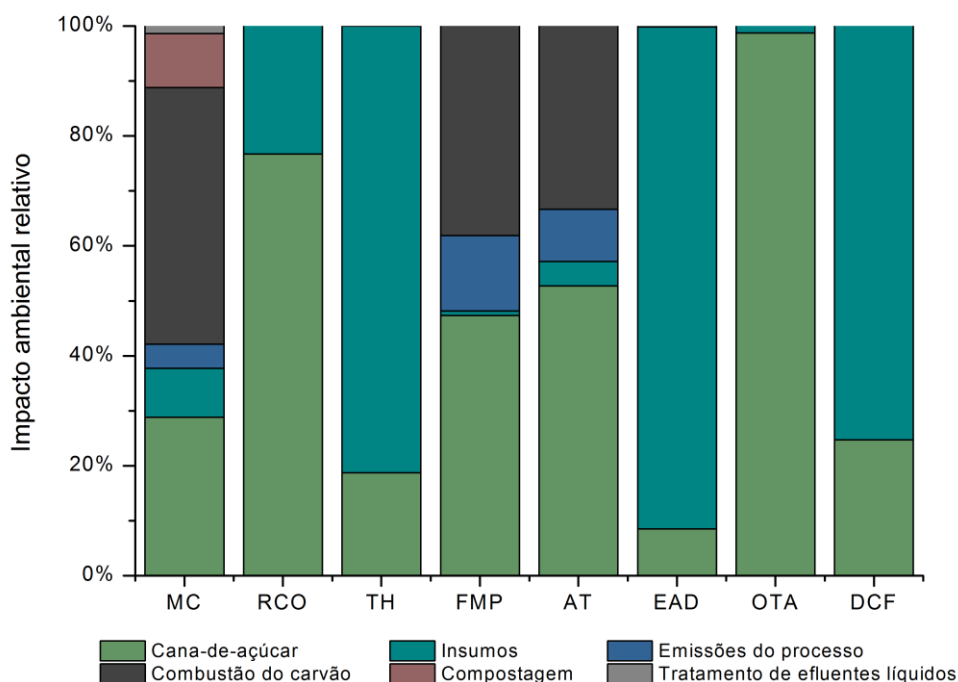


Figura 41 – Emissões de GEE da produção de etanol 1G.

A categoria de impacto de mudanças climáticas (MC) refere-se à mudança na temperatura global causada pela emissão de GEE pela atividade humana. A maioria das emissões nesta categoria são devidas à queima de carvão na caldeira (46,7%), seguida pela produção de cana-de-açúcar (28,8%). Além disso, observa-se a participação da produção de compostagem na categoria em cerca de 10%.

O fluxograma da categoria de mudanças climáticas apresentado na Figura 42, mostra a contribuição dos processos nas emissões, neste caso os mais representativos. Destaca-se que este gráfico não soma 100% devido que somente apresenta as áreas com maior contribuição na categoria. As emissões da produção de cana-de-açúcar estão relacionadas, principalmente, com a utilização de fertilizantes, a queima de palha de cana no campo, ao consumo de diesel e ao transporte da cana.

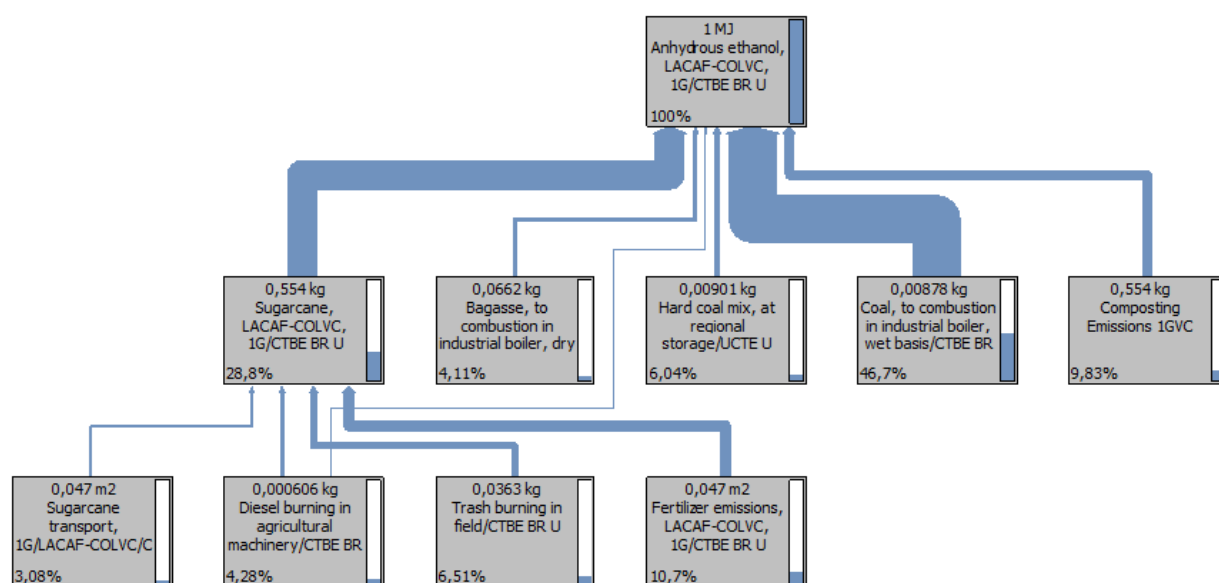


Figura 42 – Fluxograma da categoria de mudanças climáticas para o cenário 1.

A categoria de toxicidade humana (TH), reflete o dano potencial das substâncias químicas (destino, exposição e efeito). Neste caso, os insumos da produção (produção de carvão) representam 78%, enquanto que a produção de cana é de 17,5% (operações agrícolas e uso de uréia).

A redução da camada de ozônio (DCO) reflete os danos ocasionados pelas perdas fugitivas de substâncias antropogênicas que persistem na atmosfera. Estas estão associados à produção de cana-de-açúcar, principalmente, à produção de diesel e uréia e ao transporte da cana.

A formação de material particulado (FMP), refere-se aos impactos da poluição de partículas originadas de processos de combustão, extração de recursos, entre outros. A fase de produção de cana apresenta 47,3% (queima de cana), seguida pela queima de carvão com 38,3% e as emissões do processo 13,3% (queima de bagaço na caldeira).

A categoria de acidificação terrestre (AT), inclui as substâncias inorgânicas, tais como sulfatos, nitratos e fosfatos que podem causar uma mudança na acidez no solo e na ocorrência de espécies de plantas. As principais emissões acidificantes são NO_x , NH_3 e SO_2 (GOEDKOOOP et al., 2013). A produção de cana apresenta a metade das emissões geradas, seguida pela queima de carvão (33,6%) e as emissões do processo (queima de bagaço na caldeira).

A categoria de eutrofização representa o destino das emissões de nutrientes que contêm fósforo. Neste caso, o consumo de insumos é o mais

representativo (produção de carvão e ácido fosfórico), seguido pela produção de cana (operações agrícolas).

A categoria de ocupação de terra agrícola reflete o dano aos ecossistemas causado pelos efeitos da ocupação da terra por um período de tempo. A produção de cana-de-açúcar pode provocar a redução da biodiversidade pela implementação de monocultura. Além disso, pode ocorrer compactação do solo devido ao tráfego de máquinas pesadas durante o plantio, tratamentos culturais e colheita.

A categoria de depleção de combustíveis fósseis, refere-se ao consumo de recursos não renováveis baseada no PCS. Neste caso, nos insumos principalmente a produção de carvão é o fator mais representativo, seguido pela produção de cana (produção de diesel, transporte de cana e uréia).

Cenário 2

Considerando as usinas que não possuem queima de carvão na caldeira (cenário 2), a redução das emissões é significativa. Inclusive, é possível observar para este cenário que a produção de cana é a área do processo mais representativa em todas as categorias de impacto avaliadas (Figura 43). O ICV deste cenário se encontra no Apêndice 5.

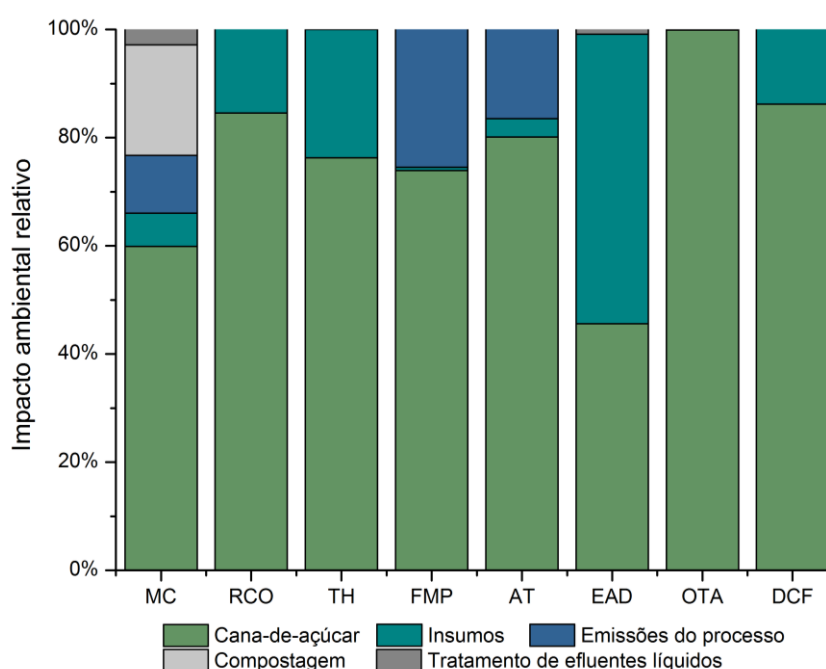


Figura 43 – Emissões da produção de etanol 1G sem queima de carvão na caldeira.

