



**MINISTÉRIO DA EDUCAÇÃO
UNIVERSIDADE FEDERAL DO PIAUÍ
PRÓ-REITORIA DE ENSINO DE PÓS-GRADUAÇÃO
COORDENADORIA GERAL DE PÓS-GRADUAÇÃO
PROGRAMA REGIONAL DE PÓS-GRADUAÇÃO EM DESENVOLVIMENTO E
MEIO AMBIENTE (PRODEMA)
MESTRADO EM DESENVOLVIMENTO E MEIO AMBIENTE (MDMA)
SUBPROGRAMA PRODEMA/PRPG/UFPI**

LILIAN DE CASTRO MORAES PINTO

ECOEFICIÊNCIA NA PRODUÇÃO SUCROALCOOLEIRA NO PIAUÍ

Orientadora: Prof.^a Dr.^a Maria do Socorro Lira
Monteiro

Teresina
2017

LILIAN DE CASTRO MORAES PINTO

ECONOMIA NA PRODUÇÃO SUCROALCOOLEIRA NO PIAUÍ

Dissertação apresentada ao Programa Regional de Pós-Graduação em Desenvolvimento e Meio Ambiente (PRODEMA) da Universidade Federal do Piauí (UFPI), como requisito à obtenção do título de Mestre em Desenvolvimento e Meio Ambiente. Área de concentração: Desenvolvimento do Trópico Ecotonal do Nordeste. Linha de Pesquisa: Políticas de Desenvolvimento e Meio Ambiente.

Orientadora: Prof.^a Dr.^a Maria do Socorro Lira Monteiro.

Teresina
2017

FICHA CATALOGRÁFICA
Universidade Federal do Piauí
Biblioteca Comunitária Jornalista Carlos Castello Branco
Serviço de Processamento Técnico

P659e Pinto, Lilian de Castro Moraes.
Ecoeficiência na produção sucroalcooleira no Piauí / Lilian de
Castro Moraes Pinto. -- 2017.
174 f. : il.

Dissertação (Mestrado) – Universidade Federal do Piauí, Programa
Regional de Pós-Graduação em Desenvolvimento e Meio Ambiente
(PRODEMA/UFPI/ TROPEN), Teresina, 2017.

“Orientação: Prof^a. Dr^a. Maria do Socorro Lira Monteiro.”


1. Cana de açúcar - Sustentabilidade. 2. Etanol. 3. Açúcar.
4. Biocombustível. I. Título.

CDD 338.173 61

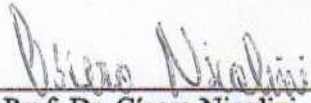


UNIVERSIDADE FEDERAL DO PIAUÍ - UFPI
PRÓ-REITORIA DE ENSINO PÓS-GRADUAÇÃO - PRPG
MESTRADO EM DESENVOLVIMENTO E MEIO AMBIENTE - MDMA

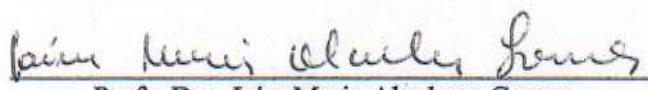
Ata da Reunião da Comissão Julgadora da Defesa de Dissertação de Mestrado de **LILIAN DE CASTRO MORAES PINTO**. Aos sete dias do mês de abril do ano de dois mil e dezessete, às duas horas e trinta minutos, no AUDITÓRIO do TROPEN, sob a Presidência do Profa. Dra. Maria do Socorro Lira Monteiro, em sessão pública, reuniu-se a Comissão Julgadora da Defesa de Dissertação de **LILIAN DE CASTRO MORAES PINTO**, aluna do Curso de Pós-Graduação em "DESENVOLVIMENTO E MEIO AMBIENTE", visando à obtenção do título de "MESTRE EM DESENVOLVIMENTO E MEIO AMBIENTE", assim constituída: Profa. Dra. Maria do Socorro Lira Monteiro (Orientadora); Profa. Dra. Jaira Maria Alcobaça Gomes (Membro interno ao Programa) e o Prof. Dr. Cícero Nicolini (Membro externo ao Programa). Iniciados os trabalhos, a candidata submeteu-se à defesa de sua dissertação, intitulada "ECOEFIÊNCIA NA PRODUÇÃO SUCROALCOOLEIRA NO PIAUÍ". Terminada a defesa, procedeu-se ao julgamento dessa prova, cujo resultado foi o seguinte, observada a ordem de arguição: Prof. Dr. Cícero Nicolini – **APROVADA**; Profa. Dra. Jaira Maria Alcobaça Gomes – **APROVADA**; Profa. Dra. Maria do Socorro Lira Monteiro (Orientadora) – **APROVADA**. Apurados os resultados, verificou-se que a candidata foi habilitada, fazendo jus, portanto, ao título de "MESTRE EM DESENVOLVIMENTO E MEIO AMBIENTE", área de concentração: "DESENVOLVIMENTO DO TRÓPICO ECOTONAL DO NORDESTE". Do que, para constar, lavrou-se a presente ata, que vai assinada pelos senhores membros da Comissão Julgadora e por mim, Coordenadora do Curso. Teresina, 07 de abril de 2017. A pós-graduada terá o prazo de 60 (sessenta) dias para entrega da versão definitiva da dissertação e de toda documentação exigida em lei, sob a pena da não obtenção do título. O documento em pauta terá validade de 60 (sessenta) dias a contar da data da defesa.




Prof. Dra. Maria do Socorro Lira Monteiro
(Orientadora)



Prof. Dr. Cícero Nicolini
(Membro Externo ao Programa – UESPI)



Profa. Dra. Jaira Maria Alcobaça Gomes
(Membro Interno ao Programa – UFPI)



Profa. Dra. Giovana Mira de Espindola
(Coordenadora do Curso)

Aos meus filhos, Melissa, Alice
e Mikael, que merecem viver
uma vida longa em um planeta
saudável.

AGRADECIMENTOS

A Deus, por sempre ter mais a agradecer do que pedir.

Aos meus pais, Josaphat e Mariluce, por acreditarem que a educação seria o melhor presente a receber.

Ao meu esposo, Daniel, maior incentivador da minha vida acadêmica, pelo apoio.

À minha orientadora, Prof.^a Dr.^a Maria do Socorro Lira Monteiro, por ter aceito uma bióloga sob suas asas e pela confiança que depositou em mim.

À Prof.^a Dr.^a Jaíra Maria Alcobaça Gomes, pela participação na Banca de Qualificação e de Defesa e por contribuir desde o Seminário Integrador I com o processo de construção e enriquecimento deste trabalho.

Ao Prof. Dr. Francisco de Alcântara Neto, pela disponibilidade em integrar a Banca de Qualificação e pelas valiosas sugestões, que contribuíram para a versão final do texto.

Ao Prof. Dr. Cícero Nicolini, por fazer parte da Banca de Defesa desta dissertação.

À Fundação de Amparo à Pesquisa do Estado do Piauí (FAPEPI), pela concessão de bolsa de estudo, indispensável na execução da pesquisa.

Aos professores e mestres do Programa de Pós-Graduação em Meio Ambiente e Desenvolvimento, pelo conhecimento transmitido.

Aos companheiros e colegas de mestrado, cujo apoio e amizade aliviaram o peso da caminhada e deram força para prosseguir.

A todos que, direta ou indiretamente, participaram deste trabalho, o meu sincero obrigado.

RESUMO

A procura por fontes alternativas de energia para substituir o uso de combustíveis fósseis evidenciou o etanol, biocombustível utilizado pelo Brasil desde 1975. Entretanto, a sustentabilidade da produção é questionada, devido aos impactos negativos causados pelo cultivo da cana de açúcar. O incentivo governamental para o crescimento do setor sucroenergético e a expansão do cultivo para regiões não exploradas do Nordeste despertaram para o estudo dos impactos ambiental e econômico dessa atividade no Piauí. Nesse sentido, questionou-se: a produção sucroalcooleira no Piauí se processa de forma ecoeficiente? Esta dissertação encerrou a hipótese de que a produção de açúcar e de álcool, por consumir grande quantidade de água e energia, emitir Gases de Efeito Estufa (GEE), gerar resíduos e requerer vastas dimensões de terra para o cultivo da matéria-prima, não ocorre de maneira ecoeficiente. Com vistas a responder o problema e constatar ou não a hipótese, objetivou-se analisar elementos e indicadores de ecoeficiência na produção sucroalcooleira no estado do Piauí. Para tanto, especificamente, contextualizou-se historicamente o cultivo de cana de açúcar no Brasil, no Nordeste e no Piauí; circunstanciou-se a produção de álcool e de açúcar; examinaram-se indicadores de ecoeficiência de valor (lucro e quantidade do produto) e de influência ambiental (consumo de energia, emissões de GEE, geração de resíduos sólidos e uso do solo) para os processos de produção de açúcar e álcool no Piauí em 2015; e avaliou-se qualitativamente a produção sucroalcooleira no mesmo, a partir de análise interpretativa dos ecoindicadores. Como suporte teórico/metodológico deste estudo, empregou-se a norma ABNT NBR ISO 14045:2014, que envolve Avaliação do Ciclo de Vida. Sendo assim, embasado no inventário do ciclo de vida do etanol e do açúcar no Piauí, a análise revelou que comparativamente ao sistema produtivo de álcool, o de açúcar apresentou maior ecoeficiência no tocante ao consumo de energia fóssil, emissões de GEE e geração de resíduos sólidos. Porém, detectou-se que a produção de álcool foi parcialmente mais ecoeficiente que a de açúcar quanto ao uso do solo, em função do aproveitamento de resíduo do processamento da cana, o melaço, em parte do processo produtivo. Adicionalmente, evidenciou-se que apenas um dos ecoindicadores construídos obteve resultado positivo para os dois produtos, o de emissões de GEE baseado na quantidade produzida, o que apontou que não obstante o reaproveitamento dos resíduos sólidos e líquidos, a produção de açúcar e de etanol no Piauí não foi ecoeficiente em 2015.

Palavras-chave: Cana de açúcar. ISO 14045:2014. Sustentabilidade. Etanol. Açúcar.

ABSTRACT

The search for alternative energy sources to replace fossil fuels has brought to light the ethanol, a biofuel which has been used in Brazil since 1975. However, the sustainability of its production is questioned due to the negative impacts caused by the cultivation of sugarcane. The governmental incentive for the growth of the sugar-energy sector and the expansion of cultivation to unexplored regions of the Northeast evidenced the need to study the environmental and economic impacts of this activity in Piauí. Thus, the question was: is the production of sugar and ethanol in Piauí conducted eco-efficiently? This dissertation supposed that the production of sugar and alcohol, because of its consumption of large amounts of water and energy, emission of greenhouse gases (GHG), generation of residues and demand for considerable dimensions of land for the cultivation of the raw material, does not occur ecoefficiently. In order to answer the question and verify the hypothesis, the main objective was to analyze elements and indicators of eco-efficiency in sugar-alcohol production in the state of Piauí. Therefore, the cultivation of sugarcane in Brazil, in the Northeast and in Piauí was contextualized historically; the production of alcohol and sugar was described; ecoefficiency indicators of value (profit and quantity of product) and of environmental influence (energy consumption, GHG emissions, solid waste generation and land use) were analyzed for sugar and alcohol production processes in Piauí in 2015; and the sugar-alcohol production was assessed, according to an interpretative analysis of the eco-indicators. The standard ABNT NBR ISO 14045: 2014 was used as theoretical/methodological support for this study, and it involved Life Cycle Assessment (LCA). Based on the inventory of the ethanol and sugar LCA in Piauí, the analysis revealed that the sugar production system presented greater ecoefficiency than alcohol in terms of fossil energy consumption, GHG emissions and solid waste generation. However, it was detected that the alcohol production system was more eco-efficient than the sugar production as to land use, due to the recycling of residue from the processing of sugarcane, molasses, in part of the productive process. Additionally, it was evidenced that only one of the eco-indicators had a positive result for both products, the GHG emissions based on the quantity produced, which pointed out that despite the reuse of solid and liquid waste, sugar and ethanol production in Piauí was not eco-efficient in 2015.

Keywords: Sugarcane. ISO 14045: 2014. Sustainability. Ethanol. Sugar.

LISTA DE ILUSTRAÇÕES

Figuras

Figura 1 - Ecoeficiência no setor empresarial	71
Figura 2 - Fases de uma avaliação de ecoeficiência.....	77
Figura 3 - Fases de uma Avaliação do Ciclo de Vida	86
Figura 4 - Área da usina COMVAP em território piauiense	90
Figura 5 - Imagem de satélite da área da usina COMVAP em território piauiense	91
Figura 6 - Sistema básico de produto do etanol ou açúcar	94
Figura 7 - Fluxograma de produção de açúcar e etanol na COMVAP em 2015.....	101
Figura 8 - Irrigação nos campos da COMVAP em 2015..	103
Figura 9 - Instalações industriais da COMVAP em 2015	104
Figura 10 - Acúmulo de bagaço para aproveitamento pela COMVAP em 2015	105
Figura 11 - Carregadora de cana e reboque tipo Julieta em abril de 2016 na COMVAP	116
Figura 12 - Uso de energia fóssil na produção de etanol e açúcar por atividade na COMVAP em 2015	139
Figura 13 - Emissões atmosféricas de GEE por atividade na COMVAP em 2015	145

Quadros

Quadro 1 - Razões para buscar ecoeficiência identificadas pelo WBCSD, OECD, PCSD e NRTEE	70
Quadro 2 - Comparativo entre variáveis ambientais dos indicadores de ecoeficiência	72
Quadro 3 - Ecoindicadores setoriais desenvolvidos pela ESCAP.....	80
Quadro 4 - Lista de categorias, aspectos e indicadores propostos pelo WBCSD	81

Quadro 5 - Indicadores de ecoeficiência na produção de etanol pela pela COMVAP	98
Quadro 6 - Indicadores de ecoeficiência na produção de açúcar pela COMVAP	99

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 - Dados consolidados do setor sucroenergético no Piauí (PI) e no Nordeste (NE), de 1948 a 2016.....	26
Tabela 2 - Série histórica da área plantada total de cana de açúcar no Brasil em mil hectares, safra de 2005/2006.....	31
Tabela 3 - Série histórica da produção de cana de açúcar no Brasil em mil toneladas da safra de 2005/2006 a 2015/2016	32
Tabela 4 - Série histórica da produtividade de cana de açúcar no Brasil em quilogramas por hectare da safra de 2005/2006 a 2015/2016	32
Tabela 5 - Série histórica de área plantada de cana de açúcar no Nordeste e estados, em mil hectares	33
Tabela 6 - Série histórica de produção de cana de açúcar no Nordeste e estados, em mil toneladas	34
Tabela 7 - Área do Piauí em relação ao Nordeste e ao Brasil	35
Tabela 8 - Número de municípios do Piauí em relação ao Nordeste e ao Brasil	35
Tabela 9 - Região Integrada de Desenvolvimento da Grande Teresina	36
Tabela 10 - Safras da usina COMVAP de açúcar, álcool e energia de 2004 a 2015	40
Tabela 11 - Resumo da safra de cana de açúcar em 2015 na COMVAP	109
Tabela 12 - Utilização de equipamentos agrícolas em usina típica	110
Tabela 13 - Energia consumida com a utilização de equipamentos agrícolas por hectare na COMVAP em 2015	111
Tabela 14 - Energia consumida pela aplicação de calcário na COMVAP em 2015	111
Tabela 15 - Energia consumida pela aplicação de fósforo e potássio na COMVAP em 2015	112
Tabela 16 - Energia consumida pela aplicação de nitrogênio na COMVAP em 2015	112
Tabela 17 - Energia consumida pela aplicação de herbicida e inseticida na COMVAP em 2015	113

Tabela 18 - Energia contida no óleo diesel constante no Balanço Energético Nacional de 2015.....	114
Tabela 19 - Consumo de energia, na forma de óleo diesel combustível, em operações agrícolas para renovação e manutenção do canavial ao longo de um ciclo de produção de cana de açúcar no Brasil	115
Tabela 20 - Consumo energético do transporte de cana de açúcar do campo até a Usina em 2015 pela queima de óleo diesel	116
Tabela 21 - Consumo energético do transporte de insumos para a usina e lavoura pela queima de óleo diesel na COMVAP em 2015	117
Tabela 22 - Consumo energético do trabalho humano em 2015 na COMVAP	118
Tabela 23 - Metodologia de cálculo do uso de energia fóssil na COMVAP.....	120
Tabela 24 - Consumo energético da distribuição de etanol em 2015 na COMVAP	121
Tabela 25 - Consumo energético da distribuição de açúcar em 2015 na COMVAP	122
Tabela 26 - Consumo de energia fóssil pela COMVAP em 2015.....	123
Tabela 27 - Consumo energético das etapas produtivas de açúcar e de etanol em 2015 na COMVAP	123
Tabela 28 - Geração de gases na produção de 1 GJ de energia decorrente da queima de petróleo, óleo diesel e carvão mineral	125
Tabela 29 - Geração de gases na produção de 1 MJ de energia decorrente da queima de petróleo, óleo diesel e carvão mineral	125
Tabela 30 - Emissões de metano originadas da queima do petróleo pela COMVAP em 2015	126
Tabela 31 - Emissões de óxido nitroso originadas da queima do petróleo pela COMVAP em 2015	127
Tabela 32 - Emissões de dióxido de carbono originadas da queima do petróleo pela COMVAP em 2015	127
Tabela 33 - Emissões de gases de efeito estufa originadas da queima do carvão mineral pela COMVAP em 2015.....	128
Tabela 34 - Emissões de metano originadas da queima do óleo diesel pela COMVAP em 2015	129

Tabela 35 - Emissões de óxido nitroso originadas da queima do óleo diesel pela COMVAP em 2015	129
Tabela 36 - Emissões de dióxido de carbono originadas da queima do óleo diesel pela COMVAP em 2015	130
Tabela 37 - Emissão de gases de efeito estufa decorrente da aplicação de um quilo de nitrogênio, de potássio e de fósforo como fertilizantes	130
Tabela 38 - Emissão de gases de efeito estufa decorrente da aplicação de nitrogênio, de potássio e de fósforo pela COMVAP em 2015	131
Tabela 39 - Emissão de metano e óxido nitroso decorrente da queima da palha na COMVAP em 2015	132
Tabela 40 - Emissão de óxido nitroso decorrente do uso de torta de filtro na COMVAP em 2015.....	133
Tabela 41 - Emissão de metano e de óxido nitroso decorrente da aplicação de vinhaça na COMVAP em 2015	134
Tabela 42 - Emissão de GEE dos materiais constituintes da COMVAP em 2015.....	134
Tabela 43 - Emissão de GEE pela atividade sucroalcooleira do Piauí em 2015	135
Tabela 44 - Consumo de água por atividade em usina com destilaria anexa	137
Tabela 45 - Consumo de água na atividade sucroalcooleira na COMVAP em 2015	137
Tabela 46 - Saída de energia do sistema produtivo da COMVAP em 2015	141
Tabela 47 - Eficiência energética do etanol de cana de açúcar da COMVAP em 2015	142
Tabela 48 - Cálculo do uso de solo para produção de 1 tonelada de cana na COMVAP em 2015	143
Tabela 49 - Cálculo da área necessária para produzir um litro de etanol e um quilo de açúcar na COMVAP em 2015	143
Tabela 50 - Uso do solo para produção de 1 litro de etanol a partir de diferentes matérias-primas	144
Tabela 51 - Indicadores de valor para o processo de produção de etanol e de açúcar da COMVAP em 2015.....	148
Tabela 52 - Demanda energética total pela COMVAP em 2015	149
Tabela 53 - Emissões de Gases de Efeito Estufa pela COMVAP em 2015	149

Tabela 54 - Quantidade de resíduos sólidos produzidos pela COMVAP em 2015	151
Tabela 55 - Uso do solo para produção de açúcar pela COMVAP em 2015	152
Tabela 56 - Indicadores de ecoeficiência consolidados no processo de produção de etanol pela COMVAP em 2015	153
Tabela 57 - Indicadores de ecoeficiência consolidados no processo de produção de açúcar pela COMVAP em 2015	154
Tabela 58 - Resultados relativos da análise de ecoeficiência de acordo com as categorias de impacto escolhidas para a produção da COMVAP em 2015	155

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

ABNT	Associação Brasileira de Normas Técnicas
ACV	Avaliação do Ciclo de Vida
AICV	Análise de Impacto do Ciclo de Vida
ANA	Agência Nacional de Águas
ANP	Agência Nacional de Petróleo, Gás Natural e Biocombustíveis
APP	Áreas de Preservação Permanente
ATR	Açúcares Totais Recuperáveis
BEN	Balanco Energético Nacional
CEBDS	Conselho Empresarial Brasileiro para o Desenvolvimento Sustentável
CH ₄	Metano
cm ²	Centímetro quadrado
CO	Monóxido de carbono
CO ₂	Dióxido de carbono
CO ₂ eq	Carbono equivalente
COMVAP	Companhia Vale do Parnaíba
CONAB	Companhia Nacional de Abastecimento
DBO	Demanda Biológica de Oxigênio
DQO	Demanda Química de Oxigênio
EDM	Entrada Direta de Materiais
EI	Indicador de Ecoeficiência
ESCAP	Comissão Social e Econômica para a Ásia e o Pacífico
GEE	Gases de Efeito Estufa
GJ	<i>Gigajoule</i>
ha	Hectare
IAA	Instituto do Açúcar e do Alcool
ICV	Inventário de Ciclo de Vida
INSS	Instituto Nacional do Seguro Social
IPCC	Painel Intergovernamental sobre Mudanças Climáticas
ISO	Organização Internacional de Normalização
J	Joule
K	Potássio

K ₂ O	Óxido de potássio
Kcal	Quilocalorias
kg	Quilograma
km ²	Quilômetro quadrado
L	Litro
m ²	Metro quadrado
m ³	Metro cúbico
MAPA	Ministério da Agricultura, Pecuária e Abastecimento
Mg	Megagrama
MJ	<i>Megajoule</i>
MW	<i>Megawatt</i>
MWH	<i>Megawatt-hora</i>
N	Nitrogênio
N ₂ O	Óxido nitroso
NEB	Balanco Energético
NO _x	Óxido de nitrogênio
NRTEE	Mesa Redonda Nacional sobre o Meio Ambiente e da Economia
OECD	Organização para a Cooperação e Desenvolvimento Econômico
ONG	Organizações Não Governamentais
ONU	Organização das Nações Unidas
P	Fósforo
P ₂ O ₅	Pentóxido de fósforo
PCSD	Conselho Presidencial sobre o Desenvolvimento Sustentável
PIB	Produto Interno Bruto
Ppm	Partes por milhão
Proálcool	Programa Nacional do álcool
R\$	Real
sc	Saca
SGA	Sistema de Gestão Ambiental
SO _x	Óxido de enxofre
t	Tonelada
UNCTAD	Conferência das Nações Unidas sobre Comercio y Desenvolvimento
WBCSD	Conselho Empresarial Mundial para o Desenvolvimento Sustentável
ZAE Cana	Zoneamento Agroecológico da Cana de Açúcar

SUMÁRIO

1 INTRODUÇÃO	18
2 CULTIVO DE CANA DE AÇÚCAR NO BRASIL, NO NORDESTE E NO PIAUÍ....	21
2.1 Advento da cana de açúcar no Brasil, no Nordeste e no Piauí	21
2.2 Evolução da agroindústria açucareira no Brasil	27
2.3 Produção de cana de açúcar no Nordeste atualmente.....	30
2.3.1 Produção de cana de açúcar no Piauí.....	35
3 PRODUÇÃO DE AÇÚCAR E ETANOL NO BRASIL.....	43
3.1 Cana de açúcar como matéria-prima	43
3.1.1 Açúcar.....	43
3.1.2 Etanol.....	46
3.2 Criação do Instituto do Açúcar e do Álcool (IAA)	48
3.3 Programa Nacional do Álcool (Proálcool)	51
3.3.1 Tecnologia <i>flex fuel</i>	56
3.4 Impactos ambientais do setor sucroalcooleiro.....	57
3.4.1 Qualidade do ar.....	59
3.4.2 Uso e qualidade da água	61
3.4.3 Uso da terra.....	63
3.4.4 Qualidade do solo	64
3.4.5 Biodiversidade	65
4 ECOEFICIÊNCIA COMO FERRAMENTA DE GESTÃO AMBIENTAL.....	67
4.1 Contexto histórico da ecoeficiência.....	68
4.2 Normas ABNT NBR ISO para ecoeficiência	75
4.3 Ecoindicadores.....	78
4.4 Metodologia de análise de ecoeficiência da ABNT NBR ISO 14045:2014	84
4.5 Obstáculos para a ecoeficiência como ferramenta de análise de sustentabilidade	86
5 PROCEDIMENTOS METODOLÓGICOS	89
5.1 Métodos	89
5.2 Universo da pesquisa	89
5.3 Delimitação da amostra	91
5.4 Técnicas de pesquisa	92
5.5 Avaliação do Ciclo de Vida (ACV).....	93

5.5.1 Avaliação do Ciclo de Vida - fase 1: definição do objetivo e escopo	93
5.5.2 Avaliação do Ciclo de Vida - fase 2: análise de inventário.....	95
5.5.2.1 Energia fóssil empregada na produção de etanol e açúcar	95
5.5.2.2 Quantificação das emissões de Gases de Efeito Estufa (GEE) na produção de etanol e açúcar.....	96
5.5.3 Avaliação do Ciclo de Vida - fases 3 e 4: análise de impacto e interpretação	96
5.6 Ecoindicadores.....	96
6 ECOEFICIÊNCIA NA PRODUÇÃO DE ETANOL E DE AÇÚCAR NO PIAUÍ	100
6.1 Ciclo de vida do açúcar e etanol.....	100
6.1.1 Fase agrícola.....	102
6.1.2 Fase industrial.....	104
6.1.2.1 Fase industrial: etanol.....	106
6.1.2.2 Fase industrial: açúcar	107
6.2 Análise de inventário do ciclo de vida.....	108
6.2.1 Energia fóssil empregada na produção de etanol e açúcar	108
6.2.1.1 Energia fóssil empregada na produção de etanol e açúcar: fase agrícola.....	109
6.2.1.2 Energia fóssil empregada na produção de etanol e açúcar: fase industrial	119
6.2.1.3 Energia fóssil empregada na produção de etanol e açúcar: distribuição	121
6.2.2 Quantificação das emissões de GEE na produção de etanol e açúcar	124
6.2.3 Análise de impacto	136
6.2.3.1 Consumo de água	136
6.2.3.2 Consumo de energia não-renovável	139
6.2.3.3 Rendimento energético líquido.....	140
6.2.3.4 Eficiência energética.....	142
6.2.3.5 Uso do solo	143
6.2.3.4 Emissões atmosféricas.....	145
6.3 Ecoeficiência na produção de etanol e de açúcar	147
7 CONCLUSÃO.....	157
REFERÊNCIAS	160

1 INTRODUÇÃO

Os combustíveis derivados do petróleo foram introduzidos para substituir o carvão como fonte de energia, uma vez que a queima desse mineral libera partículas poluentes no ar que representam um sério problema para a saúde da população mundial (BARTRA et al., 2007).

No entanto, a queima dos combustíveis fósseis aumentou a concentração de Dióxido de Carbono (CO₂) na atmosfera, o qual, juntamente com outros gases, tem contribuído para o fenômeno conhecido como efeito estufa, que retém uma parcela do calor emitido pelo sol na atmosfera terrestre, mantendo o planeta aquecido.

Todavia, de acordo com Pearce (2002), a intensificação desse fenômeno, provocada pela emissão excessiva dos Gases de Efeito Estufa (GEE) na atmosfera, tornou-se um problema cuja consequência mais grave é o aumento da temperatura global.

Logo, essa problemática, juntamente com as condições econômicas, que abrangem o preço dos combustíveis fósseis e dos avanços nas tecnologias de produção de biocombustíveis, e geopolíticas, que incluem a segurança do abastecimento energético e a redução das emissões, como sugerido no Acordo de Paris¹ em 2015, além da necessidade de diminuir a dependência do fornecimento de petróleo pelo Oriente Médio, motivaram a busca por matrizes energéticas alternativas (HAHN-HÄGERDAL et al., 2006).

Nesse sentido, em conformidade com Clancy (2008), a procura por fontes alternativas de energia, em especial de combustíveis para transporte, que é uma das atividades que mais consome combustíveis fósseis, evidenciou um grupo de líquidos derivados de matéria vegetal, conhecidos como biocombustíveis.

Logo, acentua que desde 1975 o Brasil utiliza o etanol, que é de origem vegetal, como combustível ou sob a forma de uma mistura contendo de 22% a 25% de álcool na gasolina, colocando o país em uma posição favorável internacionalmente, em termos de emissão de CO₂. Assim, em função desse quadro, o país consagrou-se como o líder mundial no setor de agroenergia, que era responsável por cerca de 30% da energia ofertada em 2011 (BRASIL, 2011).

¹ Na 21ª Conferência das Partes (COP21) da *United Nations Framework Convention on Climate Change* (UNFCCC), em 2015 em Paris, foi adotado um acordo com o objetivo de fortalecer a resposta global à ameaça da mudança do clima e de reforçar a capacidade dos países para lidar com os impactos decorrentes dessas mudanças. O Brasil comprometeu-se a reduzir as emissões de GEE em 37% abaixo dos níveis de 2005, em 2025, com uma contribuição indicativa subsequente de reduzir as emissões em 43% abaixo dos níveis de 2005, em 2030 (MMA, 2016).

Além do etanol, a cana de açúcar serve como matéria-prima para a produção de açúcar. Segundo a Companhia Nacional de Abastecimento (CONAB), enquanto na safra 2005/2006 a produção de açúcar foi de 26,42 milhões de toneladas, na safra 2013/2014 foi de 37,87 milhões. Da mesma maneira, a produção de etanol na safra 2005/2006 foi de 16,99 bilhões de litros, ao passo que na safra 2013/2014, cresceu para 27,95 bilhões. Essa situação expressou um aumento progressivo em ambas produções no Brasil, ao longo do intervalo sob análise (CONAB, 2014).

Inclusive, o Ministério da Agricultura, Pecuária e Abastecimento estima para a safra de 2019, uma produção de 47,34 milhões de toneladas de açúcar, e de 58,8 bilhões de litros de etanol (BRASIL, 2014).

Contudo, Suarez (2009) explica que, para atender a demanda do mercado mundial, faz-se necessário o incremento crescente da produção, o que comumente ocorre mediante a expansão da área de cultivo de cana de açúcar.

Com base nessa conformação, em consonância com Manzatto et al. (2009), nesse ano, o Governo Federal lançou uma regulamentação denominada “Zoneamento Agroecológico da Cana de Açúcar (ZAE Cana)”, estabelecendo diretrizes para orientar o planejamento sustentável do crescimento do setor sucroenergético, visando uma política agrícola que contemple sustentabilidade ambiental e segurança alimentar. Evidenciam que o Zoneamento previa a produção de biocombustíveis de forma sustentável e ecologicamente limpa; a cogeração de energia elétrica, para diminuir a dependência de combustíveis fósseis e gerar créditos de carbono; a conservação do solo e da água, através de técnicas conservacionistas diminuindo a erosão dos solos cultivados; a diminuição da emissão de GEE pela substituição progressiva da queimada pela colheita mecânica; e a expansão do cultivo para regiões não exploradas do Nordeste com a finalidade de exportar.

No entanto, a despeito do etanol derivado da cana de açúcar ser uma alternativa economicamente viável para substituir combustíveis fósseis na geração de energia, há controvérsias quanto à sustentabilidade de produção, devido aos impactos causados pelo cultivo da matéria-prima, sejam ambientais, entre os quais se destacam o desmatamento, alterações no solo, emissão de gases na atmosfera, uso de água e poluição; ou sociais, representados pelos conflitos por direito a terras, fome, condições precárias de trabalho e migração (PINHEIRO, 2013).

Além disso, as agroindústrias sucroalcooleiras, durante o processo produtivo, geram impactos ambientais negativos que devem ser gerenciados de forma apropriada no sentido de

não contribuírem para a degradação socioambiental do entorno de onde desenvolvem as atividades.

Nesse sentido, ressalta-se como instrumento de gestão ambiental a ecoeficiência que, conforme Mello (2002), configura-se em uma forma de buscar, por meio do uso mais eficiente de matérias-primas e energia, diminuir os custos econômicos e os impactos ambientais, ou seja, consiste em saber combinar o desempenho econômico e o ambiental, para reduzir impactos ambientais.

Logo, diante da expectativa de aumento da produção de cana de açúcar prevista no ZAE Cana, inclusive no Piauí, torna-se relevante verificar o grau de impacto ambiental dessa atividade, para tanto, questiona-se: a produção sucroalcooleira no Piauí se processa de forma ecoeficiente?

Partindo dessa problemática, esta dissertação encerra a hipótese de que a produção de açúcar e de álcool no Piauí, por consumir grande quantidade de água e energia, emitir gases de efeito estufa, gerar resíduos abundantemente e requerer vastas dimensões de terra para o cultivo da matéria-prima, não ocorre de maneira ecoeficiente.

Com vistas a responder o problema e constatar ou não a hipótese, objetivou-se analisar os elementos e os indicadores de ecoeficiência na produção sucroalcooleira no estado do Piauí. Para tanto, especificamente, contextualizou-se historicamente o cultivo de cana de açúcar no Brasil, no Nordeste e no Piauí, circunstanciou-se a produção de álcool e de açúcar; examinaram-se indicadores de ecoeficiência de valor e de influência ambiental para os processos de produção de açúcar e álcool no Piauí; e avaliou-se, qualitativamente, a produção sucroalcooleira no mesmo, a partir de análise interpretativa dos ecoindicadores.

Salienta-se que esta dissertação estrutura-se em sete capítulos. O primeiro, que consiste na introdução, apresenta a problemática, a hipótese e os objetivos da pesquisa; o segundo, contextualiza historicamente o advento da cultura canavieira no Brasil e no Piauí, a evolução da agroindústria açucareira no país e a situação atual da cana de açúcar no Nordeste; o terceiro trata do setor sucroalcooleiro no cenário nacional, da relevância do açúcar e do álcool para a economia, dos impactos ambientais derivados do setor e do panorama energético brasileiro; o quarto explicita o uso da ecoeficiência como ferramenta de gestão e introduz as Normas ABNT NBR ISO para ecoeficiência; o quinto caracteriza a área de estudo, os procedimentos metodológicos e as técnicas de pesquisa; o sexto estuda os dados obtidos na pesquisa, por meio da análise de inventário do ciclo de vida do etanol e do açúcar e dos ecoindicadores selecionados, e avalia a ecoeficiência da produção sucroalcooleira no Piauí; o sétimo capítulo explicita a conclusão da investigação.

2 CULTIVO DE CANA DE AÇÚCAR NO BRASIL, NO NORDESTE E NO PIAUÍ

Este capítulo contextualiza historicamente o cultivo de cana de açúcar no Brasil e, em particular, no Piauí. Para tanto, se encontra distribuído em três itens. O primeiro aborda a introdução da cana de açúcar no Brasil, no Nordeste e no Piauí. O segundo evidencia a evolução da agroindústria açucareira no Brasil e o terceiro apresenta a situação atual da produção de cana de açúcar no Nordeste e no Piauí.

2.1 Advento da cana de açúcar no Brasil, no Nordeste e no Piauí

A cana de açúcar chegou ao Brasil no início do século XVI, quando o Rei de Portugal, preocupado em defender as terras brasileiras, buscou povoá-las e colonizá-las. Nesse sentido, dividiu a costa do país em capitânicas, doadas a titulares, que arcariam com todas as despesas de transporte e estabelecimento de povoadores, pois havia perspectiva de grandes lucros com a cultura da cana de açúcar, produto de grande valor comercial na Europa (PRADO JUNIOR, 2006).

Para Andrade (1980), após 15 anos da chegada de Duarte Coelho no Brasil, já havia fundado duas vilas (Igarçu e Olinda) e cinco engenhos e, em função do clima quente, com duas estações definidas, e o solo argiloso de massapé, a cultura da cana de açúcar foi favorecida na Capitania. Porém, como a produção de açúcar requeria certo nível técnico que os indígenas e os escravos negros não possuíam, Duarte Coelho importou técnicos europeus.

Todavia, de acordo com Andrade (2007), a agroindústria somente se desenvolveu aceleradamente nas Capitânicas de Pernambuco e no Recôncavo Baiano, pelo fato de serem mais próximas da Europa, ou seja, do mercado consumidor, o que diminuía o custo e o tempo de transporte, pois o porto de exportação se localizava na região de Olinda e Recife.

Conforme Prado Junior (2006), a produção do açúcar tornou o Brasil o maior produtor mundial até meados do século XVII, quando surgiram os primeiros concorrentes. Em virtude desse contexto, fez-se necessária a expansão da área canavieira para além da costa brasileira.

Contudo, a despeito desse panorama, segundo Furtado (2007, p. 106), a economia nordestina sofreu um declínio entre o final do século XVII e o começo do século XIX, com

grave diminuição da renda *per capita*, o que redundou no deslocamento de parte dos habitantes livres para o interior em busca de ocupação e renda, isto é, “de sistema econômico de alta produtividade em meados do século XVII, o Nordeste se foi transformando numa economia em que grande parte da população produzia apenas o necessário para subsistir”.

Ademais, Andrade (1980) salienta que os estabelecimentos se expandiam à medida que havia a ascensão comercial do açúcar. Sendo assim, na primeira metade do século XX, observou a aglomeração dos engenhos centrais que se mantinham como unidades de produção desde o século XVI, em torno de pequenas e médias usinas. Como também, as usinas maiores passaram a absorver engenhos e usinas menores, derivado da concentração fundiária, da lucratividade, da facilidade de crédito e de emprego de capitais oriundos de outras atividades econômicas possibilitarem a formação de grupos econômicos que controlavam várias usinas.

Em função desse cenário, Prado Junior (2000, p. 42) destaca que a estrutura agrária do Nordeste se definiu como “uma minoria de grandes proprietários concentrando em suas mãos a maior parte das terras, deixando à massa da população uma reduzida sobra em que ela angustiosamente se comprime”, cuja consequência mais marcante foi a abundante disponibilidade de mão de obra gerada. Ou seja, na propriedade os trabalhadores podiam ser moradores que trabalhavam permanentemente nos canaviais, dispendo de pequenas culturas de subsistência próximas às casas, localizadas no interior da propriedade, ou foreiros, que habitavam sítios mais distantes pelos quais pagavam aluguel (foro) ao proprietário e eram obrigados a trabalhar gratuitamente para o proprietário na época das safras.

A cana de açúcar, principal atividade econômica do Nordeste, era desenvolvida na região da Zona da Mata, onde as condições eram mais propícias. Enfatiza que com o aumento da procura externa e interna por açúcar, a rentabilidade das unidades produtoras aumentou, afastando as atividades complementares, como a pecuária, extração de madeira e produção de alimentos, para regiões de menor fertilidade. Portanto, foi esse deslocamento que possibilitou a chegada de tais atividades às terras do Piauí. Logo, enquanto as regiões produtoras de açúcar formaram uma base econômica desenvolvida e sofisticada, regiões como o Piauí atravessaram séculos com estruturas econômicas e sociais estagnadas e atrasadas (BANDEIRA, 1981).

Consoante Andrade (2007), oscilações do mercado internacional provocaram variações na importância da agroindústria açucareira na vida do brasileiro, o que redistribuiu a cultura pelo território nacional. Em São Paulo, a produção inicialmente atendia o mercado interno, mas com a decadência da mineração, esse estado voltou a produção para o mercado

externo, competindo com o Nordeste. Adenda que após a crise de 1929², São Paulo voltou a investir na cultura da cana de açúcar, tornando-se em meados do século XX, o maior produtor e exportador brasileiro. Mas, no Nordeste, Pernambuco e Alagoas eram os principais produtores e exportadores, seguidos da Bahia, Paraíba, Rio Grande do Norte e Sergipe, de forma modesta.

