CELSO JÚNIOR ROSEGHINI LOPES

**COMPARANDO AS EMISSÕES DE GASES DE EFEITO ESTUFA NAS ETAPAS DA
CADEIA PRODUTIVA DO ETANOL BRASILEIRO**

São Paulo

2012

CELSO JÚNIOR ROSEGHINI LOPES

**COMPARANDO AS EMISSÕES DE GASES DE EFEITO ESTUFA NAS ETAPAS DA
CADEIA PRODUTIVA DO ETANOL BRASILEIRO**

Dissertação apresentada à Escola
Politécnica da Universidade de São Paulo
como parte dos requisitos para obtenção do
Título de Mestre em Engenharia de
Sistemas Logísticos

Área de concentração:
Engenharia de Sistemas Logísticos

Orientador: Professor livre-docente
Hugo Tsugunobu Yoshida Yoshizaki

São Paulo

2012

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

São Paulo, 27 de fevereiro de 2012.

Assinatura do autor _____

Assinatura do orientador _____

FICHA CATALOGRÁFICA

Lopes, Celso Júnior Roseghini

**Comparando as emissões de gases de efeito estufa nas etapas da cadeia produtiva do etanol brasileiro / C.J.R. Lopes. – ed.rev. -- São Paulo, 2012.
147 p.**

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

1. Gases (Emissão) 2. Efeito estufa 3. Etanol I. Universidade de São Paulo. Escola Politécnica. Departamento de Engenharia de Transportes II. t.

DEDICATÓRIA

Dedico esta dissertação a Deus, a Jesus Cristo, ao Espírito Santo, a Lídia Neves Martello, a Celso Ferreira Lopes, a Iara Roseghini Lopes, a André Luís Roseghini Lopes e a Nathália Camilla Roseghini Lopes.

AGRADECIMENTOS

Em primeiro lugar agradeço a DEUS, pelo dom da vida, amizade e por tudo aquilo que está realizando e realizará em minha vida.

A todos os meus familiares: avôs, avós, tios, tias, primos e primas. Em especial, aos meus pais, Celso Ferreira Lopes e Iara Roseghini Lopes, por todo o amor que recebi, por me cobrirem com suas orações, por terem se sacrificado em meu favor e terem me dado a chance de escolher o caminho dos estudos.

Ao meu professor e orientador Dr. Hugo Tsugunobu Yoshida Yoshizaki, pela paciência, dedicação, conselhos, ensinamentos e pela confiança depositada em mim. Também aos membros da banca, Dra. Daniela Bacchi Bartholomeu e Dr. André Bergsten Mendes, pelas instruções para a finalização desta dissertação.

Aos professores do Departamento de Engenharia de Produção, Engenharia de Transportes e Engenharia Naval e Oceânica da Escola Politécnica da Universidade de São Paulo, pelo grande aprendizado, desenvolvimento acadêmico e oportunidades. Em especial, ao professor Dr. Eduardo Zancul, que me permitiu ter uma experiência como professor universitário. Também aos funcionários, em especial, a Lídia Nogueira da Silva, Rosineide Silva, Aninha Pereira, Marlene Ferreira e Samy Santos, que sempre foram competentes, prestativos e atenciosos.

A Dra. Vanessa Meloni Massara e ao MSc. Daniel Ferreira, pela amizade e inúmeras horas dedicadas à leitura deste trabalho. Agradeço também ao MSc. Bernardo Yasuhiro Ide, por ter me ensinado quase tudo o que eu sei sobre o sistema produtivo da cana-de-açúcar e ter me fornecido os dados que tornou essa dissertação uma realidade.

A Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior (CAPES), a Fundação Vanzolini e a Escola Politécnica da USP, pelo apoio financeiro.

Aos amigos do Centro de Inovação em Engenharia de Sistemas Logísticos da Escola Politécnica da Universidade de São Paulo, por tudo: Irineu de Brito, Celso Hino, professor Dr. Cláudio Barbieri, Fabiano Stringher, Juliana Lopes, Catalina Salazar, Fábio Breslau, Rafael Rosin, Flávio Vaz, Fabiana Rivas, André Shigueo, Eduardo Peres, Raisa Quinteiro e Letícia Cestari. Também aos amigos do Núcleo de Gestão de Operações e Logística (GOL): Celso Sakuraba, Everton de Melo e Sérgio Morales.

Aos amigos da Igreja Apostólica Renascer em Cristo (São Paulo/SP - sede internacional) por todo apoio e orações. Em especial ao envio do Apóstolo Estevam Hernandes e da Bispa Sônia Hernandes.

Ao meu sogro e sogra, José Martello e Débora Neves Martello, por todo apoio e carinho.

Aos meus queridos tios, Sandra Roseghini e Fernando Reis, por terem me presenteado com o computador que facilitou os meus estudos durante o mestrado.

Aos amigos com quem dividi apartamento: Leonardo Formaggio, Fábio Freitas, Diogo Martins e Luiz Wilbert.

Aos amigos que ingressaram comigo no programa de mestrado M-LOG (2010) e fizemos diversos trabalhos em equipe: Edson Michelin e Luiz Augusto Canito Gallego de Andrade.

Aos meus queridos amigos Mateus de Andrade, Vinícius Pettan Tedesco, Maria Liége Pousa Tedesco, Rodolfo Margato da Silva, Maria Alice Moz Christofolletti, Rui de Andrade, Hertz Maceu, Josué Ferreira, Júnior Almeida, Rodrigo Yanes, Pastor Daniel Tenuta, Henrique Furlani, Danilo Ferreira, Miquéias Torres, Regiane Torres, Karina Valenzuela, Karina Maggioni, Sheila Maggioni, Raphael Camargo, Getúlio Lopes, Ricardo Brito, Gustavo Belo, Micheli Mitie Assato e Renato Lima Rasmussen.

Por fim, o agradecimento mais especial, por tudo, ao amor da minha vida, **Lídia Neves Martello**.

Agradeço a todos que, direta ou indiretamente, contribuíram para a execução desta dissertação e minha formação acadêmica.

“Então vocês verão novamente a diferença entre o justo e o ímpio, entre os que servem a Deus e os que não o servem”.

Malaquias 3:18

RESUMO

Este trabalho utilizou a metodologia *Renewable Transport Fuel Obligation* (RTFO), desenvolvida pela *Renewable Fuels Agency* (RFA, 2008), para quantificar o volume de gases de efeito estufa emitido nas etapas do ciclo de vida do etanol: manejo agrícola da cana-de-açúcar, transporte da matéria-prima da lavoura até a usina, beneficiamento industrial, cogeração de energia elétrica e logística até uma base primária de armazenamento. O arcabouço metodológico foi aplicado em cinco diferentes regiões do Estado de São Paulo, o maior produtor brasileiro: Araçatuba, Assis, Ribeirão Preto, Jaú e Piracicaba.

Ademais, objetivou-se examinar o impacto relativo que os seguintes tópicos têm nas emissões de gases de efeito estufa no ciclo de vida do etanol: (1) localização da produção de cana-de-açúcar; (2) utilização de diferentes combustíveis na etapa do manejo agrícola da cana-de-açúcar; (3) extinção da prática de queimar o canavial na fase da pré-colheita; e (4) utilização de uma logística intermodal para distribuir o etanol até uma base primária de armazenamento.

No “cenário base”, considerou-se a utilização de óleo diesel no manejo agrícola da cana-de-açúcar, a prática de queimar previamente o canavial na fase da pré-colheita e a logística rodoviária para transportar o etanol das regiões produtoras até uma base primária de armazenamento localizada no porto de Santos-SP. Já para a análise de sensibilidade dos parâmetros de emissões, os demais cenários contemplam as possíveis combinações entre o uso de biodiesel no manejo agrícola (B₂₀ ou B₁₀₀), extinção da queima do canavial na fase da pré-colheita e logística rodo-ferroviária.

Constatou-se que, independentemente do cenário analisado, em média, a maior parcela das emissões de gases de efeito estufa no ciclo de vida do etanol foi proveniente do manejo agrícola da cana-de-açúcar. Devido às características intrínsecas ao solo e a gestão das operações, as emissões são diferentes entre as regiões (amplitude de 60 kg de CO_{2e}/tonelada de etanol). Ademais, essa etapa representou 51% e 62%, quando foi considerado, respectivamente, a logística rodoviária e a intermodalidade rodo-ferroviária para transportar o produto até Santos-SP.

A utilização da intermodalidade de transporte rodo-ferroviária para distribuição do etanol corroborou para a minimização de gases de efeito estufa. Considerando a média

dos cenários analisados, essa redução chegou a 13% no ciclo de vida e a 74% apenas na etapa da logística.

Por fim, observou-se que existe minimização no volume de gases lançados na atmosfera em decorrência da sinergia entre o consumo de biodiesel B₁₀₀ no manejo agrícola da cana-de-açúcar, a extinção da prática da queima do canavial na fase da pré-colheita e a utilização de logística intermodal rodo-ferroviária para se transportar o produto até uma base de armazenamento em Santos-SP. Em média, o volume de gases de efeito estufa emitidos diminuíram em 43% no ciclo de vida do etanol.

PALAVRAS-CHAVE: Emissões de gases de efeito estufa, ciclo de vida do etanol, manejo agrícola, logística, metodologia RTFO.

ABSTRACT

This thesis adopts the Renewable Transport Fuel Obligation (RTFO) methodology, developed by the Renewable Fuels Agency (RFA, 2008), to quantify the volume of greenhouse gases that are emitted during the following stages of the ethanol life-cycle: 1) sugarcane farm management, 2) transportation of the raw material from the field to the mill, 3) industrial processing, 4) co-generation of electricity, and 5) logistics to the primary storage base. The methodology is applied over five different regions of the State of São Paulo, the largest ethanol producing State in Brazil: Araçatuba, Assis, Ribeirão Preto, Jaú e Piracicaba.

Furthermore, this thesis aims to exam the following impacts related to the greenhouse gases emitted by the stages of ethanol life-cycle: (1) sugar production location; (2) usage of different fuels at the stage of sugarcane farm management; (3) extinction of the practice of burning the sugarcane field during the pre-harvest; and (4) utilization of intermodal logistics in order to transport the end-product to a primary storage base.

In the “base scenario”, it is assumed 1) the utilization of diesel oil in the farm management of sugarcane, 2) the practice of previously burning the sugarcane field in the pre-harvest and 3) the road logistics to transport ethanol from the producing regions to a primary storage base located in the port of Santos-SP. To analyze the sensibility of emission parameters, other scenarios comprehend the possible combinations between the usage of biodiesel in farm management (B_{20} ou B_{100}), as well as the extinction of the practice of burning the sugarcane field in the pre-harvest and road-rail logistics.

It was verified that, on average, regardless of the analyzed scenario, the largest portion of greenhouse gas emissions during the ethanol life cycle is concentrated at the sugarcane farm management stage. Due to the intrinsic characteristics of the soil and the required operations management, the emissions differ between regions (amplitude of 60 kg CO_2e /ton of ethanol). Moreover, when both, road logistics and road-rail intermodality to transport the product to Santos-SP are considered, this stage represents 51% and 62%, respectively.

The utilization of road-rail transportation intermodality to distribute ethanol contributes to the reduction of greenhouse gas emission. By considering the average of analyzed

scenarios, this reduction achieves 13% during the life cycle and 74% only during the logistics stage.

Finally, it was observed that there is a reduction on the volume of gases emitted into the atmosphere as a result of synergy among the use of biodiesel B₁₀₀ in sugarcane farm management, the extinction of the practice of burning the sugarcane field in the pre-harvest and the utilization of intermodal logistic in order to transport the product to a primary storage base in Santos-SP. On average, the emitted volume of greenhouse gas decreases by 43% in the life cycle of ethanol.

Keywords: Greenhouse gas emissions, ethanol life cycle, farm management, logistics, methodology RTFO.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 - Etapas do ciclo de vida do etanol	5
Figura 2 - Diagrama simplificado da cadeia agroindústria do etanol	25
Figura 3 - Algumas das etapas presentes na produção de mudas	26
Figura 4 - Algumas das etapas presentes na fase de preparo do solo	28
Figura 5 - Algumas das etapas presentes na fase de plantio manual da cana-de-açúcar	30
Figura 6 - Algumas das etapas presentes na fase de plantio mecanizado da cana-de-açúcar	32
Figura 7 - Algumas das etapas presentes na fase de tratos culturais do canavial.....	35
Figura 8 - Algumas das etapas presentes na fase de colheita manual da cana-de-açúcar	37
Figura 9 - Algumas das etapas presentes na fase da colheita mecanizada.....	39
Figura 10 - Algumas das etapas presentes na fase de chegada da cana-de-açúcar na usina	41
Figura 11 - Algumas das etapas presentes na fase do processo industrial	42
Figura 12 - Alguns dos modais de transporte utilizados para distribuir o etanol da usina até uma base primária de armazenamento.....	43
Figura 13 - Algumas das etapas presentes na fase de consumo final do etanol	44
Figura 14 - Algumas das etapas presentes na fase de cogeração de energia elétrica	45
Figura 15 - Algumas das etapas presentes na fase de fertirrigação com vinhaça.....	48
Figura 16 - Aplicação da estrutura metodológica.....	49
Figura 17 - Fatores que explicam as diferenças regionais entre as quantidades de gases de efeito estufa emitidas na etapa do manejo agrícola da cana-de-açúcar	57
Figura 18 - Racional dos cálculos das emissões no manejo agrícola	60
Figura 19 - Racional dos cálculos das emissões no transporte da matéria-prima	62
Figura 20 - Racional dos cálculos das emissões no beneficiamento industrial.....	63
Figura 21 - Racional dos cálculos das emissões na cogeração de energia elétrica.....	64
Figura 22 - Racional dos cálculos das emissões na logística do etanol entre a usina e a base primária de armazenamento.....	66
Figura 23 - Representação esquemática da logística intermodal do etanol entre uma usina e uma base primária de armazenamento	67
Figura 24 - Racional dos cálculos das emissões na logística do etanol de um porto brasileiro até um país demandante.....	68

Figura 25 - Regiões analisadas no estudo de caso: comparação relativa das emissões de gases de efeito estufa entre as etapas da produção agrícola da cana-de-açúcar e da logística do etanol	70
Figura 26 - Emissões de gases de efeito estufa na etapa do manejo agrícola em cada região produtora analisada.....	72
Figura 27 - Contribuições relativas às emissões de gases de efeito estufa em função dos eventos presentes na etapa do manejo agrícola da cana-de-açúcar	73
Figura 28 - Emissões de gases de efeito estufa na etapa do transporte da matéria-prima, da lavoura até a usina, em cada região produtora analisada.....	74
Figura 29 - Comparação entre as emissões de gases de efeito estufa na etapa da logística, da região de Araçatuba-SP até Santos-SP: rodoviária <i>versus</i> intermodal.....	79
Figura 30 - Comparação entre as emissões de gases de efeito estufa na etapa da logística, da região de Assis-SP até Santos-SP: rodoviária <i>versus</i> rodo-ferroviária	79
Figura 31 - Comparação entre as emissões de gases de efeito estufa na etapa da logística, da região de Ribeirão Preto-SP até Santos-SP: rodoviária <i>versus</i> rodo-ferroviária	80
Figura 32 - Comparação entre as emissões de gases de efeito estufa na etapa da logística, da região de Jaú-SP até Santos-SP: rodoviária <i>versus</i> rodo-ferroviária.....	80
Figura 33 - Comparação entre as emissões de gases de efeito estufa na etapa da logística, da região de Piracicaba-SP até Santos-SP: rodoviária <i>versus</i> rodo-ferroviária	81
Figura 34 - Comparação entre as emissões de gases de efeito estufa no ciclo de vida do etanol, quando se utilizou óleo diesel, biodiesel B ₂₀ ou biodiesel B ₁₀₀ na etapa do manejo agrícola da cana-de-açúcar e logística rodoviária ou rodo-ferroviária para distribuí-lo das regiões produtoras até o porto de Santos-SP. Análise dentro de um contexto onde houve percentuais de queima do canavial na fase da pré-colheita.....	84
Figura 35 - Árvore de emissões de gases de efeito estufa, dentro de um contexto onde houve percentuais de queima do canavial na fase da pré-colheita	85
Figura 36 - Diferenças percentuais que serão obtidas quando se trocar uma combinação de combustível utilizado no manejo agrícola da cana-de-açúcar e uma opção de logística do etanol por outra combinação, dentro de um contexto onde há percentuais de queima do canavial na fase da pré-colheita	86
Figura 37 - Diferenças percentuais que serão obtidas quando se trocar uma combinação de combustível utilizado no manejo agrícola da cana-de-açúcar e uma opção de logística	

do etanol do “cenário com queima” por outra combinação do “cenário sem queima”, ou seja, dentro de um contexto de transição entre a queima do canavial na fase da pré-colheita e a sua proibição em 2017	87
Figura 38 - Comparação entre as emissões de gases de efeito estufa no ciclo de vida do etanol, quando se utilizar óleo diesel, biodiesel B ₂₀ ou biodiesel B ₁₀₀ na etapa do manejo agrícola da cana-de-açúcar e logística rodoviária ou rodo-ferroviária para distribuí-lo das regiões produtoras até o porto de Santos-SP: uma análise pós-2017, ou seja, quando não haverá queima do canavial na fase da pré-colheita	89
Figura 39 - Árvore de emissões de gases de efeito estufa, dentro de um contexto onde não haverá percentuais de queima do canavial na fase da pré-colheita	90
Figura 40 - Diferenças percentuais que serão obtidas quando se trocar uma combinação de combustível utilizado no manejo agrícola da cana-de-açúcar e uma opção de logística do etanol por outra combinação, dentro de um contexto onde não haverá percentuais de queima do canavial na fase da pré-colheita	91
Figura 41 - Comparação entre as emissões totais de gases de efeito estufa no ciclo de vida do etanol, analisando diferentes logísticas para distribuição do produto: rodoviária <i>versus</i> rodo-ferroviária	93
Figura 42 - Comparação entre as emissões de gases de efeito estufa na etapa da logística do etanol, quando se analisou o potencial e a factibilidade do Rio Tietê para escoar o produto da região de Araçatuba-SP até Santos-SP	94

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 - Balanço energético das biomassas	2
Tabela 2 - Referências macroeconômicas	2
Tabela 3 - Potencial de aquecimento global.....	8
Tabela 4 - Identificação de lacunas na literatura referente ao assunto de emissões de gases de efeito estufa em cadeias agroindustriais	18
Tabela 5 - Comparação entre as metodologias identificadas que quantificam as emissões de gases de efeito estufa	23
Tabela 6 - Produtividade média de cana-de-açúcar por região	71
Tabela 7 - Insumos utilizados do manejo agrícola da cana-de-açúcar.....	71
Tabela 8 - Distância média considerada para se movimentar a matéria-prima da lavoura até a usina	74
Tabela 9 - Insumos químicos utilizados no processo industrial do etanol.....	75
Tabela 10 - Distâncias utilizadas na etapa da logística do etanol.....	77
Tabela 11 - Comparação entre as emissões de gases de efeito estufa na etapa da logística do etanol: modal exclusivamente rodoviário <i>versus</i> combinação intermodal rodod-ferroviária	78
Tabela 12 - Quadro-resumo das emissões de gases de efeito estufa no ciclo de vida do etanol, em um contexto com queima prévia do canavial	96
Tabela 13 - Quadro-resumo das emissões de gases de efeito estufa no ciclo de vida do etanol, em um contexto onde não haverá queima prévia do canavial.....	100
Tabela 14 - Quadro-resumo das emissões totais de gases de efeito estufa no ciclo de vida do etanol.....	102
Tabela 15 - Fatores de emissão referentes à etapa do manejo agrícola	119
Tabela 16 - Fatores de emissão referentes ao processo industrial	119

LISTA DE ABREVIACES

ABNT	Associa Brasileira de Normas Técnicas
ACV	Avalia de Ciclo de Vida
ANEEL	Agência Nacional de Energia Elétrica
ANP	Agência Nacional do Petróleo, Gás Natural e Biocombustíveis
ANFAVEA	Associa Nacional dos Fabricantes de Veículos Automotores
ANDA	Associa Nacional para Difus de Adubos
BNDES	Banco Nacional de Desenvolvimento Econmico e Social
CEPEA	Centro de Estudos Avançados em Economia Aplicada
CETESB	Companhia de Tecnologia e Saneamento Ambiental do Estado de São Paulo
DOE	<i>United States Department of Energy</i>
FIESP	Federa das Indústrias do Estado de São Paulo
GHG	Greenhouse Gas Protocol
GREET	<i>Greenhouse Gases, Regulated Emissions, and Energy Use in Transportation</i>
GWP	<i>Global Warming Potential</i>
IAC	Instituto Agronômico de Campinas
IBGE	Instituto Brasileiro de Geografia e Estatstica
IEA	Instituto de Economia Agrícola
IPEA	Instituto de Pesquisa Econmica Aplicada
IPCC	<i>Intergovernmental Panel on Climate Change</i>
ISO	<i>International Organization for Standardization</i>
MCT	Ministério da Ciência e Tecnologia
RFA	<i>Renewable Fuels Agency</i>
RTFO	<i>Renewable Transport Fuel Obligation</i>
UNICA	Un da Indústria de Cana-De-Aar
WBSCD	<i>World Business Council for Sustainable Development</i>
WRI	<i>World Resources Institute</i>

SUMÁRIO

1. INTRODUÇÃO.....	1
1.1. IMPORTÂNCIA DO SETOR SUCROALCOOLEIRO PARA O BRASIL	1
1.2. OBJETIVOS	3
1.3. LIMITAÇÕES DO TRABALHO	4
1.4. ORGANIZAÇÃO DA DISSERTAÇÃO	5
2. REVISÃO DE LITERATURA	7
2.1. A EMISSÃO DE GASES DE EFEITO ESTUFA	7
2.1.1. POTENCIAL DE AQUECIMENTO GLOBAL	8
2.1.2. FATORES DE EMISSÕES	9
2.2. ESTUDOS SOBRE EMISSÕES DE GASES DE EFEITO ESTUFA NO CICLO DE VIDA DE CADEIAS AGROINDUSTRIAIS	9
2.3. NORMA NBR ISO 14040 PARA A AVALIAÇÃO DO CICLO DE VIDA	18
2.3.1. FASES DE UM ESTUDO DE AVALIAÇÃO DE CICLO DE VIDA	19
2.3.1.1. DEFINIÇÃO DE OBJETIVO E ESCOPO	19
2.3.1.2. ANÁLISE DE INVENTÁRIO DE CICLO DE VIDA (ICV).....	20
2.3.1.3. AVALIAÇÃO DE IMPACTOS DO CICLO DE VIDA (AICV)	20
2.3.1.4. INTERPRETAÇÃO DO CICLO DE VIDA.....	20
2.4. METODOLOGIAS PARA QUANTIFICAR AS EMISSÕES DE GASES DE EFEITO ESTUFA NO CICLO DE VIDA DE BIOCOMBUSTÍVEIS	21
2.5. A CADEIA AGROINDUSTRIAL DO ETANOL.....	23
2.5.1. FLUXOGRAMA DA CADEIA AGROINDUSTRIAL DO ETANOL	23
2.5.2. PRODUÇÃO DE MUDAS	25
2.5.3. PREPARO DO SOLO	26
2.5.4. PLANTIO MANUAL DA CANA-DE-AÇÚCAR.....	29
2.5.5. PLANTIO MECANIZADO DA CANA-DE-AÇÚCAR.....	30
2.5.6. TRATOS CULTURAIS DO CANAVIAL	32

2.5.7.	COLHEITA MANUAL DA CANA-DE-AÇÚCAR	35
2.5.8.	COLHEITA MECANIZADA DA CANA-DE-AÇÚCAR	38
2.5.9.	CHEGADA DA CANA-DE-AÇÚCAR NA USINA	39
2.5.10.	PROCESSO INDUSTRIAL DE FABRICAÇÃO DO ETANOL	41
2.5.11.	DISTRIBUIÇÃO DO ETANOL ATÉ UMA BASE PRIMÁRIA DE ARMAZENAMENTO	42
2.5.12.	UTILIZAÇÃO DO ETANOL PELO CONSUMIDOR FINAL	43
2.5.13.	COGERAÇÃO DE ENERGIA ELÉTRICA.....	44
2.5.14.	FERTIRRIGAÇÃO COM VINHAÇA	45
3.	PROBLEMA DA PESQUISA E A ESTRUTURA METODOLÓGICA.....	49
3.1.	PRINCÍPIOS DA NORMA ABNT NBR ISO 14040 QUE RESPALDAM A ESTRUTURA METODOLÓGICA.....	50
3.1.1.	DEFINIÇÃO DE OBJETIVO E ESCOPO	50
3.1.2.	DEFINIÇÃO DO ESCOPO	51
3.2.	APLICAÇÃO DO MÓDULO DA METODOLOGIA RTFO VOLTADO PARA O ETANOL DE CANA-DE-AÇÚCAR.....	55
3.2.1.	EMISSIONES DE GASES DE EFEITO ESTUFA NO ESCOPO DA PRODUÇÃO AGRÍCOLA	56
3.2.1.1.	CÁLCULO DAS EMISSIONES ORIUNDAS DO MANEJO AGRÍCOLA DA CANA-DE-AÇÚCAR.....	56
3.2.1.2.	CÁLCULO DAS EMISSIONES ORIUNDAS DO TRANSPORTE DA MATÉRIA-PRIMA DA LAVOURA ATÉ A USINA	60
3.2.2.	EMISSIONES DE GASES DE EFEITO ESTUFA NO ESCOPO DA PRODUÇÃO INDUSTRIAL	62
3.2.2.1.	CÁLCULO DAS EMISSIONES ORIUNDAS DO BENEFICIAMENTO INDUSTRIAL DE ETANOL.....	62
3.2.2.2.	CÁLCULO DAS EMISSIONES ORIUNDAS DA COGERAÇÃO DE ENERGIA ELÉTRICA.....	63

3.2.3. EMISSÕES DE GASES DE EFEITO ESTUFA NO ESCOPO DA LOGÍSTICA DO ETANOL ATÉ UMA BASE PRIMÁRIA DE ARMAZENAMENTO.....	64
3.2.3.1. CÁLCULO DAS EMISSÕES ORIUNDAS DA LOGÍSTICA DO ETANOL ENTRE UMA REGIÃO PRODUTORA E UM LOCAL DE ARMAZENAMENTO NO BRASIL.....	64
3.2.3.1.1. USO DE INTERMODALIDADE DE TRANSPORTE NA LOGÍSTICA DO ETANOL DA USINA ATÉ UMA BASE PRIMÁRIA DE ARMAZENAMENTO	66
3.2.3.2. CÁLCULO DAS EMISSÕES ORIUNDAS DA LOGÍSTICA DO ETANOL ENTRE UMA BASE PRIMÁRIA DE ARMAZENAMENTO LOCALIZADA EM UM PORTO BRASILEIRO E UM PAÍS DEMANDANTE	67
4. CASO DE APLICAÇÃO, RESULTADOS E ANÁLISE DE SENSIBILIDADE	69
4.1. APRESENTAÇÃO DO ESTUDO DE CASO	69
4.2. EMISSÕES DE GASES DE EFEITO ESTUFA NA ETAPA DO MANEJO AGRÍCOLA DA CANA-DE-AÇÚCAR	70
4.2.1. CONTRIBUIÇÕES RELATIVAS ÀS EMISSÕES DE GASES DE EFEITO ESTUFA NA ETAPA DO MANEJO AGRÍCOLA DA CANA-DE-AÇÚCAR.....	73
4.3. EMISSÕES DE GASES DE EFEITO ESTUFA NA ETAPA DO TRANSPORTE DA MATÉRIA-PRIMA	73
4.4. EMISSÕES DE GASES DE EFEITO ESTUFA NA ETAPA DA PRODUÇÃO INDUSTRIAL DO ETANOL	75
4.5. EMISSÕES DE GASES DE EFEITO ESTUFA NA ETAPA DA COGERAÇÃO DE ELETRICIDADE	76
4.6. EMISSÕES DE GASES DE EFEITO ESTUFA NA ETAPA DA LOGÍSTICA DO ETANOL ATÉ UMA BASE PRIMÁRIA DE ARMAZENAMENTO.....	77
4.7. ANÁLISES DE SENSIBILIDADE	81
4.8. UTILIZAÇÃO DE BIODIESEL NA ETAPA DO MANEJO AGRÍCOLA DA CANA-DE-AÇÚCAR.....	82

4.9. EXTINÇÃO DA QUEIMA DO CANAVIAL NA FASE DA PRÉ-COLHEITA.....	86
4.10. USO DE INTERMODALIDADE NA ETAPA DA LOGÍSTICA DE DISTRIBUIÇÃO DO ETANOL ATÉ UMA BASE PRIMÁRIA DE ARMAZENAMENTO.....	92
4.11. USO DO RIO TIETÊ COMO OPÇÃO DE INTERMODALIDADE NA ETAPA DA LOGÍSTICA DO ETANOL.....	93
5. CONCLUSÕES E RECOMENDAÇÕES PARA FUTUROS ESTUDOS	96
5.1. SUGESTÕES PARA FUTUROS TRABALHOS	102
6. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	104
ANEXO A.....	119
APÊNDICE A	120
APÊNDICE B.....	125
APÊNDICE C	127

1. INTRODUÇÃO

Na atual conjuntura, uma das preocupações mais latentes da sociedade reside sobre questões relacionadas à sustentabilidade do planeta. Olivette (2005) apontou que essa temática pode ser segmentada em cinco diferentes grupos: social, econômico, ecológico, espacial e cultural.

No presente trabalho, o interesse repousa sobre a sustentabilidade ecológica, também chamada de ambiental. Dentro desse panorama, os pesquisadores têm dado significativa atenção a assuntos relacionados ao aquecimento global.