Na categoria de MC se obteve uma redução de 51% das emissões de CO₂ eq quando o consumo de carvão foi eliminado. A produção de cana-de-açúcar teve a maior participação (60%), seguida pelas emissões da compostagem (20,4%) e pelas emissões do processo (combustão do bagaço). Neste caso e para a categoria TA, as emissões da cana estão relacionadas, principalmente, com a utilização de fertilizantes, à queima de cana no campo e ao consumo de diesel nas operações agrícolas mecanizadas.

Na categoria RCO, as emissões da produção de cana-de-açúcar se devem à produção de diesel (37,9%), uréia (20,2%) e pesticidas (15,5%). Na categoria TH, os impactos se devem ao uso de maquinária agrícola (13%) e a produção de uréia (11,9%). Na categoria de FMP, principalmente pela queima de cana no campo (67,5%) e pela queima de bagaço na caldeira (25%). Na categoria EAD, as emissões estão relacionadas com a produção de cana (mecanização) e as emissões da produção de ácido fosfórico. Finalmente, na categoria de DCF, devido aos impactos da produção de diesel (54,9%), transporte da cana (20,3%) e produção de uréia (18,4%).

4.2.2 Cenário 3

Na Tabela 31, é apresentada a alocação econômica utilizada para o cenário 3. Observa-se que a alocação difere do cenário 1 e 2, devido à maior produção de etanol anidro.

Tabela 31 – Fatores de alocação econômica para o cenário 3.

Produtos	Preços	Alocação econômica
Etanol anidro (US\$/l)	0,85	49,4%
Açúcar (US\$/kg)	0,44	47,1%
Eleticidade (US\$/kWh)	50,60	3,5%

Inventário do Ciclo de vida (ICV):

Na Tabela 32 é apresentado o inventário selecionado para o cenário 3.

Tabela 32 – Inventário de ciclo de vida selecionado para o cenário 3 (valores por 1 MJ de etanol produzido).

	Unidade	Emissões do processo	Cana-de-açúcar	Insumos	Amônia	Enzima	Total
Consumo recursos materiais							
Água	m3	-	2,61E-02	8,89E-04	1,40E-06	1,90E-05	0,03
Combustíveis fósseis			6,17E-02	1,20E-02	8,28E-03	3,71E-03	8,56E-02
Carvão	MJ	-	5,05E-03	2,50E-03	1,26E-04	2,02E-04	0,01
Gás Natural	MJ	-	9,86E-03	2,59E-03	5,84E-03	1,45E-03	0,02
Petróleo	MJ	-	4,67E-02	6,82E-03	2,31E-03	2,06E-03	0,06
Emissões atmosféricas							
CH ₄	kg	1,95E-04	8,06E-05	1,52E-06	3,23E-06	2,14E-06	2,82E-04
CO	kg	9,68E-05	2,56E-03	3,80E-06	2,02E-07	6,34E-07	2,66E-03
CO ₂ , fóssil	kg	8,62E-05	3,83E-03	1,09E-03	3,82E-04	2,57E-04	5,65E-03
CO ₂ , biogênico	kg	-7,50E-02	-1,14E-03	-3,64E-06	-1,93E-08	-3,16E-04	-7,64E-02
PM10	kg	-	1,44E-06	6,84E-07	4,76E-08	6,29E-08	2,24E-06
PM2.5	kg	1,64E-04	1,10E-04	5,74E-07	1,07E-07	1,21E-07	2,74E-04
N ₂ O	kg	1,18E-05	9,88E-06	2,45E-08	5,00E-09	2,04E-07	2,19E-05
NM VOC	kg	2,97E-05	4,21E-06	6,53E-07	1,29E-06	6,20E-06	4,21E-05
NO _x	kg	9,73E-05	9,71E-05	2,03E-06	3,79E-07	4,55E-07	1,97E-04
SO _x	kg	1,13E-05	1,69E-05	1,25E-05	9,92E-07	6,14E-07	4,23E-05
Outros							
Cádmio	kg	-	2,46E-09	5,86E-13	9,50E-14	3,34E-12	2,47E-09
Zinco	kg	2,76E-11	5,87E-09	2,41E-09	2,34E-10	2,37E-10	8,78E-09
Uso da terra	m2.ano	2,65E-06	3,59E-02	8,57E-05	4,15E-06	8,10E-04	3,68E-02

Avaliação do Impacto do Ciclo de Vida (AICV):

Os resultados sobre a avaliação de impacto são apresentados na Tabela 33. Observa-se uma diminuição de 61% e de 18% na categoria de mudanças climáticas em comparação como o cenário 1 e 2 respectivamente.

Tabela 33 – Impactos ambientais no cenário 3 por 1 MJ de etanol produzido.

Categorias de impacto	Unidade	Valor
Mudanças Climáticas	g CO ₂ eq	17,955
Redução da Camada de Ozônio	kg CFC-11 eq	6,72E-10
Toxicidade Humana	kg 1,4-DB eq	1,43E-03
Formação de Material Particulado	kg PM10 eq	5,55E-04
Acidificação Terrestre	kg SO ₂ eq	2,55E-04
Eutrofização na Água Doce	kg P eq	1,56E-06
Ocupação de terra agrícola	m2a	3,67E-02
Depleção de combustíveis fósseis	kg oil eq	2,04E-03

A produção de cana teve uma participação representativa em todas as categorias de impacto (Figura 44).

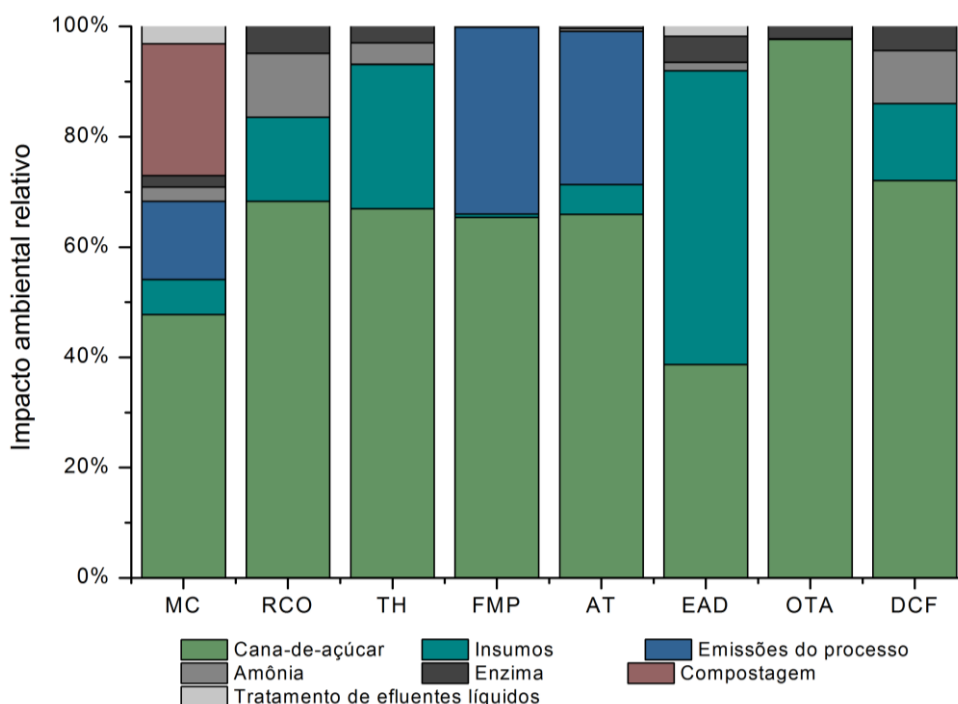


Figura 44 – Emissões da produção de etanol 1G2G.

Os resultados obtidos no cenário 3 evidenciam uma semelhança como o cenário 2. Não obstante, é importante ressaltar os impactos ambientais relacionados com o uso da amônia no processo de produção 2G, especialmente, nas categorias de impacto MC, RCO, TH e DCF. Em adição, nas categorias FMP e AT houve algumas diferenças entre os cenários nas emissões do processo. Isto devido a que no cenário 2 se considerou uma maior queima do bagaço e palha como resultado de uma maior demanda energética do processo. Observa-se também a participação da enzima na maioria das categorias, em especial nas categorias RCO, EAD e DCF. Na categoria de mudanças climáticas, o uso de fertilizantes, a queima de cana no campo e o uso de diesel foram os processos mais representativos nas emissões da produção de cana (Figura 45). Além disso, a compostagem teve uma participação de 24%, seguida pela queima de bagaço.