Contudo, Prado Junior (2006) sublinha que o crescimento ininterrupto da produção em São Paulo, praticamente tornou essa região autossuficiente, provocando a ruína das velhas regiões produtoras, em particular do Nordeste. Para contornar essa situação, a economia açucareira passou a ser controlada e regida por um sistema de quotas distribuídas entre as diferentes unidades produtoras do país, sob a direção de um órgão oficial do governo federal, o Instituto do Açúcar e do Alcool (IAA) que conduziu à estabilização do setor e evitou o colapso da produção do Nordeste.

Quando o açúcar brasileiro foi substituído no mercado externo por produtos de concorrentes melhor aparelhados ou mais avantajados por circunstâncias favoráveis, essa atividade, que era a principal e quase única atividade econômica de grandes regiões do Brasil, em particular, o litoral do Nordeste, enfrentou grandes dificuldades, declinando a participação brasileira no comércio internacional, a qual se estendeu até a II Guerra Mundial. Destarte, a produção voltou-se para o mercado interno, devido à perda dos consumidores externos. Todavia, o mercado interno por não possuir grande capacidade de absorção, provocou uma crise profunda e de sérias consequências (PRADO JUNIOR, 2006).

Diante do exposto, inferiu-se que a cultura da cana, introduzida no Brasil há cinco séculos, foi palco de grandes oscilações, haja vista que a despeito do país ter sido o maior produtor de açúcar em meados do século XVII, perdeu essa posição durante muitas décadas. Outrossim, que o plantio da cana foi itinerante territorialmente, em conformidade com as necessidades econômicas. Acrescenta-se que a participação do Piauí na produção de cana de açúcar no Brasil, por suas características físicas desfavoráveis, se manteve sempre reduzida.

Assim, as terras que fazem parte do território piauiense começaram a ser colonizadas na segunda metade do século XVII, de maneira rápida, de forma que no início do século XVIII, aproximadamente dois terços das terras já se encontravam ocupadas por um pequeno

² A crise de 1929 caracterizou-se por um período de depressão econômica que afetou a economia mundial entre 1929 e 1934. A mesma começou a ser identificada em 1928, em decorrência de uma queda generalizada nos preços agrícolas internacionais, contudo o fator mais marcante foi a crise financeira detonada pela quebra da Bolsa de Nova Iorque. A economia norte-americana, que vinha experimentando um *boom* artificial, alimentado por grandes movimentos especulativos nas bolsas e pela supervalorização de ações sem a cobertura adequada, em 24 de outubro de 1929 sofreu um movimento generalizado de vendas que levou à queda brusca nos preços das ações e ao pânico generalizado (CANO, 2009).

número de grandes fazendas de gado (ROCHA, 1982).

De acordo com Santana (2001), existem diversas causas para o devassamento e o povoamento do Piauí, haja vista o momento histórico ser indissociável da situação pela qual passavam o Nordeste e a Colônia no século XVII. Sendo assim, reconhece que o estado, em meados de 1650, foi povoado do interior para o litoral, devido à busca de novos caminhos por terra que ligassem o Maranhão ao Ceará e à Bahia, redundando na chegada ao Piauí de criadores de gado que procuravam suprir as demandas por carne e meio de transporte.

Para Santos (1980), o Piauí por ter sido o último estado nordestino a ser colonizado, a mesma não estava diretamente relacionada à expansão da economia açucareira, senão pelo fato de a pecuária ao ocupar extensos espaços no interior, os tornou insuficientes para a expansão linear da atividade; e pela existência de abundantes pastos naturais e de recursos hídricos que favoreciam a multiplicação do gado, possibilitando, dessa forma, que as terras piauienses se conformassem em opção para ocupação e exploração da pecuária extensiva e, por consequência, para a formação dos primeiros núcleos populacionais.

Furtado (2007) explana que, num primeiro momento, a pecuária se organizou como uma economia dependente da economia açucareira, crescendo conforme as demandas desta por gado, como força de tração ou como fonte de alimento. Já num segundo momento, de meados do século XVII até o início do século XIX, quando da estagnação da economia açucareira, a pecuária passou a crescer independente das solicitações do mercado consumidor da zona açucareira.

Em função desse cenário, Rocha (1982) registra que a pecuária, introduzida pelos primeiros habitantes do Piauí, se firmou como atividade dominante até meados do século XX.

Bandeira (1981) atenta para o fato de que a formação econômica piauiense, por razões históricas, geográficas, econômicas e sociais, foi condição para a implantação de uma base econômica apoiada em atividades secundárias no Piauí, em vista do contexto nordestino.

Nas primeiras décadas do século XIX, as atividades agrícolas passaram a sofrer mudanças e se diversificaram, provocando o surgimento de produtos alternativos aos da pecuária bovina como fonte de renda. Realça que, devido à Guerra de Secessão norte-americana³, a produção e venda de algodão no Piauí atingiram seu ápice, declinando após o fim da mesma (ROCHA, 1982).

³ Antes da Guerra de Secessão Norte-Americana, sete estados escravistas ao sul dos Estados Unidos se separaram e formaram uma nova nação, os Estados Confederados da América, por discordarem sobre a proibição da escravidão nos territórios que ainda não haviam se tornado estados. O governo do presidente Abraham Lincoln e a maioria das pessoas do Norte se recusaram a reconhecer a legitimidade da secessão e teve início a guerra, que durou de 1861 a 1864, e culminou na rendição do exército confederado e na reconstrução de uma nação unida livre da escravidão (HISTORY, 2009).

Em consonância com Santos (1980), do início do século XIX a meados do século XX, a economia piauiense participou ativamente do comércio internacional, através da exportação de produtos de origem extrativa vegetal, como borracha de maniçoba, cera de carnaúba e babaçu. Contudo, a despeito desse panorama, salienta que, em relação ao Nordeste, em 1980 o Piauí era um dos estados menos industrializados, derivado da estreiteza do mercado interno, da baixa renda *per capita* da população, da concorrência do sul do país, da escassez de mão de obra especializada, entre outros. Portanto, acentua que somente na década de 1970, iniciou no Piauí a instalação de infraestrutura básica, como estradas, energia, abastecimento de água, telecomunicação, educação e saúde.

Em função dessa conjuntura, o Piauí não era palco de investimentos industriais e nem tinha a capacidade de desenvolver um setor agrícola moderno. Logo, não atendia a contento a demanda interna por artigos básicos, como arroz, feijão, milho, frutas, legumes e leite (BANDEIRA, 1981).

Por conseguinte, devido o Piauí ser detentor de baixo nível tecnológico, a agricultura piauiense encerrava baixa produtividade. Inclusive, em 1970, a produção de gêneros agrícolas e, especialmente da cana de açúcar, obteve uma produtividade aproximada de apenas 60% da média do Nordeste. Outrossim, acrescenta que o estado não possuía produção suficiente de cana de açúcar para fabricação de álcool, mas dispunha de grande extensão de área ociosa e propícia para a cultura (SANTOS, 1980).

Nessa perspectiva, concorda-se com Sicsú, Silveira e Ferreira (2011), de que embora o segmento sucroalcooleiro seja o mais tradicional na economia nordestina, o mesmo acumula várias dificuldades e problemas, inclusive por produzir com custos superiores ao do Sul/Sudeste, justificado pelo protecionismo governamental, que inibiu fortemente o avanço tecnológico, e por fatores específicos ligados à topografia, à pluviosidade e à falta de mecanização.

Derivado dessa contextualização, dados do MAPA (2013a) relatam que na safra 1948/1949, ocorreu a moagem de 1.150 toneladas de cana no Piauí, as quais foram direcionadas para a produção de 69 toneladas de açúcar. Salienta que esse montante aumentou ao longo das décadas, como exposto na Tabela 1.

Tabela 1 - Dados consolidados do setor sucroenergético no Piauí (PI) e no Nordeste (NE), de 1948 a 2016

Safr	Cana moída (t)		Álcool (m ³)		Açúcar (t)	
	PI	NE	PI	NE	PI	NE
1948/1949	1.150	8.379.791	-	-	69	764.351
1958/1959	3.200	12.016.542	-	105.126	212	1.068.224
1966/1967	8.999	16.344.895	78	127.195	681	1.472.331
1978/1979	45.254	34.961.404	277	409.792	3.271	2.853.791
1988/1989	286.709	53.346.038	21.192	1.667.619	-	2.814.056
1998/1999	312.580	46.401.209	22.781	1.642.845	-	2.854.945
2008/2009	900.181	63.114.067	44.553	2.355.327	38.796	4.271.341
2015/2016	967.400	48.816.700	32.669	1.717.860	66.900	2.574.000

Fonte: MAPA (2013a); CONAB (2016).

Através da Tabela 1, identificou-se que a quantidade de cana moída aumentou progressivamente no Piauí ao longo dos 64 anos sob investigação, sem embargo ter presenciado uma queda no Nordeste na última década. Comparativamente, o Piauí representava 0,014% da produção nordestina de cana de açúcar, e 0,009% da produção nordestina de açúcar em 1948, enquanto na safra 2015/2016 essa proporção subiu para 2,0% e 2,6%, respectivamente. Na safra 1966/1967, a produção piauiense de etanol equivalia a 0,06% da produção nordestina, alcançando 1,9% na safra 2015/2016.

Sublinha-se consoante o MAPA (2013a), que o registro da produção de etanol no estado na safra de 1966/1967 foi o primeiro, com o montante de 78m³ de etanol hidratado. Porém, a versão anidro somente foi produzida na safra de 1997/1998, com 307 m³, enquanto o hidratado foi de 24.833 m³.

Encontram-se cadastradas no Departamento de cana de açúcar e agroenergia do MAPA (2016), 23 usinas em Alagoas, seis na Bahia, cinco no Maranhão, oito na Paraíba, 18 em Pernambuco, cinco em Sergipe, uma no Ceará e uma no Piauí.

Com base nessa análise, inferiu-se que apesar da colonização tardia do Piauí ter ocorrido pelos criadores de gado oriundos principalmente da Bahia e de Pernambuco, o continuado isolamento causou o baixo crescimento econômico. Por conseguinte, devido à economia limitada à agricultura de subsistência, à pecuária extensiva e pouco produtiva, e à pequena indústria de transformação, como a da cera de carnaúba, o estado não desenvolveu o setor agrícola e, assim, não atraiu investidores para alavancar o cultivo de cana de açúcar no território piauiense, como acontecia em outros estados do Nordeste.

2.2 Evolução da agroindústria açucareira no Brasil

O desenvolvimento tecnológico da produção de cana de açúcar tardou a acontecer no Brasil, haja vista que até o final do século XVIII predominava os engenhos a tração animal; o uso de lenha para alimentar as fornalhas e queimar o bagaço na bagaceira; a ignorância da utilidade do esterco dos animais e do bagaço apodrecido como adubo na cultura dos canaviais; o uso da coivara⁴; e o uso da variedade de cana crioula introduzida no século XVI (ANDRADE, 1980).

Consoante Prado Junior (2006), a inferioridade técnica da indústria açucareira do Brasil configurou-se como uma das causas da perda de competitividade no mercado internacional. Ressalta que devido à dificuldade de remodelar os velhos engenhos para atender as novas exigências tecnológicas, o país investiu nos chamados engenhos centrais, que eram grandes unidades destinadas a moer a cana de várias propriedades. Todavia, para suprir a insuficiência no fornecimento, os engenhos centrais passaram a cultivar lavouras próprias e, depois de 1890, começaram a se instalar com o propósito de utilizar matéria-prima de produção interna.

De acordo com Andrade (1980), o fracasso dos engenhos possibilitou o aparecimento de novas usinas e a transformação de alguns engenhos centrais em usinas, o que manteve as atividades agrícola e industrial nas mãos de um mesmo proprietário.

Salienta que até o início do século XIX, os engenhos eram movidos à tração animal, quando foram introduzidos os primeiros engenhos a vapor e foram inseridas novas sementes de cana, passando a denominarem-se usinas, que eram fábricas modernas cuja filosofia pregava a separação da atividade agrícola da industrial e o estímulo da mão de obra livre, com a finalidade de aumentar a produtividade agrícola e competir no mercado internacional. Adicionalmente, redes particulares de estrada de ferro foram construídas para facilitar o transporte de matéria-prima (ANDRADE, 2007).

Silva (1998) explica que a industrialização da agricultura se traduz na transformação de um sistema de produção artesanal a um sistema em base manufatureira, com máquinas e uma divisão capitalista do trabalho. A produção de cana de açúcar no Brasil deixou de ser baseada em um complexo rural⁵ e passou a integrar um complexo agroindustrial.

⁴ Segundo Andrade (1980), coivara era a queima da vegetação nativa após o corte, com a intenção de desocupar as terras onde se pretendia cultivar a cana de açúcar.

⁵ Conforme Melo (2011), o complexo rural brasileiro era caracterizado pela incipiente divisão do trabalho, sendo as atividades direcionadas para o mercado externo, mas com as unidades produtivas fabricando também todos os bens intermediários e os necessários à manufatura de tal produto.

Nesse sentido, Godoy (2013) divide a história da agroindústria da cana de açúcar do Brasil em duas fases: a primeira, que se estende do início do século XVI até o final do século XIX, refere-se ao primado da técnica; e a segunda, que compreende o final de 1800 e prolonga-se até a atualidade, relaciona-se à hegemonia da tecnologia. Dessa forma, explicita a estreita aliança entre a modernização do setor canavieiro, assentada na existência de nova modalidade de produção e na transmissão do conhecimento. Essa contextualização se adequa primordialmente a São Paulo, sobretudo em função da disponibilidade de capitais e da presença de imigrantes estrangeiros, o que denotou na instalação da indústria nacional de equipamentos para as usinas e de processos técnicos, resultantes de pesquisa tecnológica. Porquanto, o uso do vapor transformou a matriz energética, tornou as indústrias multifacetadas e a química passou a comandar processos técnicos, o que redundou no acréscimo da escala de produção.

Para Macedo (2007), o desenvolvimento da cana de açúcar além de exigir grande evolução da indústria de equipamentos para a produção de açúcar, álcool e cogeração de energia, a qual era praticamente 100% nacionalizada, provocou a criação de empregos e renda. Outrossim, salienta a busca de tecnologias comerciais para reduzir os custos de produção, como os melhores usos das variedades de cana e dos controles agrônômicos, a otimização do transporte de cana, a fermentação e a moagem, e o gerenciamento técnico da produção industrial e manutenção. E que, esses processos incluem a agricultura de precisão, sistemas integrados de colheita e transporte de cana e palha, maior automação industrial e novos processos de separação (caldo e processamento final). Tais procedimentos revelaram o avanço na modificação genética da cana, uma vez que o genoma da cana foi mapeado em 2001 em São Paulo, e algumas dezenas de projetos estão em desenvolvimento em instituições públicas e privadas.

No que concerne à expansão dos canaviais no Brasil, há uma grande preocupação com a competição por terras utilizadas para a produção de alimentos e o aumento do desmatamento. Sendo assim, Goes e Marra (2008) apostam no melhoramento genético como a grande ferramenta para garantir a sustentabilidade da cultura da cana, por reduzir custos e elevar a eficiência e a produtividade. Portanto, realçam que o uso de novas variedades de plantas adaptáveis às condições de cada região, propicia o equilíbrio entre a sustentabilidade e a produtividade da cana. Nessa perspectiva, exaltam que o Brasil está na vanguarda mundial da biotecnologia de cana. Adendam, ainda, que a utilização de variedades adequadas e de práticas culturais modernas, como a fertirrigação e outras, possibilitarão aumento de produtividade da cana de açúcar, o que implicará, obviamente, na redução das áreas

necessárias para expansão dessa cultura.

Salienta-se que o aparato de pesquisas para a cana de açúcar no Nordeste só foi retomado em anos recentes, mais especificamente com a reativação das ações através da Rede Interuniversitária para o Desenvolvimento do Setor Sucroalcooleiro (RIDESA), responsável por cerca de 70% das sementes plantadas no território brasileiro. A RIDESA conta com recursos financeiros da iniciativa privada, especialmente usinas e destilarias produtoras de açúcar e etanol das diversas regiões do Brasil, e atua fazendo pesquisa em melhoramento genético da cana de açúcar e desenvolvimento de cultivares (DAROS; OLIVEIRA; BARBOSA, 2015).

Prado Junior (2000), por outro lado, registra que a elevação do nível tecnológico das atividades rurais não significou melhoria das condições do trabalhador. Pelo contrário, algumas vezes as circunstâncias de trabalho foram agravadas, na medida em que o desenvolvimento agrícola e a situação de vida do trabalhador rural não são direta e necessariamente relacionados. Inclusive, acentua que o progresso tecnológico da lavoura canavieira no Nordeste foi acompanhado de maior concentração da riqueza, e que a expansão dos canaviais reduziu o espaço antes destinado a culturas de subsistência que garantiam o sustento dos trabalhadores.

No Brasil, a cana de açúcar é utilizada para a obtenção de açúcar, álcool e alguns outros produtos, o que aumenta a relevância da valoração da matéria-prima. Em virtude dessa circunstância, Macedo (2007) explicita a necessidade de criar uma unidade de medida capaz de traduzir a obtenção de vários produtos de uma mesma fonte, a qual foi denominada Açúcares Totais Recuperáveis (ATR), avaliado consoante a análise do teor de sacarose (açúcar) contido na cana, o teor de fibra e a pureza, e as perdas no processo de produção de açúcar e de etanol, utilizado até hoje para regular o mercado da cana. Dessa forma, desde a safra 1998/99, as relações comerciais entre o complexo agroindustrial sucroalcooleiro e os produtores independentes de cana de açúcar são presididas por um modelo paritário de autogestão, alicerçado na qualidade da cana de açúcar e nos preços obtidos no mercado pelos produtos finais (açúcar e etanol), cuja base dos cálculos assenta-se na quantidade de ATR presente em cada tonelada da matéria-prima usada na produção de açúcar e de etanol.

Em 2007, o valor da cana (como insumo) correspondia em média a 58,5% do faturamento da agroindústria com os produtos finais, e dois terços do custo final dos produtos da cana (etanol e açúcar) correspondiam ao custo da cana (MACEDO, 2007).

Já em 2014, segundo boletim da Confederação da Agricultura e Pecuária do Brasil (CNA) e do Programa de Educação Continuada em Economia e Gestão de Empresas, da

Escola Superior de Agricultura Luiz de Queiroz (Pecege/Esalq), a rentabilidade projetada do setor sucroenergético nordestino seria insuficiente para cobrir os custos de produção na safra 2014/2015. O cenário indicava usinas nordestinas comercializando a matéria-prima com preço 33% a 40% abaixo do custo total da atividade. A publicação mostra, ainda, resultados negativos para o açúcar e o etanol. Para o primeiro produto, o preço ficou até 29% inferior aos custos totais e para o segundo, esta diferença atinge 19%, em um cenário mais pessimista. Sugere também que os efeitos do clima preocupam os produtores de cana nordestinos, pois por um lado, o excesso de chuva impede a elevação do valor dos ATRs e que a produtividade atinja pelo menos um preço próximo dos custos. E, por outro lado, a quantidade de chuvas provoca a queda da remuneração do produtor em função da diminuição da concentração do açúcar. Porém, além da queda da produtividade, o produtor enfrenta um incremento dos custos de produção, influenciada, sobretudo, pela queda da produtividade por hectare (ha); subida de pelo menos 8% nos salários dos trabalhadores do setor; e 8,5% de aumento no preço do corte, carregamento e transporte da cana (CNA, 2014).

Por conseguinte, ressalta-se que o processo de desenvolvimento tecnológico implementado no setor sucroalcooleiro iniciou com a existência de uma demanda econômica associada à oferta de novas tecnologias, amparada por uma infraestrutura flexível. E que, a modernização do setor aconteceu, principalmente, através das inovações procedentes de outras áreas industriais, como transporte, mecanização, melhoramento genético, entre outras. Salienta-se que o governo tem a função de incentivador e estimulador das inovações, pois considera tais mecanismos como fundamentais para o desenvolvimento econômico de uma região. Outrossim, devido a energia desempenhar papel central no desenvolvimento socioeconômico, os países produtores de biocombustíveis terão vantagens competitivas. Todavia, não obstante o reconhecimento desse avanço tecnológico, a indústria sucroalcooleira ainda se encontra submissa aos fenômenos naturais, como a seca ou o excesso de pluviosidade, que interferem na produtividade da safra e nos resultados financeiros das usinas.

2.3 Produção de cana de açúcar no Nordeste atualmente

A Companhia Nacional de Abastecimento (CONAB), empresa pública vinculada ao Ministério da Agricultura, Pecuária e Abastecimento (MAPA), iniciou em 2005 um levantamento anual da safra de grãos, café, cana de açúcar e laranja no Brasil, para publicização do montante da área total plantada com cana de açúcar em cada estado do país, da produção e da produtividade média em cada safra (CONAB, 2016).

Na safra de 1948/1949 a quantidade de cana de açúcar moída no Brasil foi 15.667.545 toneladas, chegando a 665.586.000 na safra 2015/2016, um crescimento aproximado de 4.000%. Em 1975, a área plantada com cana de açúcar no Brasil era de 1.899.005 hectares, já em 2015 essa área foi de 8.654.000 hectares, configurando-se em um aumento de 355% em 40 anos (MAPA, 2013a; CONAB, 2016).

Essa contextualização foi derivada do fato do parque industrial ser composto por 380 unidades industriais, sendo 236 mistas, 18 produtoras de açúcar, 121 de etanol e cinco não informadas. Dessas, 159 se encontram no estado de São Paulo e as demais distribuídas por todo o país (MAPA, 2016).

Registra-se que tais dados são relevantes para a identificação das performances do cultivo de cana de açúcar ao longo dos anos nos entes federados. Sendo assim, com vistas a analisar a última década, expõe-se nas Tabelas 2, 3 e 4 a área plantada, a produção e a produtividade de cana de açúcar para as principais regiões produtoras e para o Brasil.

Tabela 2 - Série histórica da área plantada total de cana de açúcar no Brasil em mil hectares, safra de 2005/2006 a 2015/2016

Regiões	2005/ 2006	2006/ 2007	2007/ 2008	2008/ 2009	2009/ 2010	2010/ 2011	2011/ 2012	2012/ 2013	2013/ 2014	2014/ 2015	2015/ 2016
Norte/ Nordeste ⁽¹⁾	1.096	1.143	1.058	1.069	1.100	1.133	1.149	1.125	1.077	1.027	967,4
Centro/Sul ⁽¹⁾	4.744	5.020	5.952	5.989	6.310	6.923	7.213	7.360	7.735	7.978	7.687
Brasil ⁽¹⁾	5.840	6.163	7.010	7.058	7.409	8.056	8.363	8.485	8.811	9.004	8.654

Fonte: CONAB (2016).

Notas: ⁽¹⁾ Os valores de uma casa decimal foram arredondados para números inteiros.

Em conformidade com a Tabela 2, constatou-se a preponderância da região Centro/Sul com 88,8% da área dedicada ao cultivo de cana de açúcar no Brasil, em virtude do desenvolvimento tecnológico e dos investimentos, tanto na parte agrícola quanto industrial. Esse panorama realçou a potencialidade de ampliação de área plantada com a gramínea. Já os 11,2% restantes estão na região Norte/Nordeste que, consoante Vidal, Santos e Santos (2006), apresenta desvantagem em relação às outras regiões brasileiras, devido à utilização de solo menos fértil, reduzido volume de chuvas e à inviabilidade de mecanização do processo de colheita decorrente de condições topográficas desfavoráveis.

Adenda-se que da safra 2014/2015 para 2015/2016, todas as regiões sofreram queda na área de cultivo. Nas regiões Sul e Sudeste as chuvas atrasaram a colheita, no Centro-Oeste houve excesso de chuvas no Mato Grosso do Sul e no Nordeste fornecedores abandonaram as

lavouras (CONAB, 2016). Entretanto, isso não reduziu a produção de cana no Brasil na última safra (Tabela 3).

Tabela 3 - Série histórica da produção de cana de açúcar no Brasil em mil toneladas da safra de 2005/2006 a 2015/2016

Regiões	2005/ 2006	2006/ 2007	2007/ 2008	2008/ 2009	2009/ 2010	2010/ 2011	2011/ 2012	2012/ 2013	2013/ 2014	2014/ 2015	2015/ 2016
Norte/ Nordeste ⁽¹⁾	57.673	64.122	69.217	65.510	61.669	63.358	66.017	55.930	56.713	59.380	48.817
Centro/Sul ⁽¹⁾	373.740	410.678	502.154	505.925	542.845	560.547	494.938	532.986	602.109	575.387	616.770
Brasil ⁽¹⁾	431.413	474.800	571.371	571.434	604.514	623.905	560.955	588.916	658.822	634.767	665.586

Fonte: CONAB (2016).

Notas: ⁽¹⁾ Os valores de uma casa decimal foram arredondados para números inteiros.

Através da Tabela 3, verificou-se que a região Centro/Sul desde o início da série consubstanciou-se na maior produtora de cana de açúcar com 92,7%, em virtude da grande extensão de terras dedicada ao cultivo dessa cultura, condições hídricas e climáticas favoráveis e infraestrutura das usinas. Já na região Norte/Nordeste, a produção de cana equivaleu a 7,3%, com queda desde a última safra, o que pode ser explicado pelas chuvas abaixo da média e altas temperaturas, que prejudicaram a cultura.

Tabela 4 - Série histórica da produtividade de cana de açúcar no Brasil em quilogramas por hectare da safra de 2005/2006 a 2015/2016

Região	2005/ 2006	2006/ 2007	2007/ 2008	2008/ 2009	2009/ 2010	2010/ 2011	2011/ 2012	2012/ 2013	2013/ 2014	2014/ 2015	2015/ 2016
Norte/ Nordeste	55.063	56.089	65.430	61.302	56.074	55.926	57.460	49.706	52.678	57.843	50.464
Centro/Sul	78.915	81.808	84.363	84.476	86.032	80.968	68.613	72.419	77.844	72.123	80.237
Brasil	74.318	77.038	81.506	80.965	81.585	77.446	67.081	69.407	74.769	70.495	76.909

Fonte: CONAB (2016).

Assentado na Tabela 4, observou-se que sem embargo o protagonismo da região Centro/Sul, a diferença relativamente à produtividade da região Norte/Nordeste foi menos significativa, equivalendo a 63% da produção do Centro/Sul. Esse cenário revelou que mesmo com uma área plantada menor, a produção de cana em toneladas no Norte/Nordeste é elevada, mesmo estando sujeita a problemas climáticos e à idade do canavial.

Acrescenta que a área colhida de cana de açúcar destinada à atividade sucroalcooleira na safra 2015/16 foi de 8.654,2 mil hectares, e que os estados de São Paulo, Goiás, Minas Gerais, Mato Grosso do Sul, Paraná, Alagoas, Pernambuco e Mato Grosso

foram responsáveis por 94,9% da produção nacional, enquanto a performance dos demais 14 estados produtores foi de apenas 5,1%. Outrossim, sublinha que o Brasil teve redução de 350,3 mil hectares na área plantada no período de 2015/16, reflexo do comportamento da safra em São Paulo, Paraná e Mato Grosso do Sul, devido o excesso de chuva atrasar a colheita, e em Alagoas derivado de duas unidades de produção suspenderem o funcionamento nesta safra, o que influenciou negativamente na contabilidade produtiva do Nordeste (CONAB, 2016).

Destaca-se que em função desta pesquisa discorrer sobre a produção de cana de açúcar no Nordeste, em particular no Piauí, buscou-se investigar especificamente essa região e esse estado. Para tanto, apresenta-se nas Tabelas 5 e 6, dados referentes a essa temática.

Tabela 5 - Série histórica de área plantada de cana de açúcar no Nordeste e estados, em mil hectares

UF	2005/ 2006	2006/ 2007	2007/ 2008	2008/ 2009	2009/ 2010	2010/ 2011	2011/ 2012	2012/ 2013	2013/ 2014	2014/ 2015	2015/ 2016
CE	35,1	28,9	1,6	1,8	2,3	2,8	1,3	1,1	1,8	1,8	2,7
PI	10,0	12,5	13,1	13,1	13,6	13,3	13,9	14,7	15,0	13,9	15,1
MA	31,8	40,3	38,9	38,9	39,4	42,1	39,6	41,9	39,6	38,8	40,3
SE	24,8	31,1	34,9	36,0	37,9	37,0	42,5	43,4	44,5	44,4	49,8
RN	50,6	55,2	55,5	59,5	67,0	65,7	62,3	53,6	51,5	56,0	53,2
BA	55,0	70,7	37,4	37,4	37,4	42,6	42,6	48,6	53,5	48,2	53,3
PB	105,6	112,5	112,5	112,5	115,5	111,8	122,6	122,0	122,4	130,6	124,8
PE	362,4	369,6	316,6	321,4	321,4	346,8	326,1	312,1	284,6	260,1	254,2
AL	402,1	402,7	426,8	432,0	448,0	451,2	463,7	445,7	417,5	385,3	323,6
NE	1.077,4	1.123,5	1.037,3	1.052,6	1.082,5	1.113,3	1.114,6	1.083,2	1.030,2	979,0	916,9

Fonte: CONAB (2016).

De acordo com a Tabela 5, identificou-se que a despeito da redução da área produtiva em Alagoas (35,3%) e Pernambuco (27,7%), os mesmos continuam comandando a região Nordeste relativamente à área plantada, confirmando a posição como sexto e sétimo estados, respectivamente, com maior produção de cana do Brasil na última safra. Na Paraíba, as condições climáticas foram desfavoráveis durante a safra 2015/2016, em razão da má distribuição pluviométrica no período de desenvolvimento e maturação da cana, resultando numa queda de 4,5% de área plantada. As variedades cultivadas na Bahia foram favorecidas pela situação climática da região e quando não houve registros de precipitações pluviométricas, o canal foi 100% irrigado, sofrendo uma elevação de 10% na área total. No Rio Grande do Norte, o canal destinado ao setor sucroalcooleiro é cultivado na região Leste e Agreste potiguar, onde o impacto da escassez d'água foi em menor escala, mas apesar dessa condicionante houve queda de 5%. Nota-se que a falta de chuvas de agosto a novembro

de 2015, embora tenha prejudicado o desenvolvimento da cultura em Sergipe, não afetou o total de área plantada, que aumentou 12%. No Maranhão, apesar das condições meteorológicas não serem totalmente favoráveis, verifica-se aumento (4%) de área com canaviais no estado. Ademais, registra-se que a despeito do Piauí ser um dos estados com menor área plantada (1,6%), fica na frente apenas do Ceará, onde a cana de açúcar enfrenta dificuldades há muito tempo, provocando desestímulos aos produtores, devido à desativação de unidades de produção de açúcar e etanol, derivado das estiagens prolongadas que vêm penalizando o estado desde 2012, prejudicando diretamente a produção. Da safra 2014/2015 para a última safra, a área plantada com cana no Piauí teve um incremento de 8,5%.

Tabela 6 - Série histórica de produção de cana de açúcar no Nordeste e estados, em mil toneladas

UF	2005/ 2006	2006/ 2007	2007/ 2008	2008/ 2009	2009/ 2010	2010/ 2011	2011/ 2012	2012/ 2013	2013/ 2014	2014/ 2015	2015/ 2016
CE	1.773,3	1.619,1	111,5	124,0	154,4	180,5	77,4	57,0	128,6	130,5	208,6
PI	614,0	821,3	900,9	900,9	1.014,0	836,9	992,0	828,1	851,6	949,1	967,4
SE	1.417,5	1.626,8	2.306,2	2.380,0	2.249,7	2.025,6	2.551,5	2.219,3	2.321,3	2.376,4	2.284,7
MA	1.969,9	2.341,4	2.385,0	2.385,0	2.209,4	2.327,5	2.265,6	2.072,0	2.206,1	2.347,9	2.455,1
RN	2.637,8	2.888,1	3.075,0	3.296,7	3.472,5	2.729,4	2.973,3	2.247,8	2.158,2	2.688,8	2.467,7
BA	3.367,7	3.554,1	2.690,0	2.692,7	2.947,1	2.792,2	2.557,3	3.083,8	3.208,8	3.709,1	3.816,4
PB	4.765,1	5.927,2	6.117,0	6.117,0	6.320,0	5.246,3	6.723,1	5.354,9	5.283,1	6.307,9	5.532,5
PE	16.943,6	18.913,5	20.418,1	19.119,8	17.805,6	16.820,8	17.642,2	13.575,9	14.402,3	14.730,6	11.349,0
AL	23.110,7	25.168,8	29.864,3	27.400,0	24.504,5	29.120,4	27.705,4	23.533,5	22.454,6	22.422,5	16.193,4
NE	56.599,6	62.860,3	67.868,0	64.416,1	60.677,2	62.079,6	63.487,8	52.972,2	53.014,7	55.662,8	45.274,8

Fonte: CONAB (2016).

Constatou-se que a quantidade de toneladas (t) de cana de açúcar produzida no Nordeste (Tabela 6) sofreu uma redução de 18,6% na última safra, ainda que a produção tenha aumentado no Ceará (59,8%), no Maranhão (4,6%), na Bahia (2,9%) e no Piauí (1,9%). Salienta-se que esse cenário decorreu do aumento da área plantada com canaviais nos estados, como demonstrado na Tabela 5. Na última safra, 2015/2016, a produção de 967 mil toneladas de cana no Piauí foi equivalente a 2,2% da produção do Nordeste, que ultrapassou 45 milhões de toneladas. Já Alagoas e Pernambuco, estados com maior área plantada da região, tiveram queda de 27,8% e 23%, respectivamente, seguidos pela Paraíba (12,3%), Rio Grande do Norte (8,2%) e Sergipe (3,9%). Lembra-se que, em Alagoas, duas unidades de produção deixaram de funcionar nesta safra e em Pernambuco, as precipitações foram mal distribuídas, com chuvas intensas concentradas em poucos dias e de forma localizada, intercaladas com grandes intervalos de dias sem chuvas, os quais influenciaram negativamente na implantação de novas lavouras de cana de açúcar, na realização dos tratos culturais e no desenvolvimento pleno dos

canaviais da região.

Portanto, evidencia-se que o Brasil produziu 665,6 milhões de toneladas de cana de açúcar nesta safra (Tabela 3), apresentando incremento de 4,9% em relação à safra anterior e que esse aumento não foi maior em razão da crise hídrica que atingiu o Nordeste, afetando fortemente os níveis de produtividade dos canaviais, principalmente, em Alagoas e Pernambuco, que eram os maiores produtores da região.

2.3.1 Produção de cana de açúcar no Piauí

O território do Piauí possui uma área de 251.611,932 km², dividida em 224 municípios, contando com uma população estimada de 3.212.180 habitantes em 2016. Realça que, conforme o censo mais recente do IBGE, 65,8% e 34,2% da população total do Piauí residiam em áreas urbanas e rurais, respectivamente (IBGE, 2010). Sendo assim, expõe-se nas Tabelas 7 e 8, a proporção da área do estado em relação ao Nordeste e ao Brasil e o número de municípios.

Tabela 7 - Área do Piauí em relação ao Nordeste e ao Brasil

Discriminação	Área (km ²)	Percentual (%)
Piauí	251.611,932	
Nordeste	1.554.291,744	PI/NE 16,2
Brasil	8.515.767,049	PI/BR 3,0

Fonte: IBGE (2015).

Tabela 8 - Número de municípios do Piauí em relação ao Nordeste e ao Brasil

Ano	Número de Municípios			PI/NE (%)	PI/BR (%)
	Piauí	Nordeste	Brasil		
2014	224	1.794	5.570	12,5	4,0

Fonte: IBGE (2015).

Embasado nas Tabelas 7 e 8, constatou-se que a área do Piauí equivale a 16,2% de toda a área da região Nordeste e concentra 12,5% dos municípios, organizados em quatro macrorregiões (litoral, meio-norte, cerrados e semi-árido) e 12 territórios de desenvolvimento: Planície Litorânea, Cocais, Carnaubais, Entre Rios, Vale do Sambito, Vale do Rio Guaribas, Chapada do Vale do Itaim, Vale do Canindé, Serra da Capivara, Vale dos Rios Piauí e Itauera, Tabuleiros do Alto Parnaíba e Chapada das Mangabeiras. No contexto brasileiro, o Piauí abrange 3% da área do país e 4% dos municípios (PIAÚÍ, 2016).

De acordo com a CONAB (2016), o Piauí possuía 15,1 mil hectares de área plantada de cana de açúcar em dezembro de 2015. Tal cenário deriva do fato de a cultura da cana de açúcar ser recente, iniciada somente na década de 1980, com a instalação da Companhia Agroindustrial Vale do Parnaíba (COMVAP) no município de União (PI).

Alicerçado nessa caracterização, salienta-se a existência em funcionamento de uma única empresa sucroalcooleira, a COMVAP – Açúcar e Álcool Ltda., com uma área total de 16.000 ha, abrangendo municípios do Piauí, Teresina, União e José de Freitas, e do Maranhão, Caxias e Timon (COMVAP, 2016).

Enfatiza que os municípios piauienses se encontram na região Entre Rios, e fazem parte da Região Integrada de Desenvolvimento (RIDE) da Grande Teresina, juntamente com Timon – MA, como demonstrado na Tabela 9 (PIAUI, 2007).

Tabela 9 - Região Integrada de Desenvolvimento da Grande Teresina

Município	Área (km ²)	População (hab.)
Altos	957,62	39.795
Beneditinos	792,56	10.032
Coivaras	506,72	3.942
Currálinhos	362,80	4.353
Demerval Lobão	221,02	13.575
José de Freitas	1.538,21	38.440
Lagoa Alegre	394,66	8.365
Lagoa do Piauí	427,20	3.987
Miguel Leão	74,52	1.231
Monsenhor Gil	582,06	10.409
Nazária	363,8	8.398
Pau d'Arco do Piauí	426,63	3.957
Teresina	1.391,9	847.430
União	1.173,45	43.689
Timon (MA)	1.713,00	166.295

Fonte: IBGE (2016); CEPRO (2013); PIAUI (2007).

Registra-se que decorrente da sede administrativa, da planta industrial e de maior parte da lavoura de cana da COMVAP se encontrarem em território piauiense e apenas em pontos isolados nos municípios maranhenses, e pelos dados fornecidos pela Usina não apresentarem diferenciação entre os estados, esta pesquisa tratará toda a produção como se realizada no Piauí. Logo, destacaram-se na Tabela 9, os municípios com área plantada com cana de açúcar processada pela Usina, os quais se consubstanciam também nos municípios com maior extensão territorial e entre os mais populosos da Grande Teresina.

Segundo Almeida e Gonçalves (1990), a Companhia Agroindustrial Vale do Parnaíba foi implantada no estado em 1979, afetando muitas comunidades locais, como Melancias, Centro do Sítio, Havre de Graça, Três Irmãos e Meruoca, nas quais os moradores

da região sobreviviam do cultivo de produtos agrícolas, da criação de aves e caprinos, da caça e da pesca. Patenteiam também, que com o início das atividades usineiras, houve a introdução de novos valores culturais e a exploração da mão de obra local, impostas pelo então Presidente da empresa, o que provocou conflitos por terra, em virtude da expulsão de cerca de 600 famílias residentes da área, sem indenização, com a presença de tratores, armas e capangas, e a destruição dos beneficiamentos construídos. Explicitaram ainda, denúncias de regime de escravidão, de morte e de problemas físicos de muitos trabalhadores no decorrer dos primeiros 12 anos de funcionamento da COMVAP.