De acordo com Cerri e Cerri (2007), esse fenômeno é natural e acontece quando a energia solar atinge a superfície terrestre. Ao ser refletida, com um comprimento de onda muito mais longo, ela interage com os gases na atmosfera. Parte dessa radiação é absorvida, aumentando a temperatura do ar. Sem isso, a temperatura do planeta seria de, aproximadamente, -18°C , o que impossibilitaria a existência da maioria dos seres vivos.

Entretanto, Cerri e Cerri (2007) explicaram que a concentração desses gases está aumentando desde o começo da civilização humana, ou seja, de maneira antrópica. Quando o homem começou a utilizar recursos naturais, tais como carvão e petróleo e iniciou o processo de desmatamento das áreas florestadas, fez com que a quantidade de gases, principalmente o CO_2 , aumentasse exponencialmente. Isso propiciou o aumento da temperatura do ar atmosférico.

De acordo com Morais *et al.* (2010), os biocombustíveis, em especial o etanol, são uma das propostas para se tentar mitigar as emissões de gases de efeito estufa. Essa fonte de energia é chamada de renovável porque durante o crescimento da planta que origina a biomassa, no processo de fotossíntese, são absorvidas consideráveis quantidades de CO_2 .

1.1. Importância do setor sucroalcooleiro para o Brasil

De acordo com Macedo (2007), pode ser observado na Tabela 1 que o etanol brasileiro fabricado com cana-de-açúcar apresenta vantagens interessantes em relação às outras biomassas, principalmente sob a ótica do balanço energético: para cada unidade de

energia fóssil investida na produção de etanol com cana-de-açúcar, há um retorno de 8,9 unidades de energia renovável.

No entanto, Seabra (2008) afirmou que, com o advento da tecnologia que hoje é considerada promissora e o final da queima do canavial na fase da pré-colheita, esse resultado poderá ser incrementado em, aproximadamente, 60% no ano de 2020, ou seja, indo de 8,9 para 14,2.

Tabela 1 - Balanço energético das biomassas

Biomassa	Localidade	Energia renovável / energia fóssil investida
Cana-de-açúcar	Brasil	8,9
Sorgo sacarino	África	4,0
Beterraba	Alemanha	2,0
Trigo	Europa	2,0
Milho	Estados Unidos	1,3
Mandioca	Tailândia	1,0

Fonte: Macedo, 2007.

Conforme Pires e Schechtman (2010), o Brasil, produzindo etanol a partir de cana-de-açúcar, tem liderado esse segmento da economia. Isso se deve ao fato do país possuir dimensões continentais, grande extensão de terras aráveis e tecnologia que vem sendo desenvolvida desde a década de 1970.

A análise da Tabela 2 permite verificar o aumento das participações da produção de etanol na economia brasileira. A receita oriunda do etanol representou em 2009 0,75% do Produto Interno Bruto (PIB) brasileiro. De 2004 até 2009 foi observada uma taxa média de crescimento geométrica na ordem de 3,68% ao ano. A participação do etanol dentro das estatísticas do PIB do agronegócio também é animadora, pois do período de 2004 a 2009, a taxa de média anual de crescimento foi de 13,60%.

Tabela 2 - Referências macroeconômicas

	2004	2005	2006	2007	2008	2009
A) PIB brasileiro	2.629	2.744	2.976	3.181	3.258	3.363
B) PIB do Agronegócio brasileiro	953	858	847	870	836	776
C) Receita da produção de etanol no BR	13	16	20	17	20	25

Fonte: (CEPEA, 2010), (IBGE, 2010) e (IPEA, 2010)

1.2. Objetivos

Esta dissertação objetiva analisar o impacto relativo que os seguintes tópicos têm nas emissões de gases de efeito estufa no ciclo do etanol:

1. Localização da produção de cana-de-açúcar;
2. Utilização de diferentes combustíveis na etapa do manejo agrícola da cana-de-açúcar: óleo diesel, biocombustível B₂₀ e B₁₀₀;
3. Extinção da prática da queima do canavial na fase da pré-colheita;
4. Utilização de uma logística intermodal para distribuir o etanol até uma base primária de armazenamento.

É importante frisar que, no “cenário base”, as máquinas utilizadas no manejo agrícola da cana-de-açúcar são abastecidas com óleo diesel, existem percentuais de áreas que são colhidas com auxílio da queima prévia do canavial e a logística do etanol até uma base primária de armazenamento é realizada exclusivamente pelo modal rodoviário. Sendo assim, em relação ao “cenário base” foram realizadas análises de sensibilidade referentes aos tópicos 2, 3 e 4.

Para isso será utilizado o módulo da metodologia *Renewable Transport Fuel Obligation* (RTFO), proposta pela *Renewable Fuels Agency* (RFA, 2008), relativo à produção de etanol com cana-de-açúcar. Esta metodologia está respaldada por princípios de Avaliação do Ciclo de Vida da Norma ABNT NBR ISO 14040. Assim sendo, serão obtidos os parâmetros de emissões de gases de efeito estufa das etapas do ciclo de vida do etanol consideradas nessa dissertação. Cabe salientar que neste trabalho não será abordado nenhum aspecto relacionado a custos de produção ou de transporte.

Este arcabouço teórico será utilizado para calcular as emissões de gases de efeito estufa em cinco diferentes regiões produtoras de etanol localizadas no Estado de São Paulo. A escolha dessas localizações ocorreu em função da disponibilidade de dados; distância e opções de intermodalidade em relação ao porto de Santos-SP; e da maturidade da atividade canavieira na região.

As regiões analisadas são Araçatuba-SP (fronteira produtora recente); Assis-SP (intermediária); Ribeirão Preto-SP (intermediária); Jaú-SP (recente); e Piracicaba-SP

(antiga). O transporte do etanol pode ser realizado por intermédio das possíveis combinações entre os modais rodoviário, ferroviário e hidroviário.

1.3. Limitações do trabalho

Ometto (2005) considerou que o ciclo de vida do etanol pode ser didaticamente separado em seis etapas: (A) manejo agrícola da cana-de-açúcar; (B) transporte da matéria-prima da lavoura até a usina; (C) processo de fabricação do etanol; (D) cogeração de energia elétrica por intermédio da queima da palha e do bagaço da cana-de-açúcar; (E) transporte do etanol produzido na usina até uma base primária de armazenamento; e (F) utilização como combustível em autoveículos equipados com tecnologia *flexfuel* ou similar.

Entretanto, devido à disponibilidade de dados, as emissões de gases de efeito estufa nas etapas A, B e E serão quantificadas direta e individualmente para cada uma das regiões produtoras analisadas.

Já para nas etapas C e D os valores serão assumidos como constantes, ou seja, independentemente da região onde esse biocombustível é produzido, o valor será o mesmo. Cabe ressaltar que essas duas etapas têm um peso relativamente baixo nas emissões do ciclo de vida do etanol.

Além disso, não será calculado o volume de gases de efeito estufa emitido na etapa F (utilização do etanol). Adotou-se essa premissa em função de as emissões provenientes desta etapa serem intrínsecas às especificidades de consumo e potência de cada autoveículo. Tudo isso pode ser observado na Figura 1.

Figura 1 - Etapas do ciclo de vida do etanol: (A) manejo agrícola da cana-de-açúcar; (B) transporte da matéria-prima; (C) fabricação do etanol; (D) cogeração de energia elétrica; (E) transporte do etanol até uma unidade de armazenamento; (F) utilização em autoveículos. Não serão calculadas as emissões de gases de efeito estufa na etapa F

Fonte: Elaboração própria, 2011.

1.4. Organização da dissertação

Esta dissertação está organizada da seguinte maneira:

- **Capítulo 1 - Introdução:** Apresenta uma visão geral sobre o assunto, a importância do tema, os objetivos do trabalho, suas limitações e a sua organização.
- **Capítulo 2 - Revisão de literatura:** Apresenta o que foi encontrado sobre emissões de gases de efeito estufa em cadeias agroindustriais, a escolha da metodologia para o cálculo de emissões e as etapas do ciclo de vida do etanol.
- **Capítulo 3 - Problema da pesquisa e a estrutura metodológica:** Apresenta o arcabouço teórico desta dissertação, ou seja, os princípios da Norma NBR ISO

14040 que respaldam o uso do módulo da metodologia *Renewable Transport Fuel Obligation* (RTFO), indicado para o cálculo de emissões de gases de efeito estufa no ciclo de vida do etanol produzido com cana-de-açúcar.

- **Capítulo 4 - Caso de aplicação, resultados e análise de sensibilidade:** Apresenta o estudo de caso e os volumes de gases de efeito estufa emitidos em cada uma das etapas consideradas. Ademais, mostra como uma mudança em algumas das hipóteses interferiria na quantidade emitida no ciclo de vida do etanol.
- **Capítulo 5 - Conclusões e recomendações para trabalhos futuros:** Além de apresentar e consolidar o aprendizado propiciado pelo estudo, essa seção sugeri algumas ideias que não foram consideradas no escopo dessa dissertação, mas que podem ser incorporadas em trabalhos futuros.

2. REVISÃO DE LITERATURA

Este capítulo apresenta a revisão de literatura nacional e internacional sobre emissões de gases de efeito estufa em cadeias agroindustriais, em especial na do etanol oriundo de cana-de-açúcar brasileira. Além da descrição das etapas presentes nesse ciclo de vida, serão explicados os princípios relevantes da Norma ANBT NBR ISO 14040, pois dela são adotados alguns conceitos para a escolha da metodologia utilizada para mensurar os parâmetros de emissões de gases de efeito estufa apresentados neste estudo.

2.1. A emissão de gases de efeito estufa

De acordo com o Ministério da Ciência e Tecnologia (MCT, 2002), os principais gases do efeito estufa são:

- Dióxido de carbono (CO_2);
- Clorofluorcarbonos (CFC);
- Hexafluoreto de enxofre (SF_6);
- Hidrofluorcarbonos (HFC);
- Metano (CH_4);
- Óxido nitroso (N_2O);
- Ozônio (O_3);
- Perfluorcarbonos (PFC);
- Vapor d'água (H_2O).

Entretanto, de acordo com Assunção (2002), no que concerne ao ciclo de vida do etanol, apenas o dióxido de carbono (CO_2), o metano (CH_4) e o óxido nitroso (N_2O) precisam ser considerados dentro do contexto da análise de emissões atmosféricas de gases de efeito estufa.

De acordo com Ometto (2005), os gases analisados possuem diferentes potencialidades de aquecimento global. Logo, para facilitar a comparação das emissões de gases de efeito estufa proveniente de cada uma das etapas do ciclo de vida do etanol se faz necessário a criação de um denominador comum, ou seja, o gás carbônico equivalente, também conhecido como CO_{2e} .

2.1.1. Potencial de aquecimento global

Conforme as colocações do *Intergovernmental Panel on Climate Change* (IPCC, 2006), o potencial de aquecimento global, conhecido no idioma inglês por *Global Warming Potential* (GWP), é um índice que foi estipulado como padrão de referência, sendo estabelecido durante a elaboração do Protocolo de *Kyoto*, no ano de 1997, no Japão.

O IPCC é responsável pela divulgação desse índice. Ao serem colocados em uma base comum, torna-se possível somar quantidades de diferentes gases. Ademais, para o dióxido de carbono é atribuído o valor de uma unidade.

Conforme o IPCC (2006), para encontrar o valor de CO_{2e} referente à emissão resultante de alguma atividade, basta multiplicar a quantidade emitida dos gases de efeito estufa em questão pelos seus respectivos potenciais de aquecimento global, ou seja:

$$CO_{2e} = CO_2 + (GWP_{CH_4} * CH_4) + (GWP_{N_2O} * N_2O) \quad (2.1.1.1)$$

Onde:

CO_{2e} = gás carbônico equivalente;

CO_2 = gás carbônico;

GWP_{CH_4} = potencial de aquecimento global do metano;

GWP_{N_2O} = potencial de aquecimento global do óxido nitroso.

Na Tabela 3 podem ser observados os fatores de caracterização de potencial de aquecimento global para os três gases emitidos durante o ciclo de vida do etanol. De acordo com o IPCC (2006), esses índices representam uma medida do impacto que determinado gás possui sobre o forçamento radiativo.

Tabela 3 - Potencial de aquecimento global

Substância	Fórmula química	Fatores de caracterização (g CO_{2e} / g substância)		
		20 anos	100 anos	500 anos
Dióxido de carbono	CO_2	1	1	1
Metano	CH_4	62	23	7
Óxido de nitrogênio	N_2O	275	296	156

Fonte: IPCC (2006)

É válido ressaltar que forçamento radiativo é o aquecimento provocado pelo incremento de uma unidade do gás na concentração da atmosfera (PIMENTEL, 2004). Em geral, conforme mencionado por Borsari (2009), considera-se o fator de caracterização para o potencial de aquecimento global durante o período de 100 anos. Assim sendo, tem-se:

$$CO_{2e} = CO_2 + (23 * CH_4) + (296 * N_2O) \quad (2.1.1.2)$$

2.1.2. Fatores de emissões

Conforme Cunha (2010), fator de emissão é um número que deve ser multiplicado pela quantidade de insumo que foi utilizado para a produção de determinado produto ou em determinada atividade. Em geral, um fator de emissão é fornecido em função de gás carbônico equivalente (CO_{2e}), ou seja, já foi aplicado o potencial de aquecimento global.

2.2. Estudos sobre emissões de gases de efeito estufa no ciclo de vida de cadeias agroindustriais

Assunção (2000) se propôs a discutir as emissões de gases de efeito estufa no ciclo de vida do etanol produzido no Brasil. Neste estudo se adotou como ferramental teórico os princípios do método de Avaliação do Ciclo de Vida, preconizados pela *International Organization for Standardization*. De acordo com esse arcabouço teórico, deve ser realizada uma avaliação completa do ciclo de vida de um produto, ou seja, desde a produção até o descarte, considerando-se os processos e tecnologia em vigor.

Para isso, Assunção (2000) explicou que é necessária realizar a compilação de um inventário com as principais entradas e saídas de todas as etapas do sistema produtivo, tais como plantação, colheita, transporte da matéria-prima até a usina, processo de produção do etanol, transporte e uso final. Então, avalia-se o potencial impacto ambiental associado aos *inputs* e *outputs*.

Entretanto, nos resultados do trabalho de Assunção (2000) não são apresentados os dados do inventário, mas sim uma série de pressuposições e valores referentes às emissões, que foram extraídos de outros trabalhos da literatura. Porém, esse estudo

serve como uma introdução ao assunto de emissões de gases de efeito estufa no ciclo de vida do etanol.

Macedo *et al.* (2004), em um trabalho desenvolvido para a Secretaria do Meio Ambiente do Estado de São Paulo, apresentou um balanço das emissões de gases do efeito estufa na produção e no uso do etanol brasileiro.

O objetivo do trabalho de Macedo *et al.* (2004) foi estudar as emissões de gases de efeito estufa no ciclo de vida da produção e no uso do etanol, nas condições típicas encontradas nas usinas e destilarias brasileiras, constando ainda o cálculo das emissões derivadas do consumo de combustíveis fósseis e das emissões não relacionadas com o uso de energia.

A metodologia do estudo de Macedo *et al.* (2004) foi alicerçada na criação de dois cenários: (1) baseado nas médias de consumo de energia, nos insumos e nos investimentos; e (2) baseado nos melhores valores praticados, ou seja, valores mínimos de consumo, com o uso da melhor tecnologia existente e praticada da região. Quanto aos dados, foram adotados os valores médios de insumos utilizados em 2002. Já os valores referentes ao consumo energético são datados de 1998.

Em termos numéricos, Macedo *et al.* (2004) apresentaram as emissões de gases de efeito estufa segmentadas em dois grupos: (a) em função da utilização de energia fóssil; e (b) devida as outras fontes, tais como queima da palha e decomposição de fertilizantes. Para o primeiro grupo, os valores calculados para os cenários 1 e 2 foram, respectivamente, 17 e 19 kg de CO_{2e}/tonelada métrica de cana-de-açúcar (TC). Já para o segundo grupo, o resultado obtido, para ambos os cenários, foi de 15,3 kg CO_{2e}/TC.

O trabalho de Macedo *et al.* (2004) ainda salientou que as emissões evitadas pela substituição da gasolina pelo etanol e do óleo combustível pelo bagaço excedente, subtraídas dos valores acima mencionados, dão um resultado líquido de 2,6 e 2,7 t de CO_{2e}/m³ de etanol anidro e 1,7 e 1,9 t de CO_{2e}/m³ de etanol hidratado, para os Cenários 1 e 2, respectivamente.

Ometto (2005) contribui para as pesquisas relacionadas ao tema de emissões de gases de efeito estufa no ciclo de vida do etanol por meio de uma tese de doutorado. Nesse trabalho foram utilizados os princípios da estrutura metodológica da série ISO 14.040 e sua correspondente brasileira NBR ISO 14.040, além de três métodos técnico-

científicos adequados aos objetivos: um método convencional e dois baseados na termodinâmica. Cabe ressaltar que os dados primários advieram da região de Ribeirão Preto-SP.

Como objetivos específicos, o trabalho de Ometto (2005) buscou: realizar o inventário do ciclo de vida do etanol; avaliar as categorias de impactos ambientais; valorar insumos, serviços e as emissões em termos energéticos; identificar oportunidades de melhoria ambiental; e comparar as aplicações das avaliações de impactos ambientais.

No estudo de Ometto (2005), o resultado final, referente à emissão de 1.541,32 kg CO_{2e}/t de etanol, é dividido nas seguintes etapas do ciclo de vida: (1) preparo do solo, com 0,14%; (2); cultivo agrícola da cana-de-açúcar, com 1,76%; (3) tratos culturais, com 3,32%; (4) colheita da cana-de-açúcar, com 66,79%; (5) processo industrial do etanol, com 0,00%; (6) geração de vapor e de energia elétrica, com 0,06%; (7) fertirrigação, com 0,47%; (8) distribuição, com 0,03%; e (9) utilização em autoveículos, com 27,43%.

Mosciatti (2008) avaliou a geração e neutralização do gás carbônico no ciclo de vida da cana-de-açúcar de uma usina de produtora de etanol na região do município de Nova Londrina-PR. Neste trabalho foram adotados os princípios da estrutura metodológica da Norma ISO NBR 14040 da ABNT para o estudo do processo produtivo deste biocombustível.

No estudo de Mosciatti (2008), o resultado final referente à emissão bruta de 9.138,47 kg CO_{2e}/t de etanol, foi dividido nas seguintes etapas do ciclo de vida: (1) plantio, com 1,76%; (2); colheita, com 50,93%; (3) produção industrial de etanol, com 26,50%; (4) fertirrigação, com 0,015%; (5) distribuição, com 0,007%; e (6) utilização em autoveículos, com 20,79%.

Entretanto, Mosciatti (2008) considera que as emissões provenientes da colheita (queima da palha), da produção industrial de etanol (fermentação do álcool e queima do bagaço nas caldeiras) e da utilização do produto final com combustível em autoveículos podem ser neutralizadas devido à captura de CO₂ no processo de fotossíntese. Sendo assim, a emissão bruta passa de 9.138,47 para 162,43 kg de CO_{2e}/toneladas de etanol.

Seabra (2008) propôs em sua tese de doutorado uma avaliação técnico-econômica e ambiental de opções para o aproveitamento integral da biomassa oriunda da cana-de-

açúcar brasileira. É importante frisar que este trabalho resultou no artigo internacional escrito por Macedo *et al.* (2008). Cabe ressaltar que os dados foram levantados em cerca de 300 usinas localizadas no Brasil.

Na tese de Seabra (2008) há um balanço de energia e emissões de gases de efeito estufa oriundos da produção e utilização do etanol de cana-de-açúcar, considerando como dados de insumos as médias da safra de 2005/2006 e expectativas para a de 2020.

É válido ressaltar que Seabra (2008) relatou que a extensão em que um biocombustível pode substituir um combustível fóssil depende da maneira pela qual ele é produzido. Nesse sentido, a forma como o manejo agrícola é operacionalizado, o transporte da matéria-prima do campo até a usina e a modalidade de transporte utilizada durante a distribuição do produto têm forte correlação com o volume de emissões.

Seabra (2008) chamou as emissões que foram calculadas com os dados da safra 2005/2006 de cenário atual (base). Já para 2020, as estimativas são divididas em um cenário conservador e alguns agressivos. No primeiro caso foi considerada apenas a atual tecnologia comercialmente disponível. Já no segundo cenário, considerou-se o uso das tecnologias de hidrólise e gaseificação para o aproveitamento energético da biomassa da cana-de-açúcar.

A metodologia de análise de Seabra (2008) considerou os cinco níveis de fluxos de energia para as avaliações dos balanços energético e das emissões de gases de efeito estufa: (1) consumo externo direto de combustíveis e eletricidade; (2) a energia adicional necessária para a produção de insumos e materiais utilizados na agricultura e no processamento da cana-de-açúcar; (3) a energia adicional necessária para a manufatura, construção e manutenção dos equipamentos e edificações; (4) CH₄ e N₂O emitidos devidos a queima da palha da cana-de-açúcar durante a pré-colheita; e (5) N₂O e CO₂ oriundos do solo por causa da aplicação de fertilizantes minerais, calcário e resíduos que são retornados ao campo.

A tese de Seabra (2008) inovou ao realizar uma análise de sensibilidade nos dados amostrados de 35 usinas, para o ano base de 2006. Ficou evidente que os balanços de energia e emissões de gases de efeito estufa na produção de etanol proveniente da cana-de-açúcar podem variar em função da localização da unidade produtora.

Nesse sentido, Seabra (2008) destacou que a média encontrada na amostra para o item relação de energia, ou seja, a energia fóssil (em MJ) demandada para viabilizar a produção de uma tonelada de cana-de-açúcar (tc), foi de 9,4 MJ/tc, variando de 6,8 a 11,2. Já no quesito emissões, a média foi de 269 kg CO_{2e}/m³ de álcool anidro, variando de -60 a 419. Essas variações são explicadas pelos diferentes níveis de produtividade da matéria-prima, consumo de diesel e excedentes de bagaço e eletricidade.

Dentre as principais conclusões de Seabra (2008) destacou-se o fato de que, em relação a gasolina, a produção e o uso de etanol envolve uma emissão líquida evitada na ordem de 119% e 139%, respectivamente, no cenário moderado para 2020 (considerando apenas tecnologias comerciais que já são realidade hoje) e no cenário agressivo (tecnologia BIG/GT-CC, que em português significa geração de energia elétrica a partir da gasificação da biomassa integrada a ciclos combinados).

Soares *et al.* (2009) objetivou: (1) comparar o balanço energético do uso do etanol com a utilização de combustível de energia fóssil; (2) analisar as emissões de outros gases; (3) verificar se há mitigação de gases quando se substitui óleo diesel ou gasolina convencional por etanol; (4) analisar a diferença de emissões entre a colheita da cana-de-açúcar manual e mecanizada; e (5) estudar o impacto nas emissões devido a uma possível expansão da área com cana-de-açúcar para a produção de etanol. Cabe ressaltar que os dados utilizados são secundários e representam médias brasileiras.

O trabalho de Soares *et al.* (2009) novamente mostrou que a atividade de colheita da cana-de-açúcar é a responsável pela maior parcela do volume de emissões de gases de efeito estufa, respondendo por, aproximadamente, 46% do total de kg CO_{2e}/ha/ano.

Além disso, Soares *et al.* (2009) demonstrou que a prática de colheita mecanizada da cana-de-açúcar emite, aproximadamente, 80% menos gases de efeito estufa do que quando se colhe com queima prévia do canavial.

Caba ressaltar que nesse cálculo apresentado por Soares *et al.* (2009), na prática de colheita manual foram considerados os seguintes itens: (1) queima do canavial e (2) transporte da matéria-prima. Já para a prática de colheita mecanizada, foram considerados (1) o combustível fóssil utilizado pelas máquinas, (2) os demais gases de efeito estufa embutidos nas colhedeiras, (3) o transporte de cana-de-açúcar e (4) a mineralização dos resíduos.

O'Donnell *et al* (2009) não estudaram o ciclo de vida do etanol brasileiro, mas sim o do trigo norte americano. Entretanto, este trabalho se diferenciou dos demais pela ênfase que foi dada para a diferença do volume de emissões de gases de efeito estufa em função do manejo agrícola de quatro espécies de trigo em diversas regiões e da combinação intermodal de transporte utilizada pela cadeia de abastecimento para movimentar o produto plantado nos Estados Unidos da América e consumido no Japão.

A metodologia do estudo de O'Donnell *et al* (2009) foi alicerçada na elaboração de uma Análise de Ciclo de Vida individual para cada espécie de trigo cultivado nos seus três principais Estados produtores, incluindo a utilização de produtos químicos, consumo de energia e distâncias de transportes. A unidade de referência utilizada foi a de 1 kg de trigo seco em ponto de uso colocada no porto de Yokohama, no Japão.

A notabilidade do trabalho de O'Donnell *et al* (2009) está no fato da atenção que foi dada as características intrínsecas de cada região. Em outras palavras, cada localidade tem a sua própria dependência por aplicações de produtos químicos, tais como fertilizantes e pesticidas; assim com diferentes distâncias e opções de modalidade de transporte para se chegar à cidade norte americana de Portland, em Oregon, onde a produção de trigo é concentrada para posteriormente ser escoada por via marítima até Yokohama.

Os resultados apresentados por O'Donnell *et al* (2009) são bastante interessantes e colaboraram para as pesquisas sobre emissões de gases de efeito estufa em cadeias de produtos agrícolas. Indiretamente, o trabalho inspirou esta dissertação, porém, visando o ciclo de vida do etanol produzido no Estado de São Paulo e escoado pelo porto localizado na cidade Santos-SP.

O'Donnell *et al* (2009) verificaram que a variação intra-espécies, ou seja, comparando as emissões da mesma espécie em regiões diferentes, pode resultar em uma diferença de emissões de gases de efeito estufa na ordem de 101%. Isso significa que as características do solo de cada localidade são preponderantes. A variação inter-espécies de trigo, ou seja, emissões de diferentes espécies plantadas na mesma região, foi de 62%. Por fim, as possíveis opções de intermodalidade de transporte dentro do território norte americano proporcionaram uma variação de 39% a 56% nas emissões.

Silva (2009) comparou os balanços energéticos, ou seja, a razão entre a energia contida no biocombustível fabricado e a energia necessária para o seu processo de produção, e o de emissões de gases de efeito estufa no ciclo de vida do etanol combustível derivado do milho, do trigo e da cana-de-açúcar.

Sendo assim, Silva (2009) objetivou apontar qual alternativa, dentre essas diferentes fontes de matéria-prima para produção de biocombustível, apresenta maior vantagem ambiental e energética.

Para isso, as análises completas do ciclo de vida para produzir biocombustível a partir dessas três fontes abrangeram os sistemas de: (1) cultivo da matéria-prima; (2) transporte da matéria-prima até a unidade de beneficiamento industrial; (3) produção do biocombustível; (4) distribuição; (5) armazenamento; (6) distribuição até o posto de combustível; (7) e uso final por autoveículos.

De acordo com o trabalho de Silva (2009), as emissões de gases de efeito estufa dependem de quatro fatores: da produtividade agrícola; da ocupação de áreas nas quais a produção de biomassa é uma atividade adicional; da ocupação de áreas nas quais a produção de biomassa substitui atividades agrícolas; e da ocupação de áreas causando desflorestamento.

O estudo de Silva (2009) apontou que o uso de fertilizante tem grande influência no balanço de emissões de gases de efeito estufa. Considerando os valores médios de nitrogênio, fósforo e potássio utilizados para o cultivo dessas três biomassas, a cana-de-açúcar demanda, em média, respectivamente, 94,65% e 87,45% menos fertilizante do que o milho e o trigo. Isso porque no cultivo de cana-de-açúcar há fertirrigação com vinhaça e torta de filtro, resíduos provenientes do processo industrial.

Além disso, com base nas reflexões de Silva (2009), a utilização de óleo diesel no transporte da biomassa do campo até a usina também resulta em emissões de gases do efeito estufa. Nesse contexto, os principais fatores elencados pelo estudo para diferenciar as emissões entre as biomassas são: distâncias entre as plantações e as unidades de beneficiamento industrial, eficiência energética dos caminhões e condições das estradas.

Sumarizando, o estudo elaborado por Silva (2009) inovou por apresentar resultados que comparam as emissões de gases de efeito no ciclo de vida de três biomassas com o da

gasolina. Sendo assim, quando se opta por utilizar etanol proveniente de milho, trigo ou cana-de-açúcar, no lugar da gasolina, as emissões evitadas, em termos de g CO_{2e}/MJ são, respectivamente, 35,4%, 33,8% e 79,78%.

Rossetto (2010) analisou os impactos da atividade canavieira sobre os pontos de vista: (1) do uso do solo; (2) qualidade do ar atmosférico atrelado às emissões de gases de efeito estufa; (3) uso de água e contaminação do lençol freático; (4) uso de defensivos agrícolas; e questões sociais. Em suma, a autora afirmou que o fator de maior impacto ambiental está correlacionado ao fato da atividade ser considerada de monocultivo.

No que concernem as emissões de gases de efeito estufa, o trabalho de Rossetto (2010) evidenciou a fotossíntese como a principal responsável pela mitigação e balanço positivo das emissões. Estimativas apontam que esse processo fisiológico realizado pelos vegetais clorofilados retira 15 toneladas de CO₂ da atmosfera para cada hectare de cana-de-açúcar cultivado.

Garcia e Sperling (2010) objetivaram avaliar as emissões de gases de efeito estufa no ciclo de vida do etanol durante os procedimentos que acontecem nas etapas da agricultura e da industrialização em destilarias localizadas no Estado de Minas Gerais.

Para isso, os autores desenvolveram uma metodologia utilizando princípios da Avaliação do Ciclo de Vida e recomendações dos fatores de emissões que são preconizados pelo IPCC. Foi considerada a emissão total em CO_{2e}/ha/ano dos gases CO₂, CH₄ e N₂O, pois são os mais importantes de origem antropogênica em sistemas relacionados com a agricultura.