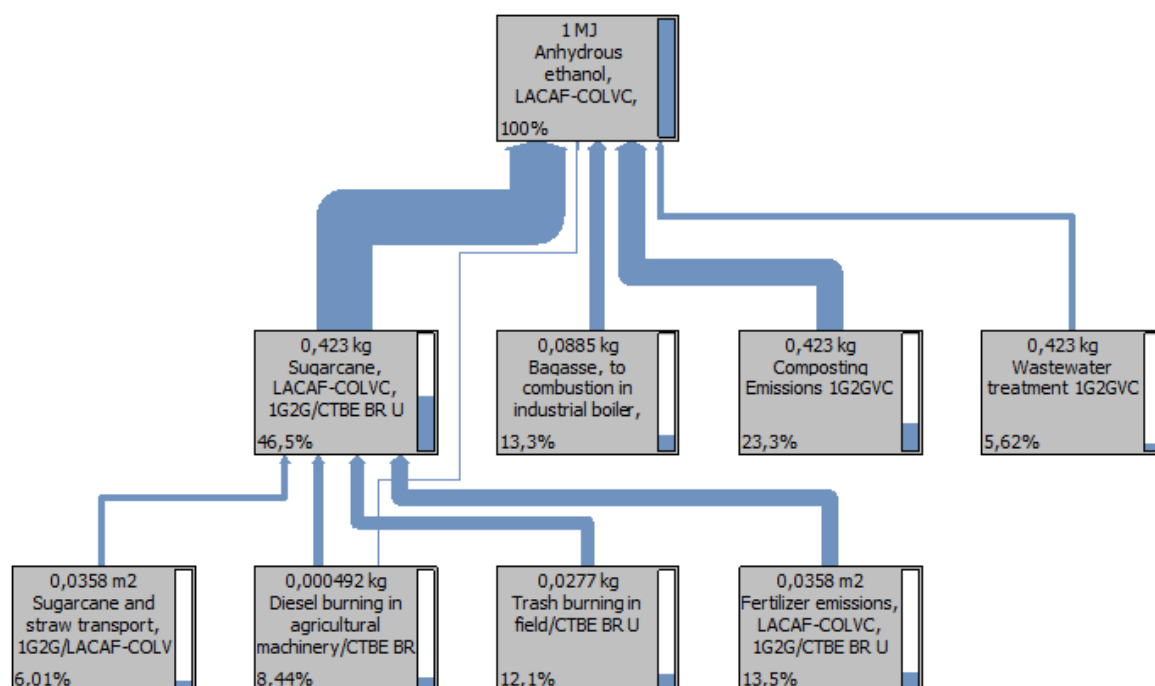


Figura 45 – Fluxograma das emissões da categoria mudanças climáticas para o cenário 3.

4.2.3 Interpretação do Ciclo de Vida

As limitações do projeto foram, principalmente, a complexidade da coleta de dados e a disponibilidade deles na literatura. Deste modo, a inexistência de avaliações de ciclo de vida detalhadas e transparentes de produção de bioenergia para a realidade colombiana disponível fez a verificação dos resultados um processo complexo. É importante destacar que estes resultados são extremamente dependentes das premissas utilizadas no projeto. Além disso, foi considerado o efeito da curva do aprendizado nos cenários avaliados.

Segundo as emissões geradas pela produção de etanol para o cenário 1 e 2 é possível verificar que ao eliminar a combustão de carvão na caldeira existe um grande potencial para diminuir as emissões de GEE na produção de etanol.

Além disso, uma análise de sensibilidade nas emissões da categoria de mudanças climáticas para o cenário 1 foi realizada ao variar a produtividade de cana-de-açúcar utilizada no estudo (Figura 46). Observa-se que a medida que a produtividade diminui, as emissões da produção aumentam.

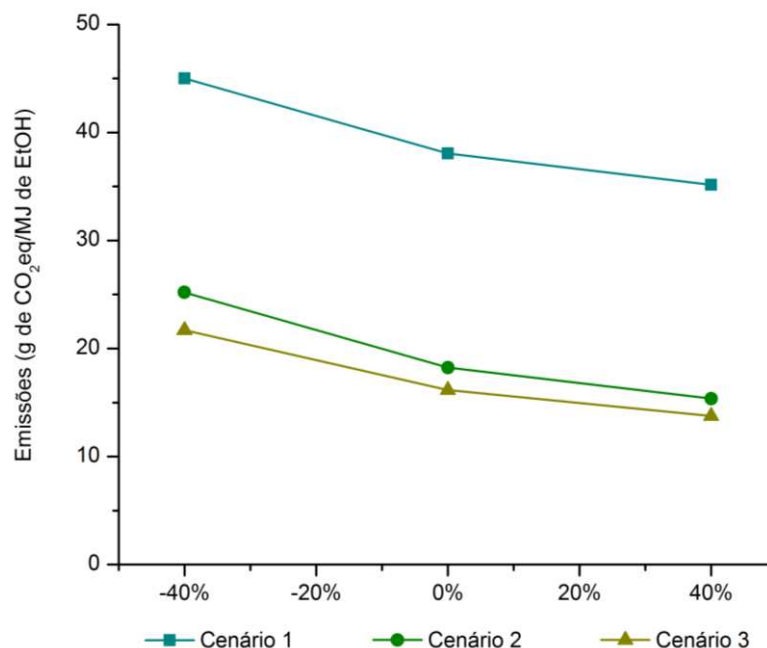


Figura 46 – Análise de sensibilidade da emissão de CO₂ eq em função da produtividade agrícola da cana-de-açúcar.

4.2.4 Comparação dos cenários selecionados

A principal diferença entre o cenário 1 e 2 é a queima de carvão na caldeira, desta maneira, as emissões do cenário 1 são maiores (Tabela 34).

Tabela 34 – Impactos ambientais nos cenários avaliados por 1 MJ de etanol produzido.

Categoria de Impacto	Cenário 1	Cenário 2	Cenário 3	Brasil 1G
Mudanças Climáticas (g CO ₂ eq)	44,730	21,835	17,955	21,355
Redução da Camada de Ozônio (kg CFC-11 eq)	8,56E-10	7,87E-10	6,72E-10	1,08E-09
Toxicidade Humana (kg 1,4-DB eq)	6,94E-03	1,72E-03	1,43E-03	2,76E-03
Formação de Material Particulado (kg PM10 eq)	1,04E-03	6,72E-04	5,55E-04	2,24E-04
Acidificação Terrestre (kg SO ₂ eq)	6,31E-04	4,20E-04	2,55E-04	7,16E-04
Eutrofização na Água Doce (kg P eq)	1,02E-05	1,92E-06	1,56E-06	2,11E-06
Ocupação de terra agrícola (m ² a)	4,76E-02	4,77E-02	3,67E-02	6,30E-02
Depleção de combustíveis fósseis (kg oil eq)	8,26E-03	2,40E-03	2,04E-03	3,58E-03

Entre o cenário 2 e 3, as emissões são semelhantes, mas com um aumento de queima de bagaço e palha, da produção de compostagem e tratamento de efluentes líquidos e diminuição da queima de cana na colheita mecanizada.

A Figura 47, mostra a comparação dos impactos ambientais dos diversos cenários colombianos avaliados, assim como a produção média de etanol de primeira geração de cana-de-açúcar no Brasil (BRA_1G) (BONOMI et al., 2016).

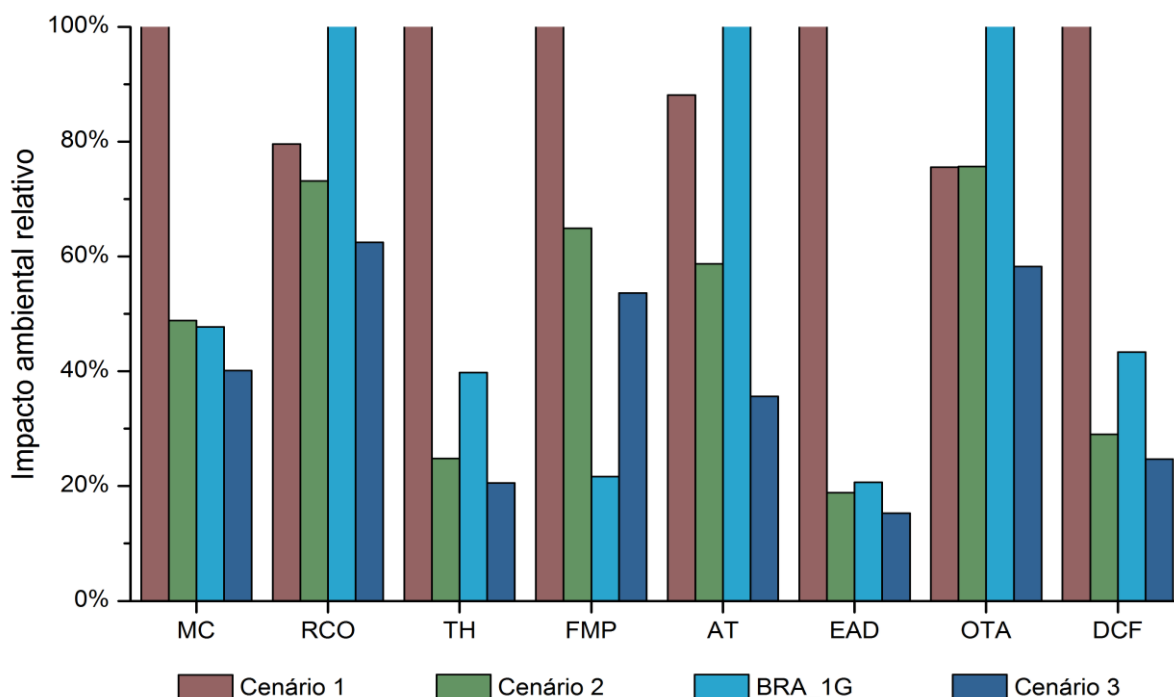


Figura 47 – Comparação das emissões de GEE nos cenários considerados.

Observa-se que nas categorias de mudanças climáticas (MC), toxicidade humana (TH), formação de material particulado (FMP), eutrofização na água doce (EAD) e depleção de combustíveis fósseis (DCF) o cenário 1 apresentou o maior impacto, enquanto nas categorias restantes o cenário brasileiro teve um maior impacto. Além disso, o cenário 2 é menor na maioria das categorias em comparação com o cenário brasileiro.