Inicialmente, a COMVAP produzia unicamente álcool, integrada ao programa Pró-Álcool, ocupando uma área de 6.000 ha de terras plantadas com canaviais que abrangiam os municípios de Teresina, União e José de Freitas. Posteriormente, incorporou outras terras, inclusive pertencentes ao Instituto de Colonização e Reforma Agrária (INCRA), totalizando 17.800 ha. A usina obteve apoio do governo estadual, que construiu 18 km de estradas vicinais e ampliou a rede elétrica. Em 1990, a COMVAP contava com aproximadamente 3000 trabalhadores, mas apenas 645 possuíam carteira de trabalho assinada, sendo que a jornada de trabalho variava de 11 a 12 horas por dia, além de ser comum a utilização de força-de-trabalho infantil (ALMEIDA; GONÇALVES, 1990).

Os referidos autores acentuam que no dia 19 de julho de 1990, um caminhão da COMVAP, apropriado para o transporte de cana, porém estava transportando cerca de 70 trabalhadores, chocou-se com outro caminhão da mesma empresa, resultando em 10 mortes, 15 pessoas mutiladas e 46 pessoas feridas gravemente. E que, derivado dessa catástrofe, fiscais, médicos e engenheiros da Divisão de Relações do Trabalho do Instituto Nacional do Seguro Social (INSS) fizeram uma vistoria na Usina em 1991, constatando várias irregularidades denunciadas pelos trabalhadores da COMVAP, como a precariedade do transporte dos boias-frias, a ausência de vínculo empregatício da maioria dos funcionários, e a falta de inspeção das caldeiras e de higienização das instalações sanitárias. Enfatizam, ainda, que esse acidente manchou tão profundamente a história da Usina, que obrigou os proprietários a colocarem a mesma à venda.

Em consonância com COMVAP (2016), a Empresa foi adquirida em 2002 pela Usina Olhos D'água, de Pernambuco, que fizera parte do Grupo Tavares de Melo, responsável pela primeira usina alcóolica do Brasil e que já estava no mercado desde 1928. Realça que a nova administração procurou resolver os problemas pendentes de ordem judicial, inclusive os trabalhistas e ambientais, e regularizar a situação da Usina. O processo ambiental, movido pelo Instituto Brasileiro do Meio Ambiente e dos Recursos Naturais Renováveis

(IBAMA), relativo à preservação de 100m de mata ciliar às margens do rio Parnaíba, foi solucionado mediante um acordo, que determinou que a cana fosse substituída por espécies nativas.

Com 87 anos de experiência, a “nova” COMVAP atualmente possui uma área total de 16.000 ha, sendo 12.000 ha de área plantada, empregando aproximadamente 2.360 trabalhadores na época da safra e 1.260 durante a entressafra. A Usina Olhos D’água iniciou na COMVAP a utilização conjunta de cana de açúcar produzida por terceiros, com a finalidade de estimular o crescimento da região e, em contrapartida, contar com fomento do governo do Piauí através dos incentivos fiscais da Lei n.º 4.859 de 1996, na forma de desconto no Imposto Sobre Circulação de Mercadorias e Serviços (ICMS), o que redundou na ampliação de área plantada e no acréscimo de mão de obra. Do total de cana processada, cerca de 80% é própria e o restante é fornecido por terceiros, resultante de parceria técnica com assentamentos rurais e com cerca de 50 fornecedores (COMVAP, 2016).

Segundo os diretores da Usina, o perfil da COMVAP é semelhante ao de outras empresas situadas no Nordeste: 70% do custo de produção decorrente da lavoura; 20% a 22% do custo se encontra na indústria; e 8% a 10% do custo se deve a gastos administrativos. Em função desse cenário reconhecem a importância da garantia da qualidade da cana de açúcar, haja vista o investimento predominante nesse ramo da atividade.

Toda a área da Usina, que se caracteriza como de Mata Atlântica, possui licença ambiental, com baixa utilização do solo, pois no Piauí opera-se economicamente em apenas 45% da área da COMVAP, devido à topografia da região. Nesse sentido, explicitou que a área de Reserva Legal⁶ é de 20% e a Área de Preservação Permanente (APP)⁷ é de 25%.

Conforme o Artigo 12 da Lei Federal 12.651 de 2012, todo imóvel rural deve manter área com cobertura de vegetação nativa, a título de Reserva Legal, sem prejuízo da aplicação das normas sobre as APPs, observado o percentual mínimo de 20% para imóveis localizados em regiões do país que não pertençam à Amazônia Legal (BRASIL, 2012).

A COMVAP situa-se em região com regime climático subúmido seco, cuja magnitude e distribuição espacial da precipitação pluviométrica são insuficientes e não satisfazem a exigência hídrica da cultura de forma adequada durante todo o seu ciclo.

⁶ Reserva Legal é a área localizada no interior de uma propriedade ou posse rural, delimitada nos termos do artigo 12 da Lei Federal n. 12.651 de 2012, com a função de assegurar o uso econômico de modo sustentável dos recursos naturais do imóvel rural, auxiliar a conservação e a reabilitação dos processos ecológicos, e promover a conservação da biodiversidade, bem como o abrigo e a proteção de fauna silvestre e da flora nativa (BRASIL, 2012).

⁷ APP é a área protegida, coberta ou não por vegetação nativa, com a função ambiental de preservar os recursos hídricos, a paisagem, a estabilidade geológica e a biodiversidade, facilitar o fluxo gênico de fauna e flora, proteger o solo e assegurar o bem-estar das populações humanas (BRASIL, 2012).

Portanto, exige a adoção da prática de irrigação que, por sua vez, pode causar impactos negativos ao meio ambiente, como salinização do solo, indisponibilidade de água para outras atividades e consumo de energia (ANDRADE JÚNIOR et al., 2012).

Nessa perspectiva, expõe na Tabela 10 a produção de açúcar, álcool e de energia, que aciona a Usina na época da moagem e cujo excedente é vendido para a concessionária local.

Tabela 10 - Safras da usina COMVAP de açúcar, álcool e energia de 2004 a 2015

SAFRAS	2004	2005	2006	2007	2008	2009	2010	2011	2012	2013	2014	2015
Cana total (t) ⁽¹⁾	349.331	492.294	706.059	689.134	900.176	1.014.077	836.697	991.947	827.756	851.482	948.654	967.427
Cana para açúcar (t) ⁽¹⁾	62.793	-	-	287.169	496.682	717.702	600.331	748.345	597.679	641.678	771.207	815.145
Cana para álcool (t) ⁽¹⁾	286.537	492.294	706.059	401.961	403.494	296.374	236.365	243.602	230.077	209.804	177.446	152.282
Açúcar (sc) ⁽²⁾	68.620	-	-	445.058	775.930	1.077.685	917.991	1.201.378	1.072.564	1.042.102	1.241.493	1.338.292
Álcool total (m ³) ⁽³⁾	19.455	35.083	50.501	36.169	44.553	40.953	35.480	37.480	32.581	31.928	32.507	32.679
Energia gerada (MWH) ⁽²⁾	-	-	-	-	493	3.182	3.018	5.777	4.580	5.260	10.814	10.728

Fonte: COMVAP (2015).

Notas: ⁽¹⁾ Duas casas decimais foram arredondadas para número inteiro.

⁽²⁾ Três casas decimais foram arredondadas para número inteiro.

⁽³⁾ Uma saca (sc) equivale a 50 kg de açúcar.

Através da Tabela 10, identificou-se que a quantidade total de cana processada em cada safra, entre 2004 e 2015, aumentou 277%, cuja culminância ocorreu em 2009, quando a cana moída ultrapassou o valor de um milhão de toneladas, que consubstanciou-se no objetivo dos novos donos da Usina. Tal incremento foi motivado pelo longo período chuvoso que acometeu o Nordeste nesse ano, uma vez que a irrigação do solo é essencial para a produtividade dos canaviais. Registra-se que em 2015, 4.000 ha da Usina encontravam-se irrigados ininterruptamente com água proveniente do rio Parnaíba, cujo uso é licenciado junto à Agência Nacional de Águas (ANA), sob a forma de outorga, que consiste em um ato administrativo, mediante o qual o poder público outorgante (União, estado ou Distrito Federal) faculta ao outorgado (requerente) o direito de uso de recursos hídricos, por prazo determinado, nos termos e nas condições expressas no respectivo ato (BRASIL, 1997a).

Consoante a Constituição Federal de 1988, a água é um bem de domínio ou da União ou dos estados. A Lei n.º 9.433 de 1997, conhecida como Lei das Águas, estabelece, em seu Artigo 1º, inciso I, que a água é um bem de domínio público, o que significa que, se um empreendedor necessitar utilizar a água em um processo produtivo, terá que solicitar a outorga ao poder público, federal ou estadual.

Portanto, seguindo esses arranjos legais, em Resolução publicada no Diário Oficial em 1º de julho de 2015, o Superintendente da ANA tornou pública a outorga à COMVAP Açúcar e Álcool Ltda. de água do rio Parnaíba, Município de União/Piauí, para irrigação, válida por dez anos.

Patenteia-se que o aumento na quantidade de cana processada derivou da mudança de foco da produção da Usina, de inicialmente dedicada apenas ao álcool, passou a empregar em torno de 80% de toda a cana processada na produção de açúcar. Inclusive, revela-se que o melaço gerado durante a produção de açúcar era misturado com o caldo já diluído para produção de álcool. Adenda-se que na safra de 2015, somente 15% do caldo produzido na moagem foi destinado ao álcool e o restante direcionou-se para a produção de açúcar, que tem se mantido acima de um milhão de sacas desde a safra de 2011. E que, a qualidade do açúcar é medida de hora em hora pela cor, ou seja, pela transmitância do açúcar diluído, e que a qualidade da cana é determinada antes do processamento pelo valor do ATR. Porém, destaca-se que 100% da cana obtida de fornecedores foi analisada, pois eram pagos pelo ATR e que da cana produzida na área da COMVAP, apenas 55% a 60% foram analisados.

Ademais, de acordo com COMVAP (2016), no período da moagem, que no Piauí ocorre entre julho e dezembro de cada ano, processam-se de 6000 a 6500 toneladas de cana a cada 24 horas, sendo que cada tonelada produz 80 quilos (kg) de açúcar ou 80 litros (L) de

álcool. Logo, em função dessa performance, registraram que na safra de 2014, a participação da usina COMVAP – Açúcar e Álcool Ltda. no Produto Interno Bruto (PIB) do Piauí foi de 0,3%.

Sem embargo a COMVAP localizar-se na região Norte do Estado, Velloso (2013) apresenta o Polo Sucroalcooleiro na região do Platô de Guadalupe, situado no município de mesmo nome, a 298 km de Teresina, no sul do estado, como oportunidade de desenvolvimento para o Piauí, em função do estabelecimento da Terracal Alimentos e Bioenergia, empresa que está em processo de aração e preparação de solo.

Para Terracal (2012), o Polo Integrado de alimentos e bioenergia que será implementado no estado do Piauí, visa a produção irrigada de cana de açúcar, tomate cereja (*Solanum lycopersicum* var. cerasiforme) e cacau, matérias-primas que serão processadas localmente num complexo industrial para produzir etanol, açúcar, pasta de tomate e amêndoas de cacau, além de gerar energia elétrica de bagaço e palha de cana. Acentua que, com investimentos previstos de R\$ 1,5 bilhão, o empreendimento está focado em três frentes, mas este estudo ressalta o planejamento do plantio de 27.360 ha de cana de açúcar e na implantação de uma usina com capacidade de moagem de até 3.420.000 t/ano de cana para produção de etanol e açúcar, e capacidade instalada de cogeração de até 137 MW.

Por conseguinte, inferiu-se que a cultura da cana de açúcar foi responsável por grandes variações na economia brasileira, tanto de momentos de elevado retorno financeiro e reconhecimento mundial como de crises avassaladoras. Que o Nordeste, onde a cultura foi inicialmente implantada, deixou de ser o maior produtor brasileiro, e o Piauí, último estado da região a ser colonizado, nunca teve a exploração de canaviais como atividade dominante, em virtude das desvantagens climáticas e de sua base econômica ser historicamente alicerçada em atividades secundárias, como extração de produtos de origem vegetal, como algodão, cera de carnaúba e babaçu. Essa performance decorreu do fato da ocupação tardia que, além de isolar o Estado, o prejudicou no acesso a investimentos para modernizar o setor agrícola, redundando em baixa produtividade.

Ademais, enfatiza-se que ao mesmo tempo em que se reconheceu a relevância dos avanços tecnológicos nas últimas décadas, para o favorecimento do setor sucroalcooleiro, verificou-se que estes se concentraram na região Centro/Sul, a qual já era beneficiada pelas características de solo, relevo e clima. No entanto, faz-se mister sublinhar que a produção conjunta das regiões Centro/Sul e Norte/Nordeste tornou o país o maior exportador dos dois produtos da cana de açúcar, o açúcar e o etanol, que revolucionou a matriz energética do Brasil.

3 PRODUÇÃO DE AÇÚCAR E ETANOL NO BRASIL

Este capítulo analisa o setor canavieiro no Brasil e para tanto se distribui em cinco itens. O primeiro aborda a cana de açúcar como matéria-prima para o açúcar e para o álcool, combustível considerado substituto para os combustíveis derivados de petróleo que são, por definição, recursos esgotáveis. O segundo versa sobre a criação do Instituto do Açúcar e do Álcool (IAA), o terceiro trata do Programa Nacional do álcool (Proálcool), o quarto discute os possíveis impactos positivos e negativos do uso do etanol como fonte de energia, enquanto o quinto apresenta o panorama geral do setor energético brasileiro.

3.1 Cana de açúcar como matéria-prima

Historicamente, o Brasil lidera o conhecimento acerca da biotecnologia da cana de açúcar, seguido pela Austrália e pela África do Sul, inclusive ressalta-se que dessa matéria-prima extraem-se diversos subprodutos, contudo esta dissertação focar-se-á somente no açúcar e no álcool. Segundo Vieira (2007), o Brasil é o principal produtor e exportador de açúcar e álcool do mundo, em função de possuir o menor custo de produção entre os competidores do mercado internacional. Elucida que esses produtos provêm de unidades industriais, distinguidas em usinas de açúcar (fabricam açúcar), destilarias autônomas (produzem álcool) e usinas com destilaria anexa (fabricam açúcar e álcool). E que em 2007, 68% das referidas unidades produziam ambos, porque apesar de diferirem quanto aos tipos, qualidade de equipamentos e controles operacionais usados, as tecnologias de produção de açúcar e de álcool são muito parecidas nas usinas brasileiras.

Para Aquino et al. (2014), no Brasil, a fabricação de álcool da cana de açúcar é realizada geralmente em unidades agroindustriais que também produzem açúcar, devido à uma forte interação entre os dois processos produtivos, visto que utilizam muitos equipamentos em comum e encerram diferenças apenas no final de cada processo.

3.1.1 Açúcar

Salientam que a produção nacional de açúcar, que se manteve praticamente estacionária de 1973 até 1992, a partir desse ano cresceu progressivamente até 2000,

proporcionando ao Brasil assumir a posição de liderança nas exportações mundiais de açúcar, devido ao descrédito do álcool combustível, à desregulamentação nas exportações de açúcar, à alta produção do sistema agroindustrial da cana de açúcar e à possibilidade de alocação da colheita de cana entre produção de açúcar ou de etanol, o que possibilitou afetar o preço desses produtos no cenário internacional (IEL/SEBRAE, 2005).

A Organização para a Cooperação e Desenvolvimento Econômico (OECD) atribui ao Brasil grande parte da responsabilidade por determinar os níveis de preços de açúcar no mundo, apontando como elementos-chave o custo de produção no Brasil e a flexibilidade para determinar o produto final (OECD, 2015).

Sendo assim, para Vieira (2007), a cana pode gerar vários tipos de açúcar, dos quais elenca:

- demerara ou bruto – tipo de açúcar em cujo processo de fabricação não se sulfitou o caldo e a massa cozida não sofreu lavagem na centrífuga, conservando intacta a película de mel que envolve seus cristais;
- *Very High Polarization* (VHP) – quando o processo de fabricação do caldo é mínimo ou nenhum e a massa cozida passa por lavagem reduzida na centrífuga, resultando no açúcar mais exportado pelo Brasil, utilizado como matéria-prima para outros processos;
- cristal – denominação de todos os açúcares brancos produzidos diretamente pela usina de açúcar, fabricado com base em um caldo sulfitado por meio de um processo em que os cristais são lavados na centrifugação e secos em secadores;
- açúcar refinado granulado – puro, sem corantes, sem umidade ou empedramento, com cristais bem definidos e grãos uniformes, sendo muito usado na indústria farmacêutica;
- açúcar refinado amorfo – com baixa cor, dissolução rápida, grãos finos e brancura excelente, e utilizado no consumo doméstico, em misturas sólidas de dissolução instantânea, bolos e confeitos, caldas transparentes e incolores;
- glaçúcar – conhecido como açúcar de confeitiro, tem grânulos bem finos, cristalinos, e é produzido diretamente na usina, sem refino. Destina-se à indústria alimentícia, que o aplica em massas, biscoitos, confeitos e bebidas;
- xarope invertido – adoçante natural constituído pela mistura em partes iguais de glicose, frutose e sacarose, apresentado na forma líquida em uma solução límpida e ligeiramente amarelada, com odor e sabor característico e com alto poder adoçante. Assume solução aquosa com alto grau de resistência à contaminação microbológica, usada em frutas em calda, sorvetes, balas e caramelos, licores, geleias, biscoitos e bebidas carbonadas;

- xarope simples ou açúcar líquido – adoçante natural de sacarose apresentado na forma líquida em uma solução, frequentemente inodora, límpida e cristalina, obtida pela dissolução de açúcar em água, com posterior purificação e descoloração. Trata-se de uma solução aquosa usada quando é fundamental a ausência de cor, caso de bebidas claras, balas, doces e produtos farmacêuticos;
- açúcar orgânico – produto de granulação uniforme, sem nenhum aditivo químico na fase agrícola e na industrial, podendo ser do tipo claro ou dourado. Durante a produção, todos os fertilizantes químicos são substituídos por um sistema integrado de nutrição orgânica para proteger o solo e melhorar as características físicas e químicas, além de evitar doenças com o uso de variedades mais resistentes e combater pragas com inimigos naturais.

Já IEL/SEBRAE (2005) sublinham que o açúcar orgânico brasileiro destina-se principalmente ao mercado norte-americano e possui vantagens por atingir preços maiores que o açúcar convencional no mercado internacional; os principais clientes do açúcar líquido são as engarrafadoras de refrigerantes, especialmente as grandes marcas; e que tanto o açúcar líquido quanto o invertido demandam capacitação em processos de limpeza dos equipamentos para movimentação, carga e descarga, e armazenagem.

De acordo com OECD (2015), em função de aumentos significativos na produção de açúcar ao longo das últimas quatro safras, ocorreu grande excedente, o que provocou queda nos preços internacionais. Adenda que a maior parte da produção adicional era derivada de países que utilizam cana de açúcar como matéria-prima, em vez de beterraba, e da expansão da área de cultivo, notadamente no Brasil, embora possa ser originada também de acréscimo dos rendimentos das culturas de açúcar e do processamento. Estimou que uma maior participação da produção de cana do mundo era dedicada à produção de etanol, passando de cerca de 20% em 2014 para 26% em 2024, e que na próxima década, o Brasil deva manter a posição de principal exportador de açúcar do mundo, com uma contribuição em torno de 40%.

O Brasil é o maior produtor e exportador mundial de açúcar, por isso, quando a economia é afetada por mudanças políticas e agitação no mercado financeiro, os custos de produção oscilam e o preço do açúcar varia. Outrossim, o açúcar no Brasil é produzido a partir da cana de açúcar, cujas plantações estão sujeitas aos fenômenos climáticos e meteorológicos, o que pode interferir na produção. Mesmo assim, a demanda global por alimentos doces permanece, pois a presença de açúcar na indústria alimentícia é crescente, na medida em que não se configura somente em mercadoria de luxo, senão é utilizado em praticamente todos os alimentos processados, como no revestimento de comprimidos, pães, entre outras coisas.

3.1.2 Etanol

Entende por biocombustível qualquer tipo de combustível proveniente de biomassa vegetal, que se comporta de modo semelhante e que pode ser empregado para substituir combustíveis de transporte, como gasolina e diesel, e em motores de combustão interna. Existem vários tipos de biocombustíveis, mas neste trabalho focar-se-á no etanol, ou bioetanol, consumido como substituto para a gasolina (BREHMER; SANDERS, 2009).

Para Aquino et al. (2014), etanol, ou álcool etílico combustível, corresponde a um tipo de álcool constituído por dois átomos de carbono, cinco átomos de hidrogênio e um grupo hidroxila, organizados em uma única molécula: C_2H_5OH . E por ser oriundo de biomassa, pode ser obtido a partir de diferentes matérias-primas, como milho, beterraba, trigo e cana de açúcar.

O etanol combustível produzido com base na cana de açúcar encerra duas diferentes formas: anidro, para ser misturado à gasolina, e hidratado, para ser usado exclusivamente como combustível veicular ou engarrafado para o consumo doméstico. Registra que um terceiro tipo, conhecido como álcool extraneuro, é empregado apenas para fins industriais (VIEIRA, 2007).

Em consonância com Turdera, Franzotti e Peterson (2015), o etanol hidratado tem um teor de água de aproximadamente 5,6% em volume e o anidro é virtualmente livre de água.

Conforme Leite e Cortez (2013), o início do século XX presenciou uma mudança no cultivo de cana de açúcar para a produção de etanol, em virtude da necessidade de amenizar as sucessivas crises do setor açucareiro e reduzir a dependência do petróleo importado. Nesse período, o etanol foi introduzido na matriz energética brasileira e, em 1925, ocorreu a primeira experiência com etanol combustível, como aditivo à gasolina. Porém, somente em 1931, o combustível produzido da cana de açúcar passou a ser oficialmente adicionado à gasolina, então importada.

Segundo Turdera, Franzotti e Peterson (2015), o etanol é catalogado dentro do conceito de energia verde, porque age como um absorvedor do dióxido de carbono (CO_2) atmosférico, contribuindo para a redução de GEE e dos impactos ambientais. Sublinham, fundamentado em uma análise do ciclo de vida completo, que o uso do etanol de cana em substituição à gasolina pode evitar até 90% das emissões de gases carbono-equivalentes (CO_2eq); e que o termo CO_2eq permite que outras emissões de GEE sejam expressas em termos de CO_2 , com base no Potencial Relativo de Aquecimento Global (GWP).

Consoante Brehmer e Sanders (2009), a tecnologia convencional para produção de biocombustíveis se assenta na conversão da porção comestível (amido, açúcar, óleos, etc.) das culturas fornecedoras de alimentos, os quais denominam-se biocombustíveis de primeira geração.

Essa contextualização para Leite e Cortez (2013) manifesta que o álcool de cana de açúcar é muito superior a qualquer outro biocombustível produzido em larga escala atualmente. Inclusive, a produtividade é mais elevada, visto que a quantidade de biomassa produzida por unidade de área de cana é significativamente mais alta que qualquer outro vegetal, o que acarreta numa maior quantidade de combustível produzida por unidade de área, dentro dos limites das tecnologias atuais. Assim, o custo de produção diminui por requerer menor extensão de terra para a mesma produção.

Ademais, Turdera, Franzotti e Peterson (2015) acrescentam que os custos de produção a partir desta matéria-prima têm reduzido sistematicamente, uma vez que o etanol não está sujeito a oscilações de mercado externo e apresenta grande produtividade em todo o território.

Além disso, ressalta o Balanço Energético (NEB) ou ciclo de vida da produção de etanol procedente da cana, que consiste na razão entre a energia obtida e a energia total utilizada para produzi-la, que é muito maior para o álcool de cana do que para qualquer outro biocombustível. Destarte, registra por um lado, que o valor internacionalmente reconhecido é nove, o que significa que, para cada unidade de energia fóssil consumida, durante o processo produtivo, são geradas nove unidades de energia renovável na forma de etanol. E, que por outro lado, devido ao NEB depender de fatores como mecanização, uso de pesticidas e fertilizantes, modo e distância de transporte, entre outros, diferentes cultivos e sistemas agrícolas requerem quantidades distintas de energia e liberam quantidades variadas da mesma, o que leva a uma diversidade de NEB (EMBRAPA, 201?).

Leite e Cortez (2013) acentuam que o álcool de milho, produzido nos EUA e responsável por mais de um terço do consumo mundial, demonstra um NEB entre um e 1,4. Que a beterraba, usada na Europa, sob tal perspectiva, apresenta o ciclo de vida de aproximadamente dois. E que, com exceção do óleo de palma, que tem, para esse parâmetro, um valor próximo a cinco, as demais opções não superam a marca de três para o NEB, conforme as limitações das tecnologias atualmente em uso.

Uma análise do ciclo de vida realizada pelo Instituto Ekos Brasil, em 2006, mostrou que para o etanol de cana substituindo uma parte da gasolina consumida na Suíça, o NEB foi de 5: 6 para 1, na medida em que considerou-se também a energia consumida no transporte do

etanol. Tal cenário expressa que, mesmo quando o etanol é exportado para outros países, o NEB final é altamente positivo quando comparado com outras culturas. Salientam que a produção de etanol derivado do milho e outras culturas requer importações consideráveis de combustíveis fósseis para as usinas produtoras, resultando em NEBs que variam entre quase zero e um pouco mais que um (GOLDENBERG, J.; COELHO, S. T.; GUARDABASSI, P., 2008).

Fischer et al. (2012) enfatizam que a produção mundial de etanol combustível é dominada por dois produtores, os EUA e o Brasil, os quais em 2008 contribuíram com cerca de 90% da produção total desse combustível. E que, embora tenham enfrentado dificuldade para obter dados detalhados sobre as matérias-primas utilizadas, concluíram que 45 a 50% da produção mundial de etanol combustível se baseou na cana de açúcar no ano da publicação, o que requereu de 280 a 300 milhões de toneladas de cana de açúcar proveniente de uma área estimada de 3,75 milhões de hectares.

Diante do exposto, reconheceu-se que a agricultura encontra-se em conflito permanente com o ambiente, o qual é geralmente subestimado quando se trata de cana e etanol no Brasil, porque o etanol de cana surgiu como solução para o problema da dependência de petróleo do país e, mais recentemente, começou a ser visto como uma solução potencial para o aquecimento global, além de beneficiar a economia, criando novas oportunidades no comércio internacional. Nesse sentido, patenteia-se que os benefícios do uso do etanol são comumente comparados aos impactos da perda de recursos naturais associados à expansão da cana e ao aumento da produção de etanol no Brasil. Porém, a crítica crescente da sustentabilidade de muitos biocombustíveis de primeira geração tem despertado a atenção para o potencial dos biocombustíveis de segunda geração, pois dependendo da escolha da matéria-prima e da técnica de cultivo, a produção desses biocombustíveis apresenta potencial de fornecer vantagens, como consumir os resíduos gerados e usar as terras abandonadas.

3.2 Criação do Instituto do Açúcar e do Alcool (IAA)

Preocupado com o eminente desaparecimento do açúcar brasileiro no mercado internacional, o Governo procurou adotar uma política de proteção da agroindústria canavieira, processo que foi acelerado pela grande crise mundial de 1929.

Em virtude desse cenário, Getúlio Vargas, por meio do Decreto-Lei n.º 19.717, de 20 de fevereiro de 1931, tornou obrigatória a aquisição, por parte do importador de gasolina, de álcool anidro de procedência nacional e a adição do mesmo na proporção de 5% à gasolina,

conforme o Artigo 1º:

A partir de 1 de julho do corrente ano, o pagamento dos direitos de importação de gasolina somente poderá ser efetuado, depois de feita a prova de haver o importador adquirido, para adicionar à mesma, álcool de procedência nacional, na proporção mínima de 5% sobre a quantidade de gasolina que pretender despachar, calculada em álcool a 100%. Até 1 de julho do 1932, tolerar-se-á a aquisição de álcool de grau não inferior a 96 Gay Lusac a 15° C., tornando-se obrigatória, dessa data em diante, a aquisição de álcool absoluto (anidro) (BRASIL, 1931a).

Enquanto o Artigo 6º previa a alteração de 5%, de acordo com o aumento ou diminuição da produção de álcool no país, o Artigo 9º estabelecia que os automóveis de propriedade ou a serviço da União, dos Estados e dos Municípios deveriam, sempre que possível, consumir álcool. Já o Artigo 17 determinou a desoneração das importações de maquinários e equipamentos com a finalidade de produzir álcool anidro:

Até 31 de março de 1932, gozará de isenção de direitos de importação, expediente e demais taxas aduaneiras, o material necessário à montagem de usinas para fabrico e redestilação do álcool anidro. Essa isenção abrange não só o material das primeiras instalações, como o indispensável ao aperfeiçoamento e adaptação para preparo do álcool anidro, das destilarias existentes no país. Igual favor é concedido, também, no aludido prazo, ao material destinado à destilação dos xistos betuminosos e ao aparelhamento das destilarias desta natureza, porventura, já instaladas (BRASIL, 1931a).

O Governo instituiu, também, por meio do Decreto-Lei n.º 20.356, de 01 de setembro de 1931, o serviço de fiscalização técnica das medidas contidas no referido Decreto, com o intuito de desenvolver o uso do álcool-motor no país, ou seja, estipulou os princípios norteadores para a fiscalização e buscou incentivar a instalação de usinas e destilarias nas unidades da federação onde se concentrava a maior parte do mercado consumidor, como rezava o Artigo 13:

A primeira usina para fabricação e redestilação de álcool anidro que se instalar em cada um dos Estados, do Rio de Janeiro, Pernambuco ou São Paulo, dentro do prazo estipulado no art. 17, do decreto n.º 19.717, com capacidade para produzir, no mínimo, quinze mil litros diários de álcool (anidro) e dotada de todos os aperfeiçoamentos modernos, será concedido o premio de cinquenta contos de réis (BRASIL, 1931b).

A fim de corrigir as distorções da economia açucareira, como a superprodução de açúcar e as disparidades regionais relacionadas com a utilização de técnicas mais ou menos aprimoradas, o Governo criou a Comissão de Defesa da Produção do Açúcar (CDPA), com o Decreto-Lei n.º 20.761, de 7 de dezembro de 1931. Segundo o Artigo 2º (BRASIL, 1931c), o papel da Comissão consiste em acompanhar a dinâmica da economia açucareira e fornecer

subsídios para a intervenção estatal quando necessária.

Dessa maneira, registra que somente através do Decreto-Lei n.º 21.010, de 01 de fevereiro de 1932, a CDPA foi regulamentada (BRASIL, 1932a).

A produção sucroalcooleira continuou sendo regulamentada por Decretos, inclusive o Decreto-Lei n.º 22.152, de 28 de novembro de 1932, foi um dos primeiros a articular, simultaneamente, a produção de açúcar e de álcool, para limitar a fabricação de açúcar e aumentar a produção de álcool anidro em todo o território brasileiro, com o objetivo de solucionar os problemas que desequilibravam a economia nacional, como a superprodução de açúcar e a carência de petróleo (BRASIL, 1932b).

Ainda sob o governo de Getúlio Vargas, por meio do Decreto n.º 22.789, de 1º de junho de 1933, foi criado o Instituto do Açúcar e do Álcool (IAA), que configurou-se no principal símbolo da intervenção governamental no país (BRASIL, 1933).

Em consonância com Vieira (2007), o IAA centralizava as operações de exportação brasileira e era a única Instituição autorizada a comprar açúcar no mercado doméstico e a estabelecer contratos de exportação, além de ser responsável pela concessão de subsídios aos produtores.

Adenda que o Decreto-Lei n.º 737, de 23 de setembro de 1938, tornou obrigatória a mistura de etanol anidro na gasolina de procedência nacional e estrangeira (BRASIL, 1938).

Nesse sentido, para Vieira (2007), a adição de álcool anidro à gasolina ocorria em proporções distintas, de acordo com a região, com a finalidade de estabilizar o preço do açúcar no mercado interno, mas sem regulamentar o seu uso.

Ademais, entre os objetivos do IAA constantes no Artigo 4º do Decreto n.º 22.789, cita-se:

- a) assegurar o equilíbrio interno entre as safras anuais de cana e o consumo de açúcar, mediante aplicação obrigatória de uma quantidade de matéria-prima, a determinar, ao fabrico do álcool;
- b) fomentar a fabricação do álcool anidro, mediante a instalação de destilarias centrais nos pontos mais aconselháveis ou auxiliando, nas condições previstas neste decreto e no regulamento a ser expedido, as cooperativas e sindicatos de usineiros que, para tal fim se organizarem, ou os usineiros individualmente, a instalar destilarias ou melhorar suas instalações atuais (BRASIL, 1933).

O IAA atuava no plano regulatório do setor, controlando preços e cotas de produção, e financiava o Programa Nacional de Melhoramento da Cana (Planalçúcar), que contava com profissionais de elevado nível de qualificação prática, direcionados à evolução da pesquisa, da capacitação e da assistência técnica (IEL/SEBRAE, 2005).

Assentado nesse panorama, infere-se que a criação do IAA, em 1933, tinha como

principais objetivos resolver os problemas de superprodução da agroindústria canavieira, por meio de planejamento e de controle da produção, com a finalidade de adequar as necessidades dos consumos interno e externo, e organizar as bases para o aumento da produção alcooleira nacional, através de financiamentos de destilarias anexas às usinas de açúcar.

3.3 Programa Nacional do Álcool (Proálcool)

Ressalta-se que não obstante essas ações iniciais, foi apenas em 1975, com o lançamento do Programa Nacional do Álcool (Proálcool), que o Governo criou as condições necessárias para que o setor sucroalcooleiro brasileiro se tornasse, três décadas mais tarde, um dos mais modernos do mundo, tendo alcançado significativos resultados ambientais e econômicos. Além disso, consoante Silva e Sakatsume (2007), o Proálcool é considerado a maior experiência mundial de exploração comercial de biomassa como fonte energética.

Segundo Goldemberg (2007), no final de 1970, o Governo Federal determinou a mistura de até 25% de etanol anidro na gasolina e encorajou os fabricantes de automóveis a produzir motores movidos a etanol hidratado puro, com vistas a reduzir as importações de petróleo. Evidencia que sem embargo ter sido uma decisão do Regime Militar⁸, foi aceita pela sociedade civil, pelo setor agrícola e pelos fabricantes de automóveis, porque possibilitou o incremento da produção de etanol, em média 6% a.a., partindo de 0,9 bilhão de litros em 1980 para 3,0 bilhões de litros em 1990 e para 4,2 bilhões de litros em 2006, o que provocou a diminuição no custo do etanol. Sublinha que embora o custo do etanol em 1980 tenha sido aproximadamente três vezes o custo da gasolina, o preço nos postos de gasolina não apresentou diferença devido aos subsídios governamentais, os quais eram oriundos principalmente de impostos sobre a gasolina, pagos pelos condutores de automóveis. Entende que a despeito dos subsídios globais ao etanol somarem cerca de US\$ 30 bilhões ao longo de 20 anos, os custos foram compensados pela redução das importações de petróleo a partir do final de 2006. Destarte, desde os anos 1990, os subsídios ao etanol foram retirados progressivamente, tornando-se em 2004 plenamente competitivo com a gasolina nos mercados internacionais sem a intervenção do Governo, pois a tecnologia moderna disponível permitia elevada produtividade e a cogeração de energia, com venda do excedente para as concessionárias.

De acordo com Leite e Cortez (2013), na época do lançamento do Proálcool, o Brasil

⁸ No Brasil, o regime ditatorial-militar durou 25 anos, de 1964 a 1989, durante o qual as forças armadas exerceram controle sobre o aparelho do Estado e a cena política (CODATO, 2005).

importava, aproximadamente, 80% do petróleo consumido, inclusive porque não havia preocupação com a emissão de CO₂ durante a queima de combustíveis fósseis.

Para Vieira (2007), com o fim de enfrentar a primeira grande crise mundial do petróleo⁹, ocorrida em 1973, o Governo Federal idealizou a substituição do diesel, do óleo combustível e da gasolina por outras fontes internas de energia. Para tanto, criou o Proálcool em 1975, com a função de regulamentar o uso do álcool anidro misturado à gasolina em todo o país, para reduzir a importação de óleo cru e conter, assim, um déficit no balanço de pagamentos.

O Programa foi instituído através do Decreto n.º 76.593 de 14 de novembro de 1975, pelo Presidente Ernesto Geisel, depois de consultas e amplas discussões com os representantes do setor, na medida em que a possibilidade de usar o álcool proveniente da cana de açúcar como combustível automotivo já era conhecida há aproximadamente um século, e havia sido testada em diferentes ocasiões, mas até os anos 1970 a disponibilidade e baixo custo de derivados de petróleo desestimularam seu emprego. Salientam que a efetividade do Proálcool fundou-se no relatório que a Secretaria de Tecnologia Industrial (STI) do Ministério da Indústria e Comércio apresentou em setembro de 1975, denominado “Etanol como combustível”, no qual o desenvolvimento independente de tecnologias de produção para a utilização de biomassa como combustível era o aspecto central. Dessa forma, enfatizam as vantagens da exploração da cana de açúcar e a necessidade de pesquisa de outras fontes, como a mandioca (SILVA; SAKATSUME, 2007).

Consoante Aquino et al. (2014), na primeira etapa do Programa, de 1975 a 1979, as metas se basearam na produção de álcool etílico anidro para ser acrescentado à gasolina.

Contudo, no contexto do lançamento do Proálcool, a indústria automobilística mudou o cenário local, investindo fortemente em engenharia e pesquisa, gerando inúmeras inovações, como o carro movido a etanol (ANFAVEA, 2016).

O desenvolvimento da engenharia nacional, após a segunda crise do petróleo¹⁰, em 1979, possibilitou o surgimento de motores, especialmente, desenvolvidos para funcionar com etanol hidratado (UNICA, 2015).

Em conformidade com Aquino et al. (2014), a partir de 1982, iniciou uma nova etapa do Programa, na qual o Governo investiu para aumentar as vendas de veículos adaptados ao

⁹ No início da década de 1970, os principais países produtores do Oriente Médio começaram a regular as exportações do óleo às nações consumidoras. Mas o choque do petróleo ocorreu em 1973, quando as vendas para os EUA, maiores importadores mundiais, e para a Europa foram embargadas, e a produção sofreu firme redução em tempos de alta demanda, forçando o preço do barril a subir cerca de 400% em três meses (IPEA, 2010).

¹⁰ A paralisação da produção petrolífera do Irã, consequência da Revolução Islâmica, provoca o aumento do preço médio do barril, chegando a US\$ 40 (UNICA, 2015).

uso do etanol, incentivando a produção do álcool combustível, atingindo grande expressividade, pois em 1985, 95,8% dos carros fabricados no país já eram movidos a álcool.

De acordo com Leite e Cortez (2013), o etanol requeria subsídios para a penetração no mercado nacional por não ser economicamente competitivo, os quais duraram até o fim do Regime Militar, em 1984. Em meados da década de 1980, começou novo período, sem subsídios, quando o Governo diminuiu seu papel no setor.

Com o Proálcool, o Governo lançou uma grande operação de financiamento, contando com recursos do Banco Mundial¹¹, com vistas a ampliar as áreas plantadas com cana de açúcar, a instalação de aparelhos de destilarias maiores nas usinas de açúcar e a criação de destilarias autônomas em vários estados brasileiros, descentralizando a produção e utilizando novas áreas mais próximas dos centros de consumo. Sendo assim, o Programa atingiu o objetivo e introduziu uma nova fonte energética baseada totalmente em tecnologia nacional. Em 1989, 60% da gasolina havia sido substituída (VIEIRA, 2007).

Segundo Castro et al. (2010), durante o Proálcool a cultura da cana, até então concentrada no Nordeste brasileiro, expandiu-se para o Centro-Sul do país, contando com fortes subsídios do Estado, com o apoio de instituições, como o IAA, e com uma base política eficiente junto ao Governo Federal. A agroindústria da cana prosperou até meados da década de 1980, centralizando-se em São Paulo, que se tornou o líder nacional do setor.