No estudo de Garcia e Sperling (2010), o resultado final, referente à emissão de 1.539,60 kg CO_{2e}/ha/ano, é dividido nas seguintes categorias: (1) consumo de combustível, com 21,9%; (2) consumo de cal e fertilizante, com 19,38%; (3) consumo de defensivos agrícolas, com 1,97%; (4) queima do canavial/palhão, com 28,21%; (5) N₂O liberado no solo, com 21,23%; (6) produção de mudas, com 4,73%; (7) produtos químicos utilizados na etapa industrial, com 2,27%. Cabe ressaltar que, na etapa (7), não são consideradas as emissões devidas ao uso de combustível, pois a energia elétrica utilizada é gerada pela queima do bagaço da cana-de-açúcar.

As discrepâncias entre os valores de gases de efeito estufa emitidos no ciclo de vida do etanol, que são encontradas em alguns dos estudos supracitados, acontecem,

principalmente, devido às hipóteses adotadas e os diferentes cenários tecnológicos considerados. Por exemplo, para calcular as emissões na etapa industrial, Mosciatti (2008) considerou a soma dos gases provenientes da fermentação do etanol e da queima do bagaço nas caldeiras, dentre outros. Já Garcia e Sperling (2010) quantificaram apenas as emissões relacionadas ao consumo de insumos químicos demandados pelo processo de beneficiamento da cana-de-açúcar.

Portanto, após o detalhamento do que foi encontrado na literatura nacional e internacional referente ao assunto de emissões de gases de efeito estufa no ciclo de vida de cadeias agroindustriais, a Tabela 4 justifica a realização desta dissertação por intermédio da tentativa de explorar as lacunas que foram identificadas. As justificativas dos critérios adotados são:

- **Avaliação do Ciclo de Vida:** se o trabalho analisa todas as etapas do ciclo de vida do produto;
- **Utilização de Normas da ABNT:** se o trabalho utiliza alguma norma preconizada pela ABNT ou alguma correlata internacional, como o caso das normas da ISO;
- **Modelo de emissões:** se o estudo considera algum modelo específico para calcular as emissões de gases de efeito estufa;
- **Parâmetros de emissões:** se o estudo apresenta parâmetros de emissões, independentemente se foi calculado no trabalho ou é uma citação de outros trabalhos encontrados na literatura;
- **Estudo realizado no Brasil:** se o estudo em questão foi realizado para uma biomassa produzida no território brasileiro;
- **Biomassa cana-de-açúcar:** se o estudo foi elaborado considerando a cana-de-açúcar como matéria-prima para a produção do etanol;
- **Estudo para diferentes regiões:** se o trabalho compara as emissões de gases de efeito estufa entre regiões, ao invés de apresentar uma média regional ou nacional;
- **Utilização de transporte intermodal na distribuição:** se o trabalho considera as possíveis combinações intermodais de transporte utilizadas na logística necessária para distribuir o etanol até uma base primária de armazenamento.

Tabela 4 - Identificação de lacunas na literatura referente ao assunto de emissões de gases de efeito estufa em cadeias agroindustriais

	Assunção (2000)	Macedo (2004)	Ometto (2005)	Mosciatti (2008)	Seabra (2008)	Soares (2009)	O'Donnell (2009)	Silva (2009)	Rossetto (2010)	Garcia (2010)
Avaliação do Ciclo de Vida		X	X	X	X	X		X		
Utilização de Normas da ABNT/ISO	X		X	X		X	X			X
Modelo de emissões		X	X			X	X			X
Parâmetros de emissões	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X
Estudo realizado no Brasil	X	X	X	X	X	X		X	X	X
Biomassa cana-de-açúcar	X	X	X	X	X	X		X	X	X
Estudo para diferentes regiões							X			
Utilização de transporte intermodal na distribuição							X			

Fonte: Elaboração própria, 2011.

Sendo assim, conforme a Tabela 4, pode-se salientar que esta dissertação está colaborando com a literatura ao abordar o tema de emissões de gases de efeito estufa no ciclo de vida do etanol preenchendo, concomitantemente, as seguintes lacunas: análise em função das diferenças intrínsecas das regiões produtoras de cana-de-açúcar no Brasil e a utilização de transporte intermodal para realização da logística de distribuição do etanol até uma base primária de armazenamento.

2.3. Norma NBR ISO 14040 para a Avaliação do Ciclo de Vida

A Associação Brasileira de Normas Técnicas (ABNT, 2009), por intermédio da norma técnica brasileira conhecida por ABNT NBR ISO 14040, elucida quais são os princípios e a estrutura necessária para a realização de trabalhos de Gestão Ambiental e Avaliação do Ciclo de Vida (AVC) de um produto.

É válido ressaltar que a ABNT NBR ISO 14040 foi elaborada no Comitê Brasileiro de Gestão Ambiental (ABNT/CB-38), pela Comissão de Estudos de Avaliação do Ciclo de Vida (CE-38:005.01). Entretanto, essa Norma é uma adoção idêntica, em conteúdo técnico, estrutura e redação, à ISO 14040:2006, que foi elaborada pelo *Technical Committee Environmental Management (ISO/TC 207), Subcommittee Life Cycle Assessment (SC 5)*, conforme ISO/IEC Guide 21-1:2005.

2.3.1. Fases de um estudo de Avaliação de Ciclo de Vida

De acordo com a ABNT (2009), um estudo de Avaliação de Ciclo de Vida é composto por quatro fases:

2.3.1.1. Definição de objetivo e escopo

De acordo com a ABNT (2009), no objetivo de um estudo de avaliação do ciclo de vida deve estar evidente qual é a aplicação pretendida, as razões para a execução do trabalho, o público alvo ao qual se deseja comunicar os resultados e se há a intenção de utilizá-los em afirmações comparativas a serem divulgadas publicamente.

É válido ressaltar a conveniência de o escopo estar suficientemente bem definido. Assim, assegura-se que a abrangência, a profundidade e o detalhamento do estudo sejam compatíveis e suficientes para atender os objetivos declarados.

A ABNT (2009) destaca os seguintes itens como pertencentes ao escopo de uma avaliação do ciclo de vida de um produto:

- O sistema de produto a ser estudado;
- As funções do sistema de produto, ou no caso de estudos comparativos, dos sistemas;
- A unidade funcional;
- A fronteira do sistema;
- Os procedimentos de alocação;
- As categorias de impacto selecionadas e metodologia para avaliação de impactos bem como a interpretação subsequente a ser utilizada;
- Os requisitos de dados;

- Os pressupostos;
- As limitações;

Sendo assim, sumariamente, o presente trabalho objetiva analisar o impacto relativo que os seguintes tópicos têm nas emissões de gases de efeito estufa: localização da produção de cana-de-açúcar; utilização de diferentes combustíveis na etapa do manejo agrícola da cana-de-açúcar; extinção da prática de queimar o canavial na fase da pré-colheita; e utilização de uma logística intermodal para distribuir o etanol até uma base primária de armazenamento. Cabe ressaltar que a unidade funcional será apresentada em kg de CO_{2e}/tonelada de etanol.

2.3.1.2. Análise de inventário de ciclo de vida (ICV)

Conforme ABNT (2009), a análise de inventário do ciclo de vida envolve a coleta de dados e os procedimentos de cálculo que serão utilizados para quantificar as entradas e saídas relevantes de um sistema de produto. Em suma, os dados advêm de especialistas do setor sucroalcooleiro ou da literatura pertinente.

2.3.1.3. Avaliação de impactos do ciclo de vida (AICV)

A partir dos resultados oriundos do inventário, inicia-se a avaliação de impacto do ciclo de vida. Conforme a ABNT (2009), o objetivo desta fase é estudar a significância dos impactos ambientais potenciais. As quantidades de gases de efeito estufa emitidos durante o ciclo de vida do etanol serão calculadas utilizando o módulo da RTFO referente à cana-de-açúcar, com algumas adaptações.

2.3.1.4. Interpretação do ciclo de vida

A ABNT (2009) explicou que, a partir desse momento, as constatações da análise de inventário e da avaliação de impacto são consideradas em conjunto. Sendo assim, é conveniente que, além de os resultados fornecidos terem consistência com o objetivo e o escopo do trabalho, também providencie aos tomadores de decisão as conclusões, as recomendações e as ressalvas quanto às limitações encontradas. Isso pode ser verificado nas conclusões e nas análises de sensibilidade deste trabalho.

Assim sendo, é válido destacar que a utilização de princípios da Norma NBR ISO 14040 é um instrumental interessante, pois auxilia no que diz respeito às análises das etapas do ciclo de vida do etanol que são considerados nesta dissertação.

2.4. Metodologias para quantificar as emissões de gases de efeito estufa no ciclo de vida de biocombustíveis

Buscou-se na literatura metodologias que fossem capazes de quantificar as emissões de gases de efeito estufa lançados na atmosfera durante o ciclo de vida do etanol brasileiro fabricado para exportação.

De acordo com o *United States Department of Energy* (DOE, 2007), o governo norte americano desenvolveu o *software* GREET, que significa “*Greenhouse gases, Regulated Emissions, and Energy use in Transportation*”. De acordo com Ribeiro (2010), essa metodologia permite ao usuário a avaliação de diferentes combinações de motores e combustíveis. Conforme Ide (2011), ela está demasiadamente atrelada à matriz energética da Califórnia, EUA.

A *Renewable Fuels Agency* (RFA) é uma agência governamental britânica responsável por estabelecer as diretrizes para que o Reino Unido se alinhe ao escopo da lei da União Européia concernente a energia.

De acordo com Lannes & Hoffmann (2008), uma das medidas adotadas pela RFA foi criar uma normativa que obriga todos os fornecedores de combustíveis destinados a veículos de transporte terrestre britânicos a garantirem que em seus produtos haja um percentual de biocombustíveis. A meta é que esse índice atinja 5% até 2014. Entretanto, cabe frisar, que, na prática, esse objetivo é alcançado misturando-se o combustível de origem fóssil à biocombustíveis dos mais diversos tipos, tais como bioetanol, metanol, biodiesel e o biogás.

Como a maioria dos países europeus, o Reino Unido se depara com obstáculos à produção de biocombustíveis em grande escala, tais como a escassez de área agricultável para expansão e de condições climáticas que inviabilizam o cultivo de cana-de-açúcar e oleaginosas de ciclo perene. Sendo assim, a solução que a maioria das indústrias britânicas encontrou para cumprir esta normativa foi importar biocombustíveis de outros países, principalmente o Brasil.

Entretanto, de acordo com as ideias de Lannes & Hoffmann (2008), a normativa RTFO é rígida no que concerne a importação de biocombustíveis. Por isso, não são aceitos aqueles provenientes de países que têm uma fonte de origem desconhecida, ou seja, sem rastreabilidade.

Então, conforme a UNICA (2010), a agência RFA lançou em 2005 a metodologia RTFO (*Renewable Transport Fuel Obligation*). Esta calcula as emissões de gases de efeito estufa nas principais etapas das cadeias agroindustriais que podem fornecer matéria-prima para a produção de biocombustíveis.

Garcia e Sperling (2010) desenvolveram, no âmbito das destilarias localizadas no Estado brasileiro de Minas Gerais, uma metodologia para estimar as emissões de gases de efeito estufa nas etapas agrícola e de industrialização da cana-de-açúcar para produção de etanol.

De acordo com *The Greenhouse Gas Protocol Initiative* (GHG, 2009), em 2008 o *World Resources Institute* (WRI), em parceria com o *World Business Council for Sustainable Development* (WBSCD), desenvolveram o *GHG Protocol*. Essa ferramenta é comumente usada para elaboração de inventários empresariais sobre emissões de gases de efeito estufa.

Portanto, pode ser observada na Tabela 5 uma comparação entre as metodologias para quantificação dos gases emitidos no ciclo de vida de biocombustíveis, de acordo com os seguintes critérios:

- **Princípios de Avaliação do Ciclo de Vida preconizados pela ABNT ou ISO:** está embasada em princípios de alguma dessas Normas;
- **Fatores de emissões confiáveis:** são fornecidos e preconizados pelo IPCC;
- **Abrangência:** aborda as principais etapas do ciclo de vida;
- **Flexibilidade:** permite o cálculo de emissões nas etapas do ciclo de vida de maneira segmentada, ou seja, não apresenta apenas um valor final, mas sim um número para todas as etapas;
- **Etanol:** serve para quantificar as emissões no ciclo de vida etanol produzido com a cana-de-açúcar brasileira.

Tabela 5 - Comparação entre as metodologias identificadas que quantificam as emissões de gases de efeito estufa

Critérios	Metodologia			
	RTFO	GREET	GARCIA	GHG
Incorpora princípios de ACV	X		X	
Utiliza fatores de emissões confiáveis	X	X	X	X
Abrangência	X	X	X	
Flexibilidade	X			
Etanol com cana-de-açúcar do Brasil	X		X	

Fonte: Elaboração própria, 2011.

Portanto, considerando os critérios supracitados, optou-se por utilizar a metodologia RTFO. Ademais, conforme destaca Ide (2011), na atual conjuntura, esta metodologia vem sendo utilizada por grandes empresas brasileiras que intencionam exportar biocombustíveis, principalmente etanol, para países localizados na União Européia e Ásia.

2.5. A cadeia agroindustrial do etanol

2.5.1. Fluxograma da cadeia agroindustrial do etanol

De acordo com Ometto (2005), neste item estão, genericamente, descritas as etapas que compõem os escopos agrícola, industrial e de distribuição do etanol até uma base primária de armazenamento, presentes durante o ciclo de vida do etanol:

- A etapa agrícola:
 - É iniciada com a preparação das mudas de cana-de-açúcar;
 - Paralela ou posteriormente ao apresto das mudas, acontece o preparo do solo;
 - Em seguida sucede-se o plantio das mudas da planta cana-de-açúcar. Isso pode ser realizado tanto de forma manual quanto mecanizada;
 - Então a lavoura recebe os tratos culturais necessários para manutenção e crescimento da planta;
 - Por fim, a colheita pode ser realizada manual ou mecanicamente.
 - Após a realização do corte, a cana-de-açúcar é transportada até a usina beneficiadora.

- A etapa industrial:
 - Na etapa industrial é onde propriamente acontece a transformação da cana-de-açúcar em etanol;
 - Além disso, em função da queima do bagaço e da palha da cana-de-açúcar em caldeiras, há o processo de cogeração de energia elétrica.
- A etapa de distribuição:
 - É quando o etanol é transportado até uma base primária de armazenamento.
- A etapa de utilização:
 - O consumidor final pode utilizar o etanol como combustível, principalmente, em autoveículos equipados com motor *flexfuel*.

Objetivando facilitar a compreensão do que foi exposto anteriormente, a Figura 2 apresenta um diagrama com as principais etapas que são observadas no ciclo de vida da cadeia agroindustrial do etanol.

Cabe frisar que, como expôs Ometto (2005), o ciclo de vida do etanol pode ser didaticamente separado em seis etapas: (A) manejo agrícola da cana-de-açúcar; (B) transporte da matéria-prima da lavoura até a usina; (C) processo de fabricação do etanol; (D) cogeração de energia elétrica por intermédio da queima da palha e do bagaço da cana-de-açúcar; (E) transporte do etanol produzido na usina até uma unidade de armazenamento; e (F) utilização como combustível em autoveículos equipados com tecnologia *flexfuel* ou similar.

Figura 2 - Diagrama simplificado da cadeia agroindústria do etanol

Fonte: Elaboração própria, 2011

2.5.2. Produção de mudas

Ide (2011) destaca que o sucesso nesta etapa significa o início do processo que possibilitará ao genótipo da cana-de-açúcar expressar todo o seu potencial biológico em um ciclo produtivo que geralmente gira em torno de pelo menos cinco anos. Algumas imagens desse processo estão ilustradas na Figura 3.

Figura 3 - Algumas das etapas presentes na produção de mudas

Fonte: Elaboração própria, 2011

2.5.3. Preparo do solo

De acordo com o Instituto Agrônômico de Campinas (IAC, 1994), admitindo-se que a área destinada para o cultivo da cana-de-açúcar já esteja desmatada, o preparo do solo é precedido pelas seguintes operações:

- Limpeza do terreno;
- Nivelamento da área;
- Análises laboratoriais da terra;
- Aragem do solo;
- Gradagem do solo.

Na limpeza do terreno, conforme Roseiro (2002), geralmente é utilizada a técnica de queima da vegetação, com a finalidade de retirar os restos da cultura e também para o controle fitossanitário de pragas que aparecem em lavouras de monoculturas.

Novo (2004) atentou para o fato de que a prática de nivelamento do solo, além de diminuir a declividade do terreno e ajudar a erradicar os buracos, também contribuirá para a minimização da probabilidade de quebra do maquinário utilizado.

Por intermédio das análises laboratoriais do solo, como salientou Segovia (2004), é possível conhecer as deficiências nutricionais e as características físico-químicas do solo, facilitando a realização das eventuais correções necessárias.

Geralmente, durante os procedimentos de análise laboratorial das características físico-químicas do solo, são identificados indesejáveis índices de acidez. De acordo com Deon (2010) e Costa (2010), o pH adequado para o cultivo da cana-de-açúcar varia entre 5,6 e 6,2, pois, dentro deste intervalo de variação, a disponibilidade de nutrientes é máxima. Para chegar a esse valor, é necessário saber os resultados das amostras do solo em uma camada de zero a vinte centímetros de profundidade.

De acordo com a Associação Nacional para Difusão de Adubos (ANDÁ, 1991), para a correção do solo, é realizado um procedimento conhecido como calagem. Dentre os produtos economicamente viáveis para correção da acidez está o calcário. Este deve ser aplicado o mais uniformemente possível sobre o terreno, sendo que a época mais indicada para sua aplicação varia desde o último corte da cana-soca até a reforma do canavial. Com base nas afirmações de Costa (2005), a soqueira é o local de onde a cana-de-açúcar brota após o primeiro corte, por isso o nome cana-soca.

Após a calagem, de acordo com Silva-Olaya (2010), a terra é arada com o objetivo de diminuir a robustez do solo, facilitando a circulação da água e do ar e a penetração das raízes, além de destruir as soqueiras de cana-de-açúcar ou da cultura que estava plantada anteriormente no local.

Por fim, antes do plantio do novo canavial é realizada a gradagem. Conforme Castilho (2010), essa prática é adotada com o objetivo de romper blocos de terra, incorporar os restos vegetais em decomposição, uniformizar o terreno e eliminar ervas rebrotadas.

Ometto (2005) explicou que todas essas atividades de preparo do solo para o cultivo da cana-de-açúcar, elencadas anteriormente, são realizadas apenas para o cultivo da cana-planta. Em média, a renovação do canavial ocorre, aproximadamente, de seis em seis anos. Entre esse período, acontece o aproveitamento da rebrota da soqueira da cana-de-açúcar.

Na Figura 4 estão ilustradas algumas das fases explicadas no processo de preparo do solo para o cultivo da cana-planta. Foi dado destaque para a aplicação de calcário e aração da terra.

Figura 4 - Algumas das etapas presentes na fase de preparo do solo

Fonte: Elaboração própria, 2011

2.5.4. Plantio manual da cana-de-açúcar

De acordo com Ripoli *et al.*(2007), a expressão plantio manual da cana-de-açúcar é erroneamente utilizada. Porém, é largamente difundida. Conforme as reflexões desse autor, o correto é chamá-lo de semimecanizado ou convencional, pois neste caso o plantio é composto por um conjunto de atividades realizadas manual e mecanicamente.

As atividades mecanizadas são realizadas por implementos agrícolas, geralmente tratores. Em suma, essas operações envolvem as etapas de sulcação, cobertura do sulco e aplicação de defensivos e fertilizantes. De acordo com Ometto (2005), sulco é um canal com, no máximo, trinta centímetros de profundidade, no qual a muda de cana-de-açúcar é depositada. Conforme Janini (2007), sulcação é a ação de abrir na terra os sulcos onde são introduzidas as mudas da planta, e é realizada por tratores pesados.

Conforme Staduto (2002), as atividades manuais são executadas pelos trabalhadores rurais, que, popularmente, são chamados no Brasil de “bóias-frias” ou “trabalhadores volantes”. Estes ficam responsáveis por, manualmente, distribuir as mudas de cana-de-açúcar, fracioná-las e alinhá-las nos sulcos.

De acordo com Fernandes (1984), em condições favoráveis de temperatura e umidade, quando a muda de cana-de-açúcar entra em contato com o solo, ela irá brotar por intermédio das gemas, que estão localizadas nos nós dos colmos. Garcia (2008) define que o colmo é cilíndrico, ereto, fibroso e está dividido em nós e entrenós. Dos nós, partem as folhas e é onde se encontram as gemas. Nos entrenós, no período de maturação, fica armazenada a sacarose.

Na Figura 5 estão ilustradas algumas das fases explicadas no processo de plantio manual da cana-de-açúcar. Foi dado destaque para a chegada dos trabalhadores rurais no campo, algo que acontece no fim da madrugada, a tarefa de depositar as mudas de cana-de-açúcar nos sulcos e a lavoura em crescimento.

Figura 5 - Algumas das etapas presentes na fase de plantio manual da cana-de-açúcar

Fonte: Elaboração própria, 2011

2.5.5. Plantio mecanizado da cana-de-açúcar

De acordo com Janini (2007), todas as operações envolvidas no sistema de produção agrícola da cana-de-açúcar podem ser mecanizadas. Entretanto, a opção de mecanizar o plantio se tornou disponível há poucos anos.

Cebim (2007) salientou que o aumento do percentual de utilização de maquinário para o cultivo tem muito a contribuir, pois, dentre outros aspectos, a máquina tem a habilidade de propiciar uma melhor densidade ao canavial e espaçamento entre os sulcos.

Pauli (2009) afirmou que o plantio mecanizado é muito parecido com o semimecanizado. Entretanto, as tarefas são executadas por intermédio de plantadeiras. A única mão-de-obra utilizada é a do operador que dirige a máquina.

Janini (2007) destacou que a mecanização do plantio vem se tornando justificada, dentre outros motivos, pela busca em minimizar os custos operacionais na produção agrícola e o significativo aumento das áreas cultivadas com cana-de-açúcar.

Em um estudo conduzido por Garcia (2008), na unidade Costa Pinto da empresa COSAN S/A, ficou comprovado que, em termos de custos operacionais efetivos, a utilização do plantio mecanizado, em detrimento ao semimecanizado, propiciou uma redução de 44% nos custos por hectare.

Na Figura 6 estão ilustradas algumas das fases explicadas no processo de plantio mecanizado da cana-de-açúcar. Foi dado destaque ao transbordo de cana picada para a máquina plantadeira, a tarefa de depositá-las nos sulcos, que foram abertos pela própria máquina instantes antes e a lavoura em crescimento.

Figura 6 - Algumas das etapas presentes na fase de plantio mecanizado da cana-de-açúcar

Fonte: Hansen (2011)

2.5.6. Tratos culturais do canavial

Após o plantio das mudas de cana-de-açúcar, que pode ser realizado manual ou mecanicamente, iniciam-se os tratos culturais no canavial. Com base nas afirmações do Banco Nacional de Desenvolvimento Econômico e Social (BNDES, 2008), o ciclo completo da cana-de-açúcar é de, geralmente, seis anos, onde ocorrem cinco cortes, sendo quatro cortes da cana-soca e uma reforma do canavial. Logo, efetivamente, são as soqueiras que recebem os tratos culturais.

Corbini (1987) explicou que tratamentos culturais é o nome que se dá ao conjunto de práticas agrícolas onde são aplicados agrotóxicos e fertilizantes, com as seguintes finalidades:

- Preservar ou restaurar as propriedades físico-químicas do solo;
- Eliminar ou reduzir a concorrência de plantas invasoras;
- Conservar o sistema de controle de erosão;
- Controlar pragas ou doenças, eventualmente.

De acordo com a Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária (EMBRAPA, 2011), a preservação ou restauração das propriedades físico-químicas do solo onde a cana-de-açúcar é cultivada pode ocorrer por intermédio da adubação química ou orgânica, além de outras práticas, tais como a rotação de cultura.

Rossetto *et al.* (2010) exemplificaram como a adubação pode amenizar a queda de produtividade ao longo do ciclo da cana-de-açúcar. Diante das condições do experimento realizado, verificou-se que a produtividade ao final da terceira soqueira, em relação à realizada no corte da cana-planta, foi 45% menor. Com a adubação, esse percentual de redução caiu para 26%. Isso representou um ganho de, aproximadamente, 100 toneladas de cana-de-açúcar ao longo do ciclo produtivo considerado, ou seja, durante um período de quatro anos.

De acordo com Rossetto *et al.* (2010), a adubação química ocorre através da aplicação de fertilizantes provenientes da indústria química. Logo, esta prática é um elemento importante na composição dos custos totais de produção da cana-de-açúcar e no volume de gases de efeito estufa emitidos para a atmosfera.

Já a adubação orgânica, conforme a EMBRAPA (2011), ocorre devido à aplicação de detritos resultantes do processo industrial necessário para a produção de açúcar e etanol. Dentre os principais resíduos estão a torta de filtro e a vinhaça.

Firme (2005) explicou que a torta de filtro origina-se a partir do processo de clarificação do açúcar. Sua composição é uma mistura de bagaço de cana-de-açúcar finamente moído com uma borra formada por compostos orgânicos e inorgânicos que foram insolubilizados. De acordo com Fialho (2007), a produção de torta de filtro varia de 35 a 45 kg por tonelada de cana-de-açúcar.

Lelis Neto (2008) apontou que a vinhaça é originária da destilação do caldo fermentado da cana-de-açúcar, quanto se produz etanol. Ferreira (2009) afirmou que para cada litro produzido de etanol são gerados de dez a dezoito litros de vinhaça.

Conforme a pesquisa de Coleti (2010), a eliminação ou redução de plantas invasoras e o controle de pragas e doenças são fundamentais, já que isso evita a concorrência com a cultura da cana-de-açúcar. Assim sendo, defensivos agrícolas, também chamados de herbicidas, são aplicados na lavoura.

Além de complexa, é muito importante a conservação do sistema de controle da erosão em áreas rurais. De acordo com Casagrande (2005), o uso e o manejo inadequado do solo fazem com que o processo de erosão seja acelerado e intensificado. O plantio direto é uma das principais formas de minimização do processo de erosão do solo. De acordo com Lino (2010), o sistema de plantio direto é verificado quando acontece a manutenção de resíduos culturais, ou seja, é deixada sobre o solo a palha do último corte da cana-soca para o novo plantio da cana-planta.

Na Figura 7 estão ilustradas algumas das fases explicadas no processo de tratos culturais da cana-de-açúcar. Foi dado destaque para a fertilização com adubo orgânico (torta de filtro) e químico e a aplicação de herbicida na lavoura.

Figura 7 - Algumas das etapas presentes na fase de tratos culturais do canavial

Fonte: UNICA, 2011

2.5.7. Colheita manual da cana-de-açúcar

Conforme Scarpari (2002), após a etapa de plantio são necessários de 14 a 18 meses para que aconteça a primeira colheita da cana-planta. Já para a cana-soca, são necessários 12 meses.

De acordo com Campos (2003), a colheita manual de cana-de-açúcar é realizada com auxílio da queima prévia do canavial. Essa prática facilita o corte, pois permite que o trabalhador rural entre no canavial. Além disso, também ajuda espantar animais peçonhentos, como cobras.

Barbosa (2011) comenta que o corte manual é realizado com um facão, golpeado na região próxima ao início da soqueira. Então os feixes de cana-de-açúcar são amontoados

no chão. Em seguida, a máquina carregadora, que utiliza garras mecânicas, coloca a matéria-prima sobre a carroceria do caminhão que realizará o transporte até a usina.

Os trabalhadores envolvidos nesse processo podem sofrer de exaustão. Alves (2006) estudou o cotidiano de um profissional que corta, manualmente, doze toneladas de cana-de-açúcar por dia. Em média, foi constatado que um trabalhador volante, aproximadamente:

- Anda 9 km;
- Despende 133.000 golpes de facão;
- Carrega manualmente as 12 toneladas cortadas de cana-de-açúcar, em montes de 15 kg;
- Faz 37.000 flexões e entorses torácicas para golpear a planta;
- Perde 8 litros de água.

De acordo com a UNICA (2011), doze toneladas de cana-de-açúcar seriam suficientes para produzir, em média, 1.020 litros de etanol. Em 2010, considerando os dados disponibilizados pela Agência Nacional do Petróleo, Gás Natural e Biocombustíveis (ANP, 2011), o preço médio do etanol ofertado ao consumidor final no Estado de São Paulo foi R\$ 1,52. Logo, conclui-se que, com essa quantidade de cana-de-açúcar, foi originada uma receita na ordem R\$ 1.550,40 no final da cadeia agroindustrial, dos quais o trabalhador rural recebeu apenas R\$ 31,77, conforme os cálculos do Instituto de Economia Agrícola (IEA, 2010).

É importante frisar que, com o advento da tecnologia das máquinas, o corte manual da cana-de-açúcar vem perdendo espaço no Brasil. Janini (2007) acrescentou que isso se deve ao fato de o corte mecânico propiciar significativa diminuição dos custos operacionais, da demanda por mão-de-obra e dos problemas ambientais. Dentre esses problemas, merecem destaque a diminuição do lançamento de gases do efeito estufa na atmosfera, de substâncias nocivas à saúde e da fuligem.

Desde 2003, no Estado de São Paulo, a Lei N° 11.241, que dispõe sobre a queima da palha da cana-de-açúcar, foi regulamentada pelo decreto N° 47.700. No artigo 2°, consta que a eliminação da queima será gradativa e que o prazo máximo é o ano de 2031.