As diferenças na categoria de redução da camada de ozônio (RCO) quando comparada com o cenário brasileiro se devem, principalmente, ao maior uso de uréia (36%) e a maior mecanização no caso brasileiro. Na categoria de formação de material particulado (FMP), o cenário brasileiro é menor devido à diminuição progressiva da queima de cana na pré-colheita, e as emissões estão relacionadas, principalmente, com a queima de bagaço na caldeira (55,1%). Finalmente, na categoria de acidificação terrestre (AT) no caso brasileiro, a maioria das emissões (86%) está relacionada com uma maior aplicação de fertilizantes.

Redução das emissões de GEE:

Para comparar a redução de emissões de GEE dos diferentes cenários, foi considerada a ACV completa (*well-to-wheel*). Desta maneira, foi adicionado o transporte e uso do etanol (2,18 g de CO₂ eq) à produção de etanol e foi comparado

com as emissões da produção de gasolina dos Estados Unidos (93 g de CO₂eq). Foi selecionada a gasolina americana pois este é um valor de referência amplamente aceito para a determinação da redução das emissões de GEE.

A redução das emissões do cenário 1 e 2 seria de 49% e 74% respectivamente em comparação com as emissões da gasolina (Tabela 35). Nestes dois cenários a redução das emissões seria maior do que o etanol dos Estados Unidos (Figura 48).

Tabela 35 – Redução das emissões de GEE para os diferentes cenários.

g CO ₂ eq/MJ	Cenário 1	Cenário 2	Cenário 3	Brasil	USA, Etanol ^a	USA, Gasolina
Produção etanol	44,73	21,84	17,95	21,36		
Distribuição	2,18	2,18	2,18	2,18		
Mudanças Climáticas	46,91	24,02	20,14	23,54	68,6	93
Redução das emissões	49,6%	74,2%	78,3%	74,7%	26,2%	-

^a Emissões do etanol de milho segundo (CALIFORNIA ENVIRONMENTAL PROTECTION AGENCY, 2008).

A redução significativa das emissões de GEE na produção de etanol de cana-de-açúcar de primeira e segunda geração, produto das boas práticas agrícolas e inovações tecnológicas, manifesta o potencial desta indústria como ente mitigador de impactos ambientais.

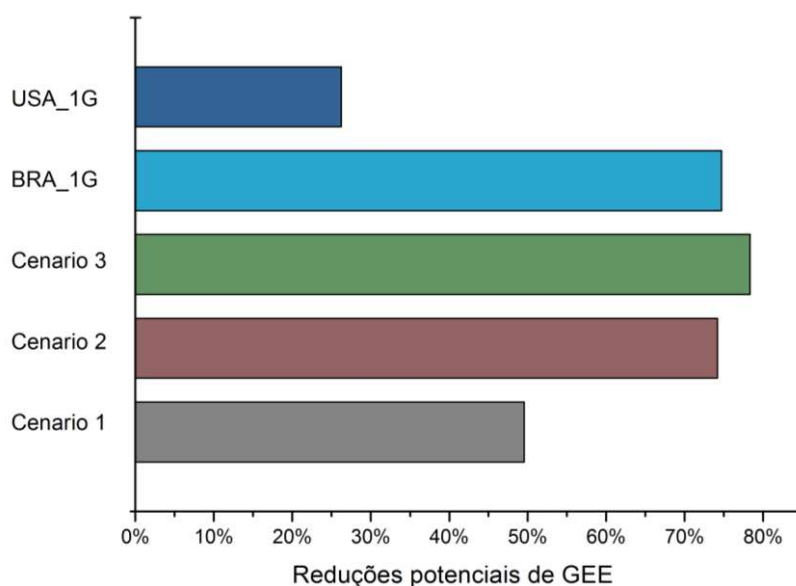


Figura 48 – Redução de emissões de GEE para os cenários avaliados.

Em conclusão, verifica-se a importância de reduzir o consumo de fontes energéticas fósseis substituindo-se por fontes renováveis e sustentáveis que ajudem a diminuir os efeitos do aquecimento global.

Finalmente, é importante salientar que se a Colômbia quiser exportar o etanol até USA ou à UE e sem considerar as emissões pelo transporte e uso, de acordo com esta análise, no cenário 1 a redução de emissões se aproxima ao valor exigido (>50%), mas não se qualificaria como biocombustível avançado pelo critério da EPA (EPA, 2010). Além disso, não atenderia os requisitos da Diretiva Europeia de Energias Renováveis a partir de 2017 (PARLAMENTO EUROPEIO, 2009). No caso do cenário 2, a redução de emissões permitiria essa qualificação (D5) na EPA e atingiria os requisitos da UE, assim como o cenário 3 poderia ser considerado um combustível celulósico (D3) pela EPA.

CAPITULO 5

5. CONCLUSÕES E SUGESTÕES PARA PRÓXIMOS TRABALHOS

Neste trabalho identificamos e avaliamos satisfatoriamente os possíveis impactos ambientais e econômicos no contexto da indústria sucroenergética da região do Vale do Rio Cauca, através de simulações realizadas na plataforma Biorrefinaria Virtual de Cana-de-açúcar (BVC).

Através das simulações feitas na plataforma BVC realizamos a avaliação técnico-econômica para as condições operacionais no caso de estudo. Os cenários 1 (1G) e 3 (1G2G) apresentaram TIRs equivalentes a 28,77% e 29,57% respectivamente, e superiores ao valor da TMA utilizada (15,30%). Os resultados da análise de sensibilidade na TIR demonstraram que tanto o preço do açúcar, o preço de etanol e o investimento são os parâmetros mais influentes. Adicionalmente, os valores de VPL para cada caso foram maiores que zero, de modo que é possível afirmar que os cenários avaliados são viáveis economicamente.

A diferença dos estudos encontrados na literatura, este trabalho considerou a combustão de carvão na caldeira em complementação ao bagaço. Assim, identificamos os impactos desta fonte fóssil de energia na análise ambiental na indústria sucroenergética. Na avaliação ambiental, o cenário 1 mostrou grandes impactos ambientais produto da combustão de carvão quando comparado com o cenário 2, cujos resultados foram próximos aos encontrados na literatura. As emissões geradas de GEE para os cenários 1 e 2 foram respectivamente 44,73 e 21,84 g de CO₂ eq/MJ. Além disso, identificamos os impactos da recirculação e concentração de vinhaça na diminuição do consumo de água e do volume de vinhaça gerada. Assim como a produção de compostagem que diminui a aplicação de fertilizantes.

Os resultados do cenário 3 mostram que é um processo potencial para aumentar a produção de etanol, em aproximadamente 97,6% da produção atual (cenário 1), mantendo-se a produção de açúcar. Uma vez que as emissões associadas a mudanças climáticas foram 17,95 g de CO₂eq/MJ, o cenário 3 proporciona uma redução destas em cerca de 61% e 18% quando comparado com o cenário 1 e 2 respectivamente. O avanço tecnológico resultante da curva de aprendizado ao longo prazo indica que o custo de produção de etanol 2G poderia ser

inferior ao custo de produção de etanol 1G, portanto, oferece um marco de referência positivo para o crescimento da indústria.

Os resultados do modelo colombiano apresentaram boas vantagens quando comparado como o modelo brasileiro devido à alta produtividade, à redução de aplicação de fertilizantes (uso de compostagem) e à recirculação e concentração de vinhaça. No entanto, na avaliação ambiental, o cenário atual colombiano teve um maior impacto por motivo da combustão de carvão na caldeira. Isto é evidente nas categorias de impacto relacionadas com mudanças climáticas, toxicidade humana, formação de material particulado, eutrofização de água doce e depleção de combustíveis fósseis. No caso do cenário colombiano sem queima de carvão, a redução de emissões seria igual que o cenário brasileiro considerado nesta análise.

A redução potencial das emissões para os cenários 1, 2 e 3 quando comparado com o consumo da gasolina é de 49%, 74% e 78% respectivamente. Neste sentido, o cenário 1 não seria considerado um combustível avançado pela EPA, nem atingiria os requisitos exigidos pela diretiva europeia de energias renováveis a partir de 2017. Portanto, destaca-se a importância de reduzir a queima de carvão na caldeira, e substituí-lo por fontes renováveis como bagaço e a palha da cana.

A Colômbia tem um grande potencial para diminuir as emissões de GEE a partir do incremento da produção de etanol anidro (1G e 2G) e assim contribuir com seu compromisso de reduzir as emissões de GEE em 20% em relação às emissões projetadas até 2030 (GARCÍA ARBELÁEZ et al., 2015).

Além disso, este trabalho fornece resultados importantes que ajudam a compreender a situação colombiana de produção de etanol 1G e serve como base para potenciais trabalhos no marco do Projeto LACAf-Cane I.

Finalmente, com base nos resultados obtidos é possível que as usinas atuais sejam as precursoras das futuras biorrefinarias com produção integrada de diferentes produtos, incluído o etanol de segunda geração, produzido a partir do excedente de material lignocelulósico (MLC) da cana-de-açúcar (palha e bagaço de cana).