Esse contexto foi constatado conforme Vieira (2007), a partir da safra 1993/1994, quando o Centro/Sul ultrapassou o Norte/Nordeste, como a principal região exportadora de açúcar.

Porém, por outro lado, Aquino et al. (2014) relatam que a situação econômica desconfortável pela qual o Brasil passava nos anos 1980, em função da inflação, foi causadora das reduções drásticas dos investimentos do Proálcool. Além disso, em 1986, a queda do preço do petróleo tirou a atratividade do Programa, pois o aumento do preço do açúcar e a liberação da exportação em 1988, causaram redução na produção do etanol e, conseqüentemente, acréscimo do preço. Em virtude desse cenário, as vendas dos veículos movidos à gasolina aumentaram, o que culminou no término da produção de motores movidos somente a etanol nos anos 1990.

Portanto, entre 1986 e 2000, houve um crescimento da produção de açúcar e uma fase de estagnação na produção de etanol. Atribuíram tal situação a vários fatores nacionais e

¹¹ O Banco Mundial é uma organização internacional que surgiu em 1944, para atender às necessidades de financiamento da reconstrução dos países devastados pela Segunda Guerra Mundial. A Instituição, que se capitalizou com a venda de títulos ao mercado garantidos pelos países membros, mudou gradualmente o foco para os países em desenvolvimento (BRASIL, 2016).

internacionais, inclusive à queda no preço do petróleo (FISCHER et al., 2008).

Para Vieira (2007), a elevação dos preços internacionais do açúcar, aliada à queda do preço do barril de petróleo no mercado internacional, atraiu os produtores, o que limitou a oferta de álcool e provocou uma grave crise de desabastecimento, com consequente perda de credibilidade por parte do consumidor em relação ao Programa.

A partir de 1986, a redução do impacto da crise do petróleo e as tentativas de combater a inflação estimularam uma curva descendente na produção de carros a etanol, que culminou com a crise de abastecimento de 1989. Registra que a diminuição da demanda do etanol hidratado foi compensada pelo maior uso do anidro misturado à gasolina, o que acompanhou o crescimento da frota brasileira de veículos leves (UNICA, 2015).

Consoante Castro et al. (2010), a crise no final dos anos 1980, demandou um reajuste macroeconômico mundial, originando o que passou a ser conhecido como desregulamentação do setor sucroalcooleiro. Esse panorama, durante o governo do presidente Collor (1990-1992), foi responsável pela extinção de instituições públicas reguladoras, como o IAA, em março de 1990, determinando o fim dos subsídios fiscais e creditícios, desmontando, assim, as políticas públicas para o setor. O Proálcool foi extinto em 1991, mas sobrevieram outras políticas, desarticuladas e conflitantes entre si, frutos também dos conflitos entre os centros produtores. Além disso, tornou-se manifesto o confronto, entre os produtores de um mesmo bloco e entre os dois blocos que se consolidaram no processo: o Nordeste e o Centro/Sul.

Segundo Vieira (2007), a crise do setor sucroalcooleiro na década de 1990, em função da desregulamentação, induziu à concentração por meio de fusões e aquisições. Destarte, grupos nacionais e estrangeiros, estes em menor número, passaram a adquirir unidades produtivas que apresentavam dificuldades financeiras e operacionais. Logo, devido à necessidade de encolhimento de custos, esse processo baseou-se na implantação de novas tecnologias de produção agrícola e automação da produção industrial, o que refletiu negativamente sobre o número de empregos do setor.

Já com relação à dinâmica do crescimento em áreas de plantio da cana no país, Castro et al. (2010) identificam três fases no Programa: de 1975 a 1987, quando houve a criação do Proálcool, com rápida expansão da produção de álcool e refreamento da produção de açúcar.

Nesta fase, para Fischer et al. (2008), houve um aumento acentuado na área de cultivo de cana no Brasil, devido à demanda nacional de matéria-prima para o Programa.

A segunda fase, de 1988 a 2000, caracteriza-se pela crise do setor, decorrente da desregulamentação, incorrendo em certa estagnação, com oscilação na produção do etanol e

na produção de açúcar, com pequeno acréscimo da produção de ambos no período. A última fase, de 2000 a 2008, foi a época em que aconteceu uma nova expansão, igualmente rápida, superando todas as produções das fases anteriores e indicando claramente que, desde 2004, o etanol apresentava crescimento maior que o do açúcar, em área plantada (CASTRO et al., 2010).

Conforme Goldenberg (2007), a produção de etanol subiu de 600 milhões de litros no ano do lançamento do Proálcool para 18 bilhões de litros na safra 2006/2007, com elevação na produtividade agrícola e industrial.

Porquanto, o Programa Nacional do Álcool ostentou várias vantagens em relação ao uso de derivados de petróleo, em especial no que se refere ao desenvolvimento tecnológico, à estratégia de abastecimento, ao desempenho da economia, ao nível de emprego e à preservação do meio ambiente. Destaca ainda que o país desenvolveu uma tecnologia, única no mundo, para a utilização em larga escala de um combustível renovável independente do mercado internacional do petróleo (VIEIRA, 2007).

Acrescenta que de 2005 a 2008, ocorreu a mais rápida expansão das áreas cultivadas com cana, motivada pela necessidade de substituir o consumo de gasolina, reduzir as emissões de GEE e a dependência de combustíveis fósseis importados (FISCHER et al., 2008).

Por conseguinte, notou-se que desde a criação do Proálcool, visando o desenvolvimento das técnicas e aperfeiçoamento dos insumos para a produção de álcool etílico no Brasil, este passou por uma série de flutuações que refletiram as prioridades políticas, econômicas e energéticas do país. Como também, constatou-se que apesar da reconhecida eficiência técnica e da importância do Programa para a produção de etanol a partir da cana de açúcar, na medida em que esse combustível contém mais energia do que é gasta para a sua obtenção, além de ser uma alternativa para o uso de combustíveis fósseis, ocorreram críticas à sua implantação, principalmente no que concerne a competição por terras com o cultivo de alimentos. Ademais, sublinha-se a importância do Estado para o setor sucroalcooleiro, devido ser o responsável pela instituição de arcabouço legal, pela existência do referido setor e por ser o financiador (direta e indiretamente), uma vez que a maior parte das pesquisas é patrocinada pelas grandes empresas estatais, estimuladas por financiamentos públicos, via incentivos e subvenções fiscais; e realizadas nas universidades em parceria com o público-privado, como observado no caso da RIDESA.

3.3.1 Tecnologia *flex fuel*

A evolução da produção brasileira de bioetanol, nos últimos anos, se deve, principalmente, ao sucesso do Proálcool, mas também aos veículos flexíveis (*flex fuel*), lançados no mercado em março de 2003. A tecnologia *flex* se transformou na mais sucedida solução de uso de combustível renovável no mundo, inclusive em 2005, a venda desse tipo de veículo representou 52% de participação no mercado de veículos leves (ANFAVEA, 2016).

Em consonância com ÚNICA (2011), o carro *flex fuel* é movido a etanol, gasolina ou qualquer mistura entre os dois e, segundo Ferreira et al. (2015), seu advento provocou novo impulso ao setor sucroalcooleiro, haja vista que o consumo de etanol hidratado passou a crescer a taxas mais elevadas, batendo recordes históricos, cujo ápice foi em 2009.

Nesse contexto, o Brasil se destacou por acumular experiência de 30 anos no uso do bioetanol como fonte alternativa de combustível “limpo” e por ser o primeiro país a utilizá-lo em larga escala, diretamente como combustível ou através da adição compulsória de álcool anidro à gasolina (VIEIRA, 2007).

Para Goldenberg (2007), desde fevereiro de 1999, os preços do etanol não são mais controlados pelo Governo. Patenteia que o etanol hidratado é usualmente vendido por 60 a 80% do preço da gasolina com álcool anidro nos postos de gasolina e, apesar de não mais existir subsídio aos produtores, o etanol continua competitivo com a gasolina no mercado internacional, devido a reduções significativas nos custos de produção.

Segundo a Agência Nacional de Petróleo, Gás Natural e Biocombustíveis (ANP), entre março e maio de 2016, o etanol hidratado foi vendido ao consumidor brasileiro por um preço médio equivalente a 72,9% do preço médio da gasolina (ANP, 2016).

Dados da Associação Nacional dos Fabricantes de Veículos Automotores (ANFAVEA) apontam que, em 2000, os automóveis e veículos comerciais leves¹² licenciados no Brasil movidos a etanol e *flex fuel* representavam 0,8% do total, evoluindo para 93% do total em 2009, demonstrando uma trajetória de crescimento exponencial. Salaria que não obstante a proporção ter reduzido para 80% em 2010, a tecnologia *flex fuel* tem dominado o mercado brasileiro de automóveis e veículos comerciais leves, por permitir ao consumidor final escolher qual alternativa é mais razoável segundo uma relação de custo/benefício, ou mesmo de não ficar vulnerável à escassez de oferta (ANFAVEA, 2016).

Por conseguinte, infere-se que o aumento da preocupação com a disponibilidade e o

¹² Picapes leves, picapes médias, picapes grandes, vans, multivans e furgões (ANFAVEA, 2016).

preço dos combustíveis fósseis, com o meio ambiente e com o aquecimento global, possibilitou que o etanol se tornasse uma alternativa renovável de combustível para o Brasil e para o mundo.

3.4 Impactos ambientais do setor sucroalcooleiro

De acordo com Leite e Cortez (2013), a conscientização mundial acerca da emissão de GEE e suas consequências para o bem-estar do planeta modificaram as motivações da demanda de combustíveis, as quais passaram a ter como elemento decisivo a sustentabilidade, que passará a determinar também a produção futura.

Nesse sentido, Goldenberg (2007), ressalta que a despeito da atratividade da sustentabilidade, dadas fontes de energia renováveis configuram-se como mais caras do que a produzida a partir de combustíveis fósseis. Logo, em virtude desse entendimento, realça que o custo continua a ser uma barreira fundamental para a adoção generalizada da biomassa tradicional como fonte de energia. Nesse quesito, o Programa de etanol se diferenciou por se basear em tecnologia inerente às condições brasileiras, nas áreas industriais e agrícolas e, em contraste com o vento e a energia solar fotovoltaica, devido a não depender de importações e poder ser transferida para outros países em desenvolvimento. Sendo assim, reconhece que o etanol combustível do Brasil apresenta custo mais baixo do que o produzido por outras tecnologias, além de ser competitivo com a gasolina nos Estados Unidos, mesmo considerando a taxa de importação. Adenda, que embora inicialmente o estímulo para o uso de etanol tenha buscado apenas reduzir a dependência das importações de petróleo, a prática demonstrou também importantes benefícios ambientais e sociais, a despeito da expansão da produção de etanol da cana ter aumentado as preocupações sobre a sustentabilidade.

Para a OCDE (2015), há uma expectativa de acréscimo da produção global de etanol para atingir, até 2024, cerca de 134,5 bilhões de litros. Essa situação decorre do fato de que falta investimento em pesquisa e desenvolvimento de biocombustíveis avançados, estimulando que o etanol de primeira geração permaneça dominando a produção durante a próxima década. Destarte, a maior parte da produção adicional de etanol é prevista para ocorrer no Brasil, onde a expansão do uso relaciona-se à exigência de níveis elevados de etanol anidro misturado obrigatoriamente à gasolina e a um sistema de tributação diferenciado que permite que o etanol hidratado compita com a gasolina, pelo menos em alguns estados.

Dessa maneira, o Plano Decenal de Energia 2023 (PDE) projeta que a demanda energética por etanol (hidratado e anidro) no Brasil crescerá 87%, passando dos atuais 22,9

bilhões de litros para 42,8 bilhões em 2023. Já a demanda por gasolina automotiva está projetada para crescer 33%, variando dos 31,7 bilhões de litros consumidos em 2013, para 42,0 bilhões em 2023 (FERREIRA et al., 2015).

Para Goldenberg (2007), a expansão do Programa de etanol por um fator de 10 (ou seja, mais 30 milhões de hectares de cana de açúcar no Brasil) poderia fornecer etanol suficiente para substituir 10% da gasolina usada no mundo. Enfatiza que esta área de terra corresponde a uma pequena fração dos mais de um bilhão de hectares de culturas primárias já colhidas no planeta, e que nos últimos 30 anos, o uso do etanol, em substituição à gasolina, promoveu uma economia equivalente a mais de um bilhão de barris de petróleo.

Nessa perspectiva, com a finalidade de produzir sem agredir o meio ambiente, o Governo lançou uma regulamentação denominada Zoneamento Agroecológico da Cana de Açúcar (ZAE Cana), por meio do Decreto n.º 6.961, de 17 de setembro de 2009, estabelecendo diretrizes para orientar o planejamento sustentável do crescimento do setor sucroenergético, visando uma política agrícola que contemple sustentabilidade ambiental e segurança alimentar. Outrossim, o ZAE Cana previa, além da expansão do cultivo para regiões não exploradas do Nordeste com a finalidade de exportar, critérios para concessão de crédito rural e agroindustrial para produção e industrialização de cana de açúcar, alternativas sustentáveis aos produtores rurais para o cultivo da terra em harmonia com o meio ambiente e áreas aptas à expansão do cultivo e plantio da cana sem prejudicar a produção de alimentos (BRASIL, 2009).

Contudo, conforme Ottoni (2010), o Artigo 1º do referido Decreto reza que as revisões do Zoneamento são de responsabilidade do Ministério da Agricultura, Pecuária e Abastecimento, e não do Ministério do Meio Ambiente, sugerindo uma mudança na relevância do bem estar ambiental durante essa expansão.

Consoante Vieira (2007), o setor sucroalcooleiro obedece a regulação específica para os produtos, segundo a Associação Brasileira de Normas Técnicas (ABNT)¹³, a Agência Nacional de Petróleo, Gás Natural e Biocombustíveis (ANP)¹⁴ e a Agência Nacional de Vigilância Sanitária (Anvisa)¹⁵, entre outros. E que a legislação ambiental brasileira baseia-se

¹³ A ABNT é uma entidade privada, sem fins lucrativos, responsável pela elaboração das Normas Brasileiras, pela avaliação da conformidade e certificação de produtos, sistemas e rotulagem ambiental (ABNT, 2016).

¹⁴ A ANP é o órgão regulador das atividades que integram a indústria do petróleo e gás natural e a dos biocombustíveis no Brasil (BRASIL, 1997b).

¹⁵ A Anvisa promove a proteção da saúde da população, por intermédio do controle sanitário da produção e consumo de produtos, serviços e ambientes submetidos à vigilância sanitária (BRASIL, 1999).

na Lei de Crimes Ambientais¹⁶, Lei Federal n.º 9.605 de 1998, e no Código Florestal Nacional¹⁷, Lei n.º 12.651, de 2012.

De acordo com Silva e Sakatsume (2007), o cultivo de cana de açúcar, como qualquer intervenção antrópica, é causador de impactos ambientais. Inclusive, antes da disseminação da preocupação ambiental, a cana de açúcar ocupava grandes áreas de mata nativa.

Portanto, reconhece-se que o Brasil é capaz de fornecer para o mundo um combustível limpo e renovável contribuindo, assim, para o combate ao fenômeno de aquecimento global, tendo como benefício colateral, o próprio desenvolvimento econômico. Porém, a despeito dessa contextualização, compreende-se que o processo de produção desse combustível, e de açúcar, é responsável por impactar negativamente o meio ambiente.

3.4.1 Qualidade do ar

Realçam que por ter um balanço energético líquido positivo, o uso de etanol de cana produzido no Brasil não resulta em emissões líquidas significativas de GEE, pois os gases lançados devido à queima de etanol (e do bagaço, em caldeiras) são reabsorvidos pela fotossíntese durante o crescimento da cana na safra seguinte. É que, a conversão para o etanol permitia a eliminação progressiva de aditivos de chumbo, de metil-terciário-butil-éter (MTBE), de enxofre reduzido, de material particulado e de emissões de monóxido de carbono (CO). Especificamente, os aditivos de chumbo foram reduzidos à medida que a quantidade de álcool na gasolina aumentava, até a total eliminação em 1991. Registram que o Brasil foi um dos primeiros países do mundo a eliminar o chumbo inteiramente da gasolina e que em muitas usinas a fonte de energia (calor e eletricidade) necessária para a produção de açúcar e álcool é o próprio bagaço, usado para produzir eletricidade adicional que alimenta a usina (GOLDENBERG; COELHO; GUARDABASSI, 2008).

Entre 2012 e 2013, o consumo de etanol hidratado e anidro foi responsável por uma queda de 1,1% nas emissões de CO₂ ainda que, no mesmo período, a intensidade de uso dos automóveis tenha aumentado em 6,5% na quilometragem percorrida, o que sinaliza o impacto que esse combustível tem nas emissões de CO₂ pelo transporte de passageiros (FERREIRA et

¹⁶ A Lei de Crimes Ambientais dispõe sobre as sanções penais e administrativas derivadas de condutas e atividades lesivas ao meio ambiente, e dá outras providências (BRASIL, 1998a).

¹⁷ O Código Florestal estabelece normas sobre a proteção da vegetação, Áreas de Preservação Permanente e as áreas de Reserva Legal; a exploração florestal, o suprimento de matéria-prima florestal, o controle da origem dos produtos florestais e o controle e prevenção dos incêndios florestais, e prevê instrumentos econômicos e financeiros para o alcance de seus objetivos (BRASIL, 2012).

al., 2015).

Já Magalhães (2007) relata que a queima da cana de açúcar antes da colheita melhora o rendimento do corte manual, auxilia no preparo do terreno para novos plantios e aumenta a quantidade de açúcar por peso, devido à evaporação da água.

Para Goldenberg, Coelho e Guardabassi (2008), por um lado, a queima do canavial facilita a colheita manual das hastes e repele animais peçonhentos. Mas, por outro lado, pode danificar o tecido celular da haste da cana e, assim, aumentar o risco de doenças, destruir a matéria orgânica, danificar a estrutura do solo devido ao aumento da secagem e elevar as ameaças de erosão, a qual pode resultar em riscos para os sistemas elétricos, ferrovias, rodovias e reservas florestais. Afora esses impactos, presenciam emissões atmosféricas prejudiciais, como CO, metano (CH₄), compostos orgânicos não-metano e material particulado, e reconhecem que a queima na cana de açúcar é responsável pelo acréscimo de concentração de ozônio troposférico. Entretanto, revelam que estudos diferem quanto à existência de uma relação direta entre a queima da cana e danos à saúde humana.

O Decreto n.º 2.661 de 8 de julho de 1998, estipulou que a queima da cana de açúcar, prática considerada fundamental para a produtividade e comum, principalmente nas usinas nordestinas, deve encerrar-se gradativamente em território nacional até 2021, com o objetivo de reduzir os impactos ambientais e os prejuízos à saúde pública (BRASIL, 1998b).

Alcopar (2016) esclarece que, especificamente para as áreas não propícias ao corte mecanizado, bem como as com declive superior a 12%, terrenos pedregosos, entre outras, o prazo para extinção das queimadas será estendido até 2031.

Consoante IEL/SEBRAE (2005), muitas usinas deveriam optar pela colheita mecanizada de cana crua, pois a qualidade da matéria-prima própria para a moagem nas usinas pode aumentar a produtividade global e reduzir o custo relativo total, derivado das operações agrícola e industrial, além de fugir das pressões ambientais causadas pela queima da palha.

As emissões oriundas da incineração do bagaço da cana são geralmente material particulado e óxidos de nitrogênio, controladas pela Resolução CONAMA 382/2006, que estabelece limites para a emissão desses poluentes (GOLDENBERG; COELHO; GUARDABASSI, 2008).

Segundo Tetti (2002), no que concerne a geração de CO₂eq, cada tonelada de cana de açúcar direcionada para a produção de etanol combustível possui um saldo positivo médio da ordem de 0,17 tonelada de CO₂eq. Ou seja, quando todas as emissões realizadas no processo de produção do etanol (fase agrícola e industrial) e as emissões resultantes da queima final do

etanol como combustível nos veículos são computadas, a “absorção” realizada pela cana na fase de crescimento apresenta um saldo de retirada de 0,17 toneladas de CO₂ da atmosfera por tonelada de cana cultivada. Dessa forma, estimativas sugerem que a produção nacional adicional de 500 milhões de litros de etanol combustível (e seu consumo) culminaria em um ganho de redução de emissões da ordem de 3.500.000 toneladas/ano de CO₂.

Logo, diante do exposto, contactou-se que a produção de cana de açúcar, de açúcar e de etanol, e o consumo desse combustível, emitem gases e material particulado que permanecem na atmosfera terrestre. Entretanto, comparativamente, é mais favorável à sustentabilidade do planeta do que os combustíveis fósseis, pois a plantação de cana é responsável pela absorção de parte do CO₂ emitido durante o processo de fotossíntese. Não há mecanismo mitigador semelhante para os GEE originados da queima de derivados do petróleo.

3.4.2 Uso e qualidade da água

Conforme Smeets et al. (2006), o Brasil conforma-se em oito grandes bacias hidrográficas e as principais regiões produtoras de cana de açúcar no Brasil situam-se na bacia do Norte e Nordeste, do São Francisco, do Atlântico Médio e do Paraná-Paraguai. Salientam que a taxa de abastecimento para o Brasil como um todo foi calculada em 1% em 1995, uma das mais baixas no mundo, e estimam que este percentual deve aumentar para 3-5% em 2075, dependendo do cenário de irrigação.

Tendo em vista a água ser um recurso utilizado na produção de cana, a precipitação total requerida pela cana é estimada em 1500-2500 mm/ano, que deve ser uniformemente distribuída através do ciclo de crescimento, e a evapotranspiração (corresponde à perda de água) da cana é estimada em 8-12 mm/t de cana. Porém, o uso da irrigação de culturas é muito baixo no Brasil, exceto na região Nordeste, devido às condições climáticas, pois no restante do país a produção de cana é principalmente de sequeiro. Por isso, ao contrário de outras partes do mundo, a irrigação da cana não é um problema sério para o Brasil (GOLDENBERG; COELHO; GUARDABASSI, 2008).

Contudo, Smeets et al. (2006) consideram a aplicação de irrigação para produção vegetal economicamente inviável.

No entanto, a propensão à irrigação objetiva desbencilhar a produção da cana e a produtividade, medida em teor de sacarose, da ocorrência de chuvas em determinadas épocas

do ano. Destarte, com a irrigação e com a introdução de novas variedades de cana, seria possível estender o período de corte da cana, que poderá passar de seis para dez meses no Nordeste (IEL/SEBRAE, 2005).

Já a conversão de cana para açúcar e etanol requer grandes quantidades de água, mas a maior parte da água utilizada pode ser reciclada. Inclusive, as práticas agrícolas modernas já incluem o aproveitamento de água de lavagem e cinzas para as colheitas via fertirrigação, juntamente com a vinhaça¹⁸ (GOLDENBERG; COELHO; GUARDABASSI, 2008).

A Lei Federal n.º 9.433 de 1997, que instituiu a Política Nacional de Recursos Hídricos e criou o Sistema Nacional de Gerenciamento de Recursos Hídricos, expõe no Artigo 1º os seguintes princípios:

- I - a água é um bem de domínio público;
- II - a água é um recurso natural limitado, dotado de valor econômico;
- III - em situações de escassez, o uso prioritário dos recursos hídricos é o consumo humano e a dessedentação de animais;
- IV - a gestão dos recursos hídricos deve sempre proporcionar o uso múltiplo das águas;
- V - a bacia hidrográfica é a unidade territorial para implementação da Política Nacional de Recursos Hídricos e atuação do Sistema Nacional de Gerenciamento de Recursos Hídricos;
- VI - a gestão dos recursos hídricos deve ser descentralizada e contar com a participação do Poder Público, dos usuários e das comunidades (BRASIL, 1997a).

Registra-se que a dita Lei, em seu Artigo 5º, estabelece como instrumentos da Política Nacional de Recursos Hídricos a cobrança pelo uso de recursos hídricos e a compensação a municípios, entre outros.

Para Smeets et al. (2006), cobrar pelo uso da água pode não ser suficiente para evitar o esgotamento dos recursos hídricos. Tal panorama explicita que um dos grandes problemas é a ineficaz aplicação da Lei. E, para tanto, faz-se necessário monitoramento e mecanismos de controle adicionais.

Portanto, compreende-se que a produção de cana de açúcar por ser particularmente sensível à disponibilidade de água, requer uma quantidade considerável da mesma, o que causa preocupação quanto à escassez, por poder afetar a indústria, a agricultura e a saúde dos seres vivos. Porquanto, como o Brasil é um país rico em água doce e com altos índices pluviométricos, denota-se que a irrigação para o cultivo, apesar de necessária em algumas regiões do país, não ocorre com uma frequência que possa interferir na disponibilidade de

¹⁸ Vinhaça é um resíduo líquido do processamento da cana, rico em nutrientes necessários ao crescimento vegetal, cuja utilização como fertilizante orgânico em substituição aos químicos permite ampliar a produtividade agrícola e reduzir o emprego de fertilizantes, atenuando os impactos sobre o meio ambiente, uma vez que esse resíduo deixou de ser lançado diretamente nos rios (AQUINO et al., 2014).

água para outros fins.

3.4.3 Uso da terra

Salienta-se que com vistas a proteger o meio ambiente, as restrições legais ao uso do solo são objeto de diversas legislações em níveis estadual e federal no Brasil, como as relacionadas à conservação e restauração das matas ciliares, como o Código Florestal, a Lei de Crimes Ambientais, normas sobre licenciamento e projetos de recuperação e a legislação tributária referente aos imóveis rurais.

Além da legislação específica sobre a problemática, Silva e Sakatsume (2007) atentam para a pertinência da legislação sobre Unidades de Conservação (UCs), na medida em que abrangem projetos de licenciamento e de recuperação e determinam, para cada bioma, a área de reserva legal.

No Brasil, a expansão da cultura de cana de açúcar é limitada pela qualidade do solo, precipitação pluviométrica e logística, a despeito dessa gramínea não ser particularmente exigente em termos de solo, pois adapta-se razoavelmente em solos de fertilidade média e alta porosidade. Ademais, enfatizam que solos mais férteis implicam em níveis elevados de produtividade e/ou menor demanda por fertilizantes e corretivos agrícolas, mas são mais caros. E que, as áreas no Nordeste são consideradas mais problemáticas, pois demandam recursos financeiros para a irrigação, uma vez que há a necessidade inicial de investimentos e o custo da energia utilizada nesta técnica (SILVA; SAKATSUME, 2007).

Segundo Goldenberg (2007), em 2007, a produção de etanol a partir da cana no Brasil foi de 16 bilhões de litros, o que requeria cerca de 3 milhões de hectares de terra. E que, a competição pelo uso da terra entre alimentos e combustível não tem sido substancial, visto que a cana de açúcar cobre 10% do total de terras cultivadas e 1% do total de terras disponíveis para a agricultura no país, com uma área total da safra de cana (para produção de açúcar e etanol) de 5,6 milhões de hectares.

Aquino et al. (2014) abordam a preocupação existente com a destinação de terras para cultivo de cana de açúcar para produção de etanol no Brasil, por temer que falem terras para produção de alimentos. Contudo, se referem apenas ao conflito álcool *versus* açúcar, sem mencionar outras culturas alimentícias, e que a produção de etanol não acarreta grandes diminuições na produção de açúcar.

Em conformidade com Goldenberg, Coelho e Guardabassi (2008), a maior ameaça representada pela expansão da quantidade de terra cultivada para a energia ou qualquer outro

uso é a irreversível conversão de ecossistemas virgens. Nesse sentido, realçam que o desmatamento provoca a extinção de espécies e dos seus habitats, e a perda das funções do ecossistema. Outrossim, que estudos revelam que a destruição em larga escala das florestas pode afetar o ciclo hidrológico e o clima, reduzindo a precipitação regional e causando temperaturas cada vez mais altas.

Por conseguinte, reconhece-se que por um lado, para acomodar o incremento da demanda por produtos derivados da cana de açúcar, especialmente o etanol, faz-se mister a incorporação de novos canaviais. E que, por outro lado, para gerenciar esse crescimento de forma responsável, o Estado precisa instituir políticas que possibilitem a expansão do cultivo de alimentos e de bioenergia, enquanto preserva os recursos naturais.

3.4.4 Qualidade do solo

Para Smeets et al. (2006), existem impactos diretos e indiretos consequentes do uso do solo. O primeiro diz respeito a qualquer degradação ou contaminação do solo, considerados crimes de poluição. Nessa perspectiva, o Artigo 54 da Lei de Crimes Ambientais determina pena de detenção de até cinco anos para quem causar poluição de qualquer natureza em níveis tais que resultem ou possam resultar em danos à saúde humana, ou que provoquem a mortandade de animais ou a destruição significativa da flora. E o segundo, se refere à poluição dos corpos d'água, flora e fauna causados pela ou decorrente da erosão do local afetado.

Não obstante esse panorama, para Macedo (2007), a cultura da cana no Brasil é conhecida pela perda relativamente pequena de solo por erosão, principalmente quando comparada com culturas de soja e de milho.

Nesse sentido, realçam que a cultura da cana de açúcar pode ser sustentável quando protege o solo contra a erosão, a compactação e as perdas de umidade e contribui quando a adubação ocorre feita corretamente. Destacam que no Brasil, existem solos que produzem cana há mais de 200 anos, cada vez com maior rendimento. Dessa forma, entendem que a prevenção da erosão do solo e do esgotamento de nutrientes pode ser alcançada através de procedimentos especiais, como evitar plantações em solos marginais, vulneráveis ou com alta declividade e monitorar a qualidade do solo e equilíbrio de nutrientes (GOLDENBERG; COELHO; GUARDABASSI, 2008).

Sendo assim, evidencia-se que alterações na qualidade do solo não devem ser esperadas quando se trata da plantação de canaviais. Contudo, a despeito desse cenário, a

legislação ambiental brasileira deve ser obedecida, principalmente no que concerne as Áreas de Preservação Permanente (APPs) e de reserva legal.

3.4.5 Biodiversidade

Sublinha-se que a despeito da utilização do etanol reduzir as emissões de GEE decorrentes da queima de combustíveis derivados de petróleo e, portanto, diminuir as perdas de biodiversidade consequentes dessas emissões, segundo Smeets et al. (2006), impactos negativos diretos da produção de cana sobre a biodiversidade podem ocorrer através da conversão de terras para o cultivo. Todavia, esses impactos são limitados quando essas terras convertidas em novos canaviais são de pastagens e não de biomas importantes, como a Floresta Amazônica, Cerrado, Mata Atlântica e Pantanal. Além disso, durante a queima da cana de açúcar, pode haver a morte de animais, por não conseguirem fugir, enquanto outros podem ficar incapazes de retornar à vida selvagem, sendo, portanto, enviados para zoológicos. Já indiretamente, o processo de produção de açúcar e de etanol pode provocar impacto nocivo sobre a biodiversidade por meio da poluição do solo, do ar e da água, devido à aplicação de agroquímicos.

Ademais, acrescenta-se que o cultivo da cana de açúcar e a produção de açúcar e de etanol, assim como o uso do mesmo, podem resultar em danos significativos para a biodiversidade, mesmo que de forma indireta, através da poluição, degradação do solo, uso de água e impactos climáticos causados pelo cultivo, transporte, refinamento e queima. Logo, tais performances expressam que a tomada de áreas mais sensíveis e menos desenvolvidas para a expansão de terras agrícolas para a produção de biocombustíveis escassearia a disponibilidade de habitats para muitas espécies e limitaria as interações oferecidas pelo ecossistema.

Portanto, compreende-se que o etanol apenas poderá ser considerado positivo para a biodiversidade se a produção não incrementar os impactos agrícolas e não aumentar a conversão de habitats naturais para uso agrícola ou deslocar terras necessárias para cobrir a demanda nutricional humana.

Todavia, infere-se que a despeito da cultura da cana passar por diversos avanços tecnológicos ao longo da história, como melhoramento genético, mecanização agrícola, manejo, controle biológico de pragas, reciclagem de efluentes e práticas agrícolas, faz-se urgente a tomada de iniciativas governamentais para solucionar problemas ambientais associados ao cultivo canavieiro. Nesse contexto, é necessário o desenho e a implantação de

instrumentos de política pública que incentivem a utilização de medidas mitigadoras do consumo de energia fóssil, e que tornem a produção de cana de açúcar e seus derivados menos causadoras de impactos ambientais negativos.

Consoante Aquino et al. (2014), sem embargo o processo de produção do etanol exigir uma grande quantidade de água, de terra e de agroquímicos, a geração de coprodutos e subprodutos, de valor alimentício, industrial ou energético, como o açúcar, o melaço, a aguardente, o bagaço, a levedura, a torta de filtro e a vinhaça, viabilizam economicamente e ambientalmente essa produção. Pois tais inovações agregam fontes de valor econômico à disponibilidade de biocombustíveis, conferindo certa flexibilidade na produção de bioenergia.

Por conseguinte, acrescenta-se que mesmo considerando os potenciais impactos negativos da produção de cana de açúcar, do álcool e do açúcar, entende-se que o uso de biomassa e o comércio de biocombustíveis, em geral, contribuem para o desenvolvimento rural, permitindo renda adicional e a criação de empregos, fomentam a sustentabilidade dos recursos naturais, colaboram com a redução de emissões de GEE e diversificam a oferta de combustíveis no mundo. Adenda-se no que concerne ao solo, ar, água e biodiversidade, que o papel dos biocombustíveis para a mitigação das mudanças climáticas exige uma gestão adequada dos recursos naturais, do solo, da biodiversidade e dos recursos hídricos. Porquanto, derivado dessa compreensão, reputa-se como fundamental a implementação de práticas agrícolas que se caracterizam pelo uso do solo, da água, de pesticidas e de estratégias de manutenção de energia que sejam sustentáveis; a recuperação de terras degradadas ao invés da expansão para habitats naturais intactos; e o uso de sistemas de colheita que maximizem a coexistência com uma diversidade de espécies selvagens.

4 ECOEFICIÊNCIA COMO FERRAMENTA DE GESTÃO AMBIENTAL

Destacam que a dependência da matriz energética de fontes não renováveis de energia e as críticas e preocupações quanto à sustentabilidade e eficácia contra as alterações climáticas, em particular as emissões de GEE, se configuraram em fatores motivadores para a introdução dos biocombustíveis. Nessa perspectiva, foi instalada a indústria sucroalcooleira, que gera um fluxo de degradação que se inicia com a extração de matéria-prima e passa por processos de transformação originando dejetos, os quais retornam ao meio, modificando, assim, o equilíbrio natural, ocasionando problemas ambientais (SCHAFFEL; ROVERE, 2010).

Logo, devido assentir que a indústria sucroalcooleira está inserida no contexto de degradação do meio ambiente, ressalta-se que para Cruz et al. (2016) faz-se necessária a adoção de medidas para minimização dos impactos ambientais, em decorrência de apreender que o processo industrial nas usinas de cana provoca grande consumo de recursos naturais, poluição atmosférica, contaminação do solo e dos corpos hídricos, além de produzir resíduo líquido altamente poluidor e resíduos sólidos causadores de degradação ambiental.

Em função dessas constatações, foram instituídas normas, iniciativas e certificações internacionais, com vistas a estabelecer critérios, indicadores e requisitos para subsidiar a discussão sobre a sustentabilidade dos biocombustíveis (RSB, 2008).

Nesse sentido, a gestão ambiental tornou-se grande aliada dos executivos, por fornecer informações e ferramentas capazes de proporcionar às organizações meios para beneficiar a gestão, com o fim de minimizar os impactos ambientais, otimizar os recursos e ampliar a competitividade (FONSECA; MARTINS, 2015).

Evidencia-se que dentre os instrumentos de gestão ambiental, utiliza-se nessa pesquisa a ecoeficiência, em virtude de compreender que o empreendimento sob análise causa impactos ambientais, fazendo, então, mister a adoção de medidas para minimizá-los. Sendo assim, salienta-se a ecoeficiência enquanto uma expressão cunhada pelo Conselho Empresarial Mundial para o Desenvolvimento Sustentável (WBCSD) em 1991, quando buscavam um conceito único para sintetizar o desenvolvimento sustentável nas atividades-fim de uma empresa, com a finalidade de explicar a criação de mais produtos e serviços com menos uso de recursos e geração de resíduos e de poluição. Na realidade, consubstancia-se em um conceito empresarial, por visar a obtenção de maior renda a partir de menor entrada de

materiais e energia, com emissões reduzidas, assentada em três objetivos: redução do consumo de recursos, minimização do impacto sobre a natureza e aumento do valor do produto ou serviço (WBCSD, 2000a).

Tendo em vista esse contexto, este capítulo distribui-se em cinco itens. O primeiro explicita os antecedentes históricos do conceito de ecoeficiência; o segundo descreve as normas da ABNT. No terceiro, definem-se ecoindicadores e elencam-se exemplos desenvolvidos e utilizados por diferentes organizações. O quarto versa a respeito da metodologia de análise de ecoeficiência proposto pela norma ABNT NBR ISO 14045:2014, que será aplicada nesta dissertação. E o quinto expõe os possíveis obstáculos à ecoeficiência, na qualidade de ferramenta de análise para a sustentabilidade.

4.1 Contexto histórico da ecoeficiência

A Comissão Social e Econômica para a Ásia e o Pacífico (ESCAP) interpreta ecoeficiência como um elemento-chave para promover mudanças fundamentais na maneira como as sociedades produzem e consomem recursos e, assim, medir o progresso no crescimento verde. Até a década de 1970, esse conceito era reconhecido como eficiência ambiental. Nos anos 1990, a ecoeficiência foi apresentada como um elo comercial para o desenvolvimento sustentável, quando o termo foi popularizado pelo WBCSD para o setor empresarial no decurso da Conferência das Nações Unidas sobre Meio Ambiente e Desenvolvimento (UNCED), em 1992 (ONU, 2009).

O WBCSD (2000b) sustenta que ecoeficiência é alcançada pela entrega de mercadorias e serviços a preços competitivos que satisfaçam as necessidades humanas e proporcionem qualidade de vida, enquanto reduzem progressivamente impactos ecológicos e a intensidade de uso de recursos ao longo do ciclo de vida dos produtos para um nível alinhado com a capacidade estimada de suporte da Terra.

Destaca que líderes empresariais, integrantes ou não do WBCSD, compreendem ecoeficiência como a criação de mais valor com menor impacto ou, simplesmente, em fazer mais com menos. Que especialistas acadêmicos veem ecoeficiência como uma síntese de eficiência econômica e ambiental em paralelo, em que o prefixo eco corresponde tanto a economia quanto ecologia. Que a Organização para a Cooperação e Desenvolvimento Econômico (OCDE) entende ecoeficiência como a eficiência com a qual os recursos ecológicos são utilizados para atender as necessidades humanas e define-a como uma proporção entre a saída (o valor dos produtos e serviços produzidos por uma empresa, setor

ou economia como um todo) e a entrada (a soma de pressões ambientais geradas pela empresa, setor ou economia). Que a Agência Europeia do Ambiente (AEA) explica ecoeficiência como mais bem-estar com menos natureza, resultado da diminuição da utilização de recursos e liberação de poluentes causados pelo desenvolvimento econômico (WBCSD, 2000a).

Nessa perspectiva, reconhece-se ecoeficiência como filosofia, estratégia de gestão ou ferramenta de gestão, na medida em que os conceitos buscam combinar o desempenho ambiental com o desempenho econômico para criar mais valor com menor impacto ao meio ambiente.