Entretanto, segunda a União da Indústria de cana-de-açúcar (UNICA, 2011), em 2007 foi criado o “Protocolo Agroambiental no Setor Sucroalcooleiro”. Mesmo sendo de adesão não-obrigatória, já foi adotado por quase todos os agentes envolvidos no setor. As diretrizes preveem a eliminação da queima em áreas mecanizáveis até 2014 e em áreas não-mecanizáveis até 2017.

Na Figura 8 estão ilustradas algumas das fases explicadas no corte manual da cana-de-açúcar. Foi dado destaque para a queima prévia do canavial, corte da planta por um trabalhador rural e carregamento do caminhão com auxílio de uma máquina.

Figura 8 - Algumas das etapas presentes na fase de colheita manual da cana-de-açúcar

Fonte: UNICA, 2011

2.5.8. Colheita mecanizada da cana-de-açúcar

Uma máquina colhedora de cana-de-açúcar tem a vantagem de trabalhar ininterruptamente. Além disso, Coelho (2009) destacou que no sistema de colheita mecanizada a matéria-prima é cortada e carregada sem que haja a necessidade de utilização direta de mão-de-obra.

Prado (2007) explicou que, com o fim das queimadas, além da redução das emissões de gases de efeito estufa, haverá aumento da quantidade de biomassa disponível, proveniente das pontas e palha da cana-de-açúcar, na mesma ordem que a quantidade de bagaço hoje disponível. Isso ocorrerá mesmo considerando que apenas 50% dessa matéria orgânica seja removida do solo. Cabe ressaltar que a importância de os outros 50% permanecer na lavoura está no fato dela ajudar na fertilização e manutenção das condições bióticas do solo e reduzir o uso de fertilizantes artificiais.

O corte é realizado por colhedoras combinadas automotrizes. Conforme Neves (2003), essas máquinas são capazes de realizar o corte da cana-de-açúcar, o fracionamento dos colmos e a limpeza parcial. Instantaneamente, a matéria-prima picada vai sendo depositada em um recipiente, paralelo a tubulação de descarga da máquina (extrator secundário), que é puxado por um trator. Em seguida acontece o transbordo, de maneira hidráulica, para o caminhão que realizará o transporte até a usina.

Na Figura 9 são ilustradas algumas das fases explicadas no corte mecanizado da cana-de-açúcar. Foi dado destaque para a colheita mecanizada e o transbordo para o caminhão que fará o transporte até a usina.

Figura 9 - Algumas das etapas presentes na fase da colheita mecanizada

Fonte: UNICA, 2011

2.5.9. Chegada da cana-de-açúcar na usina

Após a colheita da cana-de-açúcar, acontece o carregamento do caminhão, e posteriormente a condução da matéria-prima até uma unidade industrial. Logo, pode-se dizer que o ponto de origem é a lavoura e o destino final é a usina. Esse processo é comumente conhecido como Corte, Carregamento e Transporte (CCT), conforme explicado por Mundim (2009).

Sampaio (2010) destacou que, devido à sua flexibilidade para alcançar o maior número de pontos no espaço, velocidade e significativa capacidade de carga, o veículo adotado para o traslado da cana-de-açúcar, da lavoura até a usina, é o caminhão. Rodrigues (2006) ressalta que esse veículo se apresenta sob a forma de diversas composições,

sendo as mais comuns: caminhão com um reboque (Romeu e Julieta), caminhão com dois reboques (Treminhão) e o cavalo mecânico com dois semi-reboques (Rodotrem).

Albuquerque (2005) explicou que ao ser recepcionado na usina, o caminhão carregado com cana-de-açúcar é submetido à pesagem. Ademais, acontece o processo de amostragem, onde uma sonda retira amostras, aleatoriamente, para que seja verificado o teor de sacarose da matéria-prima recebida. Após o descarregamento e antes de retornar à área de lavoura, o caminhão é pesado novamente. Isso é fundamental não apenas para o cálculo do rendimento industrial e agrícola, mas também para a realização do pagamento pela cana-de-açúcar fornecida por terceiros.

Em seguida, conforme Albuquerque (2005), com o auxílio de guindastes do tipo Hilo mecânico, pontes rolantes, tombador hidráulico para basculamento ou pivotamento lateral da caçamba do caminhão, a cana-de-açúcar é descarregada.

O descarregamento da cana-de-açúcar é realizado diretamente na mesa alimentadora das moendas. Na ocorrência da queima do canavial, a cana-de-açúcar é submetida ao processo de lavagem, para a retirada de impurezas. De acordo com os levantamentos da Federação das Indústrias do Estado de São Paulo (FIESP, 2011), em média, para uma tonelada de cana-de-açúcar, se utiliza oito metros cúbicos de água durante o processo de lavagem.

Na Figura 10 estão ilustradas algumas das fases explicadas no processo de recepção da cana-de-açúcar em uma usina beneficiadora, tanto de açúcar quanto de etanol. Foi dado destaque para a pesagem inicial do caminhão, o processo de sondagem, o descarregamento e a lavagem da matéria-prima para a retirada de impurezas.

Figura 10 - Algumas das etapas presentes na fase de chegada da cana-de-açúcar na usina

Fonte: União dos Produtores de Bioenergia (UDOP, 2011)

2.5.10. Processo industrial de fabricação do etanol

Adotou-se a hipótese de que para as usinas instaladas nas regiões estudadas nessa dissertação as emissões de gases de efeito estufa são idênticas para essa etapa. O volume emitido foi calculado, mas considerou-se uma média, independentemente da localização das plantas industriais. Entretanto, o processo de fabricação de etanol está detalhado no apêndice A. A Figura 11 ilustra algumas das etapas que compõem o processo, tais como a extração e o tratamento do caldo da cana-de-açúcar.

Figura 11 - Algumas das etapas presentes na fase do processo industrial

Fonte: União dos Produtores de Bioenergia (UDOP, 2011)

2.5.11. Distribuição do etanol até uma base primária de armazenamento

Na Figura 12 estão ilustrados os três principais modais utilizados para distribuir o etanol fabricado nas usinas e destilarias brasileiras até uma base primária de armazenamento. Foi dado destaque para os modais rodoviário, ferroviário e hidroviário, onde o produto é, respectivamente, movimentado em tanques de caminhões, vagões-tanques dos trens e tanques sobre as barcaças. Apesar de não ter sido considerado nesta dissertação, cabe salientar que o transporte de etanol pelo modal dutoviário pode se tornar proeminente no Brasil.

Figura 12 - Alguns dos modais de transporte utilizados para distribuir o etanol da usina até uma base primária de armazenamento

Fonte: UNICA, 2011

2.5.12. Utilização do etanol pelo consumidor final

Conforme pode ser observado na Figura 13, o etanol chega aos postos de combustíveis por intermédio de caminhões-tanque. A adoção do modal rodoviário para atender o consumidor final fica evidente pela facilidade que este possui em alcançar um grande número de pontos no espaço. A Associação Nacional dos Fabricantes de Veículos Automotores (ANFAVEA, 2010) mencionou que o etanol é revendido aos proprietários de autoveículos equipados com tecnologia de motorização a álcool ou *flexfuel*.

Figura 13 - Algumas das etapas presentes na fase de consumo final do etanol

Fonte: UNICA, 2011

2.5.13. Cogeração de energia elétrica

Prado (2007) salientou que ambiental e economicamente é vantajoso queimar o bagaço da cana-de-açúcar para transformar energia térmica em energia elétrica. Porém, adotou-se a hipótese de que para as usinas instaladas nas regiões estudadas nessa dissertação as emissões de gases de efeito estufa são idênticas para essa etapa. O volume emitido foi calculado, mas considerou-se uma média, independentemente da localização das plantas industriais. Entretanto, o processo de cogeração está detalhado no apêndice B. A Figura 14 ilustra algumas das principais etapas, tais como o acúmulo de bagaço no pátio de uma usina, a queima em uma fornalha e um gerador elétrico.

Figura 14 - Algumas das etapas presentes na fase de cogeração de energia elétrica

Fonte: UNICA, 2011

2.5.14. Fertirrigação com vinhaça

De acordo com Oliveira (2010), a vinhaça é o principal resíduo proveniente da indústria sucroenergética. A autora salientou que a vinhaça é a água residual derivada de alguns processos efetuados para a produção de etanol, tais como a fermentação do mosto (líquido açucarado apto a fermentar) e a destilação do vinho.

Wadt (2008) explicou que a quantidade que é gerada de vinhaça depende das condições operacionais e das instalações industriais. Ribas (2006) afirmou que as características da vinhaça estão intrinsecamente relacionadas ao tipo e origem da matéria-prima utilizada na produção de etanol. Voll (2005) expôs que para a obtenção de um litro de etanol, são gerados de dez a dezoito litros de vinhaça.

De acordo com Orlando Filho *et al.* (1983), a vinhaça é, principalmente, composta por alto conteúdo de matéria orgânica; já dentre os elementos minerais presentes, merecem destaque o potássio, cálcio e magnésio; entre os micronutrientes, o ferro apresenta significativas proporções; possui baixo pH e seu aspecto visual é de cor marrom escuro. No estudo de caso conduzido por Oliveira (2010), ficou constatado que a vinhaça sai do processo produtivo com uma temperatura em torno de 90° C. Entretanto, no canal de distribuição essa temperatura chega, aproximadamente, aos 40° C.

Dentre os principais benefícios propiciados pela aplicação da vinhaça às propriedades do solo da lavoura de cana-de-açúcar, Rossetto (1987) e Aguiar Filho (2008) destacaram:

- Fertilizar o solo;
- Elevar o pH do solo.
- Aumentar a disponibilidade de alguns íons;
- Aumentar a capacidade de troca catiônica;
- Promover o aumento da capacidade de retenção de água e o desenvolvimento da microflora e microfauna do solo;
- Melhorar a estrutura física do solo, já que há a adição de matéria orgânica;
- Diminuir a disponibilidade do nitrogênio do solo;

Já dentre os principais malefícios e riscos propiciados pela aplicação da vinhaça na lavoura de cana-de-açúcar, Voll (2005), Viana (2006) e Uyeda (2009) destacaram:

- Riscos de salinidade;
- Atraso na maturação da cana-de-açúcar;
- Redução do teor de sacarose;
- Acúmulo de amido e cinzas no caldo;
- Além do mau cheiro, possibilidade de contaminação do lençol freático e corpos de água.

Conforme Viana (2006), a legislação brasileira versa sobre os procedimentos de tratamento, armazenamento, transporte e aplicação da vinhaça na lavoura de cana-de-açúcar, tanto no âmbito federal quanto no estadual.

No âmbito federal, de acordo com Souza (2010 A), a preocupação com o descarte da vinhaça no meio ambiente já chamava a atenção em 1965, quando a criação do Código Florestal passou a dispor sobre o assunto.

No âmbito estadual, o governo de São Paulo, o principal produtor de cana-de-açúcar do Brasil, demonstrou uma latente preocupação em legislar sobre a vinhaça. Souza (2010 A) destacou que o Decreto N° 8.468 de 1976 e a Lei N° 6.134 de 1988 que, respectivamente, em suma, versaram sobre o controle da poluição e o tratamento de resíduos.

Ademais, a Companhia de Tecnologia de Saneamento Ambiental (CETESB, 2006), ligada à Secretaria do Meio Ambiente do governo paulista, introduziu uma norma técnica objetivando dispor sobre os critérios e procedimentos para a aplicação da vinhaça no solo agrícola.

No que concernem as formas de aplicação da vinhaça na lavoura canavieira, Orlando Filho et al. (1983), Gomes (2003), Voll (2005), Ferreira (2009) e Souza (2010 A) salientaram que os principais sistemas verificados para a sua distribuição são:

- Sistema de aplicação da vinhaça in natura com auxílio da gravidade;
- Sistema de aplicação da vinhaça in natura através de sulcos de infiltração;
- Sistema de aplicação de vinhaça in natura por aspersão com equipamento semifixo;
- Sistema de aplicação de vinhaça in natura por aspersão com caminhão-tanque;
- Sistema de aplicação de vinhaça in natura diluída por intermédio de pivôs centrais.

Na Figura 15 estão ilustrados alguns dos procedimentos necessários para manejar e utilizar a vinhaça na lavoura de cana-de-açúcar. Foi dado destaque especial para o armazenamento do produto em um tanque receptor, um canal por onde esse fertilizante orgânico pode ser movimentado e duas maneiras de aplicá-lo: fertirrigação com caminhões equipados com conjunto moto-bomba e com moto-bomba.

Figura 15 - Algumas das etapas presentes na fase de fertirrigação com vinhaça

Fonte: Elaboração própria, 2011

O capítulo 2 versou a respeito do que foi encontrado na literatura sobre o assunto de emissões de gases de efeito estufa nas principais etapas do ciclo de vida do etanol brasileiro produzido com cana-de-açúcar. Dentre outros aspectos, esta dissertação contribui para o estado da arte, pois estudou o tema considerando a logística intermodal utilizada na fase de distribuição do etanol até uma base primária de distribuição. Além disso, foram detalhadas as etapas de produção deste biocombustível e a Norma da ANBT NBR ISO 14040, que deu respaldo para a escolha da metodologia (RTFO) utilizada para mensurar os parâmetros de emissões apresentados neste estudo.

3. PROBLEMA DA PESQUISA E A ESTRUTURA METODOLÓGICA

Este capítulo descreve a metodologia que foi utilizada para abordar a problemática referente ao cálculo de parâmetros de emissões de gases de efeito estufa no ciclo de vida de cadeias agroindustriais voltadas para a fabricação de biocombustíveis.

Conforme pode ser observado na Figura 16, a estrutura metodológica utilizada nesta dissertação está respaldada por princípios de Avaliação de Ciclo de Vida da Norma da ABNT NBR ISO 14040.

Para calcular os parâmetros de emissões de gases de efeito estufa dentro do escopo da produção agrícola, da produção industrial e da logística foi utilizado o módulo da metodologia RTFO indicado para o etanol oriundo da cana-de-açúcar. Para abordar esse assunto em outras cadeias agroindustriais, basta escolher o módulo da metodologia RTFO conveniente.

Figura 16 - Aplicação da estrutura metodológica

Fonte: Elaboração própria, 2011.

Esta estrutura metodológica é útil para atingir o objetivo de analisar o impacto relativo que os seguintes tópicos têm nas emissões de gases de efeito estufa: localização da produção de cana-de-açúcar; utilização de diferentes combustíveis na etapa do manejo agrícola da cana-de-açúcar; extinção da prática de queimar o canavial na fase da pré-colheita; e utilização de uma logística intermodal para distribuir o etanol até uma base primária de armazenamento.

Sendo assim, esses parâmetros foram calculados para cinco regiões localizadas no Estado de São Paulo. É válido ressaltar que este trabalho considera o ciclo de vida do etanol destinado à exportação. Sendo assim, o porto de Santos-SP foi adotado como o local onde o produto será armazenado, ou seja, a etapa da logística tem uma região paulista produtora de etanol como origem e esta cidade litorânea como destino final.

Genericamente, para se conhecer a quantidade de gases de efeito estufa que seria emitida na etapa da logística do etanol até o país demandante, bastaria saber a distância entre o porto brasileiro que está sendo utilizado como base primária de armazenamento e o país comprador.

Entretanto, cabe ressaltar que a estrutura metodológica apresentada nesta dissertação pode ser utilizada quando se deseja quantificar as emissões de gases de efeito estufa no ciclo de vida do etanol produzido e consumido no mercado interno brasileiro. Para isso seria necessário considerar como ponto de armazenamento a localização da cidade demandante.

3.1. Princípios da Norma ABNT NBR ISO 14040 que respaldam a estrutura metodológica

3.1.1. Definição de objetivo e escopo

De acordo com a ABNT (2009), toda Avaliação do Ciclo de Vida deve ter um objetivo e um escopo bem definidos. Então, é válido ressaltar que esta dissertação objetiva analisar o impacto relativo que os seguintes tópicos têm nas emissões de gases de efeito estufa: localização da produção de cana-de-açúcar; utilização de diferentes combustíveis na etapa do manejo agrícola da cana-de-açúcar; extinção da prática de queimar o

canavial na fase da pré-colheita; e utilização de uma logística intermodal para distribuir o etanol até uma base primária de armazenamento.

3.1.2. Definição do escopo

A seguir são apresentados e detalhados os itens que devem estar presentes no escopo de um estudo de ciclo de vida, de acordo com as exigências da Norma da ABNT NBR ISO 14040:

- O sistema de produto a ser estudado:

Conforme a ABNT (2009), devem ser mencionadas as unidades de processo que compõem o sistema em estudo. Nesta dissertação foram consideradas as seguintes etapas:

- Etapa 1: Manejo agrícola da cana-de-açúcar, que compreende:
 - Preparo do solo;
 - Plantio da cana-de-açúcar;
 - Tratos culturais;
 - Colheita da cana-de-açúcar;
- Etapa 2: Transporte da matéria-prima da lavoura até a usina beneficiadora de etanol.
- Etapa 3: Produção de etanol.
- Etapa 4: Cogeração de energia elétrica;
- Etapa 5: Transporte do etanol produzido na usina até uma base primária de armazenamento localizada no Brasil, considerando opções de intermodalidade.

- As funções do sistema de produto:

Conforme a ABNT (2009), isto explica qual é a utilidade do produto analisado. No Brasil, a função mais conhecida do etanol é a de ser utilizado como combustível em autoveículos equipados com tecnologia *total flex* (ou similar) ou ser adicionado à gasolina. Entretanto, cabe salientar que, por se tratar de um produto destinado ao

mercado externo, outros fins podem ser considerados, tais como o seu uso na forma de insumo para a produção de medicamentos ou cosméticos.

- A unidade funcional:

De acordo com a ABNT (2009), este item diz respeito em relação a qual quantidade de produto as emissões de gases de efeito estufa estão sendo atreladas. No caso nesta dissertação: a uma tonelada de etanol.

- A fronteira do sistema:

Conforme a ABNT (2009), a definição da fronteira do sistema deixa evidente o que está sendo considerado no estudo de ciclo de vida. Nesta dissertação as emissões de gases de efeito estufa estão relacionadas à utilização de insumos químicos agrícolas e industriais. Por exemplo: óleo diesel, fertilizantes, pesticidas e herbicidas, cal virgem (CaO) e óleo lubrificante.

É necessário salientar que, devido ao fato de os locais de compra dos insumos mencionados anteriormente serem muito variados, os resultados desse estudo não levam em consideração as emissões de gases de efeito estufa provenientes do transporte de tais mercadorias até as regiões produtoras de cana-de-açúcar e etanol.

- Categoria de impacto selecionada:

De acordo com a ABNT (2009), este item diz respeito ao impacto dos resultados do estudo. Nesta dissertação, as emissões de gases de efeito estufa impactam o aquecimento global.

- Requisitos de dados:

Conforme a ABNT (2009), tal item diz respeito à origem dos dados. Nesta dissertação eles são de fontes secundárias: (1) extraídos da literatura pertinente e (2) computados e divulgados pela Canaplan¹ (2011).

- Pressupostos

De acordo com a ABNT (2009), este item diz respeito às premissas adotadas na Avaliação de Ciclo de Vida do produto estudado. Para esta dissertação, tem-se:

- É importante frisar que, no “cenário base”, as máquinas utilizadas no manejo agrícola da cana-de-açúcar são abastecidas com óleo diesel, existem percentuais de áreas que são colhidas com auxílio da queima prévia do canavial e a logística do etanol até uma base primária de armazenamento é realizada exclusivamente pelo modal rodoviário.
- Os gases de efeito estufa emitidos durante o processo de fabricação do etanol e na cogeração de energia elétrica foram quantificados no escopo deste estudo e assumidos como constantes em todas as regiões analisadas. É válido ressaltar que a adoção desta premissa é justificada pela baixa participação relativa destas duas etapas nas emissões totais de gases de efeito estufa no ciclo de vida do etanol.
- Os gases de efeito estufa emitidos durante a utilização do etanol em autoveículos equipados com tecnologia *flexfuel*, ou similar, não são quantificados no escopo deste trabalho. Isso se justifica pelo fato de as emissões dependerem diretamente das especificações de consumo e desempenho de cada autoveículo.
- A única maneira de o etanol deixar uma unidade fabril, que esteja localizada em uma das regiões analisadas, é pelo modal rodoviário, mesmo que haja um rio navegável ou uma ferrovia nas proximidades. Isso acontece porque é assumida como premissa que nenhuma usina esteja exatamente ao lado de um ponto de transbordo. Sendo assim, adotou-se como hipótese que um caminhão que esteja transportando

¹ Cedidos pelo consultor independente MSc. Bernardo Yasuhiro Ide

etanol deve percorrer uma distância média de 30 km para alcançar o ponto de transbordo mais próximo.

- O tempo considerado para o ciclo de vida da cana-de-açúcar é de seis anos. Sendo assim, os valores médios dos insumos utilizados e das produtividades da cana-de-açúcar englobam uma média para todo esse período.
- O fator de emissão para o consumo energético no modal ferroviário (0,24 MJ/t*km), adotado da metodologia RTFO, é uma média para a América Latina e não, necessariamente, para a realidade brasileira. Já para o caso do modal aquaviário, fez-se um arranjo de um valor (0,17 MJ/t*km) utilizado nos Estados Unidos da América.
- O metanol é o único insumo emissor de gases de efeito estufa presente no biodiesel B₂₀ ou B₁₀₀, sendo assim, as emissões apontadas dizem respeito apenas à sua queima durante a utilização de um desses dois biocombustíveis, e não ao seu processo de fabricação e transporte.
- Um litro de biodiesel B₂₀ ou B₁₀₀ tem a mesma eficiência energética que um litro de óleo diesel, ou seja, podem ser substituído indiscriminadamente.

- Limitações:

Conforme a ABNT (2009), neste item devem ser apontadas as principais limitações do estudo. Para esta dissertação, tem-se:

- Cabe destacar que nesta dissertação não foram detalhadas as diferenças existentes entre os tipos de manejo agrícola da cana-de-açúcar, que são adotados em cada uma das regiões consideradas no estudo de caso. Entretanto, de certa maneira, indiretamente, isso pode ser observado por intermédio da análise de demanda dos insumos empregados, por exemplo: em uma região onde a prática da queima prévia do canavial é maior, a necessidade por óleo diesel, que é utilizado no abastecimento das máquinas que colhem a matéria-prima, será menor.
- Não foi possível realizar a alocação específica dos insumos utilizados, por exemplo: se é sabido que em uma região utiliza-se, em média, 300

litros de óleo diesel por hectare ao ano, têm-se, assim, a quantidade total consumida, mas não a maneira como ele foi utilizado. Logo, é o total do insumo utilizado que é multiplicado pelo seu respectivo fator de emissão, para obter-se o volume de gases de efeito estufa emitidos.

- As emissões de gases de efeito estufa oriundas da utilização de equipamentos de transbordo não foram quantificadas, mesmo sendo relativamente pequenas, já que as bombas são movidas à eletricidade.
- No que diz respeito à análise sobre a extinção da prática da queima prévia do canavial, cabe ressaltar que não foram consideradas as emissões de gases de efeito estufa provenientes do eventual aumento do consumo de óleo diesel pelas máquinas que podem ser inseridas nas operações de colheita.

3.2. Aplicação do módulo da metodologia RTFO voltado para o etanol de cana-de-açúcar

O módulo da metodologia RTFO utilizado nesta dissertação, desenvolvido pela agência britânica RFA (2008), calcula diretamente as emissões de gases de efeito estufa no ciclo de vida do etanol produzido com cana-de-açúcar.

Cabe salientar que essa metodologia não contempla o cálculo das emissões de gases de efeito estufa provenientes da utilização do etanol como combustível. Isso se justifica, pois o que é emitido depende diretamente das especificações de consumo e desempenho de cada autoveículo.

Nesta dissertação, de maneira genérica, os cálculos são segmentados para os escopos da produção agrícola; produção industrial e logística do etanol até uma base primária de armazenamento. De maneira mais específica, tem-se:

- Produção agrícola: manejo agrícola da cana-de-açúcar e transporte da matéria-prima da lavoura até a usina;
- Produção industrial: beneficiamento industrial da cana-de-açúcar em etanol e cogeração de energia elétrica;

- Logística: deslocamento do etanol até uma localidade de armazenamento.

É válido ressaltar que, quando o etanol é comprado por outro país, precisa-se calcular a quantidade de gases de efeito estufa emitida no deslocamento, em geral, marítimo, do produto. Para isso, basta conhecer a distância entre o porto onde o etanol está sendo armazenado no Brasil e o país demandante.

A metodologia RTFO permite isso, entretanto, no caso desta dissertação, o porto de Santos-SP foi adotado como o destino final da produção paulista voltada para exportação, ou seja, é onde está localizada a base primária de armazenamento.

3.2.1. Emissões de gases de efeito estufa no escopo da produção agrícola

3.2.1.1. Cálculo das emissões oriundas do manejo agrícola da cana-de-açúcar

De acordo com Ide (2011), a Figura 17 elucida os principais fatores que explicam as diferenças, entre as regiões produtoras, do volume emitido de gases de efeito estufa durante a etapa do manejo agrícola da cana-de-açúcar. Conforme pode ser observado, fatores regionais forçam a adoção de um determinado conjunto tecnológico, que está aliado a uma determinada gestão operacional.

Figura 17 - Fatores que explicam as diferenças regionais entre as quantidades de gases de efeito estufa emitidas na etapa do manejo agrícola da cana-de-açúcar

Fonte: Ide (2011)

No módulo referente ao etanol de cana-de-açúcar, as emissões de gases de efeito estufa oriundas do manejo agrícola estão relacionadas a quatro eventos:

- Emissões do solo, devido ao uso de fertilizantes nitrogenados (I);
- Emissões em função dos insumos químicos utilizados no processo agrícola (II);
- Emissões em função da quantidade consumida de óleo diesel (III);
- Emissões em função do percentual da área que é colhida com auxílio da queima prévia do canavial (IV).

Para os três primeiros eventos citados anteriormente, as emissões de gases de efeito estufa estão atreladas à produtividade, ou seja, quantas toneladas de cana-de-açúcar são produzidas em um hectare durante o período de um ano.

Entretanto, para os quatro eventos, o resultado final é exibido em kg CO_{2e} por tonelada de etanol, uma vez que, é preciso considerar a quantidade de cana-de-açúcar necessária para produzir uma tonelada de etanol, assim como a densidade deste combustível.

Nas seguintes equações essa conversão é representada por λ , refletindo a eficiência da usina em converter cana-de-açúcar *in natura* em etanol combustível, que é multiplicado pela densidade deste líquido. Para o módulo RTFO considerado nesta dissertação, λ é assumido como constante e equivale a 0,068;

Sendo assim, as emissões de gases de efeito estufa dos os eventos I, II, III e IV, presentes no manejo agrícola da cana-de-açúcar, obedecem as seguintes expressões matemáticas:

- Evento I:

$$E_I = \frac{Q_n * F_n}{Y} * \lambda \quad (3.2.1)$$

Onde,

E_I = as emissões de gases de efeito estufa correspondentes ao evento I;

Q_n = quantidade consumida de N, em kg/ha/ano, responsável pelas emissões de N₂O do solo;

F_n = fator de emissão de gases de efeito estufa, em kg CO_{2e}/ha, correspondente ao uso de N;

Y = produtividade média da cana-de-açúcar na região analisada;

λ = eficiência da usina em converter cana-de-açúcar *in natura* em etanol combustível, multiplicado pela densidade deste líquido;

- Evento II ou III:

$$E_{II \text{ ou } III} = \frac{Q_i * F_i}{Y} * \lambda \quad (3.2.2)$$

Onde,

$E_{II \text{ ou } III}$ = as emissões de gases de efeito estufa correspondentes ao evento II ou III;

Q_i = quantidade consumida de insumos químicos ou óleo diesel;

F_i = fator de emissão de gases de efeito estufa, correspondente a utilização dos respectivos insumos químicos ou óleo diesel;

Y = produtividade média da cana-de-açúcar na região analisada;

λ = eficiência da usina em converter cana-de-açúcar *in natura* em etanol combustível, multiplicado pela densidade deste líquido;

- Evento IV:

$$E_{IV} = \frac{Q_q * F_q * \mu}{\lambda} \quad (3.2.3)$$

Onde,

E_{IV} = as emissões de gases de efeito estufa correspondentes ao evento IV;

Q_q = quantidade de matéria orgânica que é queimada antes da colheita do canavial. Com base nos estudos de Macedo (2007), considerou-se nessa dissertação o equivalente a 140 kg por tonelada de cana-de-açúcar;

F_q = fator de emissão de gases de efeito estufa correspondente as emissões de N_2O e CH_4 durante na queima do canavial;

μ = percentual de área da região analisada na qual acontece a colheita manual com a queima prévia do canavial;

Y = produtividade média da cana-de-açúcar na região analisada;

λ = eficiência da usina em converter cana-de-açúcar *in natura* em etanol combustível, multiplicado pela densidade deste líquido;

Na Figura 18 pode ser observado o racional dos cálculos que são efetuados para a quantificação das emissões de gases do efeito estufa no ciclo de vida do etanol durante a etapa do manejo agrícola. A análise dimensional das variáveis demonstra a coerência das fórmulas e pode ser conferida no Apêndice C.

Figura 18 - Racional dos cálculos das emissões no manejo agrícola

Fonte: Elaboração própria a partir de RFA (2008)

3.2.1.2. Cálculo das emissões oriundas do transporte da matéria-prima da lavoura até a usina

Para se calcular as emissões de gases de efeito estufa provenientes do transporte da matéria-prima até a usina beneficiadora de etanol, é necessário saber apenas a distância média, medida em km, que um caminhão se locomove para buscar a cana-de-açúcar na lavoura e retornar a unidade fabril.

Na prática, usa-se o dobro do valor referente ao raio médio em torno da usina, onde há o cultivo de cana-de-açúcar, pois como estão sendo consideradas as emissões no ciclo de vida de um produto, também há a necessidade de se considerar a distância percorrida na ida, ou seja, quando o veículo utilizado no transporte vai vazio até a lavoura.