5.1 Sugestões para próximos trabalhos

De acordo com os resultados obtidos e considerando os possíveis trabalhos na área, ficam como sugestões as seguintes:

- Analisar o impacto do uso de diferentes equipamentos (como o decantador na fermentação para substituir a centrífuga) no balanço de massa e energia da usina.
- Incluir na simulação industrial o processo de propagação de levedura antes do processo de fermentação para observar sua influência.
- Analisar os impactos produzidos pelo uso de biodiesel como combustível substituto do diesel convencional nos processos agroindustriais da produção de etanol de cana.
- Analisar com maior detalhe os impactos gerados pelos diferentes métodos de aproveitamento e recolhimento de palha.
- Analisar os impactos da biodigestão de vinhaça ao invés da recirculação e concentração de vinhaça.
- Aplicar a ferramenta BVC para outras regiões e tecnologias potenciais para a expansão da produção de etanol na Colômbia.
- Analisar o efeito do uso da cana energia como possível matéria-prima para a entressafra em regiões de expansão na Colômbia.
- Validar os resultados obtidos com a indústria colombiana para representar a realidade com menor incerteza.

REFERÊNCIAS

ALCARDE, A. R. Outros produtos da cana. Disponível em: <http://www.agencia.cnptia.embrapa.br/gestor/cana-de-acucar/arvore/CONTAG01_108_22122006154841.html>. Acesso em: 27/10/2015.

ANDI. Autogeneración y Cogeneración. Disponível em: <[http://www1.upme.gov.co/sites/default/files/Memorias Eventos/Eficiencia Energetica/5_POTENCIAL DE COGENERACION_ANDI.pdf](http://www1.upme.gov.co/sites/default/files/Memorias%20Eventos/Eficiencia%20Energetica/5_POTENCIAL%20DE%20COGENERACION_ANDI.pdf)>. Acesso em: 29/10/2015.

ANEEL. **Atlas de Energia Elétrica do Brasil**. 2013.

ARANGO, S.; YOSHIOKA, A.; GUTIÉRREZ, V. **Análisis del ambiente competitivo del cluster bioindustrial del azúcar en el Valle geográfico del río Cauca**. Cali, Colombia, 2011.

ARBELÁEZ, M.; ESTACIO, A.; OLIVERA, M. **Impacto socioeconómico del sector azucarero en la economía colombiana**. 2010.

ASOCAÑA. **Informe Anual 2008-2009**. 2008a.

ASOCAÑA. Informe Anual 2007-2008. Disponível em: <<http://www.asocana.org/documentos/1162009-6372FF98-FFFFFFFF,000A000,00FF00,FF00FF,E1E1E1,C3C3C3,A5A5A5,878787,696969,4B4B4B,2D2D2D,0F0F0F,D2D2D2,B4B4B4.pdf>>. Acesso em: 27/10/2015b.

ASOCAÑA. Balance Azucarero Colombiano 2000-2015. Disponível em: <<http://www.asocana.org/modules/documentos/5528.aspx>>. Acesso em: 1/1/2014.

ASOCAÑA. Balance sector azucarero colombiano 2000 - 2015. Disponível em: <<http://www.asocana.com.co/modules/documentos/5528.aspx>>. Acesso em: 1/1/2016.

ASPENTECH. **Aspen Plus - Getting Started Modeling Processes with Solids**. Burlington, MA, 2013.

AYARZA, J. A. C. Latin America and ethanol from sugarcane : diagnosis of systemic environment and critical competitive factors. , 30. Aug. 2012. Campinas, SP: Biblioteca Digital da Unicamp. Disponível em: <<http://www.bibliotecadigital.unicamp.br/document/?code=000880085>>. Acesso em: 4/11/2015.

BABCOCK & WILCOX COMPANY. **Steam/its generation and use - 41st Edition**. 41st Editi ed. 2005.

BERNARDO, S. **Manejo da Irrigação na Cana-de-açúcar**. 2008.

BIGATON, A.; DANELON, A. F.; TORRES, H. J. DA S.; XAVIER, C. E. O.; MARQUES,

P. V. Indicadores técnicos e custos de produção de cana-de-açúcar, açúcar e etanol no Brasil: Fechamento de safra 2013/14. **Revista iPecege**, 4. Jan. 2015. Disponível em: <<http://revista.ipecege.org.br/index.php/ipecege/article/view/8>>. Acesso em: 28/10/2015.

BNDES; CGEE. **Bioetanol de cana-de-açúcar. Energia para o desenvolvimento sustentável**. Rio de Janeiro, RJ: BNDES, CGEE, 2008.

BOHÓRQUEZ, A.; LUGO, D. **Cuantificación y análisis de GEI en el CV del etanol obtenido de la caña de azúcar, con base en las directrices del IPCC 2006.**, 2010. Universidad de la Salle.

BONOMI, A.; CAVALETT, O.; CUNHA, M. P. DA; LIMA, M. A. P. (EDS.). **Virtual Biorefinery**. Cham: Springer International Publishing, 2016.

BREU, F.; GUGGENBICHLER, S.; WOLLMANN, J. **Bituminous and Subbituminous Coal Combustion**. 2008.

CAICEDO, E. III- Simposio de Docentes de Finanzas. **Betas Apalancado y no Apalancados en Industrias colombianas**, v. 1, n. 1, 2004.

CAIT. Climate Data Explorer, Country GHG Emissions Data Collection. Disponível em: <<http://cait.wri.org/profile/Latin America & the Caribbean>>. Acesso em: 12/1/2016.

CALIFORNIA ENVIRONMENTAL PROTECTION AGENCY. **Detailed California-Modified GREET Pathway for Denatured Corn Ethanol (Draft)**. 2008.

CARDOSO, T. DE F. **Avaliação socioeconômica e ambiental de sistemas de recolhimento e uso da palha de cana-de-açúcar**, 2014. Universidade Estadual de Campinas.

CARVAJAL PULPA Y PAPEL. Carvajal Pulpa y Papel. Disponível em: <<http://www.carvajalpulpaypapel.com/productos/>>. Acesso em: 11/11/2015.

CASTILLO M, E. F. Breve panorama energético del sector azucarero colombiano. **Técnicaña**, v. 11, n. 19, p. 5, 2007.

CENICAÑA. Proceso de obtención de azúcar. Disponível em: <http://www.cenicana.org/pop_up/fabrica/diagrama_obtencion.php>. Acesso em: 29/10/2015a.

CENICAÑA. Proceso de obtención de etanol. Disponível em: <http://www.cenicana.org/pop_up/fabrica/diagrama_etanol.php>. Acesso em: 29/10/2015b.

CENICAÑA. **Informe Anual 2014**. Cali, Colombia, 2014.

CEPEA. Etanol. Disponível em: <<http://www.cepea.esalq.usp.br/>>. Acesso em: 17/11/2015.

COLÔMBIA.MINAGRICULTURA. Estadísticas Agroforestales 1978-2013. Disponível em: <http://www.agronet.gov.co/www/htm3b/public/EstadisticasAgroforestales_1987-

2013.xlsx>. Acesso em: 30/4/2014.

COLÔMBIA.MINAGRICULTURA. **Anuario Estadístico del Sector Agropecuario 2013**. 2014a.

COLÔMBIA.MINAGRICULTURA. Sistema de Estadísticas Agropecuarias. Disponível em: <<http://www.agronet.gov.co/agronetweb1/Estad%C3%ADsticas.aspx>>. Acesso em: 1/10/2015b.

COLÔMBIA.MINAGRICULTURA. Cadena Productiva de la Caña de Azúcar. Disponível em: <<http://sioc.minagricultura.gov.co/index.php/opc-documentoscadena?ide=50>>. .

COLÔMBIA.MME. Estructura de precios de la Gasolina Motor Corriente Oxigenada. Disponível em: <<https://www.minminas.gov.co/documents/10180/1034363/CircularGasolinaJulio2015.pdf>>. Acesso em: 3/11/2015.

CONAB. **Perfil do Setor do Açúcar e do álcool no Brasil**. Brasília, 2013.

CONAB. **Acompanhamento da safra brasileira de Cana-de-açúcar**. Brasília, 2014.

CONPES. CONPES 3510-2008. Disponível em: <https://www.minambiente.gov.co/images/normativa/conpes/2008/conpes_3510_2008_.pdf>. Acesso em: 1/10/2015.

CONSORCIO CUE. **Capítulo II : Estudio ACV – Impacto Ambiental**. Medellín, 2012.

CORABASTOS. Histórico de Precios. Disponível em: <http://www.corabastos.com.co/sitio/index.php?option=com_content&view=article&id=471&Itemid=261>. Acesso em: 15/11/2015.

CORTEZ, L. A. B. Bioenergy contribution of Latin America, Caribbean and Africa to the GSB project - LACAF-Cane I. , 1. Mar. 2013. Disponível em: <<http://www.bv.fapesp.br/en/auxilios/57703/bioenergy-contribution-of-latin-america-caribbean-and-africa-to-the-gsb-project-lacaf-cane-i/>>. Acesso em: 1/10/2015.

DAMODARAN, A. **Chapter 2 - Estimating Discount Rates**. 2004.

DAMODARAN, A. Data. Disponível em: <<http://pages.stern.nyu.edu/~adamodar/>>. Acesso em: 1/9/2015.

DANE. **Informe de Coyuntura Económica Regional- Departamento del Valle del Cauca**. 2014.

DIAS, M. O. S.; CAVALETT, O.; FILHOB, R. M.; BONOMI, A. Integrated first and second generation ethanol production from sugarcane. **Chemical Engineering Transactions**, v. 37, p. 445–450, 2014.

DIAS, M. O. S.; CUNHA, M. P. DA; MACIEL FILHO, R.; et al. Simulation of integrated first and second generation bioethanol production from sugarcane: Comparison between different biomass pretreatment methods. **Journal of Industrial**

Microbiology and Biotechnology, v. 38, n. 8, p. 955–966, 2011.