Sublinha-se que sem embargo a relevância dos conceitos de ecoeficiência expostos, nesta dissertação utiliza-se o conceito de ecoeficiência da OCDE, em virtude de assentar-se na eficiência com a qual os recursos ecológicos são usados para prover os seres humanos com produtos de que necessitam, com a menor geração de resíduos possível.

Já consoante Oliveira e Feitosa (2015), a ecoeficiência está estreitamente ligada à adoção, por parte de determinada empresa, de um Sistema de Gestão Ambiental (SGA), que se responsabiliza por aumentar a eficiência relativa dos recursos. Portanto, para atingir um grau de administração empresarial realmente ecológica, requer modificação no comportamento corporativo e, para tanto, as empresas terão que internalizar os custos ambientais, ou seja, se obrigarem a alocar recursos com a finalidade de diminuir impactos ambientais.

Sendo assim, um SGA consiste em um meio pra garantir que todos os riscos e oportunidades relativas à sustentabilidade estejam devidamente identificados e geridos de forma eficiente. Inclusive, as normas ISO 14000 correspondem ao estado-da-arte no que diz respeito aos SGAs (WBCSD, 2000a).

Inerente à mudança em direção a produtos e produção mais sustentáveis e ecoeficientes, a Avaliação (ou Análise) do Ciclo de Vida (ACV) é uma ferramenta de tomada de decisão para identificar os encargos ambientais e avaliar as consequências ambientais de um produto, processo ou serviço ao longo do ciclo de vida, do berço ao túmulo¹⁹. Devido a essa situação, além de ser padronizada pela Organização Internacional de Normalização (ISO), forma a base conceitual para uma série de abordagens de gestão que consideram um produto em todo o seu ciclo de vida, abrangendo a aquisição de recursos, fabricação de produtos, o uso do produto e o descarte ao fim da vida útil (FIVE WINDS

¹⁹ Uma abordagem desde o “berço” até o “túmulo” trata de acompanhar o ciclo de vida do produto, desde a matéria-prima até a chegada ao consumidor.

INTERNATIONAL, 2000).

Na literatura sobre ecoeficiência, quatro grandes organizações, o Conselho Empresarial Mundial para o Desenvolvimento Sustentável (WBCSD), a Organização para a Cooperação e Desenvolvimento Econômico (OECD), o Conselho Presidencial sobre o Desenvolvimento Sustentável (PCSD) e a Mesa Redonda Nacional sobre o Meio Ambiente e da Economia (NRTEE), listaram as principais razões para uma organização buscar a eficiência ecológica (Quadro 1).

Quadro 1 - Razões para buscar ecoeficiência identificadas pelo WBCSD, OECD, PCSD e NRTEE

	WBCSD	OECD	PCSD	NRTEE
Imagem da marca		X		
Vantagem competitiva	X	X	X	X
Redução de custos	X	X	X	X
Relação com o cliente	X	X	X	X
Relações entre empregados	X		X	X
Relações com órgão regulador				
Inovação	X	X	X	X
Legislação		X	X	
Responsabilidade	X	X		X
Rentabilidade de longo prazo				X
Novos mercados	X			
Responsabilidade corporativa			X	X
Padrões				X
Relações com fornecedores	X		X	

Fonte: *Five Winds International* (2000).

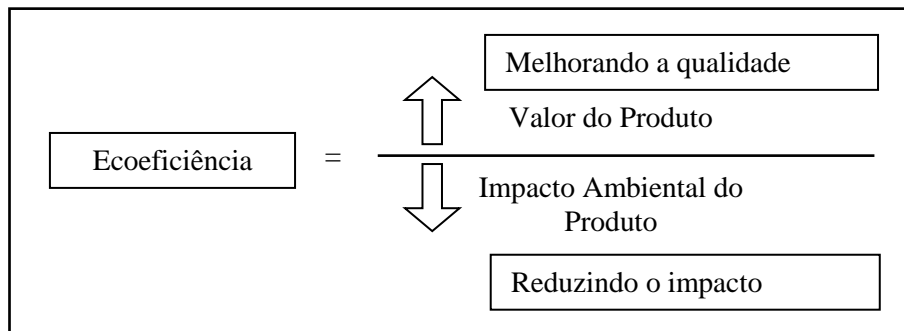
Em conformidade com o Quadro 1, constataram-se os motivos que levam as empresas a empenhar-se em alcançar ecoeficiência nos processos. Desse conjunto, Oliveira e Feitosa (2015) destacam a melhoria da imagem perante os diversos atores que interagem com o empreendimento (*stakeholders*), a redução dos custos ambientais, os menores riscos de infrações e multas, o aumento de produtividade, a melhoria da competitividade e o surgimento de alternativas tecnológicas inovadoras.

Destarte, as empresas podem decidir implementar a ecoeficiência por diversas razões, haja vista que a redução do uso de recursos e da geração de resíduos possibilita economizar recursos financeiros em materiais ou custos de penalidades regulatórias. Ademais, realça que uma ação voluntária no presente pode minimizar riscos futuros e responsabilidades de fazer atualizações custosas e desnecessárias. Logo, os empreendimentos que se encontram adiante da legislação podem ter vantagem competitiva, e produtos e processos sustentáveis

podem incrementar o interesse do consumidor e abrir novas oportunidades de negócios. Outrossim, sublinha que uma boa reputação ambiental pode melhorar o recrutamento, a moral dos empregados, o apoio dos investidores e a aceitação da comunidade (UNCTAD, 2004).

Em função de existirem diversas formas de calcular a ecoeficiência, demonstra-se, na Figura 1, uma equação que melhor se adequa ao conceito norteador dessa investigação.

Figura 1 - Ecoeficiência no setor empresarial



Fonte: ONU (2009).

Diante do exposto na Figura 1, observa-se que a análise da ecoeficiência baseia-se na relação entre o valor do produto ou serviço e o impacto ambiental causado pela produção daquele produto ou serviço, na qual se deve buscar um aumento do valor do produto por meio de melhoria na qualidade de produção, e uma redução do impacto ao meio ambiente, seja pela diminuição do consumo de energia, de materiais, de água, da emissão de GEE, de águas residuais ou de poluição. Nesta equação básica, tanto o valor do produto ou serviço como a variável ambiental incluem diferentes indicadores. Por exemplo, caso o impacto ambiental em análise seja o consumo de energia, deve-se considerar a soma total de energia consumida, que equivale à quantidade de energia comprada, incluindo calor, eletricidade, combustíveis fósseis, outras fontes de energia alicerçadas em combustíveis, energia solar, energia eólica, etc. Destarte, acentua-se que essas informações ambientais são essenciais para a construção do indicador ambiental relativo ao consumo de energia de um determinado processo.

Para a UNCTAD (2004), informação ambiental consiste em qualquer dado de um item que se relacione com elementos ambientais, e informação financeira compreende elementos referentes a uma unidade vinculada a ativos, dívidas, lucros líquidos, renda ou despesas. Logo, enfatiza que a informação ambiental é medida em unidades físicas e a informação financeira é mensurada em unidades monetárias.

Segundo WBCSD (2000b), as empresas escolhem as razões da ecoeficiência que

melhor sirvam ao processo de comunicação e de tomada de decisões, porquanto não existe consenso do numerador e do denominador, sendo que iniciativas definem a razão da ecoeficiência de forma inversa, medindo a variável ambiental por unidade financeira, resultando em taxas de intensidade de impacto. Ou seja, na prática, as duas formas são aceitas e válidas para a medição.

Nesse sentido, a Conferência das Nações Unidas sobre Comercio y Desenvolvimento (UNCTAD) contribuiu com um manual intitulado *A Manual for the Preparers and Users of Eco-efficiency Indicators*²⁰, que estende o modelo de contabilidade convencional para associar desempenho ambiental com desempenho financeiro. Acentua que os dados são usados em conjunto para medir o progresso da empresa na tarefa de alcançar a ecoeficiência ou a sustentabilidade, com o propósito de melhorar e harmonizar os métodos usados para definir, reconhecer, medir e revelar informações relacionadas com eventos e atividades de empresas para promover a comparação entre organizações que a reportam (UNCTAD, 2004).

Acrescenta-se que o WBCSD e a UNCTAD desenvolveram meios de incluir variáveis ambientais no cálculo da ecoeficiência, conforme demonstrado no Quadro 2.

Quadro 2 - Comparativo entre variáveis ambientais dos indicadores de ecoeficiência

Variável	UNCTAD	WBCSD
Consumo de água	X	X
Consumo de energia	X	X
Contribuição ao aquecimento global	X	X
Substâncias redutoras da camada de ozônio	X	X
Resíduos	X	-
Consumo de materiais	-	X

Fonte: A autora (2017).

Assentado no Quadro 2, notou-se um consenso em quatro dos cinco elementos ambientais que o WBCSD e a UNCTAD abordam, uma vez que ambos incluem consumo de água, consumo de energia, contribuição ao aquecimento global e substâncias redutoras da camada de ozônio como variáveis ambientais. E a diferença em apenas um, pois enquanto a UNCTAD engloba a geração de resíduos como quinta variável, o WBCSD encerra o consumo de materiais.

Consoante Saling et al. (2002), crescentemente os aspectos ambientais da atividade

²⁰ Um Manual para os Formuladores e Utilizadores de Indicadores de Ecoeficiência.

econômica estão sendo colocados ao lado de questões financeiras. Nesse contexto, a BASF²¹ desenvolveu uma ferramenta de análise de ecoeficiência para abordar não apenas questões estratégicas, mas também questões colocadas pelo mercado, pela política e pela pesquisa. Para tanto, considerou o tempo previsto de análise e os custos como fatores essenciais para o uso eficiente e a eficácia do método, que se baseia em avaliar o comportamento ambiental, o impacto ambiental e os possíveis impactos sobre a saúde humana e os ecossistemas, e nos custos dos produtos e processos do berço ao túmulo. Ressaltam ainda que, no método BASF, os pré-requisitos básicos da ecoeficiência incluem o benefício final para o cliente como o centro da decisão, pois todos os produtos ou processos e as análises ecológicas e as avaliações econômicas devem beneficiar o cliente da mesma maneira. Adendam que a análise de ecoeficiência foca também no cálculo do custo total do ponto de vista do consumidor final, na preparação de uma análise de ciclo de vida específica para todos os produtos ou processos investigados, de acordo com as regras da ABNT NBR ISO 14040:2009, na determinação dos impactos sobre a saúde das pessoas, dos perigos para o ambiente e dos potenciais de risco, na ponderação de análise de ciclo de vida, na determinação da relação entre ecologia e economia, na análise de deficiências e de sensibilidade, na avaliação de cenários, nas opções de negócios e, opcionalmente, na inclusão dos aspectos sociais.

Portanto, infere-se que a ecoeficiência proporciona às empresas produzir mais valor com insumos mais baixos de materiais e energia, e com reduzidas emissões, na medida em que internaliza o marketing e o desenvolvimento do produto relativamente à fabricação e à distribuição.

Nessa perspectiva, para o WBCSD (2000a) existem sete elementos que as empresas podem usar para melhorar a ecoeficiência, os quais são a redução da intensidade de utilização de material, a diminuição do consumo energético, a mitigação da dispersão de substâncias tóxicas, a melhoria da reciclabilidade, a maximização do uso sustentável de energias renováveis, o prolongamento da durabilidade do produto e o incremento da intensidade de serviço. Salienta que os ditos elementos preocupam-se com três objetivos, redução do consumo de recursos, que inclui a minimização da utilização de energia, materiais, água e terra, aumentando a reciclabilidade e a durabilidade do produto, diminuição do impacto na natureza, abrangendo a minimização das emissões gasosas, descargas de água, eliminação de resíduos, dispersão de substâncias tóxicas e a promoção do uso sustentável dos recursos

²¹ A BASF é a maior empresa da indústria química mundial que, através da ciência e da inovação, fornece produtos e soluções para atender as necessidades presentes e futuras da sociedade. Atua principalmente nas áreas de recursos, meio ambiente e clima; alimentos e nutrição; e qualidade de vida (BASF, 2016).

renováveis, e o acréscimo do valor do produto ou serviço, que significa oferecer mais benefícios para os clientes através de funcionalidade, flexibilidade e modularidade do produto, prestação de serviços adicionais (como serviços de manutenção, modernização e troca), ou seja, concentrando em vender as necessidades funcionais que os clientes realmente desejam. Adenda, que muitas empresas apresentam como quarto objetivo, a implementação de um SGA integrado ao seu sistema de gestão de negócios existente a fim de impulsionar uma abordagem ecoeficiente.

Conforme *Five Winds International* (2000), baseada nestes sete elementos a ecoeficiência possibilita processos de produção mais eficientes e a criação de melhores produtos e serviços, em paralelo com a redução de uso de recursos, de desperdício e de poluição ao longo de toda a cadeia de valor. Assim, economiza nos custos de produção e abre novas fontes de renda para os negócios, além de estimular a inovação e a criatividade na procura de formas inéditas de produzir.

No entanto, chama a atenção para algumas limitações, como: apesar da ecoeficiência parecer simples na teoria, a mesma pode ser bastante complexa quando se trata da implementação, ao se analisar os elementos de ecoeficiência do WBCSD, por não serem universalmente aplicáveis; a falta de referência direta a poluentes comuns, a emissões de GEE e impactos ecológicos associados com perturbações ambientais ou perda de biodiversidade. Realça que esquemas de avaliação que se propõem a medir a ecoeficiência devem abordar essas questões já que estão relacionadas com o impacto ambiental da organização, produto ou serviço. Outrossim, que tais limitações sugerem a necessidade de expandir os elementos para capturar uma definição mais ampla do impacto ambiental e de definir mais claramente o que significam na prática.

De acordo com a ONU (2009), o princípio da ecoeficiência deve ser aplicado aos padrões de produção e aos de consumo, nos níveis micro e macro, para evitar o efeito rebote, que corresponde à perda de ganhos potenciais de eficiência, quando a melhoria da eficiência do uso de um recurso por unidade é superado pelo aumento absoluto na demanda por mercadorias e a deterioração da eficiência de recursos no consumo.

Em um programa de ecoeficiência, o processo produtivo é constantemente monitorado, com o objetivo de identificar todas as fontes de uso de água, energia e materiais, nas quais podem ou não ocorrer desperdícios ocultos, com consequente aumento no gasto de água e energia e incremento na geração de resíduos tóxicos. Esses desperdícios frequentemente são fruto de problemas operacionais, qualidade de recursos materiais e falta de procedimentos, e de treinamento adequado das equipes (MUNCK; DIAS; SOUZA, 2008).

Por conseguinte, realizar processos com ecoeficiência possibilita agregar mais valor, ao mesmo tempo em que reduz a utilização de recursos e o impacto ambiental causado pelo produto ou serviço. Pois, não obstante não medir aspectos sociais e, portanto, ser diferente conceitualmente de sustentabilidade, a análise de ecoeficiência configura-se em uma alternativa viável para as empresas que buscam os benefícios de serem reconhecidas como “verdes” ou “sustentáveis”, por ser aplicável a todos os aspectos do negócio, desde a compra e a produção, até marketing e a distribuição.

4.2 Normas ABNT NBR ISO para ecoeficiência

A ISO 14000 é uma série de normas ambientais propostas pela *International Standardisation Organization*, que é uma Organização Não-Governamental (ONG), fundada em 1947, com sede em Genebra, na Suíça, da qual fazem parte entidades de normatização do mundo todo. Na mesma, o Brasil é representado pela Associação Brasileira de Normas Técnicas, a qual não estabelece padrões fixos ou requisitos absolutos de desempenho ambiental, apenas exige que as atividades estejam em conformidade com os requisitos legais, podendo ser aplicada em qualquer organização, além de impor algumas etapas para implantação do SGA, como planejamento, implementação e operação, verificação e análise da administração (ISO, 2016).

Com vistas à diminuição do impacto causado pelas empresas ao meio ambiente, a ISO criou as normas ISO 14000:1996, as quais foram atualizadas em 2004, com o objetivo de criar, zelar e melhorar o SGA para o manejo sustentável de recursos naturais, reduzindo os riscos consequentes das atividades industriais. Sublinha-se que estas introduziram as normas relativas à análise durante a existência de um produto, ou certificação ISO 14000: 14040, 14041, 14042, 14043, definindo uma metodologia consistente para a realização, também conhecida como ACV. Sendo que a certificação ISO 14001 é concedida a uma organização quando há um SGA implantado que reduza os efeitos prejudiciais ao ambiente causados pelas atividades.

A ACV estuda os aspectos ambientais e os impactos potenciais ao longo da vida de um produto (isto é, do “berço ao túmulo”), desde a aquisição da matéria-prima, passando por produção, uso e disposição. As categorias gerais de impactos ambientais que necessitam ser consideradas incluem o uso de recursos, a saúde humana e as consequências ecológicas (ABNT NBR ISO 14040:2009).

Ressaltam que o SGA da ISO 14001 é uma ferramenta que pretende ajudar os setores

da economia a transformarem as atividades em menos agressoras ao meio ambiente. Para tanto, determina ações a serem tomadas, garantindo a continuidade. Adendam que a ABNT NBR ISO 14001:2004 foi elaborada no Comitê Brasileiro de Gestão Ambiental (ABNT/CB-38), pela Comissão de Estudo de Gestão Ambiental (CE-38:001.01), com a finalidade de prover as organizações com elementos de um SGA para auxiliar as empresas a alcançar as metas ambientais e econômicas. Sendo assim, possibilitam a conciliação do desenvolvimento econômico com a preservação do meio ambiente, alinhando-se perfeitamente com os princípios e objetivos da ecoeficiência (CRUZ et al., 2016).

Ademais, registra-se que a avaliação da ecoeficiência é uma ferramenta quantitativa de gestão que valida o Estudo de Impactos Ambientais (EIA) do ciclo de vida de um sistema de produto em conjunto com o valor do sistema de produto para uma parte interessada. No âmbito dessa avaliação, os impactos ambientais são avaliados com a utilização da ACV, conduzida em conformidade com a ABNT NBR ISO 14040:2009 e a ABNT NBR ISO 14044:2009. Já a Norma ABNT NBR ISO 14045:2014 descreve os princípios, requisitos e orientações para a avaliação da ecoeficiência de sistemas de produto, incluindo a quantificação da ecoeficiência, foco deste trabalho.

Consoante a ABNT NBR ISO 14040 (2009):

A ACV considera todo o ciclo de vida de um produto, desde a extração e aquisição de matérias-primas, através da produção de energia e materiais, manufatura, uso, tratamento de fim de vida até a disposição final. Com base em tal visão e perspectiva sistemáticas, a transferência de cargas ambientais potenciais entre estágios do ciclo de vida ou entre processos individuais pode ser identificada e possivelmente evitada.

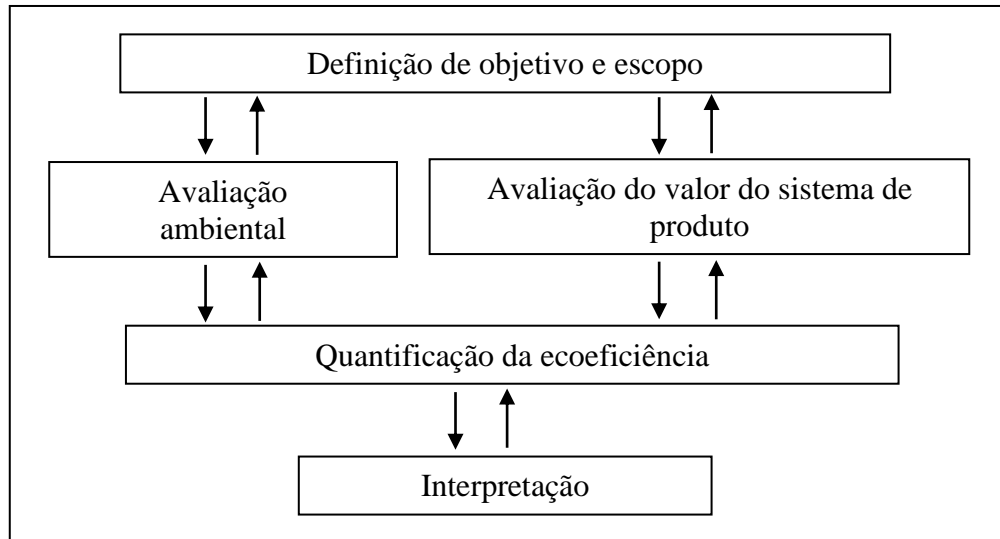
Já a ABNT NBR ISO 14045 (2014), apenas acrescenta que:

Uma avaliação de ecoeficiência considera todo o ciclo de vida, desde a extração e aquisição de matérias-primas, através da produção de energia e materiais, manufatura, uso, tratamento de fim de vida até a disposição final. Com base em tal visão e perspectiva sistemáticas, a transferência de impactos potenciais entre estágios do ciclo de vida ou entre processos individuais pode ser identificada e avaliada dentro de uma perspectiva de ecoeficiência global.

Tal constatação demonstra que uma avaliação de ecoeficiência de um sistema abrange a ACV de um produto, ou seja, a ACV enfoca os aspectos e impactos ambientais de um sistema de produto, excluindo por conseguinte, os aspectos e impactos econômicos e sociais do seu escopo. Portanto, a ACV configura-se apenas em parte da análise de ecoeficiência.

Em consonância com a norma ABNT NBR ISO 14045: 2014, uma avaliação de ecoeficiência compreende cinco fases (Figura 2).

Figura 2 - Fases de uma avaliação de ecoeficiência



Fonte: ABNT NBR ISO 14045 (2014).

Com base na Figura 2, depreendeu-se que a Norma reza que uma avaliação de ecoeficiência avalia o desempenho ambiental de um sistema de produto com relação a seu valor, referindo-se ao sistema e não ao produto em si. Essa performance decorre do fato de um produto não poder ser ecoeficiente, pois a ecoeficiência somente pode ser definida para o correspondente sistema de produto, que inclui a produção, uso e disposição final, isto é, o ciclo de vida completo.

Em vista disso, compreende-se que a série NBR ISO 14000 da ABNT almeja proteger o meio ambiente, reduzir o desperdício, os gastos e ineficiências, preservando os recursos naturais, reduzindo os custos de encontrar novos e mais recursos, em virtude de utilizar mais quantidade de materiais já adquiridos, tornando as emissões mais limpas e diminuindo a gravidade de derramamentos, vazamentos e outros acidentes. A minimização desses eventos reduz os custos de licenciamento, de remediação, com o trabalhador, de seguros, multas e outros custos e taxas.

Outrossim, reconhece-se por um lado, que proteger o meio ambiente envolve a obtenção de pequenas quantidades de materiais ou de materiais menos tóxicos. E, por outro lado, que essas escolhas melhoram a segurança do trabalhador e sua moral, tornando-o mais produtivo. Nesse sentido, realça-se que a aquisição de materiais menos perigosos reduz a necessidade e os custos associados com a compra de equipamentos, treinamento e áreas de

armazenamento, especialmente concebidos.

Agrega-se que a despeito dos benefícios elencados para o meio ambiente, as empresas deveriam buscar as certificações, cuja proposta deve proporcionar vantagens financeiras. Nesse cenário, os riscos ambientais serão reduzidos, na medida em que a empresa se tornará um investimento mais atraente para os acionistas atuais e potenciais, e mais acolhedora para os consumidores, que cada vez se encontram mais informados a respeito da importância de se preservar os recursos naturais do planeta.

4.3 Ecoindicadores

Entende-se indicador como o instrumento que permite compreender a realidade avaliada, detectar problemas e gerar subsídios que possam melhorar o desempenho do produto ou serviço considerado.

Em conformidade com a UNCTAD (2004), um indicador é uma medida utilizada para rastrear e mostrar a performance de um determinado elemento a partir da mensuração dos itens deste elemento. Para tanto, realça que os elementos são quesitos financeiros ou ambientais que devem ser considerados pelos acionistas ou parte interessada de uma organização, como bens, renda, despesas, contribuição para o aquecimento global, requerimentos de energia, geração de resíduos, etc. Sendo que um item ou grupo de itens é a informação específica relacionada com um elemento, como vendas, custo de bens, fonte de energia utilizada e tipo de resíduo. Por exemplo, um elemento seria a geração de resíduos, um item, o tipo de resíduo e um indicador, a quantidade de resíduo gerado por unidade de produto ou quantidade de resíduo gerado por metro cúbico de água utilizada. Ou seja, um elemento pode ter vários itens e vários indicadores.

Dessa forma, registra-se que um Indicador de Ecoeficiência (EEI), ou ecoindicador, mede o nível de desempenho financeiro associado ao grau de impacto ambiental. No entanto, não há consenso, regras ou padrões para reconhecimento, medida e avaliação de informações ambientais.

Para Pereira et al. (2014), o objetivo principal dos EEI é informar para ajudar a tomada de decisões econômica e ambientalmente seguras, além de propiciar a avaliação dos impactos gerados. Salientam que, geralmente, a sustentabilidade ambiental não é claramente observada quando as avaliações são realizadas em um único indicador de ecoeficiência, portanto, torna-se necessária a avaliação conjunta de ecoindicadores, sem que haja diferença de relevância entre os mesmos.

Sublinha-se que uma série de medidas ou indicadores foi sugerida desde a década de 1990, como a pegada ecológica, índices e indicadores de sustentabilidade, mas segundo a ONU (2009) nenhum destes mostrou nitidamente o caminho para o crescimento econômico com menor consumo de recursos e geração de poluição, que é um ingrediente-chave e pré-requisito do desenvolvimento sustentável. Pois, mesmo os índices ambientais populares, como o Índice de Sustentabilidade Ambiental e o Índice de Desempenho Ambiental (desenvolvidos pelo Instituto da Terra²²), ainda se concentram principalmente no meio ambiente com pouca reflexão acerca da relação entre o ambiente e a economia.

Nesse sentido, a ESCAP tem explorado o desenvolvimento de indicadores de ecoeficiência para medir o estado e progresso da ecoeficiência na economia, a fim de auxiliar os formuladores de políticas a ter uma visão clara sobre esse conceito e as implicações das decisões. Por conseguinte, os EEIs desenvolvidos pela ESCAP podem ser usados para: medir a ecoeficiência de diferentes setores dentro do país; comparar a ecoeficiência do crescimento econômico de diferentes países; identificar áreas políticas para a melhoria na obtenção de benefícios econômicos; e rastrear tendências em ecoeficiência ao longo do tempo.

Consoante a ONU (2009), esses EEIs foram projetados para capturar a eficiência ecológica do crescimento medindo a eficiência da atividade econômica e os correspondentes impactos ambientais. Isto é, trata-se de um conjunto de indicadores, em vez de ser um índice único do desempenho econômico, e podem ser distribuídos por setores, de acordo com a área que a empresa sob análise está inserida, como demonstrado no Quadro 3.

²² O Instituto da Terra, ou *Earth Institute*, é um centro de pesquisa da Universidade de Columbia que mistura pesquisa científica, educação e soluções práticas para ajudar a guiar o mundo para um caminho em direção à sustentabilidade, estudando e criando soluções para problemas de saúde pública, de pobreza, de energia, de ecossistemas, de clima, de desastres naturais e de urbanização (EARTH INSTITUTE, 2016).

Quadro 3 - Ecoindicadores desenvolvidos pela ESCAP

Setor	Intensidade de uso de recursos	Intensidade do impacto ambiental
Agricultura	Água [m ³ /PIB] Energia [J/PIB] Solo [km ² /PIB]	CO ₂ [t/PIB] CH ₄ [t/PIB]
Indústria	Energia [J/PIB] Água [m ³ /PIB] Material [EDM/PIB] ¹	CO ₂ [t/PIB] Resíduos sólidos [t/PIB]
Manufatura	Energia [J/PIB] Água [m ³ /PIB] Material [EDM/PIB]	CO ₂ [t/PIB] DBO ¹ [t/PIB] Resíduos sólidos [t/PIB]
Serviços públicos e particulares, abertos ou acessíveis ao público	Energia [J/PIB] Água [m ³ /PIB] Solo [km ² /PIB]	CO ₂ [t/PIB] Águas residuais [m ³ /PIB] Resíduos sólidos [t/PIB]
Transporte	Combustível [J/PIB]	CO ₂ [t/PIB]

Fonte: ONU (2009).

Notas: ¹ Demanda Biológica de Oxigênio.

Registra-se que conforme a área em que a empresa atua, alguns ecoindicadores podem ser mais apropriados que outros, destarte o Quadro 3 elenca as sugestões da ESCAP para os setores de agricultura, indústria, manufatura, serviços e transporte.

Logo, uma vez que a questão da sustentabilidade não pode ser definida de maneira rígida e conceituada de uma única forma, os indicadores de ecoeficiência são de extrema importância, pois irão fornecer os dados para avaliação do ambiente. Por este motivo, estes ecoindicadores devem ser constantemente monitorados e atualizados. Assim, as informações apresentadas nos EEIs possibilitam a avaliação da situação investigada de modo que se possam tomar decisões mitigadoras ou estudar a implantação de medidas técnicas. Ademais, as análises empíricas, medição de dados e conhecimento teórico oferecem informações importantes sobre o entendimento do meio ambiente no meio empresarial (PEREIRA et al., 2014).

Outrossim, o WBCSD (2000b) recomenda a adoção de oito princípios para selecionar os indicadores em qualquer campo, incluindo ecoeficiência, por acreditar que além de aplicáveis para medir o desempenho de uma empresa, podem ser empregados em outras áreas da sustentabilidade, como impactos sociais, os quais são:

- ser relevantes e significativos no que diz respeito à proteção do ambiente e da saúde humana e/ou melhorar a qualidade da vida;
- prover informações para tomadas de decisão que melhorem o desempenho da organização;
- reconhecer a diversidade inerente de negócios;

- dar suporte a *benchmarking*²³ e monitoramento ao longo do tempo;
- ser claramente definidos, mensuráveis, transparentes e verificáveis;
- ser compreensíveis para identificação pelas partes interessadas;
- basearem-se numa avaliação global de operações, produtos e serviços de uma empresa, com foco naquelas áreas diretamente controladas pela gerência;
- reconhecer problemas relacionados com aspectos anteriores e posteriores às atividades de uma empresa.

Por conseguinte, destaca-se que a seleção de indicadores é largamente influenciada pela finalidade da análise, haja vista que os EEIs são estruturados principalmente para mensurar recursos, em termos de produção e consumo, e os correspondentes impactos ambientais. Para tanto, a ONU (2009) elencou um conjunto limitado de EEIs. Todavia, revela que não é uma lista definitiva e nem exaustiva, mas sim flexível e adaptável a novas incorporações, de acordo com a relevância ambiental, a estrutura da economia, a disponibilidade dos dados e a consistência com as estratégias nacionais de desenvolvimento sustentável. Portanto, cabe à empresa ou instituição interessada na análise determinar os aspectos que requerem avaliação, a fim de direcionar a definição dos indicadores.

Para a efetividade da escolha dos ecoindicadores, a norma ABNT NBR ISO 14045 (2014) acentua os seguintes requisitos: que o aumento da eficiência para um mesmo valor do sistema de produto deve representar uma melhoria ambiental; e que o incremento da eficiência para um mesmo impacto ambiental deve corresponder a um acréscimo do valor do sistema de produto. Assim, explicita-se no Quadro 4, os indicadores elencados pelo WBCSD (2000b) que podem ser utilizados pelas empresas e organizações conforme o propósito de análise.

Quadro 4 - Lista de categorias, aspectos e indicadores propostos pelo WBCSD

Categoria	Aspecto	Exemplo
Preço do produto/serviço	Volume	Unidades vendidas (número, por exemplo) Unidade estatística (média, por exemplo) Empregados (número, horas de trabalho, por exemplo) Espaço (gestão interna, por exemplo)
	Massa	Quantidade vendida (quilogramas, por exemplo) Quantidade produzida (quilogramas, por exemplo)
	Financeiro	Vendas líquidas/volume de negócios Margem bruta (receita líquida - custo dos produtos vendidos) Valor acrescentado (receita líquida - custos de bens adquiridos)

²³ Termo utilizado para expressar o processo de avaliação da empresa em relação à concorrência, por meio do qual incorpora os melhores desempenhos de outras firmas e/ou aperfeiçoa os seus próprios métodos.

Preço do produto/serviço	Financeiro	Renda/rendimento/lucro Valor da ação Passivo (por exemplo, os custos de seguros) Reservas/provisões Investimentos e baixas Custos (produção, energia, materiais, eliminação de resíduos, controle de poluição, por exemplo)
	Funcional	Desempenho do produto Serviços prestados Rendimento agrícola Eficácia agrícola Durabilidade do produto Capacidade de transporte
	Outros	Preço do produto Quota de mercado Margens Mix de mercado
Influência ambiental da criação do produto/serviço	Consumo de energia	<i>Gigajoules</i> consumidos Quantidade de combustíveis fósseis consumida Fonte (renovável e não renovável) Emissões (toneladas de SO _x , NO _x , GEE, por exemplo)
	Consumo de materiais	Toneladas consumidas Tipo (matéria-prima, materiais indiretos, auxiliares) Fonte (renováveis, não renováveis, reciclados, virgens, etc.) Características (toneladas de materiais com certas características de segurança/risco ambiental, por exemplo)
	Consumo de recursos naturais	Toneladas consumidas Fonte (renovável, não renovável, águas subterrâneas, águas doces superficiais, água salgada, por exemplo) Uso da terra Água não processada
	Saída de não-produtos	Antes do tratamento (por exemplo, toneladas de insumos materiais processados menos toneladas de produtos gerados) Técnicas de tratamento (por exemplo, a quantidade de biotratamento, incineração, aterro) Descargas para o solo ou a água após tratamento Emissões atmosféricas Liberação de metais pesados Lançamentos persistentes, bioacumulativos e tóxicos
	Eventos não intencionais	Descargas acidentais
	Produto / Serviço	Características (por exemplo, reciclagem, reutilização, biodegradabilidade, segurança, durabilidade, risco)
	Embalagens	Toneladas vendidas Fonte (por exemplo, material virgem, reciclado)
Emissões durante a utilização e descarte	Emissões para o solo, água e ar	

Fonte: WBCSD (2000b).

Com base no Quadro 4, observou-se que o WBCSD dividiu os indicadores em categorias, de valor e ambientais, que por sua vez apresentam aspectos variados, que podem ser mensurados de maneiras distintas. Ou seja, se o produtor opta por analisar o consumo de energia de um processo e sua relação com algum aspecto de massa do produto ou serviço, o mesmo poderá correlacionar a quantidade de *gigajoules* consumidos ou a quantidade de combustíveis fósseis consumida ou a fonte de energia utilizada (renovável e não renovável), assim como as emissões gasosas associadas com o número de unidades vendidas, ou a média de unidades vendidas, o número de empregados envolvidos, ou o número de horas de trabalho, por exemplo.

Segundo o WBCSD (2000b), indicadores adicionais poderiam tornar-se aplicáveis se os esforços mundiais para desenvolver métodos de medição se tornassem bem sucedidos, como indicadores de valor financeiro adicional, emissões de acidificação para o ar e resíduos totais.

Já o Conselho Empresarial Brasileiro para o Desenvolvimento Sustentável (CEBDS) indica três categorias sucessivas para as práticas de ecoeficiência: processos mais limpos, produtos mais limpos e uso de recursos sustentáveis.

Embora a ESCAP, o WBCSD e o CEBDS classifiquem de maneira diferente os EEIs, não indicam quais devem ou não ser usados, deixando a decisão para a empresa interessada na avaliação. Da mesma forma, a norma ABNT NBR ISO 14045 (2014) não determina quais ecoindicadores devem ser utilizados para a realização de uma análise de ecoeficiência, senão somente relata que a avaliação do valor do sistema de produto, precisa considerar o ciclo de vida completo do sistema de produto e explica que há muitas maneiras de se avaliar esse valor, como lucro e disposição de pagar menos os custos, diferença frequentemente chamada de valor agregado. Patenteia ainda que, esses custos podem incluir preço, tarifa de aluguel, taxa operacional, etc., valores difíceis de determinar em uma perspectiva de ciclo de vida já que custos e lucros podem ser omitidos por dados atores na cadeia de suprimento. Todavia, estabelece que pode estimar mudanças em tais valores, por meio do desempenho funcional (valor funcional) ou de custos financeiros (valor monetário). Sendo que, o primeiro reflete um benefício tangível e mensurável para o usuário e outras partes interessadas, representando o desempenho funcional ou a deseabilidade de um sistema de produto. Enquanto, o segundo pode ser expresso em termos de custos, preço, disposição para pagar, valor agregado, lucro, investimento futuro, etc. Acrescenta que outros valores podem incluir valores intangíveis, como valores estéticos, marca e valores culturais e históricos.

Portanto, reconhece-se que na medida em que a Norma que avalia ecoeficiência não determina quais EEIs devem ser analisados, cabe ao(s) interessado(s) definir os objetivos e adotar indicadores de ecoeficiência que possibilitem alcançá-los, sempre considerando a qualidade e a incerteza dos dados, e o impacto provocado sobre a compreensão da análise.

4.4 Metodologia de análise de ecoeficiência da ABNT NBR ISO 14045:2014

Porém, sem embargo essa contextualização, Oliveira e Feitosa (2015) patenteiam que as certificações ambientais tornaram-se principalmente estratégia de marketing do que efetiva mudança no pensamento corporativo, pois, em geral, o “rótulo verde” em nada contribui para a preservação do meio ambiente ou para a redução de impactos ambientais.

Em virtude desse entendimento, utilizou-se nessa investigação a metodologia da ABNT NBR ISO 14045: 2014, para avaliar a ecoeficiência do setor sucroalcooleiro no Piauí, haja vista que, conforme a Figura 2, as análises de ecoeficiência deverão incluir a definição de objetivo e do escopo, a avaliação ambiental e do valor do sistema de produto, as quantificações da ecoeficiência e a interpretação.

Sendo assim, esclarece-se que o entendimento do objetivo e do escopo inclui as fronteiras do sistema e limitações, uma vez que o sistema de produto²⁴ deve ser definido por nome e escala, localização, tempo e principais partes interessadas envolvidas. Como também, o escopo de uma avaliação de ecoeficiência deve especificar claramente as funções (características de desempenho) do sistema de produto em estudo, com base em uma unidade funcional²⁵, mensurável e claramente determinada, que se configure em referência para a avaliação ambiental e de valor do sistema de produto.

Sublinha-se que a fronteira do sistema deve ser descrita como especificado na ABNT NBR ISO 14044, sendo a mesma para a avaliação ambiental e para o valor do sistema de produto.

A fronteira do sistema determina quais processos elementares devem ser incluídos na ACV. A seleção da fronteira do sistema deve ser consistente com o objetivo do estudo (...). É útil descrever o sistema usando um fluxograma de processo que mostre os processos elementares e suas inter-relações. Convém que cada um dos processos elementares seja inicialmente descrito visando a definir o início do processo elementar, em termos da entrada de matérias primas ou produtos intermediários, a

²⁴ Sistema de produto corresponde ao conjunto de processos elementares, com fluxos elementares e de qualquer bem ou serviço, desempenhando uma ou mais funções definidas e que modela o ciclo de vida de um produto (ABNT NBR ISO 14040:2009).

²⁵ Unidade funcional diz respeito ao desempenho quantificado de um sistema de produto para utilização como uma unidade de referência (ABNT NBR ISO 14044:2009).

natureza das transformações e operações que ocorrem como parte do processo elementar, e onde o processo elementar termina, em termos do destino dos produtos intermediários ou finais (ABNT NBR ISO 14044:2009).

Acentua-se segundo a referida Norma que as alocações a sistemas adjacentes externos da fronteira do sistema devem ser identificadas e os princípios de alocação utilizados devem ser descritos.