A metodologia RTFO fornece o valor *default*, ou seja, um número que os especialistas da RFA julgaram representar bem a realidade brasileira e adotaram como regra de quanto um caminhão padrão, representado por um veículo típico utilizado para o transporte dessa biomassa, consome de energia ao utilizar combustível fóssil para

transportar uma tonelada de cana-de-açúcar durante o percurso de um km, ou seja, 1,8 MJ/t de cana-de-açúcar/km.

A multiplicação da distância média percorrida (a ida e a volta, ou seja, o dobro do raio) pela energia consumida, resulta em um valor expressado em MJ/t de cana-de-açúcar/km. O fator de emissão é dado em kg de CO_{2e}/MJ, então, quando ele é multiplicado pela energia consumida, tem-se o resultado apresentado em kg de CO_{2e} / t de cana-de-açúcar transportada.

Por fim, levando-se em consideração a eficiência da usina em converter cana-de-açúcar *in natura* em etanol combustível e a densidade desse líquido, tem-se como resposta final a quantidade de quilos de CO_{2e} emitidos devido ao transporte da matéria-prima que é demandada pela usina para a produção de uma tonelada de etanol.

Genericamente, tem-se a seguinte equação:

$$E_c = \frac{2D * \pi * F_{\pi}}{\lambda} \quad (3.2.4)$$

Onde,

E_c = as emissões de gases de efeito estufa durante o transporte de cana-de-açúcar da lavoura até a usina;

D = distância média que se percorre para buscar cana-de-açúcar. Na prática é considerado o dobro do raio ao redor da usina;

π = consumo de energia demandada por um caminhão típico para transportar uma tonelada de cana-de-açúcar pelo percurso de um km;

F_{π} = fator de emissão de gases de efeito estufa para o consumo energético de π ;

λ = eficiência da usina em converter cana-de-açúcar *in natura* em etanol combustível, multiplicado pela densidade deste líquido;

Na Figura 19 pode ser observado o racional dos cálculos que são efetuados para a quantificação das emissões de gases do efeito estufa no ciclo de vida do etanol durante a etapa do transporte de matéria-prima da lavoura até a usina. A análise dimensional das variáveis demonstra a coerência das fórmulas e pode ser conferida no Apêndice C.

Figura 19 - Racional dos cálculos das emissões no transporte da matéria-prima

Fonte: Elaboração própria a partir de RFA (2008)

3.2.2. Emissões de gases de efeito estufa no escopo da produção industrial

3.2.2.1. Cálculo das emissões oriundas do beneficiamento industrial de etanol

Para se calcular as emissões de gases de efeito estufa provenientes da etapa de beneficiamento industrial, onde a cana-de-açúcar *in natura* é transformada em etanol, são consideradas apenas as quantidades de insumos químicos utilizadas durante o processo, assim como os seus respectivos fatores de emissão. O racional dos cálculos pode ser observado na Figura 20.

Figura 20 - Racional dos cálculos das emissões no beneficiamento industrial

Fonte: Elaboração própria a partir de RFA (2008)

3.2.2.2. Cálculo das emissões oriundas da cogeração de energia elétrica

Para se calcular as emissões de gases de efeito estufa provenientes da etapa de cogeração de energia elétrica, é necessário saber a quantidade de bagaço e de palha que estão presentes em uma tonelada de cana-de-açúcar. Além disso, é indispensável saber quantas toneladas de cana-de-açúcar são necessárias para se produzir uma tonelada de etanol. O racional dos cálculos pode ser observado na Figura 21.

Figura 21 - Racional dos cálculos das emissões na cogeração de energia elétrica

Fonte: Elaboração própria, 2011

3.2.3. Emissões de gases de efeito estufa no escopo da logística do etanol até uma base primária de armazenamento

3.2.3.1. Cálculo das emissões oriundas da logística do etanol entre uma região produtora e um local de armazenamento no Brasil

Para se calcular as emissões de gases de efeito estufa provenientes da logística do etanol até uma base primária de armazenamento, é necessário conhecer apenas a distância, medida em km, entre a unidade de produção industrial e a localidade onde o produto será armazenado.

É válido ressaltar que, como estão sendo tratadas as emissões no ciclo de vida de um produto, também há a necessidade de se considerar a distância percorrida na volta, ou seja, quando o veículo utilizado no transporte retorna vazio à usina.

No que diz respeito aos interesses dessa dissertação, a metodologia RTFO fornece o valor *default* de consumo energético para o caso do deslocamento no modal rodoviário brasileiro e ferroviário na América Latina, ou seja, o quanto que, nesses modais, um veículo padrão consome de energia ao utilizar combustível fóssil para transportar uma

tonelada de etanol durante o percurso de um km, ou seja, respectivamente 1,8 e 0,24 MJ/t de etanol/km.

A multiplicação da distância média percorrida (a ida e a volta) pela energia consumida resulta em um valor expressado em MJ/t de etanol/km. O fator de emissão é dado em kg de CO_{2e}/MJ, então, quando ele é multiplicado pela energia consumida, tem-se o resultado apresentado em kg de CO_{2e}/t de etanol transportado.

Genericamente, tem-se a seguinte equação:

$$E_e = 2D * \pi * F_{\pi} \quad (3.2.5)$$

Onde,

E_e = as emissões de gases de efeito estufa no transporte de etanol entre a região produtora e a base primária de armazenamento;

D = distância entre a região analisada e a localidade de armazenamento;

π = consumo de energia demandada por um veículo típico para transportar uma tonelada de cana-de-açúcar pelo percurso de um km;

F_{π} = fator de emissão de gases de efeito estufa para o consumo energético de π ;

Na Figura 22 pode ser observado o racional dos cálculos que são efetuados para a quantificação das emissões de gases do efeito estufa no ciclo de vida do etanol durante a etapa de transporte da usina até uma unidade de armazenamento. A análise dimensional das variáveis demonstra a coerência das fórmulas e pode ser conferida no Apêndice C.

Figura 22 - Racional dos cálculos das emissões na logística do etanol entre a usina e a base primária de armazenamento

Fonte: Elaboração própria a partir de RFA (2008)

3.2.3.1.1. Uso de intermodalidade de transporte na logística do etanol da usina até uma base primária de armazenamento

Com o intuito de elucidar o problema que será estudado, faz-se necessário a criação de um modelo conceitual, ou seja, uma representação esquemática que exemplifique as abstrações que estão sendo feitas a partir do mundo real. Nesse sentido, na Figura 22, tem-se:

- As diferentes regiões produtoras de etanol são os pontos de origem;
- Há um destino comum para todas as origens, que é o porto de Santos-SP;
- Há possibilidade de o etanol chegar ao destino, ou seja, a base primária de armazenamento localizada em Santos-SP, por meio de combinações de três modais de transporte: rodoviário, ferroviário e hidroviário;
- Os nós intermediários são os pontos onde o etanol pode ser transbordado de um modal para outro.

Figura 23 - Representação esquemática da logística intermodal do etanol entre uma usina e uma base primária de armazenamento

Fonte: Elaboração própria, 2011

3.2.3.2. Cálculo das emissões oriundas da logística do etanol entre uma base primária de armazenamento localizada em um porto brasileiro e um país demandante

A logística internacional do etanol, em geral realizada no modal marítimo, não está sendo considerada no ciclo de vida analisado nessa dissertação, pois o ponto final de armazenamento considerado é um porto marítimo brasileiro. Entretanto, para se calcular as emissões de gases de efeito estufa provenientes do transporte de etanol exportado de um porto brasileiro até um porto de um país comprador desse produto, é necessário saber apenas a distância, medida em km, entre esses dois pontos.

É válido ressaltar, que como se trata de emissões no ciclo de vida de um produto, também há a necessidade de se considerar a distância percorrida na volta, ou seja, quando o navio utilizado no transporte retorna vazio ao país de origem.

A metodologia RTFO fornece o valor *default* de consumo energético para esse deslocamento marítimo, ou seja, o quanto que um navio padrão consome de energia ao

utilizar combustível fóssil para transportar uma tonelada de etanol durante o percurso de um km, ou seja, 0,2 MJ/t etanol/km.

A multiplicação da distância média percorrida (a ida e a volta) pela energia consumida resulta em um valor expressado em MJ/t etanol/km. O fator de emissão é dado em kg de CO_{2e}/MJ, então, quando ele é multiplicado pela energia consumida, tem-se em um resultado apresentado em kg de CO_{2e}/t de etanol transportado.

Na Figura 24 pode ser observado o racional dos cálculos que são efetuados para a quantificação das emissões de gases do efeito estufa no ciclo de vida do etanol durante a etapa da logística do etanol entre o Brasil e um país comprador. A análise dimensional das variáveis demonstra a coerência das fórmulas e pode ser conferida no Apêndice C.

Figura 24 - Racional dos cálculos das emissões na logística do etanol de um porto brasileiro até um país demandante

Fonte: Elaboração própria a partir de RFA (2008)

O capítulo 3 versou sobre a estrutura metodológica, que é uma contribuição desta dissertação para a literatura. Tal arcabouço teórico está respaldado por princípios de Avaliação de Ciclo de Vida da Norma da ANBT NBR ISO 14040 e utiliza o módulo da metodologia RTFO indicado para se calcular os parâmetros de emissões de gases de efeito estufa dentro dos escopos da produção agrícola, da produção industrial e da logística do etanol produzido com cana-de-açúcar até uma base primária de armazenamento. Esses parâmetros são apresentados e discutidos no capítulo 4.

4. CASO DE APLICAÇÃO, RESULTADOS E ANÁLISE DE SENSIBILIDADE

Inicialmente, no contexto das premissas adotadas para o “cenário base”, este capítulo apresenta os parâmetros de emissões de gases de efeito estufa nas etapas do (A) manejo agrícola da cana-de-açúcar, (B) transporte da matéria-prima até a usina, (C) produção industrial do etanol, (D) cogeração de energia elétrica e (E) distribuição desse combustível até uma base primária de armazenamento. Os resultados foram calculados com o módulo da metodologia RTFO referente à produção de etanol oriundo da cana-de-açúcar.

É válido ressaltar que, no “cenário base”, as máquinas utilizadas no manejo agrícola da cana-de-açúcar são abastecidas com óleo diesel, existem percentuais de áreas que são colhidas com auxílio da queima prévia do canavial e a logística do etanol até uma base primária de armazenamento é realizada exclusivamente pelo modal rodoviário.

Posteriormente, em relação ao “cenário base”, foram realizadas análises de sensibilidade referentes à minimização das emissões de gases de efeito estufa para os tópicos de (1) utilização de biocombustíveis B₂₀ e B₁₀₀ na etapa do manejo agrícola da cana-de-açúcar; (2) extinção da prática de queimar o canavial na fase da pré-colheita; (3) e utilização de uma logística intermodal para distribuir o etanol até uma base primária de armazenamento.

4.1. Apresentação do estudo de caso

As cinco regiões paulistas que tiveram calculadas as suas respectivas emissões de gases de efeito estufa nas etapas de manejo agrícola, transporte da matéria-prima, produção industrial, cogeração e logística do etanol até uma base primária de armazenamento podem ser visualizadas na Figura 25.

Figura 25 - Regiões analisadas no estudo de caso: comparação relativa das emissões de gases de efeito estufa entre as etapas da produção agrícola da cana-de-açúcar e da logística do etanol

Fonte: Elaboração própria, 2011

Além da maturidade da atividade canavieira de cada região – Araçatuba-SP (fronteira produtora recente); Assis-SP (intermediária); Jaú-SP (recente); Piracicaba-SP (antiga); e Ribeirão Preto-SP (intermediária) – a escolha dessas localidades para comporem o estudo de caso ocorreu em função da disponibilidade de dados e da distância e opções de intermodalidade em relação ao porto localizado na cidade Santos-SP. A logística de distribuição do etanol até uma base primária de armazenamento pode ser realizada por intermédio das possíveis combinações entre o modal rodoviário, o ferroviário e o hidroviário.

4.2. Emissões de gases de efeito estufa na etapa do manejo agrícola da cana-de-açúcar

Os dados referentes às produtividades médias de cana-de-açúcar (em toneladas por hectare ao ano) e ao consumo médio de insumos agrícolas em cada uma das regiões analisadas podem, respectivamente, ser observados na Tabela 6 e na Tabela 7. Os

fatores de emissão de gases de efeito estufa indicados para os insumos químicos utilizados estão no Anexo A.

Tabela 6 - Produtividade média de cana-de-açúcar por região

Região	Corte (em t/ha/ano)					Médio
	1°	2°	3°	4°	5°	
Araçatuba	105	81	71	62	60	74,5
Assis	106	82	72	71	70	74,7
Jaú	112	95	77	70	67	82,9
Piracicaba	106	90	75	69	68	81,6
Ribeirão Preto	118	96	84	74	74	86,8

Fonte: Canaplan (2011)

Tabela 7 - Insumos utilizados do manejo agrícola da cana-de-açúcar

	CaCO ₃	Herbicida	Inseticida	Nitrogênio	Fósforo	Potássio	Diesel
Região	t/ha	kg*/ha	kg*/ha	kg/ha	kg/ha	kg/ha	(l/ha)
Araçatuba	290,0	3,2	0,5	65,0	34,0	42,0	260
Assis	300,0	3,2	0,4	60,0	32,0	52,0	270
Jaú	304,0	2,5	0,4	35,0	25,5	63,0	250
Piracicaba	372,0	3,1	0,6	33,0	26,0	80,0	250
Ribeirão Preto	300,0	2,7	0,4	63,0	29,5	62,5	260

Fonte: Canaplan (2011)

Nota: *kg de princípio ativo

A análise da Figura 26 permite inferir que, no que tange as emissões de gases de efeito estufa na etapa do manejo agrícola da cana-de-açúcar, houve diferença entre as regiões analisadas. Isso aconteceu pelas diferenças intrínsecas ao solo de cada localização, que demandam diferentes quantidades de insumos, e por diferentes políticas de gestão das operações agrícolas.

Sendo assim, as regiões que apresentaram as menores e as maiores emissões de gases de efeito estufa foram, respectivamente, a de Ribeirão Preto-SP e Araçatuba-SP, com 289 e 349 kg CO₂e/t de etanol produzido.

Figura 26 - Emissões de gases de efeito estufa na etapa do manejo agrícola em cada região produtora analisada

Fonte: Elaboração própria, 2011

É válido salientar que o eixo das abscissas está ordenado seguindo o critério da região, rodoviariamente, mais distante da cidade de Santos-SP para a mais próxima e os percentuais de áreas que são colhidas com auxílio da técnica de queimar o canavial durante a fase que antecede a colheita, de acordo com a Canaplan (2011), são: Araçatuba (30%), Assis (25%), Ribeirão Preto (20%), Jaú (30%) e Piracicaba (35%).

4.2.1. Contribuições relativas às emissões de gases de efeito estufa na etapa do manejo agrícola da cana-de-açúcar

A Figura 27 destaca como as emissões de gases de efeito estufa estão divididas, para cada região analisada, entre os insumos demandados na etapa de produção agrícola da cana-de-açúcar. Além disso, é possível observar a parcela das emissões que advêm do solo, devido ao uso de fertilizantes nitrogenados; e o montante concernente à prática da queima do canavial na fase da pré-colheita. É notado também que a utilização de óleo diesel foi o maior responsável, respondendo, em média, por 43% das emissões. Sendo assim, fez-se necessário a análise de sensibilidade apresentada no item 4.8.

Figura 27 - Contribuições relativas às emissões de gases de efeito estufa em função dos eventos presentes na etapa do manejo agrícola da cana-de-açúcar

Fonte: Elaboração própria, 2011

4.3. Emissões de gases de efeito estufa na etapa do transporte da matéria-prima

A Tabela 8 apresenta os dados referentes ao raio médio em torno das usinas localizadas nas regiões estudadas. Esses valores representam às distâncias médias percorridas no modal rodoviário para se transportar a matéria-prima da lavoura até a usina.

Tabela 8 - Distância média considerada para se movimentar a matéria-prima da lavoura até a usina

Região	Distância (km)
Araçatuba	16,5
Assis	17,0
Jaú	16,0
Piracicaba	16,0
Ribeirão Preto	16,5

Fonte: Canaplan (2011)

A análise da Figura 28 permite inferir que, no que tange as emissões na etapa do transporte da matéria-prima da lavoura até a usina, houve uma amplitude de apenas 4,55 kg CO₂e/t de etanol produzido. Isso aconteceu porque o raio médio ao entorno da usina, onde a cana-de-açúcar é cultivada, não é muito diferente entre as regiões analisadas.

Figura 28 - Emissões de gases de efeito estufa na etapa do transporte da matéria-prima, da lavoura até a usina, em cada região produtora analisada

Fonte: Elaboração própria, 2011

4.4. Emissões de gases de efeito estufa na etapa da produção industrial do etanol

De acordo com Souza (2010 B), no processo industrial do etanol de cana-de-açúcar, os principais insumos químicos utilizados são: cal virgem (CaO), antibiótico, ácido fosfórico, dispersante, antiespumante, ácido sulfúrico, bactericida, ciclo-hexano, e óleo lubrificante.

Entretanto, devido à disponibilidade de fatores de intensidade energética e fatores de emissão de gases de efeito estufa, considerou-se apenas: cal virgem (CaO); ácido fosfórico; ácido sulfúrico; e óleo lubrificante. Souza (2010 B) destacou que essa abordagem é significativa, já que, desconsiderando-se os lubrificantes, em massa, apenas a cal virgem e o ácido sulfúrico equivalem a 90% do total de insumos químicos utilizados.

Na presente dissertação foram adotados os valores da Tabela 9, que foram valores encontrados na literatura. Logo, ficou explícita a premissa de que todas as usinas localizadas nas regiões contempladas pelo estudo de caso consomem as mesmas quantidades de insumos químicos para transformarem cana-de-açúcar *in natura* em etanol, ou seja, todas têm a mesma eficiência industrial. Assim sendo, as emissões de gases de efeito estufa provenientes do processo industrial são iguais, independentemente da região analisada.

Ainda deve ser observado que, conforme Ometto (2005), uma tonelada de etanol corresponde a 1.250 litros, sendo obtidos a partir de 15,72 toneladas de cana-de-açúcar. Além disso, de acordo com informações do IPCC (2006), a densidade do etanol é igual a 0,8 kg/m³. Os fatores de emissão podem ser conferidos no Anexo A.

Tabela 9 - Insumos químicos utilizados no processo industrial do etanol

Insumo	Quantidade	Unidade	Fonte	Abrangência do estudo
Cal virgem	930	g / t de cana	Macedo <i>et al.</i> (2004)	Brasil
Ácido fosfórico	23,28	g / t de cana	Souza (2010 B)	São Paulo
Ácido sulfúrico	9,05	g / l de etanol	Macedo <i>et al.</i> (2004)	Brasil
Lubrificantes	13,37	g / t de cana	Macedo <i>et al.</i> (2004)	Brasil

Fonte: Elaboração própria, 2011

A adoção de tal premissa se justificou mediante a constatação da pequena representatividade da etapa industrial mediante as emissões totais. De acordo com Garcia e Sperling (2010) e Souza (2010 B), respectivamente, esse valor é de apenas 2,27% e 1,8% do total de gases de efeito estufa emitidos.

Nesta dissertação, foi encontrado o valor de 17 kg de CO_{2e} para cada tonelada de etanol produzido. Esse valor representou, em média, dentro das emissões totais, 2,90% e 3,47%, quando se considerou, respectivamente, a logística rodoviária e a intermodal para distribuição do produto. Assim, ficou evidente que a influência relativa da etapa de beneficiamento industrial nas emissões totais de gases de efeito estufa no ciclo de vida do etanol brasileiro é, proporcionalmente, pequena.

4.5. Emissões de gases de efeito estufa na etapa da cogeração de eletricidade

As emissões de gases de efeito estufa durante a etapa de cogeração de eletricidade foram adotadas como constantes, tendo sido utilizados dados encontrados na literatura. Logo, ficou explícita a premissa de que todas as usinas localizadas nas regiões contempladas pelo estudo de caso emitem a mesma quantidade quando queimam bagaço e palha de cana-de-açúcar, para gerar o vapor que é utilizado em alguns processos industriais e no acionamento de geradores de energia elétrica. Assim sendo, as emissões provenientes da cogeração são iguais, independentemente da região analisada.

Ometto (2005) mencionou que para a produção de uma tonelada de etanol são necessárias 15,72 toneladas de cana-de-açúcar. De acordo com Macedo *et al.* (2004), para cada tonelada de cana-de-açúcar tem-se 280 kg de bagaço e 140 kg de palha, que de acordo com Leme (2005), quando queimadas, emitem, respectivamente, 6,75 e 5,96 kg de CO_{2e}.

Sendo assim, nessa dissertação foi considerado que as emissões provenientes da queima do bagaço e da palha são, respectivamente, na ordem de 29,71 e 13,12 kg CO_{2e} para cada tonelada de etanol produzido. Assim, ficou evidente que a influência relativa da etapa de cogeração de energia elétrica nas emissões totais de gases de efeito estufa no ciclo de vida do etanol brasileiro é, proporcionalmente, pequena.

4.6. Emissões de gases de efeito estufa na etapa da logística do etanol até uma base primária de armazenamento

Os dados referentes às distâncias percorridas no modal rodoviário e ferroviário para transportar o etanol das regiões produtoras até uma localidade de armazenamento podem ser verificados na Tabela 10. Para efeitos de comparação, esta dissertação considerou a cidade de Santos-SP como o único ponto de destino.

Tabela 10 - Distâncias utilizadas na etapa da logística do etanol

Origem	Destino	Modal	Distância (km)
Araçatuba	Santos	Ferrovário	732
Araçatuba	Santos	Rodoviário	589
Assis	Santos	Ferrovário	603
Assis	Santos	Rodoviário	501
Campinas	Santos	Ferrovário	201
Jaú	Santos	Ferrovário	469
Jaú	Santos	Rodoviário	375
Piracicaba	Campinas	Rodoviário	70
Piracicaba	Santos	Rodoviário	233
Qualquer região	Ponto de transbordo ferroviário	Rodoviário	30
Ribeirão Preto	Santos	Ferrovário	569
Ribeirão Preto	Santos	Rodoviário	392

Fonte: Ferrovia Centro-Atlântica (FCA, 2011); Ferrovia América Latina Logística (ALL, 2011) e *Google Earth* (2011)

As rodovias consideradas como eixo de ligação entre as regiões que originam o etanol e o destino final, que é o porto localizado na cidade de Santos-SP, em ordem de utilização, de acordo com o *Google Earth* (2011), são:

- Origem na região de Araçatuba-SP: Rodovia Marechal Cândido Rondon, Rodovia Presidente Castelo Branco e Rodovia dos Imigrantes;
- Origem na região de Assis-SP: Rodovia Raposo Tavares, Rodovia Orlando Quagliato, Rodovia Engenheiro João Baptista Cabral Renno, Rodovia Presidente Castelo Branco e Rodovia dos Imigrantes;

- Origem na região de Ribeirão Preto-SP: Rodovia Anhanguera, Rodovia dos Bandeirantes e Rodovia dos Imigrantes;
- Origem na região de Jaú-SP: Rodovia Engenheiro Paulo Nilo Romano, Rodovia Washington Luiz, Rodovia Anhanguera, Rodovia dos Bandeirantes e Rodovia dos Imigrantes;
- Origem na região de Piracicaba-SP: Rodovia Luiz de Queiroz, Rodovia dos Bandeirantes e Rodovia dos Imigrantes.

No que tange as emissões de gases de efeito estufa na etapa da logística do etanol, das regiões produtoras até uma base primária de armazenamento localizada na cidade portuária de Santos-SP, pode-se observar, nas análises das Figura 29, Figura 30, Figura 31, Figura 32 e Figura 33, que houve uma grande redução nas emissões quando se optou por utilizar uma logística intermodal. Em média, essa redução chegou a 74,47%. Em termos absolutos, a maior redução foi verificada na movimentação que tem origem na região de Araçatuba-SP, ou seja, 142,85 kg CO_{2e} por tonelada de etanol transportado.

Conforme pode ser observado na Tabela 11, no que diz respeito às emissões de gases de efeito estufa na etapa da logística do etanol, a opção de transportá-lo utilizando uma combinação intermodal rodo-ferroviária apresentou significativa vantagem sobre a opção exclusivamente rodoviária.

Tabela 11 - Comparação entre as emissões de gases de efeito estufa na etapa da logística do etanol: modal exclusivamente rodoviário *versus* combinação intermodal rodo-ferroviária

Região de origem	Destino	Em kg CO _{2e} /t de etanol			
		Emissões com a logística do etanol			
		Rodoviária	Intermodal		
			Rodoviária	Ferroviário	Total
Araçatuba	Santos	182,4	9,3	30,2	39,5
Assis	Santos	155,1	9,3	24,9	34,2
Ribeirão Preto	Santos	121,4	9,3	23,5	32,8
Jaú	Santos	116,1	9,3	19,4	28,6
Piracicaba	Santos	72,1	21,8	8,3	30,1

Fonte: Elaboração própria, 2011. Nota: não foram consideradas as eventuais emissões oriundas da utilização de equipamentos de trasbordo.

Figura 29 - Comparação entre as emissões de gases de efeito estufa na etapa da logística, da região de Araçatuba-SP até Santos-SP: rodoviária *versus* intermodal

Fonte: Elaboração própria, 2011

Figura 30 - Comparação entre as emissões de gases de efeito estufa na etapa da logística, da região de Assis-SP até Santos-SP: rodoviária *versus* rodo-ferroviária

Fonte: Elaboração própria, 2011

Figura 31 - Comparação entre as emissões de gases de efeito estufa na etapa da logística, da região de Ribeirão Preto-SP até Santos-SP: rodoviária *versus* rodo-ferroviária

Fonte: Elaboração própria, 2011

Figura 32 - Comparação entre as emissões de gases de efeito estufa na etapa da logística, da região de Jaú-SP até Santos-SP: rodoviária *versus* rodo-ferroviária

Fonte: Elaboração própria, 2011

Figura 33 - Comparação entre as emissões de gases de efeito estufa na etapa da logística, da região de Piracicaba-SP até Santos-SP: rodoviária *versus* rodoviária

Fonte: Elaboração própria, 2011

4.7. Análises de sensibilidade

Neste item, no que concerne a minimização das emissões de gases de efeito estufa durante o ciclo de vida do etanol, a sensibilidade das premissas que envolvem o contexto do “cenário base” serão testadas para os seguintes tópicos:

- A substituição do óleo diesel utilizado na etapa do manejo agrícola da cana-de-açúcar por biodiesel B₂₀ e B₁₀₀;
- A extinção da prática da queima do canavial na fase da pré-colheita;
- Impacto relativo da utilização de intermodalidade de transporte na etapa da logística do etanol das regiões produtoras até uma base primária de armazenamento, que está no porto localizado na cidade de Santos-SP;
- O aproveitamento do potencial navegável do Rio Tietê, como uma das opções modais para transportar o etanol da região de Araçatuba-SP até Santos-SP;

4.8. Utilização de biodiesel na etapa do manejo agrícola da cana-de-açúcar

De acordo com Câmara (2006), biodiesel é um combustível alternativo produzido a partir da reação de um óleo vegetal (ou gordura animal) com álcool metílico (ou álcool etílico) na presença de um catalisador. O percentual da mistura com o óleo diesel é indicado pelo nome de um biodiesel: no B₂₀ há uma mistura de 20% de biodiesel; e no B₁₀₀ há 100% de biodiesel, ou seja, não há óleo diesel.

Nesta dissertação, considerou-se que o óleo diesel utilizado nas operações presentes na etapa do manejo agrícola da cana-de-açúcar pode ser substituído por biodiesel de duas maneiras diferentes:

- B₂₀: 20% de biodiesel e 80% de óleo diesel;
- B₁₀₀: 100% de biodiesel e 0% de óleo diesel;

De acordo com Souza (2010 B), foram consideradas nesta dissertação as seguintes premissas: (1) o metanol é o único insumo emissor de gases de efeito estufa presente no biodiesel B₂₀ ou B₁₀₀, sendo assim, as emissões apontadas dizem respeito apenas à sua queima durante a utilização de um desses dois biocombustíveis, e não ao seu processo de fabricação e transporte; (2) um litro de biodiesel B₂₀ ou B₁₀₀ tem a mesma eficiência energética que um litro de óleo diesel, ou seja, podem ser substituídos indiscriminadamente.

A adoção da premissa de que a queima do metanol é a única fonte emissora de gases de efeito estufa presente no biodiesel B₂₀ ou B₁₀₀ fez com que fosse indiferente a qual óleo vegetal, tais como soja ou dendê, ou gordura animal ele seja misturado.

No que diz respeito aos fatores de emissão de gases de efeito estufa do metanol e do óleo diesel, de acordo com Souza (2010 B) e IPCC (2006), adotou-se, respectivamente, 0,786 e 3,1kg CO_{2e}/kg.

Sendo assim, a análise da Figura 34 permite comparar o “cenário base” (C₁) com outros cinco cenários. Também pode ser verificada a contribuição relativa para as emissões de gases de efeito estufa das diferentes etapas do ciclo de vida do etanol que foram consideradas nesta dissertação: manejo agrícola da cana-de-açúcar, transporte da matéria-prima, produção industrial e cogeração de energia elétrica – que por serem

adotadas como constantes, foram somadas em uma mesma categoria – e logística do etanol até uma base primária de armazenamento localizada no porto da cidade de Santos-SP.