DIAS, M. O. S.; JUNQUEIRA, T. L.; CAVALETT, O.; et al. Integrated versus stand-alone second generation ethanol production from sugarcane bagasse and trash. **Bioresource Technology**, v. 103, n. 1, p. 152–161, 2012. Elsevier Ltd. Disponível em: <<http://dx.doi.org/10.1016/j.biortech.2011.09.120>>. .

EPA. **EPA Lifecycle Analysis of Greenhouse Gas Emissions from Renewable Fuels**. 2010.

FAO. Faostat. Disponível em: <<http://faostat3.fao.org/home/E>>. .

FAO; GBEP. Pilot Testing of GBEP Sustainability Indicators for Bioenergy in Colombia. Disponível em: <<http://www.fao.org/3/f9950f0e-255e-4828-9378-fef77b67f3d0/i4058e.pdf>>. Acesso em: 4/11/2015.

FEDEBIOCOMBUSTIBLES. Precios etanol y gasolina Colombia. Disponível em: <[http://www.fedebiocombustibles.com/estadistica-precios-titulo-Alcohol_Carburante_\(Etanol\).htm](http://www.fedebiocombustibles.com/estadistica-precios-titulo-Alcohol_Carburante_(Etanol).htm)>. Acesso em: 30/10/2015.

FEDEBIOCOMBUSTIBLES. Producción de Biodiesel. Disponível em: <<http://www.fedebiocombustibles.com/estadistica-produccion-titulo-Biodiesel.htm>>. Acesso em: 20/1/2016.

FEDESARROLLO; IQUARTIL. **Consultoría Sobre Costos de Producción de Doce Productos Agropecuarios**. 2012.

FINAGRO. Portafolio FINAGRO 2015 de Finagro. Disponível em: <http://issuu.com/finagro1/docs/finagro_brochure_2015>. Acesso em: 3/11/2015.

GARCÍA ARBELÁEZ, C.; BARRERA, X.; GÓMEZ, R.; SUÁREZ CASTAÑO, R. **El ABC de los compromisos de Colombia para la COP21**. 2015.

GERARDO, H.; TORRES, P. Censo y tipificación de productores de caña de azúcar de la industria azucarera colombiana , 1998. , , n. 27, 2000.

GOEDKOOP, M.; HEIJUNGS, R.; SCHRYVER, A. DE; STRUIJS, J.; ZELM, R. VAN. **ReCiPe 2008. A LCIA method which comprises harmonised category indicators at the midpoint and the endpoint level**. 2013.

HASSUANI, S. J.; LEAL, M. R. L. V.; MACEDO, I. DE C. **Biomass power generation: Sugar cane bagasse and trash**. Série Cami ed. Piracicaba: PNUD - Programa das Nações Unidas para o Desenvolvimento; CTC - Centro de Tecnologia Canavieira, 2005.

IEA. IEA Energy Atlas. Disponível em: <<http://energyatlas.iea.org/?subject=1378539487>>. Acesso em: 1/10/2015.

INGENIO PROVIDENCIA. Informe de sostenibilidad 2010-2011. Disponível em: <http://www.ingprovidencia.com/sites/default/files/informe_de_sostenibilidad_2010-2011.pdf>. Acesso em: 27/10/2015.

INSTITUTO DE ECONOMIA AGRÍCOLA. Banco de dados. Disponível em: <<http://www.iea.sp.gov.br/out/bancodedados.html>>. Acesso em: 3/10/2014.

INSTITUTO DE ECONOMIA AGRÍCOLA. Mecanização na Colheita da Cana-de-açúcar Atinge 84,8% na Safra Agrícola 2013/14. Disponível em: <<http://www.iea.sp.gov.br/out/verTexto.php?codTexto=13601>>. Acesso em: 25/10/2015.

IPCC. Biological treatment of solid Waste. **IPCC Guidelines for National Greenhouse Gas Inventories**. p.8, 2006. Disponível em: <http://www.ipcc-nggip.iges.or.jp/public/2006gl/pdf/5_Volume5/V5_4_Ch4_Bio_Treat.pdf>. Acesso em: 11/11/2015.

ISO 14040. **Environmental management — Life cycle assessment —Principles and framework**. 2006.

ISO 14044. **Environmental management - Life cycle assessment - Requirements and guidelines**. 2006.

KUNTSI-REUNANEN, E. A comparison of Latin American energy-related CO2 emissions from 1970 to 2001. **Energy Policy**, v. 35, n. 1, p. 586–596, 2007.

LEAL, M. R. L. V.; GALDOS, M. V.; SCARPARE, F. V.; et al. Sugarcane straw availability, quality, recovery and energy use: A literature review. **Biomass and Bioenergy**, v. 53, p. 11–19, 2013. Disponível em: <<http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0961953413001396>>. Acesso em: 29/10/2015.

LIBREROS, S. S.; SALAMANCA, S. Compostaje de residuos industriales en Colombia. **Revista Técnicaña**, v. 28, p. 15–20, 2012. Disponível em: <http://www.tecnicana.org/pdf/2012/tec_no28_2012_p15-20.pdf>. Acesso em: 4/11/2015.

LINERO, F. Aproveitamento da Palha de Cana-de-açúcar. 16º SBA - Seminário Brasileiro Agroindustrial. **Anais...** p.40, 2015. Ribeirão Preto. Disponível em: <http://www.stab.org.br/16sba/palestras/francisco_linero.pdf>. Acesso em: 14/11/2015.

MACEDO, I. C.; LEAL, M. R. L. V; HASSUANI, S. J. Sugar cane residues for power generation in the sugar/ethanol mills in Brazil. **Energy for Sustainable Development**, v. 5, n. 1, p. 77–82, 2001. International Energy Initiative, Inc. Disponível em: <[http://dx.doi.org/10.1016/S0973-0826\(09\)60022-3](http://dx.doi.org/10.1016/S0973-0826(09)60022-3)>. .

MILANEZ, A. Y.; NYKO, D.; VALENTE, M. S.; et al. De promessa a realidade: como o etanol celulósico pode revolucionar a indústria da cana-de-açúcar: uma avaliação do potencial competitivo e sugestões de política pública. , 2015. Banco Nacional de Desenvolvimento Econômico e Social. Disponível em: <<https://web.bndes.gov.br/bib/jspui/handle/1408/4283>>. Acesso em: 31/10/2015.

MONCADA, J.; EL-HALWAGI, M. M.; CARDONA, C. A. Techno-economic analysis for a sugarcane biorefinery: Colombian case. **Bioresource Technology**, v. 135, p. 533–543, 2013. Elsevier Ltd. Disponível em:

<<http://dx.doi.org/10.1016/j.biortech.2012.08.137>>. .

MONCADA, J.; TAMAYO, J. A.; CARDONA, C. A. Integrating first, second, and third generation biorefineries: Incorporating microalgae into the sugarcane biorefinery. **Chemical Engineering Science**, v. 118, p. 126–140, 2014.

MORNADINI, M.; QUAIA, E. Alternativas para el aprovechamiento de la vinaza como subproducto de la actividad sucroalcoholera. **Estación experimental agroindustrial obispo colombres**, v. 34, n. 2, p. 1–12, 2013.

MUTTON, M. A.; ROSSETTO, R.; ROSSINI, M. J. Utilização agrícola da Vinhaça. In: Editora Edgard Blucher Ltda; FAPESP (Ed.); **Bioetanol de Cana-de-Açúcar: P&D para Produtividade e Sustentabilidade**. 1a Edição ed., p.992, 2010. São Paulo.

NETO, A. E. Aspectos da Utilização dos Recursos Hídricos na Irrigação Canavieira. Disponível em: <<http://www.unica.com.br/download.php?idSecao=17&id=10937246>>.

PÁEZ, G. Control y monitoreo de las aguas subterráneas y suelos enfocado a la aplicación de vinazas en el Valle del Cauca-Colombia. Seminario control de la Contaminación y protección de la calidad de suelos y aguas subterráneas enfocado a la aplicación de fertilizantes obtenidos a partir de vinazas. **Anais...** . p.11, 2001.

PARLAMENTO EUROPEO. Directiva 2009/28/CE del Parlamento Europeo y del Consejo. Disponível em: <<http://eur-lex.europa.eu/LexUriServ/LexUriServ.do?uri=OJ:L:2009:140:0016:0062:ES:PDF>>. Acesso em: 22/1/2016.

PECEGE. **Custos de produção de cana-de-açúcar, açúcar e etanol no Brasil: Acompanhamento da Safra 2011/2012 - Centro Sul**. 2012.

PEÑA URUEÑA, M. L. **Caracterización De Cenizas De Algunos Carbones Colombianos in Situ Por Retrodispersión Gamma-Gamma**, 2011. Universidad Nacional de Colombia.

PÉREZ, M. A.; PEÑA, M. R.; ALVAREZ, P. Agro Industria Cañera Y Uso Del Agua: Análisis Crítico En El Contexto De La Política De Agrocombustibles En Colombia. **Ambiente & Sociedade**, v. XIV, n. 2, p. 153–178, 2011.

PETROBRAS. Composição de Preços da Gasolina. Disponível em: <<http://www.petrobras.com.br/pt/produtos-e-servicos/composicao-de-precos/gasolina/>>. Acesso em: 3/11/2015.

PROCAÑA. Presentación del Sector de la Caña. Disponível em: <http://www.procana.org/new/images/content/botones-articulos/Presentacion_del_Sector_de_la_Cana.pdf>. Acesso em: 1/10/2015.

QUINTERO, J. A.; MONTOYA, M. I.; SÁNCHEZ, O. J.; GIRALDO, O. H.; CARDONA, C. A. Fuel ethanol production from sugarcane and corn: Comparative analysis for a Colombian case. **Energy**, v. 33, n. 3, p. 385–399, 2008.