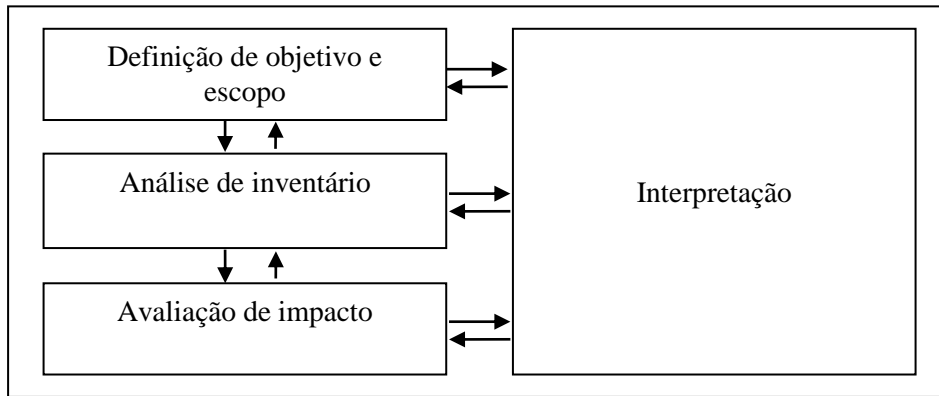
Adenda-se que para a avaliação ambiental e tipos de impactos, importa determinar quais fluxos elementares, critérios de corte, regras de alocação, categorias de impacto, indicadores de categoria, modelos de caracterização e métodos de ponderação, que irão representar o aspecto ambiental na avaliação da ecoeficiência. Destarte, revela-se que a seleção precisa ser consistente com o objetivo do estudo e que as exclusões visando à avaliação da ecoeficiência, precisam ser relatadas e justificadas.

Outrossim, para indicar o valor do sistema de produto²⁶, é necessário expor qual o valor atribuído para a parte interessada, tipo de valor e o método. Logo, o valor deve ser quantificável com referência à unidade funcional de acordo com o objetivo e o escopo da avaliação da ecoeficiência. Em seguida impõe-se selecionar e especificar os indicadores de ecoeficiência a serem utilizados na avaliação; e definir o(s) método(s) de avaliação e o formato de apresentação da avaliação da ecoeficiência. Posteriormente, estabelece-se a interpretação a ser usada e as limitações decorrentes da definição do escopo, que baliza implicitamente a aplicabilidade dos resultados da avaliação. Por fim, delimita-se o tipo e o formato do relatório, e os meios de divulgação.

Recomenda-se que a avaliação ambiental baseie-se na ACV, em conformidade com a ABNT NBR ISO 14040:2009 e ABNT NBR ISO 14044:2009 (Figura 3), pois o resultado de um estudo de Inventário de Ciclo de Vida (ICV) ou da ACV pode ser aplicado diretamente como entrada para uma avaliação de ecoeficiência.

²⁶ Valor do sistema de produto é a valia ou desejabilidade atribuída a um sistema de produto. Os tipos de valores do sistema de produto podem ser valor funcional, valor monetário e outros valores (ABNT NBR ISO 14045:2014).

Figura 3 - Fases de uma Avaliação do Ciclo de Vida



Fonte: ABNT NBR ISO 14040 (2009).

Diante da Figura 3, depreendeu-se que a ACV é composta de fases interativas, que influenciam e são influenciadas pelas fases anteriores e posteriores, ao mesmo tempo em que se faz necessária uma interpretação dos resultados ao longo de toda a avaliação.

Nessa perspectiva, salienta-se que não obstante a constatação de que a avaliação do valor do sistema de produto precisa considerar o ciclo de vida completo do sistema de produto, existem várias maneiras de avaliar o valor do sistema de produto, uma vez que este pode abranger diferentes aspectos de valor, incluindo os funcionais, monetários e estéticos. Dessa maneira, a quantificação do valor do sistema de produto deve ser conduzida com a utilização de indicadores relevantes do valor do sistema de produto, como definido no objetivo e no escopo do estudo de ecoeficiência. Enquanto, a quantificação da ecoeficiência e os resultados carecem ser determinados relacionando-se os resultados da avaliação ambiental aos do valor do sistema de produto, de acordo com a definição de objetivo e do escopo.

O objetivo da avaliação da ecoeficiência é otimizar o valor de desempenho do sistema de produto, sendo uma ferramenta de gestão fundante para diminuir o impacto ambiental global. A norma ISO 14045:2014 orienta essa avaliação, possibilitando que os usuários abordem simultaneamente as características do meio ambiente e a sustentabilidade econômica dos produtos e sistemas de produtos. A ecoeficiência pode ser medida de diversas formas, mas seguindo a norma ISO, os impactos ambientais são mensurados por meio de ACV, com o respaldo de outras normas internacionais (ISO 14040, ISO 14044).

4.5 Obstáculos para a ecoeficiência como ferramenta de análise de sustentabilidade

Sublinha que o crescimento da conscientização ambiental e do movimento em torno

do desenvolvimento sustentável, suscita nas empresas com potencial de degradação ambiental uma diversidade de posicionamentos, uma vez que podem surgir consumidores que consideram as características ambientais para selecionar produtos e serviços, e investidores que começam a se preocupar com os passivos ambientais.

Em função dessa nova contextualização, destaca-se a visão de Pereira et al. (2014), que faz-se mister atentar para a importância da orientação dos funcionários e dos gestores em um ambiente empresarial, e externamente do consumidor, por entenderem que funcionários e gestores conscientes trabalham para o melhor desempenho do processo, qualidade de vida do ser humano e do meio ambiente; e dos consumidores que, com conhecimento da relevância de boas condições ambientais, podem exigir das empresas atitudes de acordo com seus interesses.

Contudo, ressalta que a eficiência ecológica não se limita simplesmente a fazer melhorias em práticas e hábitos existentes, senão deve estimular criatividade e inovação na busca de novas formas de fazer as coisas. Também não está limitada a áreas dentro de uma empresa, pois é válida para os processos que ocorrem antes que a matéria-prima entre e depois que o produto saia de uma planta industrial, envolvendo toda a cadeia de valor, desde o fornecimento do produto. No entanto, realça que a ecoeficiência integra apenas dois de três elementos da sustentabilidade, a economia e o ambiente, deixando o terceiro, progresso social, fora de sua alçada (WBCSD, 2000a).

Sendo assim, Vinha (2009), Hart (2007) e Schaffel e Rovere (2010) compreendem que sem embargo a ecoeficiência não ser suficiente para alcançar o desenvolvimento sustentável, contribui para maior eficiência do processo (redução de custos através de menor consumo de matérias-primas e energia e geração de resíduos) e para melhoria do produto (adição de valor para as empresas e os seus clientes), além de ser avaliada considerando o propósito final. Destarte, acentuam que a eficiência ecológica e econômica precisa envolver uma relação entre meios e fins, que devem convergir para o desenvolvimento sustentável, que compreende dimensões econômica, ambiental e social.

Nessa perspectiva, Sachs (2005) questiona o posicionamento da grande maioria dos economistas de que a transição da civilização do petróleo à civilização da biomassa deverá ser realizada sob as formas mais eficientes possíveis, em virtude de considerar o termo “eficiente” um dos mais traiçoeiros do vocabulário econômico, e que depende de como está sendo relacionado, ou seja, se refere aos custos, aos objetivos sociais ou aos ambientais. Dessa maneira, patenteia a necessidade de introduzir critérios sociais e ambientais além dos econômicos.

Portanto, conforme Schaffel e Rovere (2010), a ecoeficiência não deve ser reduzida a simplesmente produzir mais com menos ou caracterizado como o "elo entre negócios e desenvolvimento sustentável", haja vista que o setor privado tem o potencial de contribuir com muito mais do que o mero controle de poluição, através do exercício da responsabilidade social. Mas, deve considerar que o alinhamento entre ecoeficiência e as práticas empresariais mais responsáveis provoca o aparecimento de um tipo de eficiência eco-social.

Consoante Macedo et al. (2007), a tecnologia para a produção de etanol de cana de açúcar no Brasil avançou progressivamente nos últimos trinta anos, e a eficiência e produtividade do etanol brasileiro são reconhecidas internacionalmente.

Em 2015, o país foi o maior produtor mundial de cana, açúcar e etanol, e também o maior exportador (CONAB, 2016).

Com base nesse cenário, Abramovay (2008) acrescenta que a eficiência técnica, econômica e energética do etanol brasileiro contrasta com os problemas socioambientais que persistem, como a exclusão social, a concentração de terra e do poder, e conflitos por terra. Ademais, reconhece esta situação como uma contradição do etanol brasileiro, pois produzir de forma eficiente não se limita à quantidade de litros de etanol produzido por hectare de terra utilizada, ou aos litros de água utilizados durante o processo de produção industrial de etanol. Senão, faz-se importante aumentar os níveis de produtividade, com a finalidade de evitar a expansão das áreas de cultivo e reduzir os custos de produção. Ou seja, essa eficiência deve ser definida em termos da relação entre meios e fins, não podendo, assim, ser avaliada sem se referir ao propósito final. Logo, se o objetivo for a produção de etanol com sustentabilidade, deve ser adotada então uma abordagem de eficiência eco-social.

Por conseguinte, constatou-se que a produção de etanol a partir da cana de açúcar é causadora de impactos sociais, ambientais e econômicos e de conflitos sobre a posse da terra, além de aprofundar a concentração de renda e piorar as condições de trabalho nas usinas sucroalcooleiras. Contudo, o objetivo desta pesquisa é verificar se a produção sucroalcooleira no Piauí se processa de forma ecoeficiente e, para tanto, serão avaliados e contrastados parâmetros ambientais e econômicos excluindo, portanto, os aspectos sociais da análise.

5 PROCEDIMENTOS METODOLÓGICOS

Em função dessa dissertação objetivar analisar a importância da usina COMVAP para o setor sucroalcooleiro do Piauí, nos aspectos econômico e ambiental, essa investigação configura-se como descritiva, e exige a realização de pesquisa de campo, na qual a Usina figura como unidade observacional, e de pesquisa documental junto a bases de dados nacionais e documentos dos órgãos públicos relacionados com a pesquisa.

Nesse sentido, o presente capítulo se encontra distribuído em seis itens. O primeiro aborda os métodos, o segundo descreve o universo da pesquisa, o terceiro delimita a amostra, o quarto apresenta as técnicas de pesquisa, o quinto explica a Avaliação do Ciclo de Vida e o sexto trata dos ecoindicadores selecionados para o estudo.

5.1 Métodos

Como suporte teórico-metodológico, empregou-se o método de estudo de caso que, segundo Marconi e Lakatos (2010), pode abranger o conjunto das atividades de um grupo particular com a finalidade de obter generalizações e ser considerado representativo de muitos outros casos semelhantes.

Destaca-se que a avaliação ambiental baseou-se na Avaliação do Ciclo de Vida (ACV) do etanol e do açúcar, em conformidade com a ABNT NBR ISO 14040 e ABNT NBR ISO 14044, cujos resultados foram utilizados para a avaliação da ecoeficiência. Outrossim, aplicou-se a análise de estatística descritiva sobre os dados coletados, ora representados de maneira gráfica, ora de maneira tabular, e os cálculos foram realizados através do *software* Microsoft Excel.

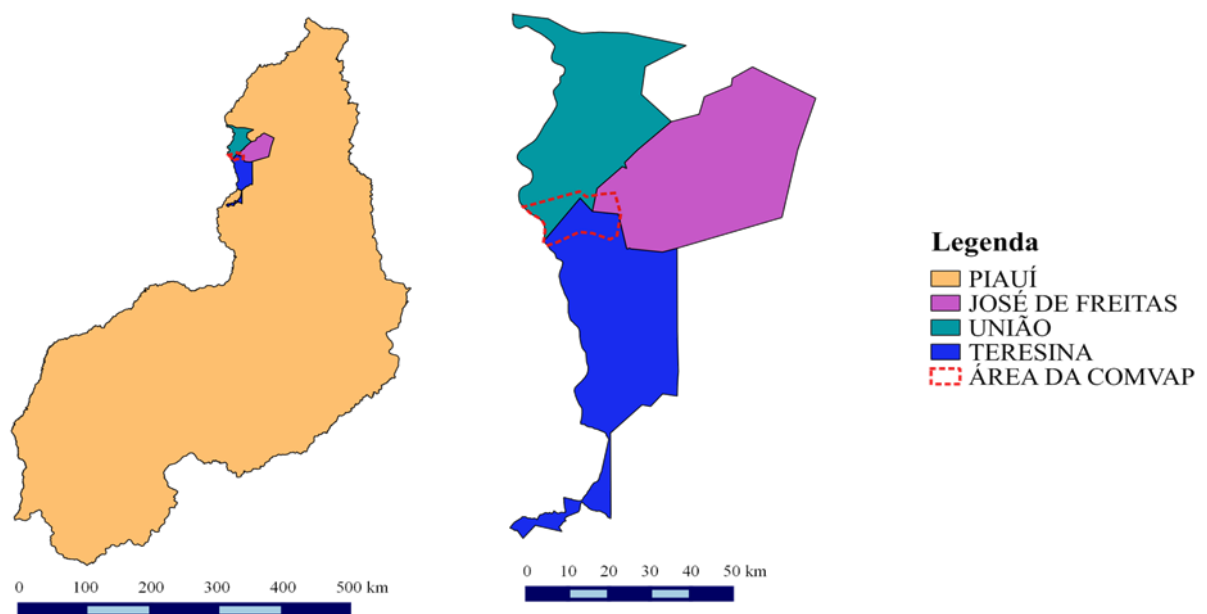
Adenda-se que a avaliação do valor do sistema de produção de etanol e do açúcar considerou o ciclo de vida completo do sistema. Ressalta-se, que em virtude do sistema de produto poder abranger diferentes aspectos de valor, no âmbito desta pesquisa, fez-se uso de valor monetário, expresso em termos de custos, preço e lucro.

5.2 Universo da pesquisa

Salienta-se que o universo da pesquisa foi representado pela produção de açúcar e de

álcool no Piauí, na única usina sucroalcooleira no Estado, a COMVAP – Açúcar e Álcool Ltda., implantada em 1979, quando produzia apenas álcool. Acentua-se que em 2002, a mesma foi adquirida pela Usina Olhos D'água, de Pernambuco, que já possuía experiência na área, a qual introduziu a produção de açúcar e de energia, possuindo atualmente uma área total de 16.000 ha, englobando territórios piauiense (Teresina, União e José de Freitas) e maranhense (Caxias e Timon), com 12.000 ha de área cultivada. A Figura 4 ilustra a localização da usina no Piauí, cuja área foi demarcada com auxílio de imagem de satélite disponibilizada pelo software *Google Earth* (2015).

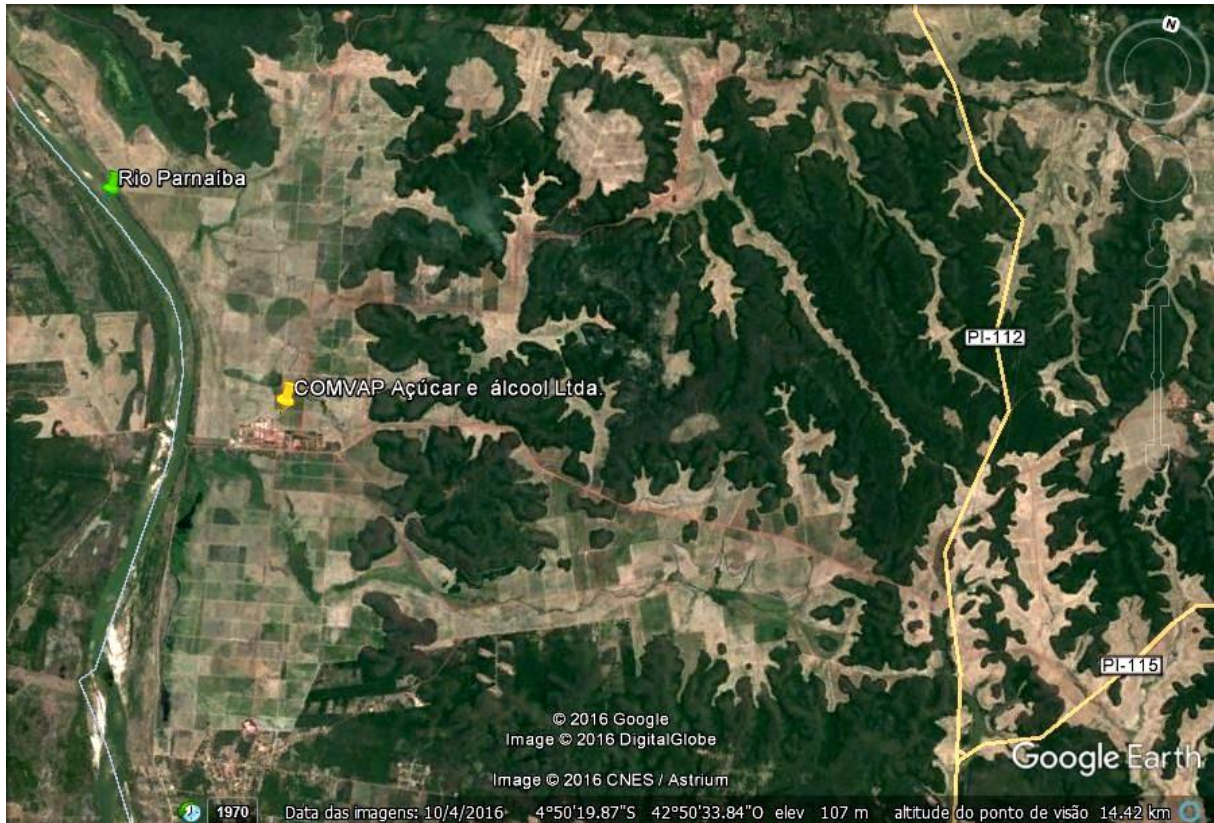
Figura 4 - Área da usina COMVAP em território piauiense



Fonte: Elaborado pela autora (2017) através do software QGIS, tendo como base a malha digital concedida pelo IBGE (IBGE, 2010).

Diante da Figura 4, observou-se a posição da área pertencente à Usina no estado do Piauí, abrangendo os municípios de Teresina, José de Freitas e União. Com a intenção de contribuir para o entendimento da localização espacial da Usina, apresenta-se na Figura 5 uma imagem de satélite da porção da COMVAP no estado.

Figura 5 - Imagem de satélite da área da usina COMVAP em território piauiense



Fonte: A autora (2017), com base no *software Google Earth* (2016).

A Figura 5 possibilitou posicionar a Usina próxima ao rio Parnaíba, demarcado pela linha azul à esquerda, e adjacente à PI-112, rodovia que liga o município de Teresina ao de União. Ressalta-se que a entrada principal da COMVAP localiza-se às margens da PI-112.

5.3 Delimitação da amostra

Registra que a coleta de dados envolveu pesquisa direta, cuja seleção dos entrevistados ocorreu mediante amostragem não probabilística intencional, na qual o pesquisador está interessado nas respostas de certos elementos da população, cuja função desempenhada ou cargo ocupado são determinantes para obtenção de dados (MARCONI; LAKATOS, 2007).

Logo, embasado nessa perspectiva, escolheu-se seis funcionários de três setores essenciais da Usina para este estudo: administrativo, industrial e agrícola. Após a definição da amostra, realizou-se a pesquisa de campo que, segundo Vergara (2009), constitui uma investigação realizada no local onde ocorre ou ocorreu o fenômeno ou que dispõe de elementos para explicá-lo.

5.4 Técnicas de pesquisa

Em relação à pesquisa empírica, aprovou-se a pesquisa junto ao Comitê de Ética em Pesquisa da UFPI, por meio do número 52728115.2.0000.5214, e promoveu-se reunião com a direção da Usina para explicitação dos objetivos e apresentação dos instrumentos de investigação, com vistas à obtenção da autorização para condução da investigação.

Posteriormente, procedeu-se à coleta de dados, iniciada com os levantamentos documental, documentação direta e bibliográfico. Como técnica de documentação direta, de cunho intensivo, utilizou-se entrevista estruturada com perguntas abertas, que é uma conversação efetuada face a face, de maneira metódica, que proporciona ao entrevistador, verbalmente, a informação necessária; e como técnicas de documentação direta, de cunho extensivo, usou-se análise de conteúdo, que permite a descrição sistemática, objetiva e quantitativa do conteúdo da entrevista, e formulário, que é um roteiro de perguntas enunciadas pelo entrevistador e preenchidas pelo mesmo com as respostas do pesquisado (MARCONI; LAKATOS, 2009).

Nesse sentido, no primeiro semestre de 2016, realizaram-se as entrevistas, cujos roteiros podem ser visualizados nos Apêndices A, B e C. Focou-se nos resultados da safra do ano anterior, 2015, e as perguntas foram divididas nas dimensões econômica, com a finalidade de obter informações da produção; e ambiental, com o fim de investigar o impacto ambiental de cada fase do processo produtivo. Patenteia-se que o trabalho de campo incluiu registro fotográfico da área da usina.

Enfatiza-se que, por meio da pesquisa documental recolheram-se informações acerca da COMVAP, assentado em documentos oficiais que, consoante Marconi e Lakatos (2010), são importantes devido o pesquisador não exercer controle sobre a forma como os documentos foram elaborados, portanto deve não somente selecionar o que interessa, como também interpretar e comparar o material, para torná-lo adequado à investigação. Sublinha-se que tais documentos configuraram-se no comparativo de safras, em dados contábeis do balanço patrimonial da Usina, na receita total das vendas de açúcar e de etanol em 2015, no custo total da produção de açúcar e de etanol em 2015, e em uma planilha com os equipamentos empregados na Usina.

De posse dos dados referentes à produção de 2015, utilizou-se a metodologia descrita pela norma ABNT NBR ISO 14045: 2014, para avaliar a ecoeficiência do setor sucroalcooleiro no Piauí. Inicialmente, descreveu-se separadamente o sistema de produção de açúcar e de álcool, usando um fluxograma de processo (Figura 7), sucedida de uma avaliação

qualitativa, na qual se identificaram as implicações causadas nos dois processos de produção, examinando os produtos, insumos e resíduos gerados, através dos elementos de ecoeficiência.

Em seguida, realizou-se, para cada processo, um exame quantitativo do grau de impacto sobre o meio ambiente, onde se mensurou e analisou indicadores de ecoeficiência de valor, oriundos da dimensão econômica e indicadores de influência ambiental provenientes da dimensão ambiental. Ao final, consolidou-se esses indicadores em indicadores síntese que mensuram a razão entre as dimensões de valor e a ambiental.

5.5 Avaliação do Ciclo de Vida (ACV)

A ACV é uma abordagem do berço ao túmulo utilizada para avaliar sistemas industriais, que começa com a coleta de matéria-prima da terra para criar o produto e termina no momento em que todos os materiais são retornados a terra. Ou seja, a ACV avalia todas as etapas da vida de um produto, com a perspectiva de que as mesmas são interdependentes, o que significa que uma operação leva à próxima. Sendo assim, possibilita a estimativa dos impactos ambientais cumulativos resultantes de todas as fases do ciclo de vida do produto, incluindo muitas vezes impactos não considerados em análises mais tradicionais. Pois, o termo ciclo de vida refere-se às principais atividades em o curso da vida útil do produto, desde a fabricação, uso e manutenção, até a disposição final, incluindo a aquisição de matéria-prima necessária para a fabricação do produto (GILLANI et al., 2010).

Com a finalidade de explicar esse procedimento, reconhece-se que de acordo com a Norma ABNT NBR ISO 14040:2009, a ACV se divide em quatro etapas, definição do objetivo e escopo da análise; análise de inventário; análise de impacto; e interpretação.

5.5.1 Avaliação do Ciclo de Vida - fase 1: definição do objetivo e escopo

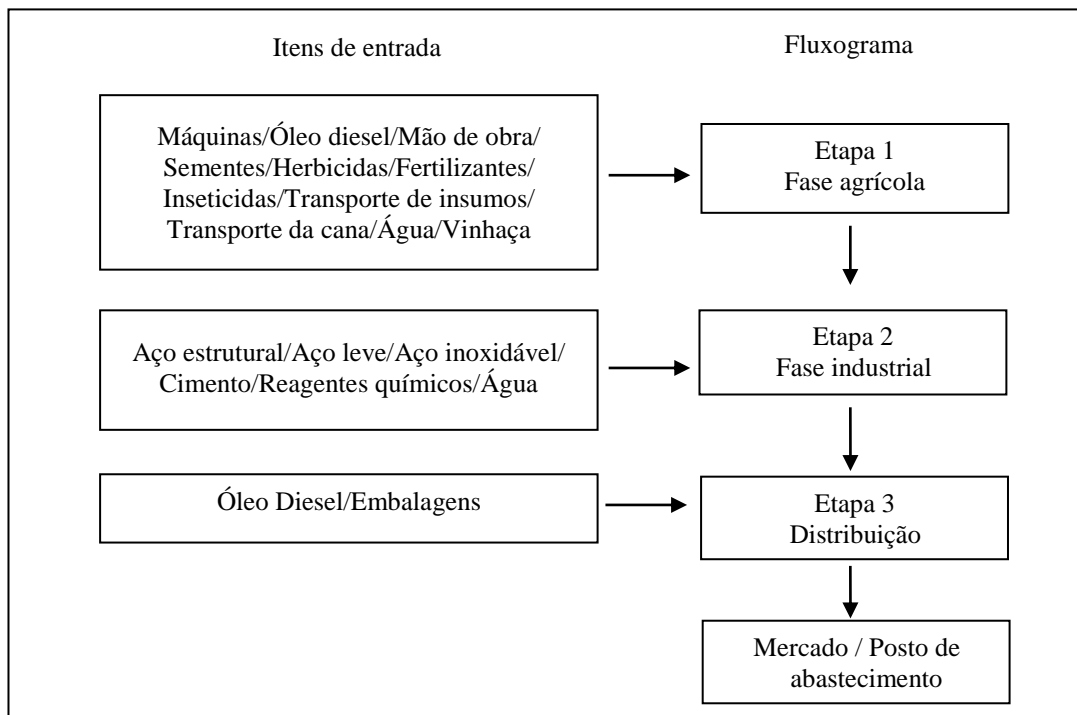
Devido essa dissertação investigar os impactos ambientais da produção de açúcar e do etanol a partir da cana de açúcar no Piauí, apresentam-se os elementos que compõem o escopo da ACV do etanol e do açúcar:

- função do sistema: os objetos desta ACV são o etanol e o açúcar produzidos a partir da cana de açúcar brasileira numa usina autônoma. Sendo que a função do etanol assenta-se em ser utilizado como combustível em veículos automotores para transporte e a do açúcar em ser usado na alimentação;

- unidade e fluxo de referência: o fluxo de referência relacionado à unidade funcional e utilizado para obtenção dos dados do ICV é de 1 hectare, cultivado com cana de açúcar por um período de 1 ano, referente à safra de 2015;
- sistema de produto: as unidades de processo que compõem a cadeia de etanol e açúcar distinguem-se em: etapas 1: agrícola; etapa 2: indústria; etapa 3: distribuição.

Ressalta-se que o sistema de produto inclui, além das três unidades de processo a ser avaliadas, os itens de entrada para cada uma dessas etapas, pois as fronteiras do sistema são definidas pelas etapas que serão incluídas no estudo, as quais são mostradas na Figura 6, incluindo o processamento e fabricação dos itens de entrada e o reuso e tratamento dos resíduos, dependendo da disponibilidade de dados e recursos.

Figura 6 - Sistema básico de produto do etanol ou açúcar



Fonte: A autora (2017).

Com base na Figura 6, observou-se que durante a primeira etapa, a fase agrícola, ocorre a maior proporção de entradas no sistema, referentes ao uso de maquinário agrícola, queima de óleo diesel, mão de obra, aplicação de sementes, transporte de insumos para o cultivo, transporte da cana do campo para a indústria, água para irrigação e vinhaça para fertirrigação. Já na fase industrial, foram consideradas as entradas relativas à edificação da usina, associadas ao material usado nas construções e nos equipamentos, assim como aos

reagentes químicos e água necessários ao processamento da cana. Na última fase, a distribuição, avaliou-se a entrada de óleo diesel para o transporte até os centros de distribuição e as embalagens de açúcar.

5.5.2 Avaliação do Ciclo de Vida - fase 2: análise de inventário

Enfatiza-se que em virtude da etapa de inventário (ICV) da metodologia de ACV corresponder ao estudo do consumo de recursos naturais, da demanda energética e das emissões associadas à cadeia produtiva, analisou-se os impactos ambientais, nos quais se incluem os processos necessários para apoiar a produção e o transporte das matérias-primas utilizadas pela cadeia.

Para um melhor tratamento dos dados e para facilitar a investigação, fez-se um levantamento dos itens que serão avaliados em cada uma das etapas, a quantidade de cada um e a unidade no sistema internacional associada a cada uma das entradas por hectare por ano, segundo as especificações publicadas no Manual de Boas Práticas e Manejo de Incertezas em Inventários Nacionais de GEE do IPCC (2006), com o intuito de elaborar um inventário detalhado. A análise energética envolveu o fator energético (em *Megajoules*) aplicado para cada entrada e a energia total produzida por cada item por hectare por ano. Para as emissões de GEE, considerou-se dióxido de carbono (CO₂), metano (CH₄) e óxido nitroso (N₂O), indicando o combustível de maior representatividade para cada um dos itens e os quilogramas emitidos de cada um dos GEE por *Megajoule* consumido, finalizando com os quilogramas de CO₂ equivalentes emitidos na totalidade por cada item por hectare e por ano.

Sublinha-se que os dados não obtidos diretamente na COMVAP serão substituídos por dados de outros estudos realizados em usinas sucroalcooleiras, como BEN (2015), MAPA (2013a), MAPA (2013b), Carvalho (2010), Garcia e Sperling (2010), Soares et al. (2009), Alves et al. (2009), Pedrosa (2009), Macedo, Seabra e Silva (2008), Boddey et al. (2008), Pimentel e Patzek (2007), IPCC (2007), IPCC (2006), Resende et al. (2006), Macedo, Leal e Silva (2004), Macedo (1998) e Pimentel (1980).

5.5.2.1 Energia fóssil empregada na produção de etanol e açúcar

Analisou-se cada uma das etapas de produção do etanol e do açúcar para quantificar o consumo de energia fóssil para cada atividade: cultivo da matéria-prima, processamento na

usina e distribuição.

Dessa forma, calculou-se o consumo energético do trabalho humano, do maquinário, da aplicação de insumos e defensivos agrícolas, do transporte, das sementes, assim como da construção e manutenção da usina, dos reagentes químicos usados na indústria e da distribuição dos produtos.

A unidade utilizada para o estudo da eficiência energética nesta dissertação é a do Sistema Internacional, ou seja, o Joule e seus múltiplos, principalmente *Megajoules* (MJ).

Onde: $1 \text{ cal} = 4,1868 \text{ J} = 0,0000041868 \text{ MJ}$;

$1.000 \text{ cal} = 1 \text{ kcal} = 4186,8 \text{ J} = 0,0041868 \text{ MJ}$.

5.5.2.2 Quantificação das emissões de Gases de Efeito Estufa (GEE) na produção de etanol e açúcar

Registra-se que para a produção de etanol e açúcar, faz-se imprescindível o uso de combustíveis fósseis, cuja queima gera a emissão dos GEE. Destarte, as quantidades básicas de todos os itens de entrada expostos anteriormente e a energia consumida por esses itens foram usadas para estimar a emissão dos GEE, aplicando os fatores de emissão para cada um dos gases considerados (CO_2 , CH_4 e N_2O).

5.5.3 Avaliação do Ciclo de Vida - fases 3 e 4: análise de impacto e interpretação

Conforme a norma ABNT NBR ISO 14045:2014, um estudo de ICV pode ser utilizado diretamente como entrada para uma avaliação de ecoeficiência. Portanto, os resultados do ICV, a análise de impacto e a interpretação foram relacionados à avaliação do valor do sistema de produto para a consolidação dos ecoindicadores escolhidos para este estudo.

5.6 Ecoindicadores

Acentua-se que para a produção de etanol, a COMVAP processou 967.427,41 toneladas (t) de cana em 2015, das quais 152.282,14 t foram destinadas à produção de álcool, gerando um produto de 32.679.517 litros de etanol, sendo 89,8% anidro e 10,2% hidratado, o que possibilitou calcular os seguintes indicadores econômicos:

a. quantidade de etanol produzido em litros - trata-se de um indicador que por revelar a dimensão do negócio, permite verificar, quando comparado com o consumo dos insumos necessários para produzi-lo, o grau de impacto ambiental da atividade e as possíveis tomadas de decisões para reduzi-lo;

b. lucro bruto na produção de etanol em real (R\$) - refere-se ao montante do lucro bruto na produção de etanol, obtido retirando-se da receita bruta os custos informados pelo produtor;

Já os indicadores ambientais, configuram-se em:

c. consumo de energia - soma da energia total consumida derivada do consumo de energia para cada atividade, como plantio de cana, manejo da cultura, colheita, processamento na usina e distribuição. A quantidade de etanol produzido (a), dividida pelo consumo de energia (c) determina o indicador consolidado, ou seja, o montante de etanol produzido por unidade de energia consumida. Enquanto, o lucro bruto (b) dividido pelo consumo de energia (c) mostra o indicador consolidado, isto é, o lucro bruto gerado por consumo de energia;

d. emissões de GEE - derivada do total de emissões de CO₂eq, em kg, gerado em cada etapa analisada. Acentua-se que os GEE considerados foram o CO₂, o CH₄ e o N₂O, e que o indicador consolidado revela a produção de etanol (a)/(d) e o lucro bruto gerado por kg de CO₂eq emitido (b)/(d);

e. geração de resíduos sólidos - quantidade de resíduo, em kg, gerado na produção de etanol, indicado pelo peso total do bagaço residual da cana e o peso total de torta de filtro produzida, os quais foram informados pelo produtor. O indicador consolidado mede a quantidade de produto gerado por kg de resíduo sólido (a)/(e) e o lucro bruto gerado por kg de resíduo sólido (b)/(e);

f. uso do solo - área, em metros quadrados, utilizada na produção de etanol. O indicador consolidado mensura a quantidade de produto gerado por m² de terra (a)/(f) e o lucro bruto obtido por m² cultivado (b)/(f).

De forma resumida, o Quadro 5, expõe os indicadores de ecoeficiência para o processo de produção de etanol.

Quadro 5 - Indicadores de ecoeficiência na produção de etanol pela COMVAP

Dimensão	Indicadores de Ecoeficiência	
	Indicadores Gerais	Indicadores Consolidados Valor do etanol (a) ou (b) Impacto Ambiental (c) ou (d) ou (e) ou (f)
Econômica	a. Quantidade de etanol produzido b. Lucro bruto na produção de etanol	a/c. Produção de etanol por MJ de energia consumida. b/c. Lucro bruto por MJ de energia consumida.
Ambiental	c. Consumo de energia	a/d. Produção de etanol por kg de GEE emitido. b/d. Lucro bruto por kg de GEE emitido.
	d. Emissões de GEE	a/e. Produção de etanol por kg de resíduos sólidos gerados.
	e. Geração de resíduos sólidos	b/e. Lucro bruto por kg de resíduos sólidos gerados.
	f. Uso do solo	a/f. Produção de etanol por m ² de terra. b/f. Lucro bruto por m ² de terra.

Fonte: A autora (2017).

Ressalta-se que para a produção de açúcar pela COMVAP em 2015, foram destinadas 815.145,27 t de cana de açúcar para o processamento, gerando 1.338,292 sacas de açúcar. Tais dados possibilitaram a concepção dos seguintes indicadores econômicos:

a. quantidade de açúcar produzido - informada pelo produtor em número de sacas, a qual foi convertida em quilogramas, na medida em que cada saca acomoda 50kg de açúcar.

b. lucro bruto na produção de açúcar em real (R\$) - refere-se ao valor do lucro bruto na produção de açúcar, obtido retirando-se da receita bruta os custos informados pelo produtor;

Já os seguintes indicadores se assentaram nos dados ambientais para a produção de açúcar:

c. consumo de energia - soma total de energia consumida na produção de açúcar em 2015, representada pelo consumo de energia fóssil, utilizada nas diferentes etapas da produção: agrícola, processamento na usina e distribuição. A quantidade de açúcar produzido (a), dividida pelo consumo de energia (c) determina o indicador consolidado: produção de açúcar por *Megajoule* de energia consumida. O lucro bruto (b) dividido pelo consumo de energia (c) mostrou o indicador consolidado: lucro bruto gerado por consumo de energia;

d. emissões de GEE - total de emissões de CO₂eq, em kg, gerada pela queima da palha da cana, consumo de combustíveis fósseis e processamento na Usina para produção de açúcar. Os GEE considerados foram CO₂, CH₄ e N₂O. O indicador consolidado mostrou a contribuição a quantidade de açúcar produzido por kg de GEE emitido(a)/(d) e o lucro bruto gerado por kg de CO₂eq emitido (b)/(d);

e. geração de resíduos sólidos - quantidade de resíduo, em kg, gerado na produção de

açúcar, indicado pelo peso total do bagaço residual da cana e o peso total de torta de filtro produzida, informado pelo produtor. O indicador consolidado mede a quantidade de produto gerado por kg de resíduo sólido (a)/(e) e o lucro bruto gerado por kg de resíduo sólido (b)/(e);

f. uso do solo - área, em metros quadrados, utilizada na produção de açúcar. O indicador consolidado mede a quantidade de produto gerado por m² (a)/(f) e o lucro bruto gerado por m² cultivado (b)/(f).

De forma resumida, o Quadro 6 mostra os indicadores de ecoeficiência para o processo de produção de açúcar.

Quadro 6 - Indicadores de ecoeficiência na produção de açúcar pela COMVAP

Dimensão	Indicadores de Ecoeficiência	
	Indicadores Gerais	Indicadores Consolidados Valor do açúcar (a) ou (b) Impacto Ambiental (c) ou (d) ou (e) ou (f) ou (g)
Econômica	a. Quantidade de açúcar produzido b. Lucro bruto na produção de açúcar	a/c. Produção de açúcar por MJ de energia consumida. b/c. Lucro bruto por MJ de energia consumida.
Ambiental	c. Consumo de energia fóssil	a/d. Produção de açúcar por kg de GEE emitido. b/d. Lucro bruto por kg de GEE emitido.
	d. Emissões de GEE	a/e. Produção de açúcar por kg de resíduos sólidos gerados. b/e. Lucro bruto por kg de resíduos sólidos gerados.
	e. Geração de resíduos sólidos	a/f. Produção de açúcar por m ² de terra. b/f. Lucro bruto por m ² de terra.
	f. Uso do solo	

Fonte: A autora (2017).

Diante do exposto, realça-se que a análise qualitativa dos elementos de ecoeficiência e a construção e a avaliação dos indicadores apresentados, referentes aos processos de produção de açúcar e de etanol, conformaram-se na apuração da ecoeficiência nas referidas atividades.

Patenteia-se que existem *softwares*, como o *SimaPro*, o *Open LCA* e o *GaBi*, que são usados como ferramentas profissionais para coletar dados, analisar e monitorar a sustentabilidade no desempenho dos produtos e serviços de empresa, e para ACV. Entretanto, nesta dissertação, optou-se pela não utilização de *softwares* para a ACV, por não ser uma requisição da Norma ISO 14045 e devido ao tempo necessário para familiarização com o sistema escolhido e aplicação do mesmo.

Portanto, embasado nos procedimentos expostos, investigou-se a ecoeficiência na produção sucroalcooleira piauiense, cujos resultados estão explicitados no capítulo seis.