Cabe ressaltar que a análise levou em consideração os diferentes percentuais de queima na fase da pré-colheita que foram identificados em cada região, de acordo com a Canaplan (2011): Araçatuba (30%), Assis (25%), Ribeirão Preto (20%), Jaú (30%) e Piracicaba (35%). Quanto aos cenários, tem-se:

- C₁: Utilização de óleo diesel na etapa do manejo agrícola da cana-de-açúcar e logística rodoviária para distribuir o etanol da região de origem até Santos-SP (“cenário base”);
- C₂: Utilização de óleo diesel na etapa de manejo agrícola da cana-de-açúcar e logística intermodal rodo-ferroviária para distribuir o etanol da região de origem até Santos-SP;
- C₃: Utilização de biodiesel B₂₀ na etapa de manejo agrícola da cana-de-açúcar e logística rodoviária para distribuir o etanol da região de origem até Santos-SP;
- C₄: Utilização de biodiesel B₂₀ na etapa de manejo agrícola da cana-de-açúcar e logística intermodal rodo-ferroviária para distribuir o etanol da região de origem até Santos-SP;
- C₅: Utilização de biodiesel B₁₀₀ na etapa de manejo agrícola da cana-de-açúcar e logística rodoviária para distribuir o etanol da região de origem até Santos-SP;
- C₆: Utilização de biodiesel B₁₀₀ na etapa de manejo agrícola da cana-de-açúcar e logística intermodal rodo-ferroviária para distribuir o etanol da região de origem até Santos-SP;

Figura 34 - Comparação entre as emissões de gases de efeito estufa no ciclo de vida do etanol, quando se utilizou óleo diesel, biodiesel B₂₀ ou biodiesel B₁₀₀ na etapa do manejo agrícola da cana-de-açúcar e logística rodoviária ou rodo-ferroviária para distribuí-lo das regiões produtoras até o porto de Santos-SP. Análise dentro de um contexto onde houve percentuais de queima do canavial na fase da pré-colheita

Nota: “C₁” é o “cenário base”

Fonte: Elaboração própria, 2011

A análise da Figura 35 apresenta os principais resultados observados na Figura 34, ou seja, qual foi o volume emitido de gases de efeito estufa durante o ciclo de vida do etanol, em função do tipo de combustível utilizado na etapa do manejo agrícola da cana-de-açúcar e da opção de transporte adotada na etapa da logística de distribuição do etanol até uma base primária de armazenamento. Cabe ressaltar que a análise foi realizada dentro de um contexto onde houve percentuais de áreas que sofreram a queima do canavial na fase da pré-colheita.

Assim sendo, é possível observar que a maior emissão (667 kg CO₂e/t etanol) aconteceu na região de Araçatuba-SP, quando o tipo de combustível utilizado na etapa do manejo

agrícola da cana-de-açúcar foi o óleo diesel e a opção de transporte adotada na etapa da logística de distribuição do etanol foi exclusivamente rodoviária, ou seja, no “cenário base”. Já o melhor resultado (355 kg CO_{2e}/t etanol) foi verificado quando utilizou-se biodiesel B₁₀₀ e logística intermodal rodo-ferroviária com origem na região de Ribeirão Preto-SP.

Combustível usado no manejo	Opção de logística	Emissões (kg CO _{2e} /t etanol)	
		Menor	Maior
Óleo diesel	Rodoviária	Piracicaba (526)	Araçatuba (667)
	Intermodal	Ribeirão Preto (457)	Araçatuba (524)
Biodiesel B20	Rodoviária	Piracicaba (506)	Araçatuba (643)
	Intermodal	Ribeirão Preto (436)	Araçatuba (500)
Biodiesel B100	Rodoviária	Piracicaba (423)	Araçatuba (549)
	Intermodal	Ribeirão Preto (355)	Araçatuba (406)

Figura 35 - Árvore de emissões de gases de efeito estufa, dentro de um contexto onde houve percentuais de queima do canavial na fase da pré-colheita

Fonte: Elaboração própria, 2011

A Figura 36 mostra as diferenças percentuais obtidas, para a média dos volumes emitidos de gases de efeito estufa no ciclo de vida do etanol nas cinco regiões contempladas pelo estudo de caso, quando se trocar uma combinação formada por um tipo de combustível que estava sendo utilizado na etapa do manejo agrícola da cana-de-açúcar e uma opção de transporte da etapa de logística do etanol por outra combinação.

Por exemplo, quando se substituir, o óleo diesel utilizado nas operações da etapa do manejo agrícola da cana-de-açúcar e a opção de transporte rodoviário na etapa da logística do etanol até Santos-SP, por, respectivamente, biodiesel B₁₀₀ e logística intermodal rodo-ferroviária, haverá uma redução média de 35% nas emissões totais de

gases de efeito estufa. As etapas consideradas no ciclo de vida do etanol foram: o manejo agrícola da cana-de-açúcar, o transporte da matéria-prima da lavoura até a usina, a produção industrial, a cogeração de energia elétrica e a logística de distribuição do etanol até uma base primária de armazenamento em Santos-SP.

			Para					
De	Manejo		Óleo Diesel	Óleo Diesel	Biodiesel B ₂₀	Biodiesel B ₂₀	Biodiesel B ₁₀₀	Biodiesel B ₁₀₀
	Manejo	Logística	Rodoviária	Intermodal	Rodoviária	Intermodal	Rodoviária	Intermodal
	Manejo	Logística	Rodoviária	Intermodal	Rodoviária	Intermodal	Rodoviária	Intermodal
	Óleo Diesel	Rodoviária	-	-16%	-4%	-20%	-19%	-35%
	Óleo Diesel	Intermodal	20%	-	15%	-4%	-3%	-22%
	Biodiesel B ₂₀	Rodoviária	4%	-13%	-	-17%	-16%	-33%
	Biodiesel B ₂₀	Intermodal	25%	5%	21%	-	2%	-19%
	Biodiesel B ₁₀₀	Rodoviária	23%	3%	18%	-2%	-	-20%
	Biodiesel B ₁₀₀	Intermodal	54%	29%	48%	23%	25%	-

0% < Redução < 14%	15% < Redução < 29%	Redução > 30%
0% < Aumento < 14%	15% < Aumento < 29%	Aumento > 30%

Figura 36 - Diferenças percentuais que serão obtidas quando se trocar uma combinação de combustível utilizado no manejo agrícola da cana-de-açúcar e uma opção de logística do etanol por outra combinação, dentro de um contexto onde há percentuais de queima do canavial na fase da pré-colheita

Fonte: Elaboração própria, 2011

4.9. Extinção da queima do canavial na fase da pré-colheita

Segunda a União da Indústria de cana-de-açúcar (UNICA, 2011), em 2007 foi criado o “Protocolo Agroambiental no Setor Sucroalcooleiro”. Mesmo sendo de adesão não-obrigatória, já foi adotado por quase todos os agentes envolvidos no setor. As diretrizes preveem a eliminação da queima em áreas mecanizáveis até 2014 e em áreas não-mecanizáveis até 2017. Logo, pode-se considerar um cenário no qual a queima do

canavial na fase da pré-colheita não existirá a partir de 2017. Entretanto, cabe salientar que a análise proposta nesta dissertação não considera o eventual aumento do consumo de óleo diesel pelas máquinas que podem ser inseridas nas operações de colheita.

Sendo assim, pode-se observar na Figura 37 as diferenças percentuais que serão obtidas em uma transição entre uma combinação do “cenário com queima” e uma do “cenário sem queima”. Nas opções presentes no “cenário com queima” foi considerado que existem algumas áreas com percentuais de queima na fase da pré-colheita, utiliza-se óleo diesel, biodiesel B₂₀ ou biodiesel B₁₀₀ na etapa do manejo agrícola da cana-de-açúcar, e na etapa da logística transporta-se o etanol pelo modal rodoviário ou pela opção intermodal rodo-ferroviária. Já no “cenário sem queima”, a diferença reside no fato de que a prática da queima prévia do canavial deixará de existir em 2017.

			Para “cenário sem queima”					
		Manejo	Óleo Diesel	Óleo Diesel	Biodiesel B ₂₀	Biodiesel B ₂₀	Biodiesel B ₁₀₀	Biodiesel B ₁₀₀
De “cenário com queima”	Manejo	Logística	Rodoviária	Intermodal	Rodoviária	Intermodal	Rodoviária	Intermodal
	Óleo Diesel	Rodoviária	-8%	-24%	-12%	-28%	-27%	-43%
	Óleo Diesel	Intermodal	10%	-9%	6%	-14%	-12%	-32%
	Biodiesel B ₂₀	Rodoviária	-4%	-21%	-8%	-25%	-24%	-41%
	Biodiesel B ₂₀	Intermodal	15%	-5%	11%	-10%	-8%	-29%
	Biodiesel B ₁₀₀	Rodoviária	13%	-7%	9%	-12%	-10%	-30%
	Biodiesel B ₁₀₀	Intermodal	42%	17%	36%	11%	13%	-12%

 0% < Redução < 14%	 15% < Redução < 29%	 Redução > 30%
 0% < Aumento < 14%	 15% < Aumento < 29%	 Aumento > 30%

Figura 37 - Diferenças percentuais que serão obtidas quando se trocar uma combinação de combustível utilizado no manejo agrícola da cana-de-açúcar e uma opção de logística do etanol do “cenário com queima” por outra combinação do “cenário sem queima”, ou seja, dentro de um contexto de transição entre a queima do canavial na fase da pré-colheita e a sua proibição em 2017

Fonte: Elaboração própria, 2011

De acordo com a Figura 37, se, após 2017, uma determinada região continuar utilizando o óleo diesel como combustível nas operações presentes na etapa do manejo agrícola da cana-de-açúcar e a logística rodoviária para transporte do etanol até Santos-SP, apenas o fato de a queima do canavial na fase da pré-colheita ser extinta, haverá uma redução média de 10% nas emissões totais de gases de efeito estufa no ciclo de vida do etanol. As etapas consideradas no ciclo de vida analisado foram: o manejo agrícola da cana-de-açúcar, o transporte da matéria-prima da lavoura até a usina, a produção industrial, a cogeração de energia elétrica e a logística de distribuição do etanol até uma base primária de armazenamento em Santos-SP.

Por exemplo, em um contexto onde não haja mais a prática da queima prévia do canavial na fase da pré-colheita, quando se substituir, o óleo diesel utilizado nas operações da etapa do manejo agrícola da cana-de-açúcar e a opção de transporte rodoviário na etapa da logística do etanol até Santos-SP, por, respectivamente, biodiesel B₁₀₀ e logística intermodal rodo-ferroviária, haverá uma redução média de 43% nas emissões totais de gases de efeito estufa no ciclo de vida do etanol.

Já no que diz respeito às emissões de gases de efeito estufa para depois de 2017, ou seja, quando não haverá mais a queima do canavial na fase da pré-colheita, pode-se observar na Figura 38 uma comparação entre os seis cenários que foram elaborados para cada região contemplada pelo estudo de caso. Também pode ser verificada a contribuição relativa para as emissões de gases de efeito estufa das diferentes etapas do ciclo de vida do etanol que foram consideradas nesta dissertação: manejo agrícola da cana-de-açúcar, transporte da matéria-prima, produção industrial e cogeração de energia elétrica – que por serem adotadas como constantes, foram somadas em uma mesma categoria – e logística do etanol até uma base primária de armazenamento localizada em Santos-SP. Quanto aos cenários, tem-se:

- C₁: Utilização de óleo diesel na etapa do manejo agrícola da cana-de-açúcar e logística rodoviária para distribuir o etanol da região de origem até Santos-SP (“cenário base” em um contexto de extinção da queima prévia do canavial);
- C₂: Utilização de óleo diesel na etapa de manejo agrícola da cana-de-açúcar e logística intermodal rodo-ferroviária para distribuir o etanol da região de origem até Santos-SP;

- C₃: Utilização de biodiesel B₂₀ na etapa de manejo agrícola da cana-de-açúcar e logística rodoviária para distribuir o etanol da região de origem até Santos-SP;
- C₄: Utilização de biodiesel B₂₀ na etapa de manejo agrícola da cana-de-açúcar e logística intermodal rodo-ferroviária para distribuir o etanol da região de origem até Santos-SP;
- C₅: Utilização de biodiesel B₁₀₀ na etapa de manejo agrícola da cana-de-açúcar e logística rodoviária para distribuir o etanol da região de origem até Santos-SP;
- C₆: Utilização de biodiesel B₁₀₀ na etapa de manejo agrícola da cana-de-açúcar e logística intermodal rodo-ferroviária para distribuir o etanol da região de origem até Santos-SP;

Figura 38 - Comparação entre as emissões de gases de efeito estufa no ciclo de vida do etanol, quando se utilizar óleo diesel, biodiesel B₂₀ ou biodiesel B₁₀₀ na etapa do manejo agrícola da cana-de-açúcar e logística rodoviária ou rodo-ferroviária para distribuí-lo das regiões produtoras até o porto de Santos-SP: uma análise pós-2017, ou seja, quando não haverá queima do canavial na fase da pré-colheita

Nota: “C₁” é o “cenário base” em um contexto de extinção da queima prévia do canavial

Fonte: Elaboração própria, 2011

A análise da Figura 39 apresenta os principais resultados da Figura 38, ou seja, qual será o volume emitido de gases de efeito estufa durante o ciclo de vida do etanol, em função do tipo de combustível utilizado na etapa do manejo agrícola da cana-de-açúcar e da opção de transporte adotada na etapa da logística de distribuição do etanol. Cabe ressaltar que a análise foi realizada dentro de um contexto onde não haverá percentuais de áreas que sofrem a queima do canavial na fase da pré-colheita, ou seja, pós-2017.

Assim sendo, é possível observar que a maior emissão (617 kg CO_{2e}/t etanol) acontecerá na região de Araçatuba-SP, quando o tipo de combustível utilizado na etapa do manejo agrícola da cana-de-açúcar for o óleo diesel e a opção de transporte adotada na etapa da logística de distribuição do etanol for exclusivamente rodoviária. Já o melhor resultado (314 kg CO_{2e}/t etanol) será verificado quando se utilizar biodiesel B₁₀₀ e logística intermodal rodo-ferroviária com origem na região de Jaú-SP.

Combustível usado no manejo	Opção de logística	Emissões (kg CO _{2e} /t etanol)	
		Menor	Maior
Óleo diesel	Rodoviária	Piracicaba (468)	Araçatuba (617)
	Intermodal	Jaú (416)	Assis (475)
Biodiesel B20	Rodoviária	Piracicaba (448)	Araçatuba (593)
	Intermodal	Jaú (396)	Assis (451)
Biodiesel B100	Rodoviária	Piracicaba (365)	Araçatuba (499)
	Intermodal	Jaú (314)	Araçatuba (356)

Figura 39 - Árvore de emissões de gases de efeito estufa, dentro de um contexto onde não haverá percentuais de queima do canavial na fase da pré-colheita

Fonte: Elaboração própria, 2011

A Figura 40 mostra as diferenças percentuais obtidas, para a média dos volumes emitidos de gases de efeito estufa no ciclo de vida do etanol das cinco regiões contempladas pelo estudo de caso, quando se trocar uma combinação formada por um tipo de combustível que esteja sendo utilizado na etapa do manejo agrícola da cana-de-açúcar e uma opção de transporte da etapa de logística do etanol até uma base primária de armazenamento por outra combinação.

Por exemplo, quando se substituir o óleo diesel utilizado nas operações da etapa do manejo agrícola da cana-de-açúcar e a opção de transporte rodoviário na etapa da logística do etanol até Santos-SP, por, respectivamente, biodiesel B₁₀₀ e logística intermodal rodo-ferroviária, haverá uma redução média de 38% nas emissões totais de gases de efeito estufa. Cabe ressaltar que a análise foi feita dentro de um contexto onde não haverá percentuais de áreas que sofrem a queima do canavial na fase pré-colheita.

			Para					
			Óleo Diesel	Óleo Diesel	Biodiesel B ₂₀	Biodiesel B ₂₀	Biodiesel B ₁₀₀	Biodiesel B ₁₀₀
			Rodoviária	Intermodal	Rodoviária	Intermodal	Rodoviária	Intermodal
De	Manejo	Logística						
	Óleo Diesel	Rodoviária	-	-18%	-4%	-22%	-20%	-38%
	Óleo Diesel	Intermodal	22%	-	17%	-5%	-3%	-25%
	Biodiesel B ₂₀	Rodoviária	4%	-14%	-	-19%	-17%	-36%
	Biodiesel B ₂₀	Intermodal	28%	5%	23%	-	2%	-21%
	Biodiesel B ₁₀₀	Rodoviária	25%	3%	20%	-2%	-	-22%
	Biodiesel B ₁₀₀	Intermodal	62%	33%	55%	26%	29%	-

 0% < Redução < 14%	 15% < Redução < 29%	 Redução > 30%
 0% < Aumento < 14%	 15% < Aumento < 29%	 Aumento > 30%

Figura 40 - Diferenças percentuais que serão obtidas quando se trocar uma combinação de combustível utilizado no manejo agrícola da cana-de-açúcar e uma opção de logística do etanol por outra combinação, dentro de um contexto onde não haverá percentuais de queima do canavial na fase da pré-colheita

Fonte: Elaboração própria, 2011

4.10. Uso de intermodalidade na etapa da logística de distribuição do etanol até uma base primária de armazenamento

A análise da Figura 41 permite verificar o quanto que houve de mitigação de gases de efeito estufa no ciclo de vida do etanol, quando se considerou a intermodalidade na etapa da logística para se transportar o etanol fabricado no interior do Estado de São Paulo até a cidade de Santos-SP.

O cenário intermodal foi composto pela alternativa de transportar o etanol por modal rodoviário até um ponto de transbordo, escoando-o assim por uma via férrea. Considerou-se que o etanol foi fabricado dentro de um raio médio de 30 km do ponto de coleta ferroviária. A exceção foi a região de Piracicaba-SP, pois nesse caso as instalações necessárias para o transbordo estão localizadas na cidade de Campinas-SP, ou seja, em média, a 70,1 km de distância.

A redução alcançada teve correlação direta com a distância da região analisada até o porto, ou seja, quanto mais longe da cidade de Santos-SP, maior foi a mitigação de gases de efeito estufa. Isso aconteceu porque quanto maior a distância, mais se observou a eficiência energética do modal ferroviário em relação ao rodoviário, que é, respectivamente, de 0,24 e 1,8 MJ/t/km.

Os dados mostraram o que foi explicado anteriormente. Quando a logística rodoviária foi substituída pela combinação intermodal rodo-ferroviária, a região de Araçatuba-SP, que é a mais longínqua do porto de Santos-SP, obteve uma redução no volume emitido de gases de efeito estufa na ordem 21,43%. Já para a região de Piracicaba-SP, a mais próxima, considerando o mesmo destino, essa redução foi de apenas 8%. Em termos médios, para as cinco regiões analisadas, a logística intermodal proporcionou uma redução de 16,45%. Cabe salientar que essas reduções nas emissões de gases de efeito estufa dizem respeito ao ciclo de vida do etanol.

Figura 41 - Comparação entre as emissões totais de gases de efeito estufa no ciclo de vida do etanol, analisando diferentes logísticas para distribuição do produto: rodoviária *versus* rodo-ferroviária

Fonte: Elaboração própria, 2011

Cabe ressaltar que os gases de efeito estufa emitidos devido à utilização de instrumentos ou ferramentas para transbordar o etanol de um modal de transporte para outro não foram considerados no escopo desse trabalho.

Isso acontece, pois, conforme o histórico de informações da empresa CPA Trading S/A (2011), os pontos de transbordo de etanol localizados no Brasil utilizam bombas elétricas. Logo, ficou evidente que a influência relativa do bombeamento do etanol nas emissões totais de gases de efeito estufa é, proporcionalmente, pequena, podendo ser desconsiderada.

4.11. Uso do Rio Tietê como opção de intermodalidade na etapa da logística do etanol

Em termos geográficos, dentre as cinco regiões contempladas pelo estudo de caso desta dissertação, a de Araçatuba-SP foi a única candidata que fez a utilização do Rio Tietê ser factível para o escoamento do etanol até o porto localizado na cidade de Santos-SP.

Para isso, foi considerado que o etanol percorreu uma distância média de 30 km até um ponto de coleta no Rio Tietê. Posteriormente, utilizou-se o modal aquaviário até a cidade de Anhembi-SP. De acordo com a Secretaria Estadual de Logística e Transportes (2011), esse percurso é equivalente a 413 km. Deste ponto em diante, o etanol seguiu até o porto de Santos-SP pelo modal rodoviário.

De acordo com a RFA (2008), a eficiência energética de um navio típico é de 0,20 MJ/t/km. Entretanto, baseando-se na proporção entre navegação marítima e de interior observada nos dados de Jun *et al.* (2001), adotou-se nessa dissertação que para se transportar uma tonelada de etanol, pelo Rio Tietê, em um percurso de um quilometro, é demandado 0,17 MJ.

Assim sendo, pode-se observar na Figura 42 que, quando o Rio Tietê foi considerado, as emissões na etapa da logística foram de 114,55 kg de CO_{2e}/t de etanol movimentado (“cenário intermodal II”). Este cenário foi 37,18% menos poluidor do que aquele que utilizou exclusivamente o modal rodoviário. Entretanto, ele foi inferior à combinação intermodal rodo-ferroviária (“cenário intermodal I”), já que, em relação ao pior cenário, a redução chegou a 361,60%.

Figura 42 - Comparação entre as emissões de gases de efeito estufa na etapa da logística do etanol, quando se analisou o potencial e a factibilidade do Rio Tietê para escoar o produto da região de Araçatuba-SP até Santos-SP

Fonte: Elaboração própria, 2011.

O capítulo 5, primeiramente, apresentou os principais resultados obtidos para o “cenário base”, onde as máquinas utilizadas no manejo agrícola da cana-de-açúcar são abastecidas com óleo diesel, existem percentuais de áreas que são colhidas com auxílio da queima prévia do canavial e a logística do etanol até uma base primária de armazenamento é realizada exclusivamente pelo modal rodoviário.

Já a análise de sensibilidade abordou a temática de emissões de gases de efeito estufa no ciclo de vida do etanol sob a perspectiva do uso de diferentes tipos de biodiesel, do fim da queimada, como previsto para até o ano de 2017 e da logística intermodal para distribuir o etanol até uma base primária de armazenamento. A hipótese de transportar etanol pelo Rio Tietê também foi contemplada.

As conclusões referentes ao impacto relativo que os seguintes tópicos têm nas emissões de gases de efeito estufa estão sumarizadas no capítulo 5: localização da produção de cana-de-açúcar; utilização de diferentes combustíveis na etapa do manejo agrícola da cana-de-açúcar; extinção da prática de queimar o canavial na fase da pré-colheita; e utilização de uma logística intermodal para distribuir o etanol até uma base primária de armazenamento.

5. CONCLUSÕES E RECOMENDAÇÕES PARA FUTUROS ESTUDOS

Este capítulo aborda as principais conclusões sobre o impacto relativo que os seguintes tópicos têm nas emissões de gases de efeito estufa: localização da produção de cana-de-açúcar; utilização de diferentes combustíveis na etapa do manejo agrícola da cana-de-açúcar; extinção da prática de queimar o canavial na fase da pré-colheita; e utilização de uma logística intermodal para distribuir o etanol até uma base primária de armazenamento localizada em Santos-SP. Em suma, os principais resultados podem ser observados na Tabela 12.

Tabela 12 - Quadro-resumo das emissões de gases de efeito estufa no ciclo de vida do etanol, em um contexto com queima prévia do canavial

Em kg CO ₂ /t de etanol								
Região produtora	Produção agrícola			Transporte da cana	Produção industrial		Logística do etanol	
	Manejo				Etanol	Cogeração	Rodoviária	Intermodal
	Tipo de combustível							
	Diesel	B ₂₀	B ₁₀₀					
Araçatuba	349	325	231	75	17	43	182	40
Assis	345	320	222	77	17	43	155	34
Ribeirão Preto	289	268	187	75	17	43	121	33
Jaú	304	284	202	73	17	43	116	29
Piracicaba	321	301	218	73	17	43	72	30

Fonte: Elaboração própria, 2011

Como também assinalado por Ometto (2005) e Mosciatti (2008), essa dissertação mostrou que as atividades presentes na etapa do manejo agrícola da cana-de-açúcar representaram a maior parcela das emissões de gases de efeito estufa no ciclo de vida do etanol. Em valores absolutos, quando foi considerado um cenário onde houve uso de óleo diesel e a adoção da prática de queimar o canavial na fase da pré-colheita, o máximo emitido foi de 349 e o mínimo de 289 kg CO₂/t de etanol, respectivamente, para as regiões de Araçatuba-SP e de Ribeirão Preto-SP.

Ainda considerando o cenário supracitado, no que diz respeito ao valor médio das emissões na etapa do manejo agrícola das regiões analisadas, foi encontrado 322 kg

CO₂/t de etanol, ou seja, 55% do total, quando considerou-se o transporte rodoviário na logística do produto. Entretanto, esse valor chegou a 66%, em um contexto no qual a intermodalidade rodo-ferroviária substituiu a opção exclusivamente rodoviária presente na etapa da logística.

Os dados do estudo de caso mostraram que a localização da etapa do manejo agrícola da cana-de-açúcar interferiu na quantidade de gases de efeito estufa emitidos. Além de fatores de gestão administrativa das operações agrícolas, que não foram contemplados no âmbito dessa dissertação, isso aconteceu pelas distinções intrínsecas ao solo de cada região, que demandaram diferentes quantidades de insumos químicos, tais como calcário e fertilizantes; e percentuais diferentes de áreas da lavoura que sofreram com a queima do canavial na fase da pré-colheita. Chegou a ser verificada uma amplitude de 60 kg CO₂/t de etanol entre as regiões de Araçatuba-SP e Ribeirão Preto-SP;

Dentre os insumos utilizados na etapa do manejo agrícola da cana-de-açúcar, o óleo diesel respondeu, em média, por 42,09% das emissões de gases de efeito estufa. Entre as regiões analisadas observou-se uma diferença de consumo de até 20 litros de óleo diesel por hectare. É válido salientar que a amplitude demandada entre as regiões se torna significativa no volume final, ou seja, quando se considerar toda a produção.

Na etapa do transporte de matéria-prima da lavoura até a usina, no que diz respeito às emissões de gases de efeito estufa, não foram verificadas diferenças significativas entre as regiões pesquisadas. A amplitude foi de 4,55 kg CO₂/t de etanol, quando se comparou as regiões de Piracicaba-SP e Jaú-SP com Assis-SP. Isso aconteceu porque é comum que, independentemente da região, o raio médio ao entorno das usinas, de onde se origina a cana-de-açúcar utilizada no processo industrial, seja parecido. Isso garante a competitividade econômica do negócio, pois como a cana-de-açúcar é um produto volumoso, não é interessante transportá-la por longas distâncias.

As emissões de gases de efeito estufa provenientes do processo industrial do etanol de cana-de-açúcar foram consideradas no ciclo de vida. Entretanto, foram adotados somente os valores emitidos em função da utilização dos principais insumos químicos demandados por essa atividade, ou seja, a cal virgem, o ácido fosfórico, o ácido sulfúrico e o óleo lubrificante.

Sendo assim, nesta dissertação, encontrou-se o valor de 17 kg de CO_{2e} para cada tonelada de etanol produzida pela indústria sucroalcooleira. Esse valor foi adotado como uma constante, independente da região produtora. Em média, dentro das emissões de todo o ciclo de vida representaram 2,90% e 3,47%, quando se considerou, respectivamente, a logística rodoviária e a intermodalidade rodo-ferroviária para distribuição do produto.

Sendo assim, ficou evidente que a influência relativa da etapa de beneficiamento industrial nas emissões totais de gases de efeito estufa no ciclo de vida do etanol é, proporcionalmente, pequena. Deste modo, não houve a necessidade de se calcular tal volume emitido em cada região considerada no estudo de caso, sendo satisfatória a adoção de uma média nacional obtida por intermédio de dados encontrados na literatura.

Para o cálculo das emissões de gases de efeito estufa durante a etapa de cogeração de eletricidade foi adotada a constante de 42,83 kg CO_{2e}/t de etanol. Esse valor foi obtido a partir de informações encontradas na literatura. Logo, ficou explícita a premissa de que todas as usinas localizadas nas regiões analisadas no estudo de caso emitem a mesma quantidade, quando queimam bagaço e palha de cana-de-açúcar para gerar o vapor que é utilizado em alguns processos industriais e também no acionamento de geradores que produzem energia elétrica. Assim sendo, as emissões provenientes da cogeração são iguais, independentemente da região analisada.

Sendo assim, ficou evidente que a influência relativa da etapa de cogeração de energia elétrica nas emissões totais de gases de efeito estufa no ciclo de vida do etanol é, proporcionalmente, pequena. Deste modo, não houve a necessidade de se calcular tal volume emitido em cada região considerada no estudo de caso, sendo satisfatória a adoção de uma média nacional obtida por intermédio de dados encontrados na literatura.

A hipótese de substituir o óleo diesel demandado pelas operações presentes na etapa do manejo agrícola da cana-de-açúcar por biodiesel B₂₀ ou B₁₀₀, proporcionou uma redução significativa no volume de gases de efeito estufa emitidos. Em média, para as regiões analisadas, obteve-se, apenas nessa etapa, respectivamente, uma redução na ordem de 6,81% e 34,05%. Cabe ressaltar que essa análise foi realizada dentro de um contexto onde houve percentuais de áreas que sofreram a queima do canavial na fase da pré-colheita.

Entretanto, quando se considerou o ciclo de vida estudado nesta dissertação, dentro de um contexto onde a logística rodoviária é utilizada para o transporte até uma base primária de armazenamento, essa substituição de combustível significou uma redução de emissões na ordem de, respectivamente, 3,74% para B₂₀ e 18,69% para a utilização de B₁₀₀. Já para um cenário onde a logística de distribuição era rodo-ferroviária, obteve-se um volume de, respectivamente, 4,47% e 22,37% a menos de gases de efeito estufa emitidos.