REBOLLEDO C, A. Sistema de cosecha manual de caña de azúcar en Colombia

Cosecha manual de caña de azúcar en Colombia. Taller Internacional de cosecha y transporte de caña de azúcar. **Anais...** . p.35, 2006. Cali, Colombia, Colombia.

REN 21, (RENEWABLE ENERGY POLICY NETWORK FOR THE 21ST CENTURY). **Renewables 2015 Global Status Report (GSR)**. 2015.

RTI. **Greenhouse Gas Emissions Estimation Methodologies for Biogenic Emissions from Selected Source Categories : Solid Waste Disposal Wastewater Treatment Ethanol Fermentation**. 2010.

SÁNCHEZ, J. H. The discount rate in emerging countries-application of the Colombian case. **Revista EAN**, , n. 69, p. 120–134, 2010. Disponível em: <http://www.scielo.org.co/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S0120-81602010000200008&lng=en&nrm=iso&tlng=es>. .

SANZ, D. **Análisis y Optimización exergética de una planta de Cogeneración para la Industria Azucarera**, 2014. Universidad Tecnológica de Pereira.

SEABRA, J. E. **Avaliação técnico-econômica de opções para o aproveitamento integral da biomassa de cana no Brasil**, 2008. Universidade Estadual de Campinas. Disponível em: <<http://libdigi.unicamp.br/document/?code=vtls000446190>>. .

SECRETARIA DO MEIO AMBIENTE. Protocolo Agroambiental do Setor Sucroenergético Paulista. Disponível em: <<http://www.ambiente.sp.gov.br/etanolverde/files/2014/12/Protocolo-Agroambiental-do-Setor-Sucroenerg%C3%A9tico-Relat%C3%B3rio-consolidado.pdf>>. Acesso em: 25/10/2015.

SHEINBAUM-PARDO, C.; RUIZ, B. J. Energy context in Latin America. **Energy**, v. 40, n. 1, p. 39–46, 2012. Elsevier Ltd. Disponível em: <<http://dx.doi.org/10.1016/j.energy.2011.10.041>>. .

TECNICAÑA. Mecanización de la cosecha de caña de azúcar. **Tecnicaña**, v. 11, n. 19, p. 40, 2007. Disponível em: <http://www.tecnicana.org/pdf/2007/tec_v11_no19_2007_p33-34.pdf>. Acesso em: 27/10/2015.

TECNICAÑA. Programa nacional de formación especializada y actualización tecnológica del talento humano. Seminario Internacional de Fertilización y Nutrición de la Caña de Azúcar. **Anais...** . p.1–127, 2009. Cali, Colombia: Sena-Asocaña.

UDOP. **Produção brasileira de cana-de-açúcar, açúcar e etanol**. 2015.

UNICA. **Cenário e Desafios para a Expansão do Setor Sucroenergético**. Ribeirão Preto, 2012.

UNICA. **Relatório final da safra 2014/2015**. 2014.

UNICA. **A Bioeletricidade da cana em números**. 2015.

UPME. Generación. Disponível em: <<http://www.siel.gov.co/Inicio/Generaci%C3%B3n/Generaci%C3%B3n1/tabid/143/De>>

fault.aspx>. Acceso em: 13/11/2015a.

UPME. Balance Minero Energético. Disponible em: <http://www.upme.gov.co/GeneradorConsultas/Consulta_Balance.aspx?IdModulo=3>. Acceso em: 1/10/2015b.

UPME. **Costo Fiscal de Subsidios y Exenciones tributarias al Consumo de Gasolina y ACPM**. 2014.

URIBE, D. A.; WWF COLOMBIA. Una mirada a la agricultura de Colombia desde su Huella Hídrica. Disponible em: <<http://www.huellahidrica.org/Reports/Arevalo-2012-HuellaHidricaColombia.pdf>>. Acceso em: 27/10/2015.

VALENCIA, M. J.; CARDONA, C. A. The Colombian biofuel supply chains: The assessment of current and promising scenarios based on environmental goals. **Energy Policy**, v. 67, p. 232–242, 2014. Elsevier. Disponible em: <<http://dx.doi.org/10.1016/j.enpol.2013.12.021>>. .

VIVEROS, C. A. **Identificación de características asociadas con las mayor eficiencia en el uso de agua para la producción de caña de azucar**, 2011. Universidad Nacional de Colombia.

XM. **Informe Seguimiento Cogeneradores**. 2015a.

XM. Base de datos XM. Disponible em: <<http://informacioninteligente10.xm.com.co/transacciones/Paginas/default.aspx>>. Acceso em: 5/5/2015b.

APÊNDICES

Apêndice 1 – Parâmetros utilizados na simulação

Tabela 36 – Parâmetros relevantes utilizados na simulação em Aspen Plus.

Parâmetro	Unidade	Valor
Limpeza da cana-de-açúcar		
Tipo de sistema de limpeza		Lavagem
Eficiência de remoção de terra	%	80,0
Extração de açúcares		
Tipo de equipamento		Moenda
Vazão de água de embebição em relação à cana moída	%	26,8
Eficiência média de extração de açúcares (glicose e sacarose)	%	96,24
Temperatura da água de embebição	°C	40
Tratamento de Caldo		
Temperatura do caldo pré-aquecido	°C	60
Adição de cal na calagem	kg CaO/TC	0,8
Sulfitação	kg/TC	0,2
Concentração de Ca(OH) ₂ adicionado na calagem	°Bé	9 a 15
Teor de fosfato no caldo fosfatado (mássico)	ppm	250
Concentração de ácido fosfórico adicionado	%	85
Temperatura do caldo quente	°C	105
Quantidade média de polímero floculante	g/TC	11,80
Concentração da solução polimérica (mássico)	%	0,10
Temperatura do caldo clarificado	°C	85
Água de lavagem da torta em relação à vazão da torta	%	131
Temperatura da água de lavagem da filtração	°C	85
Bagacilho alimentado no filtro	kg/TC	3,9
Quantidade de torta de filtro	kg/TC	30
Pol na torta	%	1,72
Pressão no primeiro efeito do evaporador	bar	1,696
Pressão no segundo efeito do evaporador	bar	1,354
Pressão no terceiro efeito do evaporador	bar	1,010
Pressão no quarto efeito do evaporador	bar	0,529
Pressão no quinto efeito do evaporador	bar	0,200
Brix na saída do evaporador	°Bx	68
Fermentação		
Teor de células no pé-de-cuba em base úmida	%	
Teor de etanol no vinho alimentado nas colunas	°GL	8,3
Temperatura da fermentação	°C	33
Adição de ácido sulfúrico no tratamento de células	g/ L etanol	21,6
Eficiência de fermentação	%	91,6
Destino da purga de leveduras	-	Destilação
Destilação		
Teor de etanol na vinhaça (em massa)	%	0,05
Teor de etanol na flegmaça (em massa)	%	0,10
Continua		

Parâmetro	Unidade	Valor
Continuação Tabela 36		
Teor alcoólico do etanol hidratado (em massa)	%	96,0
Método de desidratação		Peneira molecular
Teor alcoólico do etanol anidro (em massa)	%	99,6
Número de efeitos no evaporador para concentração de vinhaça		5
Brix na saída do evaporador	°Bx	45
Cogeração		
Reserva de bagaço (start-up)	%	3,54
Tipo de acionamento das moendas		Eletrificado
Demanda de energia elétrica	kWh/TC	43,8
Pressão das caldeiras	bar	65
Eficiência em base PCI da caldeira	%	75,17
Temperatura dos gases na saída da caldeira	°C	160
Temperatura do vapor gerado	°C	478
Eficiência isentrópica das turbinas	%	83
Eficiência do gerador	%	95
Pressão do vapor de processo	bar	2,5
Produção de açúcar		
Número de efeitos no evaporador		5
Pureza do xarope	%	87,0
Brix do açúcar A	°Bx	99,4
Pureza do açúcar A	%	99,8
Brix do melaço	°Bx	86,0
Pureza do melaço	%	61
Brix do açúcar final	°Bx	99,6
Pureza do açúcar final	%	99,8
Umidade do açúcar produzido	%	0,10
Recuperação total de açúcar	%	76,5

Fonte: Cenicaña (Comunicação pessoal, setembro, 2015).

Apêndice 2 – Eficiência estimada da caldeira

Tabela 37 – Composição do combustível equivalente.

%	Carvão (13%)	Bagaço (87%)	Combustível equivalente
C	63,74	24,82	29,88
H	4,84	3,01	3,25
O	8,75	23,16	21,29
S	0,76	0,02	0,12
N	1,05	-	0,14
H ₂ O	-	47,00	40,89
Cinzas	20,85	2,16	4,59
PCS (btu/lb)			4.715,87
PCI (btu/lb)			4.410,44

Tabela 38 – Método para estimar a eficiência da caldeira.

Entradas		Cálculos de combustão		Cálculos de eficiência	
Excesso de ar	30	Ar teórico corrigido	7,68	Perdas	
Temperatura entrada (°F)	77	Resíduo de combustível	0,10	Gás seco (%)	7,04
Temperatura do combustível (°F)	77	Resíduo total	0,10	Entalpia de vapor (T=320)	1.204,78
Temperatura do gás de saída	320	Ar seco	9,99	Entalpia de vapor (T=77)	45,00
Umidade	0,017	H ₂ O do ar	0,17	Água do combustível (%)	17,20
PCS	4.715,87	H ₂ O do combustível	1,48	Umidade no ar	0,19
Perda de carvão (% combustível entrada)	0,4	Gás úmido de combustível	2,02	Radiação de superfície	0,40
Ar teórica	7,70	Gás úmido Total	13,66	Total	24,83
Carvão não queimado (% combustível)	0,13	Água em gás úmido	1,65		
		Gás seco	12,01	Créditos	-
		H ₂ O no gás	12,10	Eficiência (%)	75,17

Fonte: (BABCOCK & WILCOX COMPANY, 2005)

Apêndice 3 – Taxa mínima de atratividade (TMA)

Tabela 39 – Método CAPM para estimar a TMA real.