6 ECOEFICIÊNCIA NA PRODUÇÃO DE ETANOL E DE AÇÚCAR NO PIAUÍ

Sublinha-se que a cana de açúcar fornece um suco doce e potável (garapa ou caldo de cana), rico em sais minerais e açúcares vegetais, e cuja evaporação fornece um melado ou xarope que, submetido a diferentes tratamentos, gera diversos tipos de açúcar encontrados no comércio. Esta garapa também pode originar o vinho que, por processo de destilação, resultará em aguardente ou em álcool combustível. Explicita-se que o bagaço resultante do esmagamento dos colmos pode ser aproveitado na fabricação de papel e que as cinzas fornecem excelente adubo potássico-fosfatado. Além disso, a vinhaça, líquido excedente do processo de destilação, pode ser usada como adubo na própria lavoura de cana.

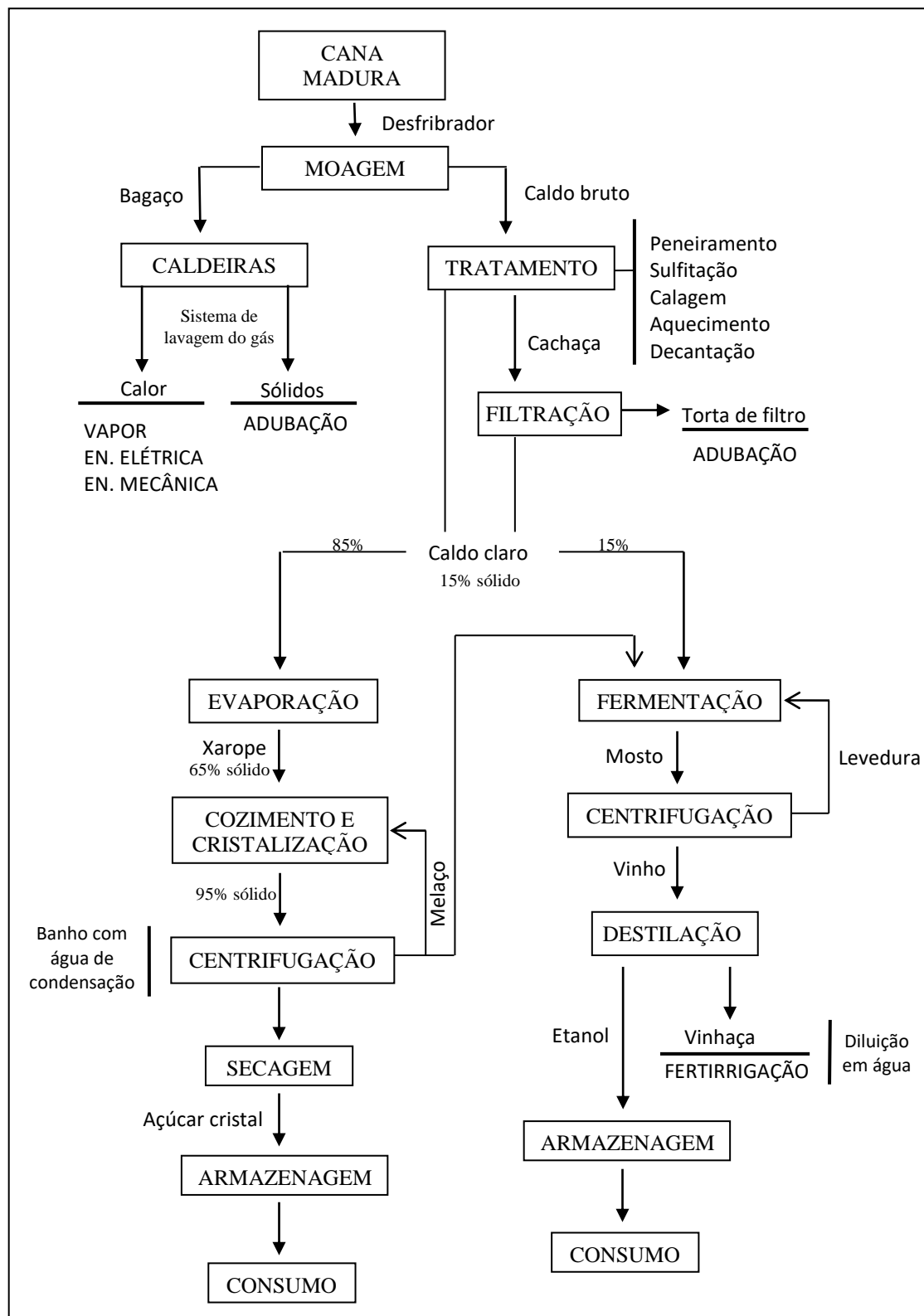
Nessa perspectiva, analisa-se a ecoeficiência do processo produtivo de açúcar e do álcool na indústria sucroalcooleira do Piauí, considerando a safra do ano de 2015. Para tanto, expõe-se as análises da investigação em três itens. O primeiro, descreve o ciclo de vida do açúcar e do etanol. O segundo, aborda o inventário do ciclo de vida, distinguindo-se em três subitens, sendo que o primeiro versa sobre a energia fóssil empregada na produção de etanol e açúcar, nas fases agrícola, industrial e de distribuição; o segundo a respeito da quantificação das emissões de GEE nesses processos; e o terceiro, trata dos impactos derivados do consumo de água e de energia não-renovável, do rendimento energético líquido, da eficiência energética, do uso do solo e das emissões atmosféricas. Já o terceiro item evidencia os resultados da análise da ecoeficiência na produção de etanol e de açúcar no Piauí.

6.1 Ciclo de vida do açúcar e etanol

De forma geral, as etapas do ciclo de vida do açúcar e do etanol de cana de açúcar podem ser resumidas em: extração da matéria-prima, produção, reciclagem do bagaço da cana, distribuição e utilização. Para ambos, a extração da matéria-prima corresponde às atividades agrícolas do cultivo da cana de açúcar; a produção, equivale à fase de transformação industrial nas usinas, desde a entrada da cana na usina até a produção do açúcar e etanol, incluindo a geração de energia elétrica e o vapor; a reciclagem, realizada por meio da fertirrigação da vinhaça; a distribuição, pelo transporte do produto até os postos de distribuição para a venda; e a utilização, pelo descarte das embalagens de açúcar e pela

combustão do etanol usado como combustível em veículos automotores. Para tanto, expõe-se na Figura 7 o fluxograma de produção de etanol e açúcar pela COMVAP em 2015.

Figura 7 - Fluxograma de produção de açúcar e etanol na COMVAP em 2015



Fonte: A autora (2017).

Diante do exposto na Figura 7, depreendeu-se que a separação da matéria-prima entre fabricação de etanol e de açúcar apenas ocorre quando é atingido o estágio no qual o caldo claro é obtido. Até então, todas as entradas, como os reagentes químicos empregados no tratamento, e saídas do sistema, como o bagaço e a torta de filtro, estavam relacionadas a ambos os produtos. Ao retirar esse caldo 15% sólido, a maior parte era direcionada à produção de açúcar, que tinha o melaço como subproduto, e a menor parte era dirigida para a produção de etanol, que por sua vez gerava a vinhaça. Por esse motivo, a fase agrícola do ciclo de vida do etanol e de açúcar foi analisada como única, diferenciando-se durante o processamento industrial.

As fases agrícola e industrial do ciclo de vida do etanol e do açúcar estão descritas de maneira mais aprofundada nos subitens que seguem.

6.1.1 Fase agrícola

Consoante Santiago e Rosseto (2007), a fase agrícola do processo canavieiro inicia-se pelas operações de limpeza do terreno, estudos da qualidade do solo, nivelamento, aração e gradagem do solo, admitindo que a área já tenha sido desmatada e que está sendo empregada para a agricultura. Destarte, a preparação de solo se dá por meio de uma série de operações que têm por finalidade fornecer as melhores condições biológicas e físico-químicas ao solo para a germinação das sementes ou o brotamento dos tubérculos.

Para Ometto (2005), o preparo periódico do solo ocorre para o plantio da cana-planta. Após o primeiro corte, acontece o preparo para a cana-soca²⁷, o qual se repete, geralmente, por cinco cortes e finalmente, o ciclo se completa com a renovação do canavial, a qual se dá pelo replantio. Da mesma maneira, Macedo, Seabra e Silva (2008) chegaram a uma média padrão de um ciclo de plantio de seis anos, durante o qual se realiza uma reforma, quatro culturas e cinco cortes.

De acordo com a COMVAP (2016), a safra de 2015 na Usina COMVAP processou 967.427,41 toneladas de cana de açúcar do tipo cana-soca, não havendo, por conseguinte, colheita de cana plantada nessa safra. Desse montante, 82% foi de cana própria e 18% de cana fornecida por terceiros, o que, considerando a produtividade média de 80,6 Mg/ha, totaliza uma área colhida de 12.000 ha, em conformidade com a documentação analisada. Dessa

²⁷ A cana que sofre o primeiro corte é chamada cana-planta. Após o primeiro corte, a cana é chamada de cana-soca, que geralmente sofre cinco cortes e finalmente, o ciclo se completa com a renovação do canavial, quando ocorre o replantio (OMETTO, 2005).

maneira, após a colheita da safra anterior, seguiu a etapa de manejo da cultura, que compreendeu a aplicação de agrotóxicos e, quando necessário, a adubação. Depois das aplicações de herbicidas e inseticidas, a próxima etapa do ciclo de vida do álcool e do açúcar, ainda nas operações agrícolas, consistiu na fase da colheita, na qual se utilizou a prática da queima da palha da cana de açúcar, prévia ao corte. Acrescenta que para a irrigação, contou com 25 motores elétricos e com 12 pivôs centrais. Com vistas a ilustrar essa situação, apresenta-se a Figura 8.

Figura 8 - Irrigação nos campos da COMVAP em 2015



Fonte: A autora (2017).

Através da Figura 8, explicitou-se o uso de pivô de irrigação para a distribuição de água, em parcela do canavial da COMVAP em 2015.

Em conformidade com Rossetto (2008), o processo da queima da palha da cana de açúcar se distingue em três fases:

- ignição: se configura no início do processo, com a presença de oxigênio e baixa temperatura. Por isso, consubstancia-se como breve e apresenta baixa concentração de poluentes;

- combustão incompleta: atinge altas temperaturas e forma gases tóxicos, como CO, CO₂, óxido de nitrogênio (NO_x) e óxido de enxofre (SO_x), entre outros;
- resfriamento: se caracteriza pela diminuição da temperatura e pela liberação de materiais particulados, hidrocarbonetos policíclicos aromáticos (HPAs) e outras substâncias orgânicas provenientes dessa combustão incompleta.

Depois desses procedimentos, a cana de açúcar destinou-se para o processamento industrial, que se conforma na produção de açúcar e de etanol.

6.1.2 Fase industrial

A etapa da fabricação do álcool e do açúcar começou com a entrada da cana de açúcar na Usina, descarregada por caminhões, em esteiras que a conduzem às fases do processo industrial. Apresenta-se na Figura 9, uma parte das instalações industriais da COMVAP.

Figura 9 - Instalações industriais da COMVAP em 2015



Fonte: A autora (2017).

Salienta-se que do lado direito da Figura 9, ocorre o começo do processamento industrial da cana, configurado pela separação e pela pesagem, seguida da limpeza e do fatiamento dos colmos em pedaços menores. E que do lado esquerdo, encontra-se o acúmulo

de bagaço que pode ser utilizado para acionamento da Usina.

Adenda-se que para o processamento, inicialmente a cana deve ser lavada com água, para a retirada do material unido ao colmo durante o corte e o transporte do campo à Usina, o que provoca o aparecimento do primeiro efluente, a água da lavagem de cana.

Segundo a COMVAP (2016), nessa etapa do processamento industrial são consumidos, em média, 3 a 7 m³ de água por tonelada de cana. Após a lavagem, a matéria-prima do processo industrial é cortada e desfibrada para aumentar a eficiência de extração do caldo nas moendas, as quais são movimentadas por turbinas a vapor, movidas pela queima do bagaço nas caldeiras. Em seguida, acontece a fase grande do esmagamento ou da moagem, que separou a cana em caldo, que é processado, e o bagaço, que é um subproduto residual que serve de matéria-prima para produção de vapor (21kg/cm²), que gera energia para acionar as turbinas. O vapor que escapa (cerca de 1,5kg/cm²) serve como fonte de calor para o processo. Ressalta que o acionamento mecânico da Usina ocorre por meio da turbina a vapor, e o calor é usado para evaporação e cozimento do caldo; e que a energia elétrica consumida no período da moagem é produzida pelo bagaço, enquanto o excedente é reservado para o início da safra seguinte e outras eventualidades. Com vistas a ilustrar esse procedimento, expõe-se o acúmulo de bagaço pela Usina para posterior aproveitamento, na Figura 10.

Figura 10 - Acúmulo de bagaço para aproveitamento pela COMVAP em 2015



Fonte: A autora (2017).

O registro fotográfico demonstrado na Figura 10 mostra um montante de resíduo sólido do tipo bagaço, resultante do processamento industrial da cana de açúcar na safra de 2015.

Dando seguimento, o caldo produzido durante a moagem composto, de acordo com Alcarde (2007), por uma solução contendo sacarose, açúcares redutores²⁸ e não-açúcares²⁹, passou por um tratamento, por aquecimento e decantação, subdividindo-se no processo de produção, em açúcar e em álcool.

Acentua que o lodo resultante da decantação foi submetido à filtração a vácuo e que o líquido da filtração retornou ao processo e que o resíduo sólido, conhecido por torta de filtro, foi destinado à fertilização nos campos de cultivo de cana de açúcar. Salienta que a chaminé das caldeiras possuía sistema de lavagem de gases, que foram liberados na atmosfera praticamente isentos de partículas sólidas. E que colocou-se *sprays* na passagem desses gases, para impedir que os sólidos subissem. Assim, o gás passou e os sólidos ficaram. Essa filtragem é rica em nutrientes, principalmente potássio. Portanto, o caldo obtido no processo de extração foi encaminhado diretamente para a fabricação do etanol e do açúcar (COMVAP, 2016).

6.1.2.1 Fase industrial: etanol

O caldo, enriquecido com alguns nutrientes, foi inoculado com leveduras do gênero *Saccharomyces* que, em consonância com Alcarde (2007), são responsáveis por reverter a sacarose ($C_6H_{12}O_6$) e transformá-la em etanol (C_2H_5OH) e dióxido de carbono (CO_2).

Na COMVAP, tanto o caldo quanto o melaço residual da produção de açúcar foram sujeitos à fermentação, cujo produto foi um substrato açucarado, denominado mosto, que foi centrifugado para a obtenção e a reutilização das leveduras, enquanto o líquido, o vinho, foi enviado às colunas de destilação. E a levedura resgatada recebeu um tratamento no laboratório para sua recuperação a fim de eliminar infecção (presença de bactérias em níveis indesejados), pois essa levedura seria reaproveitada. Registra que a destilação do vinho gerou o etanol (anidro ou hidratado) e a vinhaça, sendo que cada tonelada de caldo de cana ou melaço gerou de 16 a 17 litros de vinhaça, a qual é altamente poluente e não pode atingir os cursos de água, pois apresenta Demanda Biológica de Oxigênio (DBO) elevada, e é rica em

²⁸ Os açúcares redutores são compostos por frutose e glicose (ALCARDE, 2007).

²⁹ Os não açúcares são compostos por substâncias orgânicas e não orgânicas. As orgânicas são os aminoácidos, proteínas, gordura e cera; os não orgânicos são compostos por sais minerais (ALCARDE, 2007).

nutrientes, principalmente potássio.

Adenda por um lado, que ela foi aproveitada e utilizada na fertirrigação, diluída em água proveniente do rio Parnaíba, e residual dos processos de lavagem na Usina numa proporção de 10:1. E, por outro lado, que a lâmina que se formou sobre a superfície do solo foi fina demais para contaminar o lençol freático. Sendo assim, a vinhaça não ficou armazenada, pois à medida que era produzida, era bombeada para os canteiros, seguindo um curso sobre o solo até as bombas de irrigação. Porém, como o solo é compactado demais, a mesma não foi absorvida. Outrossim, realça que a água da lavagem do vapor também foi reaproveitada, haja vista que uma estação de tratamento separou os sólidos, decantou e limpou, enquanto todos os sólidos recuperados retornaram para a lavoura, como regeneradores de solo. E que, o vapor foi gerado a partir da queima do bagaço nas caldeiras e a energia elétrica, devido à utilização de geradores a vapor (COMVAP, 2016).

Dessa maneira, compreende-se que a reutilização de subprodutos no ciclo de vida do etanol caracterizou-se pela fertirrigação da vinhaça por aspersão e torta de filtro nos campos de cultivo. Segundo Rosseto e Santiago (2007), a vinhaça é o maior poluidor dentre os efluentes, variando o desprendimento, dependendo da concentração alcoólica obtida na fermentação, de 10 a 18 litros por litro de álcool produzido, com altas temperaturas na saída dos destiladores, as quais variam de 85°C a 90°C. Contudo, entendem que a riqueza organo-mineral é alta, tendo grande importância na aplicação em solos agrícolas, como nas lavouras de cana de açúcar, em substituição parcial ou total à adubação organo-mineral.

Portanto, a COMVAP (2016) patenteia que em seguida armazenou o etanol em tanques de concreto para posterior distribuição. Destarte, o uso do etanol hidratado ocorre pela combustão em veículos automotores e o ciclo é concluído com a absorção, pela cana de açúcar, durante o crescimento, do CO₂ emitido na combustão e demais fases do ciclo de vida do álcool.

6.1.2.2 Fase industrial: açúcar

Em conformidade com a COMVAP (2016), o caldo destinado para a produção de açúcar, quando saiu da moenda, passou por outras quatro fases: tratamento, evaporação, cozimento e centrifugação, cujo objetivo era obter sacarose pura. Destaca que o açúcar cristal produzido em 2015, teve uma média de 99,6% de sacarose. Na fase de tratamento, ocorreu o peneiramento, a adição de cal (para precipitar sacarato de cálcio), enxofre, ácido fosfórico, entre outros, e a decantação, ou clarificação, utilizados para facilitar a separação de produtos

indesejados, originando um caldo límpido e transparente. Após esse procedimento mediu-se a transmitância para verificar a transparência do caldo. Como também, denota que o resíduo decantado (cachaça) foi filtrado, quando se obteve caldo filtrado (não tão puro quanto o clarificado) e filtrado sólido, chamado de torta de filtro, que retornou para a clarificação e se consubstanciou em fonte de matéria orgânica, sendo utilizado como fertilizante. Nessa etapa teve-se um caldo 15% sólido.

Acrescenta que a evaporação, que é conformada por calor e vapor, objetivou retirar a água. Nessa etapa o caldo se apresentou 65% sólido. E que durante a cristalização e o cozimento obteve-se a massa cozida, que foi 94% sólida, composta de cristais de sacarose envoltos em mel (açúcares que não cristalizaram, como glucose e sacarose). Nesse estágio, apresentava cerca de 82% de sacarose. Evidencia que a centrifugação separou a sacarose da glucose, realizada através da lavagem com água por 10 a 12 segundos e da filtragem do mel. Mas, quando a centrífuga parava, o açúcar ficava no cesto e caía na esteira ainda úmido, para entrar no sistema de secagem para embalagem. Depois desse processo, o mel era aproveitado para fazer uma nova massa e um novo cozimento, tornando-se matéria-prima para a produção de álcool. Acentua que cada tonelada de mel gerou 320 a 330 litros de álcool e cada tonelada de cana processada gerou 70 a 75 kg de melaço (COMVAP, 2016).

6.2 Análise de inventário do ciclo de vida

Com vista à análise do ciclo de vida, estudaram-se a demanda energética, as emissões associadas à cadeia produtiva de etanol e de açúcar no Piauí, o consumo de água e o uso do solo, correspondente à etapa de inventário da metodologia de ACV.

6.2.1 Energia fóssil empregada na produção de etanol e açúcar

Acentua-se que todas as etapas de produção de etanol e de açúcar, como as operações agrícolas, processamento industrial e distribuição ao consumidor, precisam de energia que, em geral, provém de fontes fósseis de carbono.

Outrossim, compreende-se que nessa investigação aplicou-se a média padrão de Macedo, Seabra e Silva (2008) para o manejo da cultura da cana de açúcar, de um ciclo de

plantio de seis anos, com uma reforma³⁰, quatro culturas e cinco cortes.

Alicerçado nesse entendimento, calcularam-se os aspectos referentes ao cultivo da cana de açúcar considerando os dados relativos à implantação da lavoura, por ser uma atividade única para os cinco anos subsequentes de produção, rateados em partes iguais para os seis anos de cultivo. Desse modo, cada ciclo produtivo incorporou um quinto do dispêndio energético correspondente à fase de instalação da lavoura; e mensurou-se o gasto energético com a colheita e manutenção das soqueiras³¹ levando em conta a produção de 2015.

Com o objetivo de calcular a quantidade de energia fóssil empregada na produção de etanol e de açúcar, usaram-se as informações coletadas na COMVAP, como mostradas na Tabela 11.

Tabela 11 - Resumo da safra de cana de açúcar em 2015 na COMVAP

Item	Produção	Percentual
Área colhida (ha)	12.000,00	
Cana total (t)	967.427,41	100,0%
Rendimento médio (Mg/ha)	80,60	
Cana para etanol (t)	152.282,14	15,7%
Etanol total (m ³)	32.679,50	
Cana para açúcar (t)	815.145,27	84,3%
Açúcar (kg)	66.914.600,00	

Fonte: COMVAP (2015).

Assentado na Tabela 11 e considerando que a quantidade total de cana de açúcar colhida em 2015 correspondeu a 100%, verificou-se que 84,3% da cana foi usada para produzir açúcar e 15,7% foi destinada à produção de etanol, aproximando-se da média mundial explicitada por OECD (2015), de 80% e 20%, respectivamente, o que corrobora a posição do Brasil como principal exportador de açúcar do mundo.

6.2.1.1 Energia fóssil empregada na produção de etanol e açúcar: fase agrícola

Para as atividades agrícolas, Macedo, Leal e Silva (2004) realizaram um levantamento de dados numa usina típica, que caracteriza-se pela colheita realizada predominantemente por maquinário agrícola, na qual detectaram uma densidade média de utilização (Tabela 12) para todos os equipamentos usados na produção de cana de açúcar.

³⁰ Trata-se da renovação do canavial, com a retirada da cana, destruição da soqueira, calagem, preparo do solo e novo plantio de cana (MACEDO et al., 2008).

³¹ Conhece-se como soqueira da cana de açúcar, as raízes que sobraram dentro e fora da terra, após seu corte, aproximadamente a cinco centímetros do solo (DIAZ, 2011).

Tabela 12 - Utilização de equipamentos agrícolas em usina que faz uso de colheita mecanizada

Equipamento	Densidade média de utilização (kg/ha.ano)
Tratores	41,8
Implementos	12,4
Caminhões	82,4
Total	136,6

Fonte: Macedo, Leal e Silva (2004).

Diante do exposto na Tabela 12, ressalta-se que os valores encontrados são referentes à uma usina onde a colheita ocorre de forma mecanizada, ou seja, na qual há preponderância de utilização de maquinário comparativamente à COMVAP, onde a colheita ocorre 100% de forma manual. Uma vez que não foi possível obter a densidade média de utilização de equipamentos agrícolas pela COMVAP, usou-se nessa investigação os valores determinados por Macedo, Leal e Silva (2004), mesmo considerando-os superestimados para a realidade do Piauí. Porém, reconheceu-se que essa situação não prejudicou a consistência científica da pesquisa.

IEL/SEBRAE (2005) reconhece que a colheita mecanizada provoca o incremento no emprego de equipamentos agrícolas e, por conseguinte, maior consumo de combustíveis fósseis, o que resulta em emissão de GEE durante o cultivo.

Contudo, para Goldenberg, Coelho e Guardabassi (2008), o consumo de combustíveis fósseis limitado a caminhões de transporte, máquinas para colheita e o uso de fertilizantes, torna as emissões de GEE no decorrer do cultivo e do processamento da cana menores do que seriam se fosse aplicada na queima.

Com a finalidade de analisar o consumo de energia na COMVAP, utilizou-se o fator energético de 8,52 MJ/kg determinado por Alves, Boddey e Urquiaga (2009) para a energia empregada na fabricação e manutenção das máquinas, como tratores e implementos agrícolas que operam na produção da cana de açúcar. Logo, embasado nesse procedimento, calculou-se a energia consumida com o manuseio de maquinário agrícola na COMVAP, considerando o cultivo de 12.000 ha em 2015, conforme apresentado na Tabela 13.

Tabela 13 - Energia consumida com a utilização de equipamentos agrícolas por hectare na COMVAP em 2015

Item	Cálculo	Resultado
a. Densidade média de utilização (kg/ha.ano)		136,60
b. Quantidade de hectares cultivados (ha)		12.000,00
c. Utilização de equipamentos na COMVAP (kg)	$a \times b$	1.639.200,00
d. Energia total consumida (MJ)	$c \times 8,52$	13.965.984,00
e. Energia consumida por hectare (MJ/ha.ano)	$d \div b$	1.163,83

Fonte: A autora (2017).

De acordo com a Tabela 13, constatou-se que o gasto energético referente ao maquinário agrícola pela COMVAP foi de 1.163,83 MJ/ha, o qual corresponde à energia usada na fabricação e manutenção das máquinas. Todavia, em virtude do reconhecimento que a Usina realiza colheita manual, utilizando menor quantidade de equipamentos agrícolas do que a média aplicada, esse montante foi superestimado.

Continuando a análise, calculou-se o custo energético da aplicação de calcário para a safra de 2015, como demonstrado na Tabela 14.

Tabela 14 - Energia consumida pela aplicação de calcário na COMVAP em 2015

Item	Cálculo	Resultado
a. Quantidade de hectares cultivados (ha)		12.000,0
b. Aporte total de calcário (t)	$2 \times a$	24.000,0
c. Aporte anual de calcário (t/ano)	$b \div 6$	4.000,0
d. Aporte anual de calcário por hectare (t/ha.ano)	$c \div a$	0,3
e. Energia consumida por hectare (MJ/ha.ano) ¹	$e \times 1,31$	436,2

Fonte: A autora (2017).

Nota: ¹ O valor para o aporte anual médio de calcário foi convertido em kg para o cálculo da energia consumida (e).

Em consonância com a Tabela 14, identificou-se que o custo energético da aplicação de calcário na cultura de cana de açúcar durante a safra de 2015 na COMVAP foi de 436,2 MJ/ha.ano, o que significou cerca de 3% da energia total consumida no dito ano, conforme a Tabela 26, que consolida o total de energia fóssil consumida pela Usina.

Destaca-se que o cálculo fundamentou-se no estudo de Alves, Boddey e Urquiaga (2009), por estimarem que a cada novo plantio (de seis em seis anos) são adicionadas 2 t de calcário/ha, com um custo energético de 1,31 MJ/kg, haja vista que a aplicação de calcário é importante para o plantio da cana, devido aumentar a exploração da água e dos nutrientes do solo, e auxiliar a planta na tolerância à seca.

Adicionalmente, determinou-se o custo energético da utilização de fósforo (P) e de potássio (K) pela Usina em 2015, como mostrado na Tabela 15.

Tabela 15 - Energia consumida pela aplicação de fósforo e potássio na COMVAP em 2015

Item	Cálculo	Resultado
a. Quantidade de hectares cultivados (ha)		12.000,00
b. Aporte anual de fósforo (kg/ano)	$16 \times a$	192.000,00
c. Energia total consumida pela aplicação de P ₂ O ₅ (MJ/ano)	$3,19 \times b$	612.480,00
d. Energia consumida pela aplicação de P ₂ O ₅ (MJ/ha.ano)	$c \div a$	51,04
e. Aporte anual de potássio (kg/ano)	$83 \times a$	996.000,0
f. Energia total consumida pela aplicação de K ₂ O (MJ/ano)	$5,86 \times e$	5.866.440,00
g. Energia consumida por hectare (MJ/ha.ano)	$f \div a$	488,87

Fonte: A autora (2017).

Da Tabela 15, depreendeu-se que a aplicação de fósforo consumiu 51,04 MJ/ha.ano e a de potássio, 488,87 MJ/ha.ano, o que equivaleu a 0,4% e 3,6%, respectivamente, da energia total consumida pela COMVAP no ano analisado (Tabela 26).

A apuração dos valores baseou-se em Alves, Boddey e Urquiaga (2009), para quem a aplicação recomendada de P e K é de 16 kg/ha.ano de pentóxido de fósforo (P₂O₅) e 83 kg/ha.ano de óxido de potássio (K₂O), compostos comumente usados como fertilizantes, os quais apresentam os valores de 3,19 e 5,89 MJ/kg como fatores energéticos, respectivamente.

Em seguida, calculou-se o gasto energético relativo ao uso de fertilizantes nitrogenados pela COMVAP em 2015, como exibido na Tabela 16.

Tabela 16 - Energia consumida pela aplicação de nitrogênio na COMVAP em 2015

Item	Cálculo	Resultado
a. Quantidade de hectares cultivados (ha)		12.000
b. Aporte total de nitrogênio (kg/ano)	$57 \times a$	684.000
c. Energia total consumida (MJ/kg)	$b \times 54$	36.936.000
d. Energia consumida por hectare (MJ/ha.ano)	$c \div a$	3.078

Fonte: A autora (2017).

Salienta-se que a Tabela 16 revelou um consumo de 3.078 MJ/ha.ano de energia, derivado da aplicação de compostos nitrogenados como fertilizantes, correspondendo a 23% do consumo de energia pela Usina (Tabela 26).

Sublinha-se que o consumo de energia fóssil na fertilização nitrogenada é representativo, visto que os N-fertilizantes são produzidos por processo alimentado por gás natural. No Brasil, a aplicação de compostos nitrogenados por hectare é geralmente de 20 quilos no plantio e 80 a 100 quilos nas socas, resultando numa média ponderada anual ao redor de 57 quilos de nitrogênio (N) por hectare. Realça-se que a determinação do consumo energético, decorrente do uso desses compostos, considerou o fator energético de 54 MJ/kg para nitrogênio na produção de N-fertilizantes, indicado por Alves, Boddey e Urquiaga

(2009). Adenda-se que outras fontes importantes de energia fóssil são os herbicidas e os inseticidas.

Prosseguindo com a pesquisa, calculou-se o consumo energético relativo ao uso de herbicidas e inseticidas durante a safra de 2015 pela COMVAP, como apresentado na Tabela 17.

Tabela 17 - Energia consumida pela aplicação de herbicida e inseticida na COMVAP em 2015

Item	Cálculo	Resultado
a. Quantidade de hectares cultivados (ha)		12.000,00
b. Aporte anual de herbicida (kg/ano)	$2,2 \times a$	26.400,00
c. Energia total consumida pela aplicação de herbicida (MJ/ano)	$452 \times b$	11.932.800,00
d. Energia consumida pela aplicação de herbicida (MJ/ha.ano)	$c \div a$	994,40
e. Aporte anual de inseticida (kg/ano)	$0,12 \times a$	1.440,00
f. Energia total consumida pela aplicação de inseticida (MJ/ano)	$363,83 \times e$	523.915,20
g. Energia consumida por hectare (MJ/ha.ano)	$f \div a$	43,66

Fonte: A autora (2017).

Em conformidade com a Tabela 17, detectou-se que, em 2015, o uso de herbicidas e inseticidas pela COMVAP resultou num consumo de energia de 994,4 MJ/ha.ano e de 43,66 MJ/ha.ano, respectivamente, o que se equipara a 7,4% e 0,3% da energia total consumida (Tabela 26).

Alves, Boddey e Urquiaga (2009) explicam que devido à complicada síntese dos herbicidas, os mesmos necessitam de grandes quantidades de energia fóssil na fabricação industrial, sendo estimadas em 452 MJ por kg de ingrediente ativo.

Nesse sentido, ressalta-se que o BNDES (2008) estima como valores recomendados para a aplicação, em um hectare, 2,20 kg de herbicidas e 0,12 kg de inseticidas.

Inclusive, segundo Pimentel (1980), o custo energético dos inseticidas utilizados na fase agrícola de produção de cana de açúcar é 363,83 MJ/kg.

Reconheceu-se que o consumo energético oriundo da aplicação de calcário, inseticidas, herbicidas e fertilizantes, que totalizou 38% de toda a energia investida para o cultivo de um hectare de cana de açúcar, como mostra a Figura 12, apresentou-se inferior ao obtido por Salla e Cabello (2010), no qual a entrada de energia redundou em 50,4% do total, em investigação realizada em um agroecossistema na região do Vale do Médio Paranapanema, em São Paulo, e em duas usinas no mesmo estado. Ainda que esta região apresente características edafoclimáticas mais vantajosas para a cultura de cana de açúcar, o resultado indica que uma menor quantidade de energia fóssil foi inserida no sistema produtivo

agrícola da COMVAP em 2015 do que em São Paulo, atestando a viabilidade da área para cultivo eficiente dessa gramínea.

Acrescenta-se que para precisar o consumo energético resultante da queima de óleo diesel, primeiramente, calculou-se o poder calorífico do combustível. Para tanto, usaram-se as informações do Balanço Energético Nacional de 2015, consoante BEN (2015), demonstradas na Tabela 18.

Tabela 18 - Energia contida no óleo diesel constante no Balanço Energético Nacional de 2015

Item	Cálculo	Valor
Densidade do óleo diesel (kg/m ³)		840
Energia contida no óleo diesel (kcal/kg)		10.100
Energia contida no óleo diesel (MJ/kg) ¹		42,287
Poder calorífico do óleo diesel (MJ/L) ²	$(c \times a) \div 1000$	35,52

Fonte: A autora (2017).

Notas: ¹ Transformou-se a energia contida em MJ sabendo que 238,84 kcal equivalem a 1 MJ.

² Fez-se a conversão de m³ em litros, considerando que 1m³ = 1000L.

De acordo com a Tabela 18, verificou-se que o poder calorífico do óleo diesel estimado é de 35,52 MJ/L.

Reafirma-se a utilização de Alves, Boddey e Urquiaga (2009) para o cálculo do consumo de energia, na forma de óleo diesel combustível, em operações agrícolas para renovação e manutenção do canavial, como explicitado na Tabela 19.

Tabela 19 - Consumo de energia, na forma de óleo diesel combustível, em operações agrícolas para renovação e manutenção do canavial ao longo de um ciclo de produção de cana de açúcar no Brasil

1. Ciclo de cana-planta					
Operação agrícola	Equipamento	litros/h	ha/h	litros/ha	MJ/ha ¹
Aplicação de calcário	MF 290	6,00	1,78	3,37	119,70
Incorporação dos restos culturais	Valmet 1280	12,80	1,85	6,92	245,80
Aração pesada I	CAT D6	27,60	1,98	13,94	495,15
Subsolagem	CAT D6	26,00	1,16	22,41	796,00
Aração pesada II	CAT D6	27,60	2,04	13,53	440,00
Aração pesada III	CAT D6	27,60	2,04	13,53	440,00
Gradagem	CAT D6	13,00	2,52	5,16	183,30
Sulcamento	MF 660	11,50	1,26	9,13	325,00
Distribuição de toletes	MF 275	3,30	0,79	4,18	148,50
Fechamento sulcos e aplicação de inseticidas	MF 275	4,80	2,52	1,90	67,50
Aplicação de herbicidas	Ford 4610	4,00	3,30	1,21	43,00
Capina entre linhas	Valmet 880	5,50	1,44	3,82	135,70
Total				99,1	3.520,00
2. Ciclo de cana-soca					
Operação Agrícola	Equipamento	litros/h	ha/h	litros/ha	MJ/ha ¹
Remoção de resíduos	MF 275	4,00	1,37	2,92	103,70
Capina entre linhas	Valmet 1580	9,20	2,05	4,49	159,50
Aplicação de herbicidas	Ford 4610	4,00	3,30	1,21	43,00
Total				8,62	306,20
Média anual de todas as operações agrícolas²				22,26	790,80

Fonte: A autora (2017).

Notas: ¹ Valor calorífico de 1,0 litro de óleo diesel = 35,52 MJ.

² Baseado em um sistema de produção composto por um ciclo de cana-planta e quatro socas em um período total de 6 anos, em que a média anual de consumo de combustível é igual a: $C_{cp} + (4 \times C_{cs})/6$, onde C_{cp} e C_{cs} equivalem ao consumo de combustível para cana-planta e cana-soca, respectivamente.

Diante do exposto na Tabela 19, observou-se que em virtude da quantidade de combustível utilizado pelas máquinas ser maior durante o plantio da cultura, o consumo de óleo diesel totaliza praticamente 100 litros por hectare. E por ser menor nas operações de manutenção das socas, o consumo é de apenas 9 litros por hectare por ano. Contudo, na média, anualmente, as máquinas consomem 22,3 litros de óleo diesel por hectare, com consumo de 790,80 MJ/ha de energia, o que equivale a 6,0% do total consumido pela COMVAP em 2015.

Segundo Macedo, Leal e Silva (2004), o transporte da cana do campo para a usina é uma atividade com grande consumo de óleo diesel e o custo da energia fóssil para esse transporte depende da distância média percorrida no trajeto dos caminhões até a usina, da capacidade de transporte e do consumo de combustível por km. A colheita, realizada 100% manual, é conduzida por meio de carregadora de cana e de reboque tipo Julieta (Figura 11).

Figura 11 - Carregadora de cana e reboque tipo Julieta em abril de 2016 na COMVAP



Fonte: A autora (2017).

Assentado na Figura 11, observou-se que os reboques Julieta ficavam em um determinado ponto fixo quando vazios, carregando ou descarregando, e eram engatados a caminhões rebocadores para se locomover até o campo durante a colheita e para a usina, efetuar as entregas.

Enfatiza-se que em função da produtividade agrícola da COMVAP em 2015 ter sido de 80,60 megagramas (Mg) de cana por hectare cultivado, foi possível determinar o consumo energético decorrente da queima de óleo diesel para o transporte da cana, como demonstrado na Tabela 20.

Tabela 20 - Consumo energético do transporte de cana de açúcar do campo até a Usina em 2015 pela queima de óleo diesel

Item	Cálculo	Valor
a. Produtividade agrícola da COMVAP (Mg/ha)		80,60
b. Capacidade média do caminhão transportador (t)		28,00
c. Número de cargas necessárias por hectare	$a \div b$	2,88
d. Distância percorrida em uma viagem de ida e volta (km/ha)	2×17	34,00
e. Distância total percorrida (km/ha)	$c \times d$	97,92
f. Rendimento médio de óleo diesel (km/L)	$(1,6 + 3) \div 2$	2,30
g. Consumo de óleo diesel por hectare (L/ha)	$e \div f$	42,60
h. Média anual de consumo de óleo diesel (L/ha.ano) ¹	$(g \times 5) \div 6$	35,50
i. Poder calorífico do óleo diesel (MJ/L)		35,52
j. Consumo energético da queima de diesel (MJ/ha.ano)	$h \times i$	1.260,90

Fonte: A autora (2017).

Nota: ¹ Calculou-se a média anual de consumo, uma vez que em seis anos foram realizadas cinco colheitas.

Conforme a Tabela 20, detectou-se que o consumo médio de energia fóssil para o transporte de cana foi de 1.260,9 MJ/ha.ano na safra de 2015 da COMVAP, o que correspondeu a 9,5% do consumo total (Tabela 26).

Nessa perspectiva, destaca-se que o MAPA (2013b) estima que a distância média percorrida pela cana do ponto de corte até a usina no Piauí é de aproximadamente 17 km.

Acentua-se que para o cálculo da energia no transporte da cana até a usina considerou-se a referida distância, cujo trajeto geralmente é realizado em caminhões com capacidade média de 28 toneladas de cana, e que os rendimentos médios são de 1,6 km/litro de óleo diesel carregado e 3 km/litro quando vazio³².

Outrossim, ressalta-se o consumo de diesel no transporte de insumos para a usina e lavoura. E com vistas a explicitar o custo energético desse transporte, apresenta-se a Tabela 21.