Ademais, se, para a média das regiões analisadas, essa substituição for, concomitantemente, de combustível demandado na etapa do manejo agrícola da cana-de-açúcar e da opção de transporte na etapa da logística de distribuição do etanol até uma base primária de armazenamento, ou seja: indo de um cenário onde se utiliza óleo diesel e modal rodoviário para um cenário com consumo de biocombustíveis B₂₀ ou B₁₀₀ e logística intermodal para ambas as opções de biocombustíveis, haverá um volume de, respectivamente, 20,19% e 35,14% a menos de gases de efeito estufa sendo emitidos no ciclo de vida do etanol.

Em termos médios para os dados das regiões analisadas, dentro de um contexto onde havia percentuais de queima prévia do canavial na fase da pré-colheita, os resultados mostraram sinergia quando se substitui o combustível utilizado nas operações presentes na etapa do manejo agrícola da cana-de-açúcar e a opção de transporte na etapa da logística do etanol até uma base primária de armazenamento de Santos-SP. O valor mais expressivo foi uma redução média de 35,14% nas emissões totais de gases de efeito estufa no ciclo de vida do etanol. Isso aconteceu quando se trocou o óleo diesel e a logística exclusivamente rodoviária por, respectivamente, biodiesel B₁₀₀ e logística intermodal rodo-ferroviário.

Outro importante tópico que colaborará com a diminuição das emissões de gases de efeito estufa no ciclo de vida do etanol será o fim da prática da queima prévia do canavial durante a fase da pré-colheita. Em média, considerando todas as possíveis combinações de combustíveis utilizados na etapa do manejo agrícola e as opções de transporte da etapa de logística para distribuir o etanol até uma base primária de armazenamento, apenas a extinção da queimada proporcionará uma redução de 10% no total de gases emitidos no ciclo de vida do etanol.

A partir de 2017 a queima prévia do canavial será proibida por lei. Logo, para as regiões analisadas, as emissões médias na etapa do manejo agrícola da cana-de-açúcar, quando se utilizar óleo diesel, biodiesel B₂₀ e B₁₀₀, cairão, respectivamente, para 14,43%, 15,48% e 21,87%. Isso pode ser verificado na Tabela 13.

Tabela 13 - Quadro-resumo das emissões de gases de efeito estufa no ciclo de vida do etanol, em um contexto onde não haverá queima prévia do canavial

					Em kg CO ₂ e/t de etanol			
Região produtora	Produção agrícola			Transporte da cana	Produção industrial		Logística do etanol	
	Manejo				Etanol	Cogeração	Rodoviária	Intermodal
	Tipo de combustível							
	Diesel	B ₂₀	B ₁₀₀					
Araçatuba	299	276	181	75	17	43	182	40
Assis	303	279	181	77	17	43	155	34
Ribeirão Preto	256	235	154	75	17	43	121	33
Jaú	255	234	153	73	17	43	116	29
Piracicaba	263	243	160	73	17	43	72	30

Fonte: Elaboração própria, 2011.

Entretanto, no ciclo de vida total, essa redução, quando considerado um cenário de logística exclusivamente rodoviária será de, respectivamente, 7,92%, 8,23% e 9,74%. Já dentro de um contexto onde haja logística intermodal rodo-ferroviária, a minimização das emissões será na ordem de, respectivamente, 9,48%, 9,93% e 12,21%. Cabe salientar que para a média das regiões contempladas pelo estudo de caso, em valores absolutos, a redução em decorrência do fim da prática da queima prévia do canavial na fase da pré-colheita será de 46,41 kg de CO_{2e}/t de etanol.

Considerando-se o “cenário base”, a utilização da intermodalidade de transporte rodo-ferroviária na etapa da logística de distribuição do etanol até uma base primária de armazenamento colaborou para a minimização das emissões de gases de efeito estufa no ciclo de vida do etanol. Para a média das regiões analisadas no estudo de caso, essa redução chegou a 16,45%, em detrimento do uso de uma logística exclusivamente rodoviária.

Ao analisarmos apenas as emissões concernentes a etapa da logística do etanol das regiões produtoras até uma base primária de armazenamento, o uso da intermodalidade

de transporte rodo-ferroviária proporcionou uma redução média de 74,47%. Isso foi alcançado devido à correlação direta que o volume de gases de efeito estufa emitido tem com a distância da região produtora de etanol até a cidade de Santos-SP, ou seja, quanto mais longe do porto mais será observada a eficiência energética do modal ferroviário em detrimento ao rodoviário.

Cabe ressaltar que a utilização da intermodalidade hidro-rodoviária foi testada para o Rio Tietê, objetivando o escoamento do etanol da região de Araçatuba-SP até a cidade de Santos-SP. Calculou-se uma emissão de 114,55 kg de CO_{2e}/t de etanol durante essa operação logística. Este cenário foi 37,18% menos poluidor do que aquele que utilizou uma logística exclusivamente rodoviária (pior cenário). Entretanto, ele foi inferior a combinação intermodal rodo-ferroviária, já que esta, em relação ao pior cenário, proporcionou uma redução de 361,60% nos níveis de emissões. Investimentos em obras de construção civil no leito do Rio Tietê e na edificação de plataformas intermodais para graneis líquidos colaborariam a favor da opção hidro-rodoviária.

Este capítulo abordou as principais conclusões sobre as contribuições dessa dissertação para a literatura. Foram apresentadas as quantidades de gases de efeito estufa emitidas no ciclo de vida do etanol para o “cenário base”, ou seja, quando há utilização de óleo diesel na etapa do manejo agrícola da cana-de-açúcar, prática de queima do canavial na fase da pré-colheita e transporte exclusivamente rodoviário na etapa de logística de distribuição do etanol.

Além disso, por intermédio de uma análise de sensibilidade, demonstrou o que aconteceria ao “cenário base” se o óleo diesel fosse substituído por biodiesel B₂₀ ou B₁₀₀; a prática da queima do canavial na fase pré-colheita fosse extinta; e a logística exclusivamente rodoviária de distribuição do etanol até uma base primária de armazenamento fosse alterada para uma intermodal rodo-ferroviária.

Por fim, pode ser observado na Tabela 14 um quadro-resumo que contém os totais de emissões de gases de efeito estufa nos cenários de ciclo de vida do etanol que foram propostos nesta dissertação, ou seja, “C₁”, “C₂”, “C₃”, “C₄”, “C₅” e “C₆”. Ele foi organizado em função de três níveis: (1) se houve ou não a prática da queima do

canavial na fase da pré-colheita, (2) qual combustível foi consumido na etapa do manejo agrícola da cana-de-açúcar, e (3) qual tipo de transporte foi utilizado na etapa da logística do etanol até uma base primária de armazenamento.

Tabela 14 - Quadro-resumo das emissões totais de gases de efeito estufa no ciclo de vida do etanol

Em kg CO _{2e} /t de etanol												
Região produtora	Cenário com queima prévia						Cenário sem queima prévia					
	Combustível utilizado na etapa do manejo agrícola da cana-de-açúcar											
	Óleo diesel		B ₂₀		B ₁₀₀		Óleo diesel		B ₂₀		B ₁₀₀	
	Opções de transporte utilizadas na etapa da logística do etanol											
	Rodo	Inter	Rodo	Inter	Rodo	Inter	Rodo	Inter	Rodo	Inter	Rodo	Inter
Araçatuba	667	524	643	500	549	406	617	474	593	450	499	356
Assis	637	516	613	492	515	394	596	475	572	451	474	353
Ribeirão Preto	526	484	506	464	423	381	468	426	448	406	365	323
Jaú	545	457	525	436	444	355	512	424	492	403	411	322
Piracicaba	553	466	533	446	451	364	504	416	483	396	402	314

Fonte: Elaboração própria, 2011

Como todo trabalho científico, esta dissertação tem um escopo delimitado. Sendo assim, o próximo item traz algumas sugestões que podem ser incorporadas em pesquisas futuras sobre o tema de emissões de gases de efeito estufa no ciclo de vida do etanol.

5.1. Sugestões para futuros trabalhos

Esse item aborda algumas sugestões que podem ser incorporadas em pesquisas futuras sobre o tema de emissões de gases de efeito estufa no ciclo de vida do etanol. Dentre elas, estão:

- Aplicar a metodologia RTFO em mais regiões produtoras de etanol. Principalmente nos Estados localizados no centro-oeste brasileiro, que formam a nova fronteira sucroalcooleira do país.

- Calcular e comparar as emissões de gases de efeito estufa na etapa da logística do etanol para as combinações intermodais que utilizam o modal dutoviário para escoar o produto.
- Considerar a diferença nas emissões de gases de efeito estufa na logística dos combustíveis utilizados no ciclo de vida do etanol, pois, na melhor das hipóteses, o biodiesel pode ser produzido na mesma localidade onde o etanol é fabricado, exigindo um menor deslocamento entre oferta e demanda. Já o óleo diesel, em geral, é originado em regiões litorâneas.
- Analisar o ciclo de vida do etanol sob uma perspectiva multicritério, ou seja, incluir outros aspectos importantes na análise, tais como os custos de produção e transportes das diferentes regiões fabricantes de cana-de-açúcar e etanol; mais combinações de modais de transporte; e os riscos. Sendo assim, intencionar-se-ia analisar os *trade-offs* envolvidos.

6. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

AGÊNCIA NACIONAL DE ENERGIA ELÉTRICA (ANEEL, 2005). **Biomassa**. Capítulo 5. Acessado em 23/04/2011. Disponível em: < <http://www.aneel.gov.br>>.

AGÊNCIA NACIONAL DO PETRÓLEO, GÁS NATURAL E BIOCOMBUSTÍVEIS (ANP, 2011). **Preço médio do etanol**. Acessado em 12/04/2011. Disponível em: <www.anp.gov.br>.

AGUIAR FILHO J. M. M. **Análise enzimática de fungos lignocelulolíticos cultivados em vinhaça e bagaço de cana-de-açúcar**. 2008. 79p. Dissertação (Mestrado) - Escola Superior de Agricultura Luiz de Queiroz, Universidade de São Paulo, Piracicaba, 2008.

ALBUQUERQUE A. G. **Avaliação exergetica dos efluentes do processo industrial do álcool**. 2005. 63p. Dissertação (Mestrado) - Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, São Carlos, 2005.

ALVES F. **Por que morrem os cortadores de cana?** Revista Saúde e Sociedade, vol.15, n.3, PP 98-98, 2006. Disponível em: www.scielo.br.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS (ABNT, 2009). **Norma ABNT NBR ISO 14040 - Gestão ambiental - Avaliação do ciclo de vida - Princípios e estrutura**. Comitê Brasileiro de Gestão Ambiental (ABNT/CB-38). São Paulo, 2009.

ASSOCIAÇÃO NACIONAL DOS FABRICANTES DE VEÍCULOS AUTOMOTORES (ANFAVEA, 2011). **Anuário da Indústria Automobilística Brasileira**. Acesso em 31/03/2011. Disponível em: <www.anfavea.com.br>.

ASSOCIAÇÃO NACIONAL PARA DIFUSÃO DE ADUBOS (ANDA, 1991). **Boletim Técnico N° 1 – Acidez do solo e calagem**. Acessado em 12/04/11. Disponível em: <www.anda.org.br/boletins/Boletim_01.pdf>.

ASSUNÇÃO J.V. **Life Cycle Analysis of Sugar Cane Ethanol in relation to Greenhouse Gases Emissions**. 93rd Conference and Exhibition of the Air & Waste Management Association, jun, 2000.

BARBIERI R. H. T.; BARCELOS, I. S. **Produção de fertilizante orgânico a partir do bagaço de cana-de-açúcar: uma alternativa para o gerenciamento do resíduo oriundo**. VIII Congresso Brasileiro de Engenharia Química em Iniciação Científica, 2009.

BARBOSA C. M. G. **Avaliação cardiovascular e respiratória em um grupo de trabalhadores cortadores de cana-de-açúcar queimada no Estado de São Paulo**. 2011. 151p. Tese (Doutorado) - Faculdade de Medicina, Universidade de São Paulo, São Paulo, 2011.

BERNARDO NETO O. **Integração das principais tecnologias de obtenção de etanol através do processamento de celulose (2ª geração) nas atuais usinas de processamento de cana-de-açúcar (1ª geração)**. 2009. 138p. Dissertação (Mestrado) - Escola Politécnica, Universidade de São Paulo, São Paulo, 2009.

BANCO NACIONAL DE DESENVOLVIMENTO ECONÔMICO E SOCIAL (BNDES, 2008). **Bioetanol de cana-de-açúcar - Energia para o desenvolvimento sustentável**. Rio de Janeiro, 2008. Disponível em: <www.bioetanoldecana.org>.

BORSARI V. **Caracterização das emissões de gases de efeito estufa por veículos automotores leves no Estado de São Paulo**. 2009. 207p. Dissertação (Mestrado) - Faculdade de Saúde Pública, Universidade de São Paulo, São Paulo, 2009.

CALTAROSSO F. **Análise de tensões em equipamentos de moagem da cana-de-açúcar usando o método dos elementos finitos**. 2008. 204p. Dissertação (Mestrado) - Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, São Paulo, 2008.

CÂMARA G. M. S. **Biodiesel Brasil - estado atual da arte**. Departamento de Produção Vegetal - USP/ESALQ. Piracicaba, 2006.

CAMPOS D. C. **Potencialidade do sistema de colheita sem queima da cana-de-açúcar para o sequestro de carbono.** 2003. 100p. Tese (Doutorado) - Escola Superior de Agricultura Luiz de Queiroz, Universidade de São Paulo, São Paulo, 2003.

CANAPLAN - CONSULTORIA TÉCNICA LTDA. **11º Relatório sobre os insumos consumidos na produção de cana-de-açúcar (safra 2010, editado em Janeiro de 2011).** Piracicaba, 2011.

CARVALHO, M. D. **Proposta de um modelo de planejamento agregado da produção numa usina de açúcar e álcool vinculado à flutuação de preços em mercados à vista e no mercado futuro.** 2009. 201p. Dissertação (Mestrado) - Escola Politécnica, Universidade de São Paulo, São Paulo, 2009.

CASAGRANDE C. A. **Diagnóstico ambiental e análise temporal da adequabilidade do uso e cobertura do solo na bacia do Ribeirão dos Marins, Piracicaba-SP.** 2005. 153p. Dissertação (Mestrado) - Escola Superior de Agricultura Luiz de Queiroz, Universidade de São Paulo, Piracicaba, 2005.

CASTILHO S. C. P. **Evolução de crostas superficiais sob chuva natural em diferentes solos da região de Piracicaba, SP.** 2010. 72p. Dissertação (Mestrado) - Escola Superior de Agricultura Luiz de Queiroz, Universidade de São Paulo, Piracicaba, 2010.

CEBALLOS-SCHIAVONE C. H. M. **Tratamento térmico do caldo de cana-de-açúcar visando a redução de contaminantes bacterianos - *Lactobacillus* - na produção de etanol e eficiência de tratamento do fermento por etanol.** 2009. 178p. Dissertação (Mestrado) - Escola Superior de Agricultura Luiz de Queiroz, Universidade de São Paulo, Piracicaba, 2009.

CEBIM V. L. S. M. **Biometria de mudas de cana-de-açúcar (*Saccharum spp.*) em dois sistemas de plantio.** 2007. 90p. Dissertação (Mestrado), Escola Superior de Agricultura Luiz de Queiroz, Universidade de São Paulo, Piracicaba, 2007.

CENTRO DE ESTUDOS AVANÇADOS EM ECONOMIA APLICADA (CEPEA, 2010). **PIB do agronegócio brasileiro**. Acesso em 06/04/2011. Disponível em: <www.cepea.esalq.usp.br/>.

CERRI C. C.; CERRI C. E. P. **Agricultura e aquecimento global**. Centro de Energia Nuclear na Agricultura (CENA/USP) e Escola Superior de Agricultura Luiz de Queiroz (ESALQ/USP), 2007.

COELHO M. F. **Planejamento da qualidade no processo de colheita mecanizada da cana-de-açúcar**. 2009. 79 Pg. Dissertação (Mestrado) - Escola Superior de Agricultura Luiz de Queiroz, Universidade de São Paulo, São Paulo, 2009.

COLETI J. T. **Tratos culturais na cana soca**. In: DINARDO-MIRANDA L. L.; VASCONCELOS A. C. M.; LANDELL G. A., coord. **Cana-de-açúcar**. Campinas, Instituto Agrônômico, 2010.

COMPANHIA DE TECNOLOGIA E SANEAMENTO AMBIENTAL DO ESTADO DE SÃO PAULO (CETESB, 2006). **Vinhaça: Critérios e procedimentos para aplicação no solo agrícola**. Acesso em 18/03/2011. Disponível em: <http://www.cetesb.sp.gov.br/Tecnologia/camaras/P4_231.pdf>.

CORBINI J. L. **Operações agrícolas em tratos culturais**. In: PARANHOS S. B., coord. **Cana-de-açúcar - cultivo e utilização**. Campinas, Editora Fundação Cargill, 1987.

COSTA M. C. G. **Distribuição e crescimento radicular em soqueiras de cana-de-açúcar: dois cultivares em solos com características distintas**. 2005. 104p. Tese (Doutorado) - Escola Superior de Agricultura Luiz de Queiroz, Universidade de São Paulo, São Paulo, 2005.

COSTA T. R. C. C. **Comunidade bacteriana, atributos do solo e fluxo de gases em solo sob Cerrado e cana-de-açúcar**. 2010. 126p. Dissertação (Mestrado) - Centro de Energia Nuclear na Agricultura, Universidade de São Paulo, São Paulo, 2010.

CUNHA P. E. V. **Aplicação da metodologia para estimativa do fator de emissão - nutrientes e metais pesados - para avaliar a contribuição dos efluentes de carcinicultura no estuário do rio Potengi, Natal (RN).** 2010. 238p. Tese (Doutorado) - Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, São Carlos, 2010.

CPA TRADING S/A. **Informações sobre o transbordo do etanol.** Sarandi, 2011.

DANTAS D. N. **Uso da biomassa da cana-de-açúcar para geração de energia elétrica: análise energética, exergética e ambiental de sistemas de cogeração em sucroalcooleiras do interior paulista.** 2010. 131p. Dissertação (Mestrado) - Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, São Carlos, 2010.

DANTAS FILHO P. L. **Análise de custos na geração de energia com bagaço de cana-de-açúcar: um estudo de caso em quatro usinas de São Paulo.** 2009, 175p. Dissertação (Mestrado) - Programa Interunidades de Pós-Graduação em Energia da Universidade de São Paulo (Escola Politécnica / Faculdade de Economia e Administração / Instituto de Eletrotécnica e Energia / Instituto de Física), São Paulo, 2009.

DEON M. D. **Reciclagem de água e nutrientes pela irrigação da cana-de-açúcar com efluente de estação de tratamento de esgoto.** 2010. 88p. Tese (Doutorado) - Escola Superior de Agricultura Luiz de Queiroz, Universidade de São Paulo, Piracicaba, 2010.

EMPRESA BRASILEIRA DE PESQUISA AGROPECUÁRIA (EMBRAPA, 2011). **Cana-de-açúcar.** Acesso em 28/05/2011. Disponível em: <www.embrapa.gov.br>.

FEDERAÇÃO DAS INDÚSTRIAS DO ESTADO DE SÃO PAULO (FIESP, 2011). **Ampliação da oferta de energia através da biomassa.** São Paulo: FIESP - CIESP, 2001. Acesso em 18/03/2011. Disponível em: <www.fiesp.com.br>.

FERNANDES A. J. **Manual da cana-de-açúcar.** Piracicaba, Editora Livrocere, 1984.

FERREIRA L. F. R. **Biodegradação de vinhaça proveniente do processo industrial de cana-de-açúcar por fungos**. 2009. 135p. Tese (doutorado em Agronomia), Escola Superior de Agricultura “Luiz de Queiroz” da Universidade de São Paulo, Piracicaba, 2009.

FERROVIA AMÉRICA LATINA LOGÍSTICA (ALL, 2011). **Distâncias ferroviárias**. Acesso em 06/08/11. Disponível em: <www.all-logistica.com>.

FERROVIA CENTRO-ATLÂNTICA (FCA, 2011). **Distâncias ferroviárias**. Acesso em 06/08/11. Disponível em: <www.fcasa.com.br/>.

FIALHO L. L. **Caracterização da matéria orgânica em processo de compostagem por métodos convencionais e espectroscópicos**. 2007. 170p. Tese (Doutorado) - Instituto de Química de São Carlos, Universidade de São Paulo, São Carlos, 2007.

FIRME L. P. **Cinética de degradação microbiológica de torta de filtro no solo na presença de cádmio e níquel**. 2005. 86p. Dissertação (Mestrado) - Escola Superior de Agricultura Luiz de Queiroz, Universidade de São Paulo, Piracicaba, 2005.

GARCIA J. C. C.; SPERLING E. V. **Emissão de gases de efeito estufa no ciclo de vida do etanol: estimativa nas fases de agricultura e industrialização em Minas Gerais**. Revista Engenharia Sanitária e Ambiental, v. 15, n. 3, 217-222, 2010.

GARCIA M. A. L. **Avaliação de um sistema de plantio mecanizado de cana-de-açúcar**. 2008. 78p. Dissertação (Mestrado) - Escola Superior de Agricultura Luiz de Queiroz, Universidade de São Paulo, São Paulo, 2008.

GREENHOUSE GAS PROTOCOL (GHG, 2009). **The greenhouse gas protocol initiative**. Acesso em 06/08/11. Disponível em: <www.ghgprotocol.gov/>.

GOMES J. F. F. **Produção de colmos e exportação de macronutrientes primários por cultivares de cana-de-açúcar (*Saccharum spp.*)**. 2003. 65p. Dissertação (Mestrado) - Escola Superior de Agricultura Luiz de Queiroz, Universidade de São Paulo, Piracicaba, 2003.

GOOGLE EARTH. **Distâncias rodoviárias**. Acesso em 06/08/11. Disponível em: <www.google.com/earth>.

HANSEN V. A. **Plantio mecanizado de cana-de-açúcar**. Acesso em 28/03/11. Disponível em: <www.flickr.com>.

IDE B. Y. **Entrevista concedida**. Piracicaba, 2011.

INSTITUTO AGRONÔMICO DE CAMPINAS (IAC, 1994). Estudo de caso: Destilarias de álcool e usinas de açúcar. Campinas, Documentos Técnicos, 1994.

INSTITUTO BRASILEIRO DE GEOGRAFIA E ESTATÍSTICA (IBGE, 2010). **Receita com etanol**. Acesso em 06/04/11. Disponível em: <www.ibge.com.br>.

INSTITUTO DE ECONOMIA AGRÍCOLA (IEA, 2010). **O salário real do trabalhador rural**. Acesso em 08/04/2011. Disponível em: <www.iea.sp.gov.br>.

INSTITUTO DE PESQUISA ECONÔMICA APLICADA (IPEA, 2010). **PIB brasileiro**. Acesso em 06/04/2011. Disponível em: <www.ipea.gov.br>.

INTERGOVERNMENTAL PANEL ON CLIMATE CHANGE - IPCC. **Technical summary**. Climate Change 2006: Synthesis Report. Working Group I. Geneva, 2006.

JANINI D. A. **Análise operacional e econômica do sistema de plantio mecanizado de cana-de-açúcar (*Saccharum spp.*)**. 2007. 149p. Dissertação (Mestrado) - Escola Superior de Agricultura Luiz de Queiroz, Universidade de São Paulo, Piracicaba, 2007.

JUN P.; GILLENWATER M.; BARBOUR W. **CO₂, CH₄, and N₂O emissions from transportation-water-borne navigation**. Good Practice Guidance and Uncertainty Management in National Greenhouse Gas Inventories - IPCC, 2001.

KAWABATA C. Y. **Aproveitamento de cinzas da queima de resíduos agroindustriais na produção de compósitos fibrosos e concreto leve para a construção rural.** 2008. 165p. Tese (Doutorado) - Faculdade de Zootecnia e Engenharia de Alimentos, Universidade de São Paulo, Pirassununga, 2008.

LANNES & HOFFMANN. **Auxiliando o agronegócio.** Acesso em 17/07/2011. Disponível em: <www.lannes-hoffmann.com.br/pdf/artigo11.pdf>.

LEÃO R. M. **Álcool energia verde.** São Paulo-SP. Igual Editora, 2002.

LELIS NETO J. A. **Monitoramento de componentes químicos da vinhaça aplicados em diferentes tipos de solo.** 2008, 89p. Dissertação (Mestrado), Escola Superior de Agricultura Luiz de Queiroz, Universidade de São Paulo, Piracicaba, 2008.

LEME P. R.; SILVA S. L.; PEREIRA A. S. C.; PUTRINO S. M.; LANNA D. P. D.; NOGUEIRA FILHO J. C. M. **Utilização do bagaço de cana-de-açúcar em dietas com elevada proporção de concentrados para novilhos *Nelore* em confinamento.** Revista Brasileira de Zootecnia, v.32, n.6, p.1786-1791, 2003.

LEME R. M. **Estimativa das emissões de poluentes atmosféricos e uso de água na produção de eletricidade com biomassa de cana-de-açúcar.** 2005, 160p. Dissertação (Mestrado) - Faculdade de Engenharia Mecânica, Universidade Estadual de Campinas, Campinas, 2005.

LINO J. S. **Evolução do sistema plantio direto e produção de sedimentos no Rio Grande do Sul.** 2010. 119p. Dissertação (Mestrado) - Escola Superior de Agricultura Luiz de Queiroz, Universidade de São Paulo, Piracicaba, 2010.

LOPES C. H. **Glossário de termos técnicos para a indústria sucroalcooleira.** Piracicaba, Editora IAA/PLANALSUCAR, 1986.

LORA B. A. **Potencial de geração de créditos de carbono e perspectivas de modernização do setor sucroalcooleiro do Estado de São Paulo através do mecanismo de desenvolvimento limpo.** 2008. 134p. Dissertação (Mestrado) - Programa Interunidades de Pós-Graduação em Energia da Universidade de São Paulo (Escola Politécnica / Faculdade de Economia e Administração / Instituto de Eletrotécnica e Energia / Instituto de Física), São Paulo, 2008.

MACEDO I. C. *et al.* **Balanço das emissões de gases do efeito estufa na produção e no uso do etanol no Brasil.** Relatório Final da secretária do Meio Ambiente do Estado de São Paulo, abr, 2004.

MACEDO I. C. **Situação atual e perspectivas do etanol.** Estudos Avançados, Instituto de Pesquisa Econômica Aplicada, ano 21, n. 59, 157-165, 2007.

MORAIS M. A. F. D.; COSTA C. C.; GUILHOTO J. J. M.; SOUZA L. G. A.; OLIVEIRA F. C. R. **Externalidades sociais dos combustíveis.** In: SOUZA E. L. L.; MACEDO I. C., coord. **Etanol e bioeletricidade - a cana-de-açúcar no futuro da matriz energética.** São Paulo, Editora Luc Projetos de Comunicação, 2010.

MOSCIATTI J. V. D. **Estudo do ciclo de vida da cana-de-açúcar.** 2008, 40p. Monografia (Graduação) - Pontifícia Universidade Católica do Paraná, Curitiba, 2008.

MINISTÉRIO DA CIÊNCIA E TECNOLOGIA - MCT. **Primeiro inventário brasileiro de emissões antrópicas de gases de efeito estufa.** Brasília, 2002.

MUNDIM J. U. C. **Uso de simulação de eventos discretos para o dimensionamento de frota para colheita e transporte de cana-de-açúcar.** 2009. 118p. Dissertação (Mestrado) - Escola Politécnica, Universidade de São Paulo, São Paulo, 2009.

NEVES J. L. M. **Avaliação de perdas invisíveis em colhedoras de cana-de-açúcar e alternativas para a redução.** 2003. 223p. Tese (Doutorado) - Faculdade de Engenharia Agrícola, Universidade Estadual de Campinas, Campinas, 2003.

NOVO M. C. S. S. **Efeito da palha de cana-de-açúcar e do tamanho de tubérculos no desenvolvimento da tiririca (*Cyperus Rotundus* L.).** 2004. 120p. Tese (Doutorado) - Escola Superior de Agricultura “Luiz de Queiroz”, Universidade de São Paulo, Piracicaba, 2004.

O'DONNELL B.; GOODCHILD A.; COOPER J.; OZAWA T. **The relative contribution of transportation to supply chain greenhouse gas emissions: A case study of American wheat.** Transportation Research Part D, 2009.

OLIVEIRA B. J. **Vinhaça da cana-de-açúcar: fluxos de gases de efeito estufa e comunidades de *archaea* presente no sedimento do canal de distribuição.** 2010. 97p. Dissertação (Mestrado) - Escola Superior de Agricultura Luiz de Queiroz, Universidade de São Paulo, Piracicaba, 2010.

OLIVEIRA J. G. **Perspectivas para a cogeração com bagaço de cana-de-açúcar: potencial do mercado de carbono para o setor sucro-alcooleiro paulista.** 2007, 157p. Dissertação (Mestrado) - Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, São Carlos, 2007.

OLIVETTE M. P. A. **O setor agropecuário no contexto da sustentabilidade - a região Oeste do Estado de São Paulo.** 2005, 310p. Tese (Doutorado) - Faculdade de Filosofia, Letras e Ciências Humanas, Universidade de São Paulo, São Paulo, 2005.

OMETTO A. R. **Avaliação do ciclo de vida do álcool etílico hidratado combustível pelos métodos EDIP, Exergia e Emergia.** 2005, 209p. Tese (Doutorado) - Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, São Carlos, 2005.

ORLANDO FILHO J.; SILVA G. M.; LEME E. J. A. **Utilização agrícola dos resíduos da agroindústria canavieira.** In: ORLANDO FILHO J., coord. **Nutrição e adubação da cana-de-açúcar no Brasil.** Piracicaba, Editora IAA/PLANALSUCAR, 1983.