	Parâmetro	Valor
Taxa livre de risco	T-bonds rate (média geométrica 2005-2014)	4,88%
Beta	Alavancado	1,83
(Rm-Rf)	Market risk premium (média geométrica 2005-2014)	2,73%
	Country default spread (CDS)	2,26%
	Desvio padrão em ações (e)	16,00%
	Desvio padrão preço de títulos (b)	6,67%
	Desvio padrão relativo (e/b)	2,40
Rp	Country risk Premium (CDS* (e/b))	5,43%
Custo de capital próprio	Ke	15,30%

Apêndice 4 – Fluxo de caixa

Tabela 40 – Cálculos para o fluxo de caixa para o cenário 1, 2 e 3.

Parâmetro		Cenário 1	Cenário 2	Cenário 3
RECEITA	Receita anual anidro (US\$ mi)	67,97	67,966	134,29
	Receita anual hidratado (US\$ mi)	0	0	0,00
	Receita anual açúcar (US\$ mi)	128,13	128,13	128,13
	Receita anual eletricidade (US\$ mi)	7,10	7,09	9,51
	Receita anual bagaço (US\$ mi)	4,32	1,58	0,00
	Receita anual líquida (US\$ mi)	207,5	204,77	271,94
CUSTOS OPERACIONAIS	Custo anual com cana (US\$ mi)	57,30	57,30	56,36
	Custo anual com carvão (US\$ mi)	4,32	0,00	0,00
	Custo anual com enzimas (US\$ mi)	0,00	0,00	4,15
	Custo anual com palha (MLC na 2G) (US\$ mi)	0,00	0,00	2,14
	Custo anual com outros insumos (US\$ mi)	2,21	2,21	2,21
	Custo anual mão-de-obra (US\$ mi)	4,49	4,49	5,45
	Custo manutenção (US\$ mi)	6,81	6,81	9,54
	Custo operacional anual (US\$ mi)	75,15	70,82	79,85
IMPOSTOS	Excedente operacional bruto anual (US\$ mi)	132,38	133,95	192,09
	Depreciação contábil anual (US\$ mi)	23,62	23,62	33,06
	Renda tributável anual primeiros 10 anos (US\$ mi)	108,76	110,33	159,03
	IRPJ anual primeiros dez anos (US\$ mi)	35,89	36,41	52,48
	Renda tributável anual APÓS primeiros 10 anos (US\$ mi)	132,38	133,95	192,09
	IRPJ anual APÓS primeiros dez anos (US\$ mi)	43,69	44,20	63,39
	Excedente líquido anual primeiros dez anos (US\$)	96,49	97,54	139,61
	Excedente líquido anual APÓS primeiros dez anos (US\$)	88,70	89,74	128,70

Tabela 41 – Fluxo de caixa para o cenário 1.

Ano	Fluxo de caixa	Acumulado	Descontado	Descontado acumulado
0	-59,05	-59,05	-59,05	-59,05
1	-118,10	-177,15	-102,43	-161,48
2	-82,67	-259,82	-62,18	-223,66
3	96,49	-163,33	62,94	-160,71
4	96,49	-66,84	54,59	-106,13
5	96,49	29,65	47,34	-58,78
6	96,49	126,14	41,06	-17,72
7	96,49	222,63	35,61	17,88
8	96,49	319,12	30,88	48,77
9	96,49	415,61	26,78	75,55
10	96,49	512,10	23,23	98,78
11	96,49	608,59	20,15	118,92
12	96,49	705,08	17,47	136,40
13	88,70	793,77	13,93	150,32
14	88,70	882,47	12,08	162,40
15	88,70	971,16	10,48	172,88
16	88,70	1.059,86	9,09	181,97
17	88,70	1.148,55	7,88	189,85
18	88,70	1.237,25	6,83	196,68
19	88,70	1.325,94	5,93	202,61
20	88,70	1.414,64	5,14	207,75
21	88,70	1.503,33	4,46	212,21
22	88,70	1.592,03	3,87	216,07
23	88,70	1.680,73	3,35	219,43
24	88,70	1.769,42	2,91	222,33
25	88,70	1.858,12	2,52	224,86
26	88,70	1.946,81	2,19	227,04
27	88,70	2.035,51	1,90	228,94

Tabela 42 – Fluxo de caixa para o cenário 2.

Ano	Fluxo de caixa	Acumulado	Descontado	Descontado acumulado
0	-59,05	-59,05	-59,05	-59,05
1	-118,10	-177,15	-102,43	-161,48
2	-82,67	-259,82	-62,18	-223,66
3	97,54	-162,28	63,63	-160,03
4	97,54	-64,74	55,18	-104,85
5	97,54	32,79	47,86	-56,99
6	97,54	130,33	41,51	-15,49
7	97,54	227,87	36,00	20,51
8	97,54	325,41	31,22	51,73
9	97,54	422,95	27,07	78,80
10	97,54	520,49	23,48	102,28
11	97,54	618,03	20,36	122,65
12	97,54	715,56	17,66	140,31
13	89,74	805,31	14,09	154,40
14	89,74	895,05	12,22	166,63
15	89,74	984,80	10,60	177,23
16	89,74	1.074,54	9,19	186,42
17	89,74	1.164,28	7,97	194,39
18	89,74	1.254,03	6,91	201,31
19	89,74	1.343,77	6,00	207,30
20	89,74	1.433,52	5,20	212,50
21	89,74	1.523,26	4,51	217,02
22	89,74	1.613,00	3,91	220,93
23	89,74	1.702,75	3,39	224,32
24	89,74	1.792,49	2,94	227,26
25	89,74	1.882,24	2,55	229,81
26	89,74	1.971,98	2,21	232,03
27	89,74	2.061,72	1,92	233,95

Tabela 43 – Fluxo de caixa para o cenário 3.

Ano	Fluxo de caixa	Acumulado	Descontado	Descontado acumulado
0	-82,65	-82,65	-82,65	-82,65
1	-165,30	-247,94	-143,36	-226,00
2	-115,71	-363,65	-87,03	-313,03
3	139,61	-224,04	91,07	-221,97
4	139,61	-84,44	78,98	-142,98
5	139,61	55,17	68,50	-74,49
6	139,61	194,78	59,41	-15,08
7	139,61	334,38	51,52	36,44
8	139,61	473,99	44,68	81,12
9	139,61	613,60	38,75	119,88
10	139,61	753,21	33,61	153,49
11	139,61	892,81	29,15	182,63
12	139,61	1.032,42	25,28	207,91
13	128,70	1.161,12	20,21	228,12
14	128,70	1.289,82	17,53	245,65
15	128,70	1.418,51	15,20	260,85
16	128,70	1.547,21	13,18	274,04
17	128,70	1.675,91	11,43	285,47
18	128,70	1.804,61	9,92	295,39
19	128,70	1.933,30	8,60	303,99
20	128,70	2.062,00	7,46	311,44
21	128,70	2.190,70	6,47	317,91
22	128,70	2.319,40	5,61	323,52
23	128,70	2.448,09	4,87	328,39
24	128,70	2.576,79	4,22	332,61
25	128,70	2.705,49	3,66	336,27
26	128,70	2.834,19	3,17	339,44
27	128,70	2.962,89	2,75	342,19

Apêndice 5 – Inventário de Ciclo de Vida

Tabela 44 – ICV selecionado para o cenário 2 (valores por 1 MJ de etanol produzido).

	Unidade	Emissões do processo	Cana-de- açúcar	Insumos	Total
Consumo recursos materiais					
Água	m3	-	3,46E-02	1,06E-03	3,57E-02
Combustíveis fósseis					
			8,68E-02	1,39E-02	1,01E-01
Carvão	MJ	-	6,75E-03	2,72E-03	9,46E-03
Gás Natural	MJ	-	1,95E-02	2,92E-03	2,24E-02
Petróleo	MJ	-	6,05E-02	8,24E-03	6,87E-02
Emissões atmosféricas					
CH4	kg	1,76E-04	1,09E-04	1,75E-06	2,87E-04
CO	kg	8,77E-05	3,40E-03	4,69E-06	3,49E-03
CO2, fóssil	kg	1,14E-04	5,40E-03	1,29E-03	6,81E-03
CO2, biogênico	kg	-8,01E-02	-1,52E-03	-3,70E-06	-8,16E-02
PM10	kg	-	2,03E-06	7,86E-07	2,82E-06
PM2.5	kg	1,48E-04	1,46E-04	6,43E-07	2,94E-04
N2O	kg	1,15E-05	1,75E-05	2,92E-08	2,91E-05
NMVOC	kg	1,95E-05	6,17E-06	7,66E-07	2,64E-05
NOx	kg	8,85E-05	1,28E-04	2,20E-06	2,19E-04
SOx	kg	1,51E-05	2,30E-05	1,30E-05	5,10E-05
Outros					
Cádmio	kg	-	3,03E-09	6,61E-13	3,03E-09
Zinco	kg	3,67E-11	7,94E-09	2,33E-09	1,03E-08
Uso da terra	m2.ano	2,51E-06	4,76E-02	1,06E-04	4,78E-02