PARO A. C. **Estudo da contribuição do gás natural no setor elétrico - uma análise de cenários de sua expansão nos setores de geração termelétrica, cogeração e residencial.** 2005, 101p. Dissertação (Mestrado) - Escola Politécnica, Universidade de São Paulo, São Paulo, 2005.

PAULI D. G. **Planejamento da qualidade do plantio mecanizado da cana-de-açúcar.** 2009, 80p. Dissertação (Mestrado) - Escola Superior de Agricultura Luiz de Queiroz, Universidade de São Paulo, Piracicaba, 2009.

PELLEGRINI L. F. **Análise e otimização termo-econômica-ambiental aplicada à produção combinada de açúcar, álcool e eletricidade.** 2009, 349p. Tese (Doutorado) - Escola Politécnica da Universidade de São Paulo, 2009.

PIMENTEL V. C. R. **Alternativas de solução para os impactos físicos de barragens.** 2004. 416p. Dissertação (Mestrado) - Escola Politécnica, Universidade de São Paulo, São Paulo, 2004.

PIRES A.; SCHECHTMAN R. **Políticas internacionais de biocombustíveis.** In: SOUZA E. L. L.; MACEDO I. C., coord. **Etanol e bioeletricidade - a cana-de-açúcar no futuro da matriz energética.** São Paulo, Editora Luc Projetos de Comunicação, 2010.

PRADO T. G. F. **Externalidades do ciclo produtivo da cana-de-açúcar com ênfase na produção de energia elétrica.** 2007. 252p. Dissertação (Mestrado) - Programa Interunidades de Pós-Graduação em Energia da Universidade de São Paulo (Escola Politécnica / Faculdade de Economia e Administração / Instituto de Eletrotécnica e Energia / Instituto de Física), São Paulo, 2007.

RENEWABLE FUELS AGENCY (RFA, 2008). **Carbon and Sustainability Reporting Within the Renewable Transport Fuel Obligation.** Technical Guidance Part Two Carbon Reporting - Default Values and Fuel Chains. London, 2008.

RIBAS M. M. F. **Tratamento de vinhaça em reator anaeróbio operado em batelada sequencial contendo biomassa imobilizada sob condições termofílicas e mesofílicas.** 2006. 198p. Tese (Doutorado) - Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, São Paulo, 2006.

RIROLI T. C. C.; RIPOLI M. L. C.; CASAGRANDE D. V.; IDE B. Y. **Plantio de cana-de-açúcar: estado da arte.** Piracicaba, Edição dos autores, 2007.

RODRIGUES L. **O processo de terceirização e a presença de arranjos institucionais distintos na colheita da cana-de-açúcar.** 2006. 121p. Dissertação (Mestrado) - Escola Superior de Agricultura Luiz de Queiroz, Universidade de São Paulo, São Paulo, 2006.

ROSEIRO M. N. V. **Morbidade por problemas respiratórios em Ribeirão Preto-SP, de 1995 a 2001, segundo indicadores ambientais, sociais e econômicos.** 2002. 170p. Dissertação (Mestrado) - Escola de Enfermagem de Ribeirão Preto, Universidade de São Paulo, Ribeirão Preto, 2002.

ROSSETTO A. J. **Utilização agronômica dos subprodutos e resíduos da indústria açucareira e alcooleira.** In: PARANHOS S. B., coord. **Cana-de-açúcar – cultivo e utilização.** Campinas, Editora Fundação Cargill, 1987.

ROSSETTO R. **A cana-de-açúcar e a questão ambiental.** In: DINARDO-MIRANDA L. L.; VASCONCELOS A. C. M.; LANDELL G. A., coord. **Cana-de-açúcar.** Campinas, Instituto Agronômico, 2010.

ROSSETTO R.; DIAS F. L. F; VITTI A. C. **Fertilidade do solo, nutrição e adubação.** In: DINARDO-MIRANDA L. L.; VASCONCELOS A. C. M.; LANDELL G. A., coord. **Cana-de-açúcar.** Campinas, Instituto Agronômico, 2010.

SAMPAIO M. A. P. **Aceleração do tempo e encurtamento das distâncias - o histórico papel das técnicas no processo de interiorização e modernização da canavieira paulista: séculos XVI a XXI.** 2010. 219p. Dissertação (Mestrado) - Faculdade de Filosofia, Letras e Ciências Humanas, Universidade de São Paulo, São Paulo, 2010.

SCARPARI M. S. **Modelos para a previsão da produtividade da cana-de-açúcar (*Saccharum spp.*) através de parâmetros climáticos.** 2002. 94p. Dissertação (Mestrado) - Escola Superior de Agricultura Luiz de Queiroz, Universidade de São Paulo, Piracicaba, 2002.

SEABRA J. E. A. **Avaliação técnico-econômica de opções para o aproveitamento integral da biomassa de cana no Brasil.** 2008. 298p. Tese (Doutorado) - Faculdade de Engenharia Mecânica, Universidade Estadual de Campinas, Campinas, 2008.

SECRETARIA ESTADUAL DE LOGÍSTICA E TRANSPORTES. **Distâncias na hidrovia Tietê-Paraná.** Acessado em 19/09/2011. Disponível em: <www.transportes.sp.gov.br>.

SEGOVIA V. M. S. **Perfil tecnológico dos fornecedores de cana-de-açúcar e entraves para a adoção de sistemas agroflorestais na região de Piracicaba, SP - Brasil.** 2004. 103p. Dissertação (Mestrado) - Escola Superior de Agricultura Luiz de Queiroz, Universidade de São Paulo, Piracicaba, 2004.

SILVA-OLAYA A. M. **Emissão de dióxido de carbono após diferentes sistemas de preparo do solo na cultura da cana-de-açúcar.** 2010. 103p. Dissertação (Mestrado) - Escola Superior de Agricultura Luiz de Queiroz, Universidade de São Paulo, Piracicaba, 2010.

SILVA C. R. U. **Balanco de energia e das emissões de gases de Balanco de energia e das emissões de gases de brasileiro.** 2009. 150p. Dissertação (Mestrado), Faculdade de Engenharia Mecânica, Universidade Estadual de Campinas, Campinas, 2009.

SOARES L. H. B.; ALVES B. J. R.; URQUIAGA S.; BODDEY R. M. **Mitigação das emissões de gases efeito estufa pelo uso de etanol da cana-de-açúcar produzido no Brasil.** Norma técnica da EMBRAPA, abr, 2009.

SOUZA O.; SANTOS I. E. **Aproveitamento do bagaço de cana-de-açúcar pelos ruminantes.** Brasília, Comunicado Técnico do Ministério da Agricultura, Pecuária e Abastecimento, 2002.

SOUZA P. H. T. O. **Rede neural artificial para monitoramento em tempo real da concentração de potássio na vinhaça *in natura***. 2010 A. 85p. Dissertação (Mestrado) - Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, São Carlos, 2010 A.

SOUZA S. P. **Produção integrada de biocombustíveis: uma proposta para reduzir o uso de combustível fóssil no ciclo de vida do etanol de cana-de-açúcar**. 2010 B. 144p. Dissertação (Mestrado) - Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, São Carlos, 2010 B.

STADUTO J. A. R. **Determinação dos salários na agropecuária brasileira - período de 1971 a 1996**. 2002. 141p. Tese (Doutorado) - Escola Superior de Agricultura Luiz de Queiroz, Universidade de São Paulo, Piracicaba, 2002.

STUPIELLO J. P. **A cana-de-açúcar como matéria-prima**. In: PARANHOS S. B., coord. **Cana-de-açúcar - cultivo e utilização**. Campinas, Editora Fundação Cargill, 1987.

UNIÃO DA INDÚSTRIA DE CANA-DE-AÇÚCAR (UNICA, 2010). **Biocombustíveis certificados: como chegar lá**. Acessado em 18/02/11. Disponível em: <www.unica.com.br>.

UNIÃO DA INDÚSTRIA DE CANA-DE-AÇÚCAR (UNICA, 2011). **Protocolo agroambiental do setor sucroenergético**. Acessado em 13/04/11. Disponível em: <www.unica.com.br>.

UNIÃO DOS PRODUTORES DE BIOENERGIA (UDOP, 2011). **Imagens do setor sucroalcooleiro**. Acessado em 19/02/11. Disponível em: <www.udop.com.br>.

UNITED STATES DEPARTMENT OF ENERGY (DOE, 2007). **REET - Greenhouse gases, Regulated Emissions, and Energy use in Transportation**. Acessado em 19/08/11. Disponível em: <<http://energy.gov>>.

UYEDA C. A. **Influência da aplicação de vinhaça na condutividade hidráulica do solo saturado e no escoamento superficial.** 2009. 67p. Tese (Doutorado) - Escola Superior de Agricultura Luiz de Queiroz, Universidade de São Paulo, Piracicaba, 2009.

VIANA A. B. **Tratamento anaeróbio de vinhaça em reator UASB operado em temperatura na faixa termofílica (55°C) e submetido ao aumento progressivo de carga orgânica.** 2006. 102p. Dissertação (Mestrado) - Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, São Carlos, 2006.

VOLL C. E. **Aplicação de vinhaça e do extrato de palhiço de cana-de-açúcar no controle de plantas daninhas.** 2005. 57p. Dissertação (Mestrado) - Escola Superior de Agricultura Luiz de Queiroz, Universidade de São Paulo, Piracicaba, 2005.

WADT L. C. **Cultivo de *Pleurotus spp.* em vinhaça visando à produção de biomassa e exopolissacarídeos.** 2008. 110p. Dissertação (Mestrado) - Centro de Energia Nuclear na Agricultura, Universidade de São Paulo, Piracicaba, 2008.

ANEXO A

Tabela 15 - Fatores de emissão referentes à etapa do manejo agrícola

Insumo/atividade	Fator de emissão	Unidade
Emissões de N ₂ O do solo	6,163	kg CO _{2e} /ha
Nitrato de amônia	6,8	kg CO _{2e} /kg nutriente
Sulfato de amônia	1,62	kg CO _{2e} /kg nutriente
Uréia	1,33	kg CO _{2e} /kg nutriente
Nitrato de cálcio	10,9	kg CO _{2e} /kg nutriente
Uréia nitrato de amônio	4,09	kg CO _{2e} /kg nutriente
NPK	2	kg CO _{2e} /kg nutriente
Superfosfato triplo	0,354	kg CO _{2e} /kg nutriente
Rocha fosfática	0,095	kg CO _{2e} /kg nutriente
Mono fosfato de amônia	0,596	kg CO _{2e} /kg nutriente
Cloreto de potássio	0,333	kg CO _{2e} /kg nutriente
Cal	0,124	kg CO _{2e} /kg nutriente
Fertilizantes de Magnésio	0,769	kg CO _{2e} /kg nutriente
Fertilizantes de sódio	1,62	kg CO _{2e} /kg nutriente
Pesticidas	17,3	kg CO _{2e} /kg nutriente
Óleo diesel	3,0874	kg CO _{2e} /l diesel
N ₂ O	0,022	kg CO _{2e} /kg lixo queimado
Metano	0,0585	kg CO _{2e} /kg lixo queimado

Fonte: RFA (2008)

Tabela 16 - Fatores de emissão referentes ao processo industrial

Insumo químico	Fator de emissão	Unidade	Fonte
Cal virgem	0,88	(kg CO _{2e} / kg)	Simapro (2008)
Ácido fosfórico	1,150	(kg CO _{2e} / kg)	Simapro (2008)
Ácido sulfúrico	0,34	(kg CO _{2e} / kg)	Simapro (2008)
Lubrificantes	0,71	(kg CO _{2e} / m ³)	Simapro (2008)

Fonte: Souza (2010 B)

APÊNDICE A

O processo de fabricação do etanol

Após ser submetida à lavagem, a cana-de-açúcar passa por um processo conhecido como preparação. De acordo com Caltarosso (2008), na etapa de preparo, que tem por objetivo aumentar o poder de empacotamento da matéria-prima e realizar o máximo de rompimentos das células, para facilitar a extração do caldo durante a moagem, a cana-de-açúcar, conduzida por esteiras rolantes, passa pelos seguintes equipamentos:

- Jogo de lâminas niveladoras: objetiva uma alimentação mais uniforme do colchão de cana-de-açúcar na esteira metálica;
- Picadores: têm a função de fragmentar a cana-de-açúcar, sem extrair o caldo;
- Desfibradores: têm por finalidade desintegrar por completo a estrutura do colmo da cana-de-açúcar;
- Espalhadores: estes equipamentos têm a função de descompactar o material oriundo das etapas supracitadas;
- Eletroímã: visa à remoção de materiais ferrosos que possam vir com a cana-de-açúcar desfibrada. Isso ajuda a evitar a quebra dos rolos das moendas.

Conforme Caltarosso (2008), após a etapa de preparação, começa a operação de moagem, objetivando extrair o máximo de sacarose contida no caldo de cana-de-açúcar. Isso acontece por meio de pressão exercida por sucessivos esmagamentos nos ternos da moenda.

Ademais, cabe ressaltar, que um objetivo secundário da moagem é a produção de um bagaço final em condições favoráveis a queima eficiente nas caldeiras, ou seja, com baixa umidade e de espessura fina. Carvalho (2009) explicou que quando o bagaço é queimado nas caldeiras, ocorre liberação de energia para vaporizar a água que alimenta as turbinas movidas a vapor. Tem-se então, a transformação de energia térmica em energia mecânica.

Oliveira (2007) salientou que além do esmagamento, é necessário que haja um sistema de embebição eficiente, para que a extração de sacarose seja elevada. Para isso, adiciona-se água ou caldo diluído à matéria submetida à moagem, sob a forma de

aspersão, jatos fortes ou lençol de água. A embebição utilizada pode ser simples, devido à adição apenas de água, ou do tipo composta.

Lopes (1986) apontou que a embebição composta, que é o processo mais utilizado pelas usinas, consiste em adicionar água somente antes do último terno da moenda, sendo que o caldo extraído do último terno é aplicado como embebição no antepenúltimo terno. Esse procedimento acontece, sucessivamente, até o segundo terno. De acordo com Caltarosso (2008), esta operação permite a retirada de, aproximadamente, 97% da sacarose contida na cana-de-açúcar.

Bernardo Neto (2009) ainda comentou que a extração da sacarose da cana-de-açúcar ainda pode ocorrer por meio do sistema de difusão. Neste processo, um difusor, em conjunto com um ou dois ternos de secagem são utilizados para obtenção do açúcar por meio do sistema de lixiviação.

Após o caldo ser extraído da cana-de-açúcar, e antes de ser encaminhado para a produção de etanol, ele pode ser tratado. Leme (2005) expôs que não há uma padronização no tratamento: há usinas e destilarias que não fazem tratamento algum, outras o pasteurizam, e ainda têm as que dão ao caldo extraído da cana-de-açúcar um tratamento igual ao recebido pelo caldo que será utilizado na fabricação de açúcar.

Quando tratado, conforme Caltarosso (2008), o processo físico inicia-se com o caldo passando por peneiras, separadores de areia e hidrociclones para a remoção das impurezas mais espessas. No entanto, esses aparelhos não são capazes de remover impurezas menores (solúveis, insolúveis ou coloidais). Logo, há a necessidade de efetuar uma sequência de procedimentos, objetivando coagulá-las, para, posteriormente, removê-las por decantação.

Posteriormente a etapa supracitada, inicia-se o tratamento químico. Conforme explicado por Bernardo Neto (2009), em tanques misturadores, ocorre a adição de leite de cal (Ca(OH)_2), num processo denominado de calagem. De acordo com Albuquerque (2005), a calagem tem por finalidade eliminar corantes, neutralizar ácidos orgânicos e auxiliar na formação de sulfito de cálcio e fosfato de cálcio. Esses produtos, ao sedimentarem, arrastam impurezas presentes no líquido: solúveis, insolúveis e coloidais. Durante a calagem, o pH do caldo de cana-de-açúcar que está sendo tratado se eleva e passa a assumir valores neutros.

Depois da calagem, conforme elucidado por Ceballos-Schiavone (2009), o caldo é aquecido a uma temperatura que se aproximam dos 105° C. Esse aquecimento visa acelerar e facilitar as reações de coagulação das albuminas, graxas, ceras e gomas. Essas impurezas são separadas por floculação e precipitação nos decantadores.

Depois de aquecido, de acordo com Caltarosso (2008), o caldo de cana-de-açúcar é submetido à operação de flasheamento, passando por um equipamento denominado balão de *flash*, onde o ar contido no caldo é eliminado por intermédio da diminuição brusca de pressão. Quando presente, este ar dificulta a decantação das impurezas mais leves.

Sequencialmente há a etapa denominada de decantação ou clarificação. Caltarosso (2008) elucidou que é neste momento do tratamento que as impurezas floculadas nas operações anteriores são retiradas e o caldo de cana-de-açúcar é purificado.

Conforme Pellegrini (2009), do processo de decantação, além do caldo purificado surge um acúmulo de impurezas denominadas de lodo, que é submetido ao artifício da filtração em filtros rotativos a vácuo. Com isso é possível recuperar alguma sacarose ainda existente no caldo.

Depois da filtração, o lodo remanescente recebe o nome de torta de filtro e é armazenado, em geral, no pátio externo da usina, para ser utilizado como adubo orgânico na lavoura durante o próximo plantio de cana-planta ou trato cultura da cana-soca.

De acordo com Caltarosso (2008), após a administração dos processos físicos e químicos de tratamento, o caldo de cana-de-açúcar deve resfriado, em trocadores de calor, até atingir a temperatura de, aproximadamente, 30°C.

Inicia-se então um procedimento bioquímico chamado de fermentação. Em suma, Monteiro (2010) explicou que a fermentação é a atividade de transformar o açúcar em álcool. Esse processo é dividido, conforme apontou Caltarosso (2008), em três etapas: preparação do mosto, preparação do fermento e fermentação.

De acordo com Stupiello (1987), mosto é um líquido açucarado apto a fermentar. Logo, durante a preparação do mosto, visando uma fermentação mais eficiente, a concentração da solução de açúcar é ajustada. Em geral, conforme Carvalho (2009), o mosto é

composto de caldo clarificado, melaço (proveniente da produção de açúcar) e água. Pellegrini (2009) afirmou que o mosto apresenta uma concentração final entre 16 a 20° Brix (porcentagem em peso de sólidos solúveis contidos em uma solução).

No que concerne ao preparo do fermento, de acordo com Pellegrini (2009), normalmente, utiliza-se o processo de fermentação *Melle-Boinot*. Bernardo Neto (2009) afirmou que esse é o procedimento mais empregado e também é conhecido como fermentação por batelada.

Após o caldo de cana-de-açúcar ser submetido aos procedimentos supracitados, inicia-se, então, o processo de fermentação. De acordo com Bernardo Neto (2009), em condições anaeróbicas, ou seja, sem a presença de oxigênio, a fermentação alcoólica ocorre devido a uma série de reações químicas catalisadas por leveduras. Caltarosso (2008) explicou que tal processo acontece em dornas de fermentação, onde o mosto é misturado com o pé-de-cuba na proporção de 2:1, respectivamente.

Conforme Albuquerque (2005), a sacarose é transformada em álcool segundo a reação de *Gay-Lussac*. Na equação estequiométrica dessa reação química, é possível observar que a sacarose ($C_{12}H_{22}O_{11}$), absorvendo uma molécula de água (H_2O), se desdobra em açúcares redutores, ou seja, em glicose ($C_6H_{12}O_6$) e frutose ($C_6H_{12}O_6$), que, por sua vez, tornam-se álcool, liberando também dióxido de carbono e calor.

De acordo com Carvalho (2009), para a fermentação, é necessário que a temperatura da dorna seja mantida entre 28 e 30°C. A duração média do processo varia entre seis e oito horas, resultando em um vinho fermentado com, aproximadamente, 9,5% de teor alcoólico.

Finalizada a fermentação nas dornas, o vinho é centrifugado. Conforme explicado por Albuquerque (2005), esse processo tem como principal objetivo recuperar as leveduras (*Saccharomyces cerevisiae*) utilizadas para catalisar a fermentação.

É válido salientar que se procura evitar a infecção bacteriana. Então, conforme exposto por Ceballos-Schiavone (2009), a levedura recuperada no processo de centrifugação sofre um tratamento antes ser utilizada em uma fermentação futura. Nesse tratamento são adicionados água, objetivando reduzir o teor alcoólico, e ácido sulfúrico. A mistura originada neste procedimento é comumente conhecida como pé-de-cuba.

Depois de centrifugado, ou seja, sem a presença de leveduras, o vinho delevedurado é enviado às colunas de destilação, para a separação do álcool. De acordo com Leão (2002), esse processo físico, baseado em diferentes pontos de ebulição de seus componentes, serve para separar líquidos que estão misturados pelo processo de condensação.

Conforme Caltarosso (2008), a destilação, visando separar o vinho do etanol, é efetuada em três colunas superpostas:

- Coluna A:
 - *Input*: o vinho centrifugado;
 - *Output*: vinhaça e flegma.
- Coluna B:
 - *Input*: flegma;
 - *Output*: flegmaça, óleo fúsil e álcool hidratado.
- Coluna C:
 - *Input*: álcool hidratado e ciclo hexano;
 - *Output*: álcool anidro.

De acordo com Albuquerque (2005), cabe elucidar que o álcool que atinge um teor na ordem de 96° GL é chamado de álcool hidratado. Para a produção de álcool anidro, com um teor alcoólico de 99,7° GL, há a necessidade de acrescentar ciclo hexano como desidratante, pois o álcool hidratado constitui uma mistura azeotrópica, ou seja, os componentes não são separados por um processo de destilação simples. Após a separação, o desidratante é recuperado e reaproveitado.

Finalmente, conforme Carvalho (2009), após o processo de transformação da cana-de-açúcar em etanol, sob a forma de combustível hidratado ou anidro, esse é quantificado e armazenado. A armazenagem acontece em tanques metálicos com capacidade para grandes volumes, até que o produto seja comercializado.

APÊNDICE B

O processo de cogeração

De acordo com Carvalho (2009), na etapa de moagem da cana-de-açúcar, a sacarose contida no caldo é separada do bagaço. Tal resíduo é considerado uma biomassa, e pode ser aproveitado com diversas finalidades.

Do ponto de vista energético, para fim de outorga de empreendimentos do setor elétrico, biomassa é todo recurso renovável oriundo de matéria orgânica (de origem animal ou vegetal) que pode ser utilizada na produção de energia. Assim como a energia hidráulica e outras fontes renováveis, a biomassa é uma forma indireta de energia solar. A energia solar é convertida em energia química, através da fotossíntese, base dos processos biológicos de todos os seres vivos (AGÊNCIA NACIONAL DE ENERGIA ELÉTRICA (ANEEL, 2005).

De acordo com Lopes (1986), o bagaço pode ser definido como um resíduo fibroso resultante da moagem da cana-de-açúcar, constituído de fibra mais caldo residual. Conforme Kawabata (2008), o bagaço da cana-de-açúcar *in natura* é composto por 50% de umidade, 45% de fibras lignocelulósicas e 3% de sólidos solúveis em água. De acordo com Macedo *et al.* (2004) e Dantas Filho (2009), são gerados, em média, aproximadamente, 280 kg de bagaço e 140 kg de palha para cada tonelada de cana-de-açúcar moída no Brasil.

Paro (2005) explicou que cogeração é o ato de se produzir duas ou mais formas de energia a partir de um único combustível, sendo que o processo mais comum é a produção de energia elétrica e térmica. Quando se utiliza uma biomassa, o ciclo mais comum é o *Bottoming Cycle*, onde o calor de processo é retirado no início da operação.

De acordo Souza e Santos (2002), Leme *et al.* (2003), Kawabata (2008), Barbieri e Barcelos (2009), Dantas Filho (2009) e Dantas (2010), dentre as atuais e mais promissoras funcionalidades do bagaço, merecem destaque a cogeração de energia elétrica, a fabricação de papel, a composição de chapas estruturais para a indústria moveleira, a alimentação de animais, a produção de fertilizante orgânico e a sua utilização como material alternativo à areia e o cimento na construção civil.

Dantas Filho (2009) explicou que, na maioria das usinas brasileiras, depois que o caldo é extraído da cana-de-açúcar, o bagaço é conduzido por esteiras à caldeira, onde é submetido a uma pressão de 21 bar e a uma temperatura de 300° C. A operação de queima do bagaço resulta na produção média de 450 a 500 kg de vapor d'água.

Lora (2008) elucidou que esse vapor acionará as turbinas da usina, transformado a energia térmica em energia mecânica e elétrica. Pellegrini (2009) salientou que além dos geradores, que provêm energia elétrica para os demais setores da indústria, tais turbinas movimentam os instrumentais utilizados na fase de preparo da cana-de-açúcar: os picadores, os desfibradores e as moendas.

Conforme Dantas (2010), todas as usinas de cana-de-açúcar instaladas no Estado de São Paulo são auto-suficientes no que concerne a utilização de energia elétrica utilizada durante os processos industriais de fabricação de açúcar e álcool. Isso acontece, diretamente, devido à cogeração a partir da queima do bagaço e da palha da cana-de-açúcar.

No Brasil, desde 07/07/1995, as usinas beneficiadoras de cana-de-açúcar são incentivadas a produzirem energia elétrica, devido à promulgação da Lei Federal nº 9.074. Tal Lei versa sobre a liberação da comercialização dos excedentes de energia elétrica. Criou-se, então, uma terceira fonte de renda bastante significativa para os produtores de açúcar e álcool.

Conforme Dantas Filho (2009) o excedente produzido é comercializado com a concessionária responsável pela distribuição de energia elétrica nas cidades localizadas na região próxima à usina. Devido essa proximidade geográfica, a geração descentralizada proporciona poucas perdas de energia.

Ademais, Dantas Filho (2009) também destacou que outro fator que corrobora para a comercialização da energia elétrica proveniente da cogeração, é que o período de safra da cana-de-açúcar, que ocorre, geralmente, entre os meses de março e novembro, coincide com as épocas de estiagem, ou seja, quando há diminuição das chuvas, arrefecendo, assim, a oferta de energia elétrica por parte das hidrelétricas.

De acordo com Prado (2007), é válido ressaltar que a cogeração não proporciona apenas benesses econômicas às usinas, mas também traz benefícios para o meio ambiente e para a sociedade como um todo.

APÊNDICE C

Análise dimensional das variáveis presentes na planinha de cálculo da metodologia *Renewable Transport Fuel Obligation (RTFO)*

1. Cálculo das emissões na etapa do manejo agrícola da cana-de-açúcar

- Emissões do solo:

$$Kg \text{ de nitrogênio} * \text{Fator de emissão} \div Y \div \lambda = \quad (AC1)$$

$$= \left\{ \frac{\left[\frac{kg \ N}{ha.ano} \right] * \left[\frac{kg \ CO_{2e}}{ha} \right]}{\left[\frac{t \ cana-de-açúcar}{ha.ano} \right] * \left[\frac{t \ etanol}{t \ cana-de-açúcar} \right]} \right\} \quad (AC2)$$

$$= \left[\frac{kg \ CO_{2e}}{t \ etanol} \right] \quad (AC3)$$

- Emissões com os insumos agrícolas:

$$\text{Quantidade do insumo} * \text{Fator de emissão} \div Y \div \lambda = \quad (AC4)$$

$$= \left\{ \frac{\left[\frac{kg \ insumo}{ha.ano} \right] * \left[\frac{kg \ CO_{2e}}{kg \ insumo} \right]}{\left[\frac{t \ cana-de-açúcar}{ha.ano} \right] * \left[\frac{t \ etanol}{t \ cana-de-açúcar} \right]} \right\} \quad (AC5)$$

$$= \left[\frac{kg \ CO_{2e}}{t \ etanol} \right] \quad (AC6)$$

- Emissões com diesel utilizado em operações agrícolas:

$$\text{Volume utilizado de diesel} * \text{Fator de emissão} \div Y \div \lambda = \quad (AC7)$$

$$= \left\{ \frac{\left[\frac{litros}{ha.ano} \right] * \left[\frac{kg \ CO_{2e}}{litros} \right]}{\left[\frac{t \ cana-de-açúcar}{ha.ano} \right] * \left[\frac{t \ etanol}{t \ cana-de-açúcar} \right]} \right\} \quad (AC8)$$

$$= \left[\frac{kg \ CO_{2e}}{t \ etanol} \right] \quad (AC9)$$

- Emissões com a queima do canavial:

$$Lixo * Fator de emissão * \% \text{ área colhida com queimada } \div \lambda = \quad (AC10)$$

$$= \left\{ \frac{\left[\frac{kg \text{ lixo}}{t \text{ cana-de-açúcar}} \right] * \left[\frac{kg CO_{2e}}{kg \text{ lixo}} \right]}{\left[\frac{t \text{ etanol}}{t \text{ cana-de-açúcar}} \right]} \right\} \quad (AC11)$$

$$= \left[\frac{kg CO_{2e}}{t \text{ etanol}} \right] \quad (AC12)$$

2. Cálculo das emissões na etapa do transporte da matéria-prima da lavoura até a usina

$$Distância \text{ média } * consumo \text{ de combustível } * Fator \text{ de emissão } \div \lambda = \quad (AC13)$$

$$= \left\{ \frac{\left[[km] * \left[\frac{MJ}{t \text{ cana-de-açúcar} * km} \right] * \left[\frac{kg CO_{2e}}{MJ} \right] \right]}{\left[\frac{t \text{ etanol}}{t \text{ cana-de-açúcar}} \right]} \right\} \quad (AC14)$$

$$= \left[\frac{kg CO_{2e}}{t \text{ etanol}} \right] \quad (AC15)$$

3. Cálculo das emissões na etapa da logística do etanol até uma unidade de armazenamento

$$= \left\{ \left[[km] * \left[\frac{MJ}{t \text{ etanol} * km} \right] * \left[\frac{kg CO_{2e}}{MJ} \right] \right] \right\} \quad (AC16)$$

$$= \left[\frac{kg CO_{2e}}{t \text{ etanol}} \right] \quad (AC17)$$