Tabela 21 - Consumo energético do transporte de insumos para a usina e lavoura pela queima de óleo diesel na COMVAP em 2015

Item	Cálculo	Valor
a. Área cultivada da COMVAP (ha)		12.000,00
b. Quantidade de combustível consumido por hectare (L/ha)		5,80
c. Quantidade de combustível consumido na COMVAP (L/ano)	$a \times b$	69.600,00
d. Poder calorífico do óleo diesel (MJ/L)		35,52
e. Consumo energético total da queima de diesel (MJ/ano)	$c \times d$	2.472.192,00
f. Consumo energético anual da queima de diesel (MJ/ha.ano)	$e \div a$	206,00

Fonte: A autora (2017).

Com base na Tabela 21, identificou-se que o gasto de energia decorrente do transporte de insumos para a usina e para a lavoura, foi de 206 MJ/ha.ano, indicando um gasto equivalente a 1,5% do total (Tabela 26).

Nesse sentido, Boddey et al. (2008) calcularam que o combustível necessário para transportar anualmente tais produtos é de 5,8 L/ha.

Salienta-se que o gasto energético oriundo da queima de óleo diesel nas etapas de cultivo e transporte resultou em 17% do montante total gasto pela COMVAP na safra de 2015, sendo que a maior parte dele (9,6%) derivou do transporte da cana. Tal constatação pactua com o estudo de Salla e Cabello (2010), no qual o transporte da cana foi responsável por 12% do consumo total de energia para produção de um hectare de cana de açúcar. Registram ainda, que o dispêndio energético durante as atividades de preparo de área dessa

³² Consoante Alves, Boddey e Urquiaga (2009), um caminhão com reboque (tipo Julieta), carrega 28 toneladas de cana e percorre 1,6 quilômetro com cada litro de óleo diesel, quando totalmente carregado. Quando vazio, o caminhão percorre 3 quilômetros por litro de diesel.

cultura foi menos elevado, devido a representar apenas um quinto do valor real, pois a atividade demanda apenas um preparo de área para cinco colheitas consecutivas.

Continuando a análise, demonstra-se na Tabela 22, o consumo energético da atividade humana na safra de 2015 na COMVAP.

Tabela 22 - Consumo energético do trabalho humano em 2015 na COMVAP

Item	Cálculo	Valor
a. Energia consumida pelo trabalho rural (MJ/dia) ¹		62,70
b. Energia consumida pelo trabalho rural (MJ/hora) ²	$a \div 8$	7,84
c. Quantidade de horas de trabalho humano por hectare (h/ha)		128,00
d. Consumo energético do trabalho humano (MJ/ha.ano)	$b \times c$	1.003,50

Fonte: A autora (2017).

Notas: ¹ A energia consumida pelo trabalho rural foi calculada em MJ, sabendo que 238,84 kcal equivalem a 1 MJ, totalizando 62,7 MJ/dia.

² Um dia equivale a 8h de trabalho.

Por meio da Tabela 22, verificou-se que a energia gasta pelo trabalho humano na Usina em 2015 foi de 1.003,5 MJ/ha.ano, representando 7,5% do consumo energético total (Tabela 26).

Com relação ao consumo de energia nos trabalhos manuais no cultivo da cana de açúcar, utilizou-se como dado básico para o cálculo, a energia consumida pelo trabalho rural (kcal/dia de trabalho) de 14.975 kcal/dia, obtida por Giampietro e Pimentel (1990).

Sendo assim, Pimentel e Patzek (2007) estimaram que em todo o processo agrícola da produção da cana são empregues 128 horas-homem por hectare em um ano.

A energia gasta pela mão de obra humana na COMVAP em 2015 foi superior ao resultado de Campos et al. (2009), que investigaram a demanda energética da produção de soja no Paraná, durante a qual o trabalho humano contribuiu com 0,41% do total. Acentua-se que o baixo dispêndio energético da mão de obra, comparado aos 7,5% referentes à COMVAP, evidenciou o grau de intensidade da mecanização na cultura. Porquanto, o resultado deste estudo para o trabalho humano foi considerado elevado, o que pôde ser explicado pela colheita manual da safra.

Adenda-se que para a realização da irrigação, a COMVAP contou com 25 motores elétricos e 12 pivôs centrais, cujas bombas e deslocamento obtiveram energia proveniente da queima do bagaço. Portanto, esse contexto expõe por que a irrigação não foi contabilizada como atividade consumidora de energia.

Como também, realça-se que a energia consumida pela aplicação das sementes foi calculada segundo a metodologia proposta por Pimentel e Patzek (2007), que outorgam 2,0%

de todas as entradas agrícolas como a energia consumida na aplicação das sementes. Ou seja, esse valor foi determinado a partir do total de 9.517,2 MJ/ha.ano, gerando uma quantidade de energia igual a 190,34 MJ/ha.ano decorrente da aplicação de sementes (Tabela 26).

Acrescenta-se, em conformidade com Pimentel e Patzek (2007), que se faz relevante considerar uma quantidade estimada de 2000 kg de sementes por ciclo.

Por conseguinte, assentado nos dados constatados, inferiu-se que o total de energia fóssil incorporado no sistema produtivo de açúcar e de etanol em 2015 no Piauí foi 9.707,54 MJ/ha.ano. Outrossim, notou-se que tal montante abrangeu a totalidade de energia consumida pela mão de obra humana e pela queima de óleo diesel, resultante do transporte de insumos destinados à lavoura e à usina. Ao mesmo tempo, identificou-se que os elementos de maior consumo energético foram a utilização de compostos nitrogenados na fertilização, o transporte da cana da lavoura até a usina e o uso de maquinário agrícola.

6.2.1.2 Energia fóssil empregada na produção de etanol e açúcar: fase industrial

Uma grande quantidade de energia é utilizada no processamento do etanol e do açúcar na usina. Nesse sentido, destaca-se que a COMVAP faz uso da queima do bagaço da cana para gerar vapor, que alimenta caldeiras de alta pressão, abastecendo a usina de energia gerando, inclusive, um excedente que pode ser exportado para a rede. Deste modo, não é necessário o uso de energia fóssil para alimentar a usina. Porém, a despeito dessa performance, existe um custo energético fundamental, como o custo da edificação da usina, associado ao material usado nas construções e nos equipamentos.

Para a análise, apresenta-se a Tabela 23 com a metodologia de cálculo do uso de energia fóssil incorporada na edificação da COMVAP.

Tabela 23 - Metodologia de cálculo do uso de energia fóssil na COMVAP

Material	Vida útil	Massa	Incluindo manutenção	Incluindo uso de energia <i>in situ</i>	kg/ano	kg/ha.ano ¹	Energia total
	anos						toneladas
Cimento na construção ²	50	1.600	4.800,0	4.992,00	99.840	8,32	54,99
Aço leve (estrutural) ³	25	2.873	5.746,0	6.090,76	243.630	20,30	609,00
Aço leve em equipamento ³	10	1.437	2.011,8	2.184,24	218.424	18,20	546,00
Aço inoxidável ⁴	25	410	820,0	869,20	34.768	2,90	208,18
Total							1.418,17

Fonte: A autora (2017).

Notas: ¹ Área colhida pela COMVAP: 12.000 ha.

² Energia em cimento: 6,61 MJ/kg (PIMENTEL; PATZEK,2007).

³ Energia em aço: 30 MJ/kg (PIMENTEL; PATZEK,2007).

⁴ Energia em aço inoxidável: 71,7 MJ/kg (PIMENTEL; PATZEK,2007).

Consoante a Tabela 23, identificou-se que a energia investida na construção e manutenção do prédio da usina juntamente com a energia consumida *in situ*, redundou em um gasto de 1.418,17 MJ/ha.ano, referentes a 10,5% do total consumido pela COMVAP em 2015 (Tabela 26).

Boddey et al. (2008) sublinham que a construção de uma usina tem 50 anos de vida útil, e que para tanto faz-se necessária uma massa total de 1.600 toneladas de cimento.

Além disso, realçaram que o cálculo do gasto energético do aço investido na usina considera que um terço da massa total do aço encontra-se disposta como equipamentos e que o restante conforma-se na estrutura da usina (PIMENTEL; PATZEK, 2007).

De acordo com Seabra et al. (2011), muitos estudos de ACV também incluem a energia incorporada nas máquinas e edifícios. Logo, entendem que a avaliação de tais fluxos podem adicionar complexidade desnecessária para a análise, uma vez que representam pequenas porções do total de emissões e de energia utilizada. Notam que especificamente no caso do Brasil, a energia fóssil incorporada tende a ser ainda menor, devido à grande participação de fontes renováveis na matriz energética.

Entretanto, segundo a ISO 14.040, para estudos de Ciclo de Vida, é preciso incluir a energia fóssil empregada na fabricação, manutenção, possível desmontagem e disposição de equipamentos e construções utilizadas na manufatura de um produto.

Conforme a metodologia descrita por Alves, Boddey e Urquiaga (2009), considerou-

se 225,3 MJ/ha.ano de energia para a retificação de etanol hidratado³³ e uma energia consumida proveniente dos insumos da usina de 487,6 MJ/ha.ano.

Ademais, enfatiza-se que a etapa industrial da produção de açúcar e etanol pela COMVAP em 2015, requereu um custo energético de 2.131,07 MJ/ha.ano, montante inferior ao demonstrado por Salla e Cabello (2010), de 139.532,21 MJ/ha.ano. Tal constatação se deve ao fato do referido estudo analisar usina que não usou o bagaço como fonte de energia, porquanto necessitou da entrada de energia fóssil para os processos produtivos.

Destarte, reconhece-se que o impacto do uso de fontes renováveis no montante final de energia necessária para processar um hectare de cana de açúcar é alto e que os processos industriais da COMVAP configuraram-se em alternativa vantajosa para o meio ambiente, por requisitar menor entrada de energia fóssil, não-renovável.

6.2.1.3 Energia fóssil empregada na produção de etanol e açúcar: distribuição

Segundo a direção da COMVAP, a mesma vende etanol para Teresina, Fortaleza/CE, São Luís/MA e Guamaré/RN, e para a distribuição faz-se mister consumo energético, o qual é exibido na Tabela 24.

Tabela 24 - Consumo energético da distribuição de etanol em 2015 na COMVAP

Item	Cálculo	Valor
a. Produção total de etanol (L)		32.679.500,0
b. Capacidade do caminhão (L)		15.000,0
c. Quantidade de cargas (unidade)	$a \div b$	2.178,6
d. Distância anual percorrida (km)	$c \times 360$	784.308,0
e. Rendimento médio do caminhão (km/L)		2,5
f. Consumo total de diesel (L)	$d \div e$	313.723,2
g. Poder calorífico do diesel (MJ/L)		35,52
h. Consumo energético anual (MJ/ano)	$f \times g$	11.143.448,0
i. Área cultivada da COMVAP (ha)		12.000,0
j. Consumo energético anual por hectare (MJ/ha.ano)	$h \div i$	928,6

Fonte: A autora (2017).

Através da Tabela 24, verificou-se que, durante a distribuição do etanol, a Usina consumiu 928,60 MJ por hectare por ano, correspondendo a 7,0% do total (Tabela 26).

A Usina possui caminhões-tanque com capacidade de 3.000, 5.000 e 15.000 L, cujo rendimento médio de combustível é 2,5 km/L, que realizam um trajeto usina-posto de abastecimento com distância média 360 km, no percurso ida e volta (COMVAP, 2016).

³³ Parte do processo produtivo do etanol, que visa concentrar o caldo proveniente da destilação de forma a obter um grau alcoólico de 97 % e retirar impurezas (EMBRAPA, 2016).

Consoante SECEX/MDIC (2013), toda a produção de açúcar do Piauí é direcionada para o mercado interno a qual fica armazenada em sacos de juta de 50kg em galpões apropriados na área da Usina, até serem recolhidos para distribuição.

Inclusive, notou-se com base nas informações da COMVAP (2016), que a Usina fornece açúcar para os estados do Piauí, do Maranhão e do Ceará. Nesse sentido, apresenta-se na Tabela 25, o consumo energético decorrente da distribuição de açúcar pela COMVAP em 2015.

Tabela 25 - Consumo energético da distribuição de açúcar em 2015 na COMVAP

Item	Cálculo	Valor
a. Produção total de açúcar (kg)		66.914.600,00
b. Capacidade do caminhão (kg)		30.000,00
c. Quantidade de cargas (unidade)	$a \div b$	2.230,50
d. Distância percorrida (km)	$c \times 360$	802.975,20
e. Rendimento médio do caminhão (km/L)		3,50
f. Consumo total de diesel (L)	$d \div e$	229.421,50
g. Poder calorífico do diesel (MJ/L)		35,52
h. Consumo energético anual (MJ/ano)	$f \times g$	8.149.051,20
i. Área cultivada da COMVAP (ha)		12.000,00
j. Consumo energético anual por hectare (MJ/ha.ano)	$h \div i$	679,10

Fonte: A autora (2017).

Alicerçado na Tabela 25, constatou-se que o gasto energético estimado derivado da queima de óleo diesel ocasionada pela distribuição do açúcar produzido na Usina foi de 679,1 MJ/ha.ano em 2015, proporcional a 5,0% do total consumido (Tabela 26).

Realça-se que o transporte do açúcar é usualmente realizado por caminhões com capacidade para 30 toneladas e rendimento de 3,5 km/L, em um percurso médio de 360km de ida e volta.

Sendo assim, o montante de energia consumida na etapa de distribuição de açúcar e etanol pela COMVAP em 2015 foi de 1.607,70 MJ/ha.ano, referente a 12% do total (Tabela 26). Esse valor poderia ser reduzido com a diminuição do percurso usina-posto de abastecimento ou usina-distribuidor.

Acrescenta-se que essa investigação detectou a quantidade total de energia fóssil envolvida no sistema produtivo, como demonstrado na Tabela 26.

Tabela 26 - Consumo de energia fóssil pela COMVAP em 2015

ITEM	Entradas		Energia	
	Quantidade Básica	Unidade Básica	Fator Energético MJ/Unid. Bas.	MJ/ha.ano
Máquinas	136,6	kg	8,52	1.163,83
Óleo diesel	22,26	L	35,52	790,80
Calcário	333,00	kg	1,31	436,20
Fósforo	16,00	kg	3,19	51,04
Potássio	83,00	kg	5,89	488,87
Nitrogênio	57,00	kg	54,00	3.078,00
Herbicidas	2,20	kg	451,66	994,40
Inseticidas	0,12	kg	363,83	43,66
Sementes ¹	2000	kg	-	190,34
Transporte de insumos	5,80	L	35,52	206,00
Transporte da cana	35,50	L	35,52	1.260,90
Cimento na construção	8,32	kg	6,61	54,99
Aço leve (estrutural)	20,30	kg	30,00	609,00
Aço leve em equipamento	18,20	kg	30,00	546,00
Aço inoxidável	2,90	kg	71,70	208,18
Retificação até 99.5% ²	-	-	-	225,30
Reagentes químicos usados na usina ²	-	-	-	487,60
Mão-de-obra	128,00	h	7,84	1.003,50
Distribuição álcool	26,14	L	35,52	928,60
Distribuição açúcar	19,11	L	35,52	679,10
Total				13.446,31

Fonte: A autora (2017).

Notas: ¹ Estimado como correspondente a 2,0% de todas as entradas agrícolas.

² Alves, Boddey e Urquiaga (2009).

Ressalta-se que a Tabela 26 resume os processos responsáveis pelo consumo de energia do cultivo da cana de açúcar pela COMVAP na safra de 2015, o qual totalizou 13.446,31 MJ/ha. Registra-se que esse montante distinguiu-se no custo energético das etapas produtivas de açúcar e de etanol, como exposto na Tabela 27.

Tabela 27 - Consumo energético das etapas produtivas de açúcar e de etanol em 2015 na COMVAP

Etapa	Entrada de energia (MJ/ha.ano)	Proporção
Fase agrícola	9.707,54	72,2%
Fase industrial	2.131,07	15,8%
Distribuição	1.607,70	12,0%
Total	13.446,31	100,0%

Fonte: A autora (2017).

Por meio da Tabela 27, observou-se a predominância do gasto de energia fóssil nas atividades executadas durante a fase agrícola. Todavia, reconhece-se que esse montante foi

superestimado, em virtude da Usina utilizar fertirrigação com vinhaça diluída em água de lavagem da cana e aplicação de torta de filtro, cuja riqueza organo-mineral é elevada, e por isso substituir parcial ou totalmente a adubação química, tornando menor a necessidade do aporte de nitrogênio, potássio e fósforo.

Ainda que esse gasto de energia fóssil tenha sido menor, o valor de 13.446,31 MJ/ha.ano foi inferior ao encontrado por Salla e Cabello (2010), de 14.370,90 MJ/ha.ano, que analisaram usina típica ³⁴da região Centro/Sul, na qual a colheita é mecanizada mas não se faz uso do bagaço para abastecer a indústria. Isso indicou que a atividade da COMVAP, considerando a demanda por energia não-renovável, se assemelhou a de usina da região preponderante do Brasil, que apresenta maior desenvolvimento tecnológico e investimentos, tanto na parte agrícola quanto industrial.

6.2.2 Quantificação das emissões de GEE na produção de etanol e açúcar

Historicamente sabe-se que o uso de combustíveis fósseis na produção de etanol e açúcar ocasiona a emissão de GEE. Inclusive, conforme o IPCC (2006), em 100 anos, uma molécula do gás metano (CH₄) na atmosfera tem potencial de efeito estufa 25 vezes maior do que a de dióxido de carbono (CO₂) enquanto uma molécula de óxido nitroso (N₂O) apresenta um potencial 298 vezes maior.

Em função dessa constatação, revela-se que nesta dissertação, tais emissões foram agregadas na base da equivalência de dióxido de carbono (CO₂eq).

Para Alves, Boddey e Urquiaga (2009), pequenas emissões de GEE (CH₄, CO₂ e N₂O) durante a fabricação dos insumos e derivados da queima de combustíveis fósseis, utilizados nas operações agrícolas e de processamento da cana para produzir etanol e açúcar, podem contribuir significativamente para o efeito estufa. E que, os resíduos do processamento industrial, como a vinhaça e a queima da palha, podem ser fontes de emissões consideráveis de CH₄. Ainda que, as emissões mais importantes de N₂O são esperadas pela aplicação no solo de fertilizantes nitrogenados, tortas e outras fontes de nitrogênio. Como também, que o metano e o óxido nitroso são produzidos em pequenas quantidades na combustão de petróleo, óleo diesel e outros combustíveis como carvão mineral.

Sendo assim, registra-se que as quantidades básicas de todos os itens de entrada expostos anteriormente e a energia consumida por esses itens foram usadas para estimar a

³⁴ Nesta investigação, usina típica é qualquer usina que faça uso de maquinário agrícola para a colheita da cana, prescindindo da queima da palhada.

emissão dos GEE, utilizando fatores de emissão para cada um dos gases considerados (CO_2 , CH_4 e N_2O). Nessa perspectiva, a Tabela 28 resume a quantidade de cada um dos GEE estudados gerada na produção de 1 *gigajoule* (GJ) de energia pela queima de petróleo, diesel ou carvão mineral.

Tabela 28 - Geração de gases na produção de 1 GJ de energia decorrente da queima de petróleo, óleo diesel e carvão mineral

Combustível	CO_2	CH_4	N_2O
Petróleo	73,3 kg	0,003 kg	0,00006 kg
Óleo diesel	74,1 kg	0,003 kg	0,00006 kg
Carvão mineral	94,6 kg	0,001 kg	0,00150 kg

Fonte: IPCC (2006).

Diante do exposto na Tabela 28, observou-se que preponderou a emissão do dióxido de carbono a partir da queima dos três combustíveis analisados, petróleo, óleo diesel e carvão mineral. No entanto, patenteia-se que o potencial de efeito estufa do mesmo é inferior ao do metano e ao do óxido nítrico.

Dessa maneira, entende-se que devido 1 GJ equivaler a 1000 *megajoules* (MJ), a Tabela 29 explicita a quantidade de cada um dos GEE estudados gerada na produção de 1 MJ de energia pela queima de petróleo, diesel ou carvão mineral.

Tabela 29 - Geração de gases na produção de 1 MJ de energia proveniente da queima de petróleo, óleo diesel e carvão mineral

Combustível	CO_2	CH_4	N_2O
Petróleo	$7,3 \times 10^{-2}$ kg	3×10^{-6} kg	6×10^{-8} kg
Óleo diesel	$7,4 \times 10^{-2}$ kg	3×10^{-6} kg	6×10^{-8} kg
Carvão mineral	$9,4 \times 10^{-2}$ kg	1×10^{-6} kg	$1,5 \times 10^{-6}$ kg

Fonte: IPCC (2006).

Sublinha-se que a Tabela 29 demonstrou os valores da Tabela 28 convertidos, uma vez que os cálculos do custo energético foram feitos em MJ. Por exemplo, para gerar 1 GJ de energia faz-se necessário queimar 0,003 kg de petróleo, e que para gerar 1 MJ de energia, que equivale a 0,001 GJ, queima-se 0,000003 kg desse óleo.

Logo, para conhecer as emissões segundo a fonte de energia primária, teve-se que saber qual é a mais representativa para cada um dos itens expostos nos parágrafos anteriores. Assim, identificando as quantidades básicas dos mesmos foi possível encontrar os fatores de emissão para todos os elementos.

Para Alves, Boddey e Urquiaga (2009), as emissões de GEE resultantes de mão de obra, herbicidas, inseticidas e sementes que se originam de diferentes fontes são melhor representadas pelo petróleo como fonte de energia primária necessária para fabricação, processamento ou desenvolvimento.

Neste trabalho, as emissões provocadas pela queima do óleo cru foram separadas pelo tipo de gás e distribuídas em três tabelas: metano, óxido nitroso e dióxido de carbono, Tabelas 30, 31 e 32, respectivamente.

Tabela 30 - Emissões de metano originadas da queima do petróleo pela COMVAP em 2015

ITEM	Entradas		Energia		Emissões de CH ₄		
	Quantidade Básica	Unidade Básica	MJ/ha.ano	kg CH ₄ /MJ ¹	Emissão de CH ₄ (kg./ha.ano) ²	Emissão kg CH ₄ /unid. bas. ³	kg CO ₂ eq/ha.ano ⁴
Herbicidas	2,20	kg	994,40		$2,9 \times 10^{-3}$	$1,3 \times 10^{-3}$	0,072
Inseticidas	0,12	kg	43,66		$0,1 \times 10^{-3}$	$8,3 \times 10^{-4}$	0,002
Sementes	2.000	kg	190,34	3×10^{-6}	$0,6 \times 10^{-3}$	$3,0 \times 10^{-7}$	0,015
Mão-de-obra	128,00	h	1.003,50		$3,0 \times 10^{-3}$	$2,3 \times 10^{-5}$	0,075
Total					$6,6 \times 10^{-3}$		0,164

Fonte: A autora (2017).

Notas: ¹ Indica quantos quilogramas de metano são emitidos por MJ utilizado.

² Indica as emissões de metano (em quilogramas por cada hectare cultivado por ano).

³ Mostra os quilogramas emitidos de metano pelas respectivas unidades básicas dos itens.

⁴ Mostra os quilogramas de CO₂eq emitidos em sua totalidade por cada item por hectare e por ano.

Consoante a Tabela 30, verificou-se que a quantidade total de CO₂eq decorrente do metano emitido pelos processos cuja fonte de energia primária é o petróleo foi 0,164 kg por hectare por ano. Todavia, para converter as emissões totais de CH₄ de cada item considerado em quantidade de carbono equivalente, precisou-se multiplicar os valores por 25, que é o potencial de efeito estufa do metano.

Tabela 31 - Emissões de óxido nitroso originadas da queima do petróleo pela COMVAP em 2015

ITEM	Entradas		Energia		Emissões de N ₂ O		
	Quantidade Básica	Unidade Básica	MJ/ha.ano	kg N ₂ O/MJ ¹	Emissão de N ₂ O (kg./ha.ano) ²	Emissão kg N ₂ O/unid. bas. ³	kg CO ₂ eq/ha.ano ⁴
Herbicidas	2,20	kg	994,40	6×10 ⁻⁸	5,9×10 ⁻⁵	2,6×10 ⁻⁵	0,007
Inseticidas	0,12	kg	43,66		2,6×10 ⁻⁶	2,1×10 ⁻⁵	0,006
Sementes	2.000	kg	190,34		1,1×10 ⁻⁵	0,5×10 ⁻⁸	0,1×10 ⁻⁶
Mão-de-obra	128,00	h	1.003,50		6,0×10 ⁻⁵	4,6×10 ⁻⁷	0,0001
Total					13,26×10 ⁻⁵		0,0131

Fonte: A autora (2017).

Notas: ¹ Indica quantos quilogramas de óxido nitroso são emitidos por MJ utilizado.

² Indica as emissões de óxido nitroso (em quilogramas por cada hectare cultivado por ano).

³ Mostra os quilogramas emitidos de óxido nitroso pelas respectivas unidades básicas dos itens.

⁴ Mostra os quilogramas de CO₂eq emitidos em sua totalidade por cada item por hectare e por ano.

Em conformidade com a Tabela 31, detectou-se que a quantidade total de CO₂eq resultante do óxido nitroso emitido pelos processos cuja fonte de energia primária é o petróleo foi 0,0131 kg por hectare por ano. Acrescenta-se que para determinar a quantidade de carbono equivalente a partir das emissões totais de N₂O, multiplicaram-se os valores por 298, que é o potencial de efeito estufa do óxido nitroso.

Tabela 32 - Emissões de dióxido de carbono originadas da queima do petróleo pela COMVAP em 2015

ITEM	Entradas		Energia		Emissões de CO ₂	
	Quantidade Básica	Unidade Básica	MJ/ha.ano	kg CO ₂ /MJ ¹	Emissão de CO ₂ (kg./ha.ano) ²	Emissão kg CO ₂ /unid. bas. ³
Herbicidas	2,20	kg	994,40	7,3×10 ⁻²	72,5	32,95
Inseticidas	0,12	kg	43,66		3,2	26,66
Sementes	2.000	kg	190,34		13,8	0,007
Mão-de-obra	128,00	h	1.003,50		73,2	0,57
Total					162,7	

Fonte: A autora (2017).

Notas: ¹ Indica quantos quilogramas de dióxido de carbono são emitidos por MJ utilizado.

² Indica as emissões de dióxido de carbono (em quilogramas por cada hectare cultivado por ano).

³ Mostra os quilogramas emitidos de dióxido de carbono pelas respectivas unidades básicas dos itens.

Como demonstrado na Tabela 32, notou-se que a emissão total de dióxido de carbono pelos processos cuja fonte de energia primária é o petróleo foi 162,7 kg por hectare por ano. Outrossim, que a quantidade total emitida pelos processos dependentes da queima de petróleo foi descoberta com base no volume de CO₂ liberado para produção de 1 MJ de energia. Portanto, com o montante de energia consumida em 2015 pela COMVAP,

determinou-se uma emissão de 162,9 kg de CO₂eq por hectare por ano derivado dos processos que utilizam petróleo como fonte energética primária.

Para a continuidade da pesquisa, expõem-se na Tabela 33, as emissões ocasionadas pelas atividades nas quais a queima de carvão mineral é a fonte primária de energia.

Tabela 33 - Emissões de gases de efeito estufa originadas da queima do carvão mineral pela COMVAP em 2015

Máquinas	
Quantidade Básica	136,6
Unidade Básica	kg
MJ/ha.ano	1.163,83
Metano	
kg CH ₄ /MJ	1×10^{-6}
Emissão de CH ₄ (kg./ha.ano)	$1,16 \times 10^{-3}$
Emissão kg CH ₄ /unid. bas.	$8,4 \times 10^{-6}$
Kg CO ₂ eq/ha.ano	0,0002
Óxido nítrico	
kg N ₂ O/MJ ¹	$1,5 \times 10^{-6}$
Emissão de N ₂ O (kg./ha.ano)	$1,74 \times 10^{-3}$
Emissão kg N ₂ O/unid. bas.	$1,2 \times 10^{-5}$
Kg CO ₂ eq/ha.ano	0,0038
Dióxido de carbono	
Kg CO ₂ /MJ	$9,4 \times 10^{-2}$
Emissão de CO ₂ (kg./ha.ano)	110,0
Emissão kg CO ₂ /unid. bas.	0,8

Fonte: A autora (2017).

Alicerçado na Tabela 33, observou-se que 110 kg de CO₂eq foram emitidos devido à queima de carvão mineral. E que as estimativas para a maquinaria foram baseadas na quantidade de aço contido na composição da mesma. Para tanto, segundo Alves, Boddey e Urquiaga (2009), o carvão mineral configura-se como fonte de energia primária.

Ressalta-se que a quantidade de CO₂eq emitido pela queima de carvão mineral na indústria do aço, que gerou o maquinário utilizado na cultura de cana de açúcar, foi definida multiplicando os valores encontrados para a quantidade de CH₄ e N₂O emitida, pelos respectivos potenciais de efeito estufa. E que a essa grandeza somou-se a quantidade de CO₂ emitida, totalizando 110 kg de CO₂ e CO₂ equivalente. Logo, percebeu-se que a emissão de metano e de óxido nítrico foi insignificante para o valor total.

Ademais, o reconhecimento do óleo diesel como fonte de energia para o transporte de insumos e de cana, para as máquinas agrícolas e para a distribuição dos produtos, revela que as emissões originadas da queima do óleo diesel estão separadas pelo tipo de gás emitido,

como metano, óxido nitroso e dióxido de carbono, apresentadas nas Tabelas 34, 35 e 36.

Tabela 34 - Emissões de metano originadas da queima do óleo diesel pela COMVAP em 2015

ITEM	Entradas		Energia		Emissões de CH ₄		
	Quantidade Básica	Unidade Básica	MJ/ha.ano	kg CH ₄ /MJ	Emissão de CH ₄ (kg./ha.ano)	Emissão kg CH ₄ /unid. bas.	kg CO ₂ eq/ha.ano
Óleo diesel	22,26	L	790,80		$2,3 \times 10^{-3}$	$1,0 \times 10^{-4}$	0,057
Transporte de insumos	5,80	L	206,00		$0,6 \times 10^{-3}$	$1,0 \times 10^{-4}$	0,015
Transporte da cana	35,50	L	1.260,90	3×10^{-6}	$3,7 \times 10^{-3}$	$1,0 \times 10^{-4}$	0,092
Distribuição	45,25	L	679,10		$2,0 \times 10^{-3}$	$0,4 \times 10^{-4}$	0,05
Total					$8,6 \times 10^{-3}$		0,21

Fonte: A autora (2017).

Por meio da Tabela 34, constatou-se que a quantidade total de CO₂eq oriunda das emissões de metano pela queima de óleo diesel foi 0,21 kg por hectare por ano. E que para converter as emissões totais de CH₄ em quantidade de carbono equivalente, multiplicaram-se os valores por 25, que é o potencial de efeito estufa do metano.

Tabela 35 - Emissões de óxido nitroso originadas da queima do óleo diesel pela COMVAP em 2015

ITEM	Entradas		Energia		Emissões de N ₂ O		
	Quantidade Básica	Unidade Básica	MJ/ha.ano	kg N ₂ O/MJ	Emissão de N ₂ O (kg./ha.ano)	Emissão kg N ₂ O/unid. bas.	kg CO ₂ eq/ha.ano
Óleo diesel	22,26	L	790,80		$4,7 \times 10^{-5}$	$2,1 \times 10^{-6}$	0,014
Transporte de insumos	5,80	L	206,00		$1,2 \times 10^{-5}$	$2,0 \times 10^{-6}$	0,003
Transporte da cana	35,50	L	1.260,90	6×10^{-8}	$7,5 \times 10^{-5}$	$2,1 \times 10^{-6}$	0,022
Distribuição	45,25	L	679,10		$4,0 \times 10^{-5}$	$0,9 \times 10^{-6}$	0,011
Total					$17,1 \times 10^{-5}$		0,050

Fonte: A autora (2017).

Segundo a Tabela 35, verificou-se que a quantidade total de CO₂eq derivada das emissões de óxido nitroso pela queima de óleo diesel foi 0,05 kg por hectare por ano. E que para especificar a quantidade de carbono equivalente a partir das emissões totais de N₂O, multiplicaram-se os valores por 298, que é o potencial de efeito estufa do óxido nitroso.

Tabela 36 - Emissões de dióxido de carbono originadas da queima do óleo diesel pela COMVAP em 2015

ITEM	Entradas		Energia		Emissões de CO ₂	
	Quantidade Básica	Unidade Básica	MJ/ha.ano	kg CO ₂ /MJ ¹	Emissão de CO ₂ (kg./ha.ano)	Emissão kg CO ₂ /unid. bas.
Óleo diesel	22,26	L	790,80		58,5	2,63
Transporte de insumos	5,80	L	206,00		15,2	2,62
Transporte da cana	35,50	L	1.260,90	7,4×10 ⁻²	93,3	2,63
Distribuição	45,25	L	679,10		50,2	1,11
Total					217,2	

Fonte: A autora (2017).

A Tabela 36 explicita que, com o montante de energia consumida em 2015 pela COMVAP, estabeleceu-se uma emissão de 217,2 kg de CO₂ por hectare por ano através da queima de óleo diesel. Porquanto, a quantidade total emitida de dióxido de carbono foi calculada sabendo a quantidade liberada desse gás para produção de 1 MJ de energia. Dessa forma, salienta-se que da queima do óleo diesel, originaram-se 217,46 kg de CO₂eq por hectare por ano, e que as emissões de metano e óxido nitroso não foram altas o suficiente para alterar a quantidade final de gás emitido.

Adenda-se que, em virtude dos fertilizantes e do calcário completarem os componentes na produção da cana de açúcar, expõe-se, na Tabela 37, o fator de emissão de CO₂eq por cada quilo de insumo.

Tabela 37 - Emissão de gases de efeito estufa decorrente da aplicação de um quilo de nitrogênio, de potássio e de fósforo como fertilizantes

Fertilizante	Fator de emissão (kg CO ₂ eq/kg)
N	3,03
K ₂ O	2,67
P ₂ O ₅	0,52

Fonte: Garcia; Sperling (2010).

Por meio da Tabela 37, observou-se a preponderância das emissões de CO₂eq oriundas do uso de nitrogênio, seguida do potássio e do fósforo. Conhecendo os fatores de emissão para cada tipo de fertilizante e as quantidades utilizadas pela COMVAP em 2015, as emissões resultantes do uso dos mesmos estão expostas na Tabela 38.

Tabela 38 - Emissão de gases de efeito estufa decorrente da aplicação de nitrogênio, de potássio e de fósforo pela COMVAP em 2015

Fertilizante	Quantidade Básica (kg)	Fator de emissão (kg CO ₂ eq/kg)	kg CO ₂ eq
N	57,00	3,03	172,71
K ₂ O	83,00	2,67	221,61
P ₂ O ₅	16,00	0,52	8,32

Fonte: A autora (2017).

Diante do evidenciado na Tabela 38, detectou-se que a quantidade de CO₂eq emitida devido ao uso dos fertilizantes nitrogênio, fósforo e potássio pela COMVAP na safra de 2015 totalizou 402,64 kg.

Conforme o IPCC (2006), as emissões de CO₂ originadas da adição de calcário foram estimadas pela quantidade de calcário aplicado ao plantio, multiplicada pelo fator de emissão de 0,75 kg de CO₂/kg de calcário.

Além disso, considerando a Tabela 14, 300kg de calcário foram utilizados pela COMVAP na safra de 2015. Por conseguinte, esse cenário acarretou uma emissão de 225 kg de CO₂.

Esse panorama possibilitou calcular que a aplicação de cal e fertilizantes foi responsável por 26% das emissões de GEE pela COMVAP em 2015, sendo maior que o resultado obtido por Garcia e Sperling (2010), que investigaram destilarias localizadas em Minas Gerais e obtiveram uma emissão de 298,4 kg CO₂eq/ha.ano, correspondente a 19,4% do total referente a aplicação desses insumos. Essa comparação indicou necessidade de incrementar a aplicação desses produtos no solo cultivado pela COMVAP, derivado de qualidade inferior do mesmo.

Consoante Silva e Sakatsume (2007), solos mais férteis implicam menor demanda por fertilizantes e corretivos agrícolas.

Dando seguimento à análise, calculou-se a emissão de CH₄ e N₂O originada da queima da palha pela COMVAP em 2015, como mostra a Tabela 39.

Tabela 39 - Emissão de metano e óxido nitroso decorrente da queima da palha na COMVAP em 2015

Item	Quantidade	Emissão total de CH ₄ (kg)	Emissão total de N ₂ O (kg)	Potencial de efeito estufa	Emissão de CO ₂ eq (kg/ha.ano)
Palha (t/ano)	157.440 ¹	-	-	-	-
Emissão de CH ₄ (kg/t)	2,7	425.088	-	-	-
Emissão de CH ₄ por hectare (kg/ha.ano)	-	35,4	-	25	885,6
Emissão de N ₂ O (kg/t)	0,07	-	11.020,8	-	-
Emissão de N ₂ O por hectare (kg/ha.ano)	-	-	0,91	298	273,7

Fonte: A autora (2017).

Nota: ¹ Calculou-se 80% de 196,8 t, visto que essa é a eficiência média do processo (IPCC, 2006).

Consoante a Tabela 39, realça-se que a queima da palha durante a colheita na COMVAP em 2015 foi responsável pela emissão de 425.088 kg de gás metano e 11.020,8 kg de gás óxido nitroso. E que, convertendo esses valores pelos respectivos potenciais de efeito estufa, determinou-se uma emissão de 1.159,3 kg de CO₂eq por hectare.

Destarte, compreende-se que a queima da palha durante a colheita é responsável por emissões significativas de metano. Inclusive, como Alves, Boddey e Urquiaga (2009), o total de palha de cana depositada é de 16,4 t/ha.ano, totalizando 196.800 t na COMVAP em 2015.

Adicionalmente, quando a palha é queimada, parte do N utilizado como fertilizante é perdido e há emissão de N₂O. Como não há dados específicos para a queima da cana quanto às emissões de CH₄ e N₂O, utilizaram-se os fatores fornecidos pelo IPCC (2006) para a queima de resíduos agrícolas, que relata que para cada tonelada de palha queimada com uma eficiência de 80%, são produzidos 2,7 kg de CH₄ e 0,07 kg de N₂O.

Os resultados mostraram que 48% da emissão de GEE (Figura 13) durante as etapas de agricultura e industrialização da cana de açúcar para produção de etanol e de açúcar pela COMVAP em 2015 ocorreram durante a queima do canavial e do palhiço, quando há emissão de CH₄ e N₂O. Comparando-se os resultados obtidos neste estudo com a pesquisa realizada por Garcia e Sperling (2010), observou-se que as emissões oriundas da queima da palha estimadas (1.159,3 kg CO₂eq/ha.ano) são maiores em comparação com as emissões correspondentes nesse estudo (434,31 kg CO₂eq/ha.ano), equivalentes a 28% do total. A principal diferença está nas operações agrícolas, que se caracterizam pelo cultivo semimecanizado, contando tanto com colheita manual com queima prévia do canavial

(68,4%) quanto com colheita mecanizada (31,6%).

Durante o manejo da cultura ocorrem também emissões do N₂O provenientes do nitrogênio presente na torta de filtro e o resultado do cálculo das emissões de N₂O pelo uso de torta de filtro na COMVAP em 2015 pode ser visto na Tabela 40.

Tabela 40 - Emissão de óxido nitroso decorrente do uso de torta de filtro na COMVAP em 2015

Item	Quantidade por hectare	Emissão como N ₂ O (1%)	Potencial de efeito estufa	Emissão total de CO ₂ eq (kg/ha.ano) ¹
Nitrogênio (kg/ano)	9,1	0,09	298	26,82

Fonte: A autora (2017).

Nota: ¹ Considerou-se 12.000 ha de área plantada.

Com base na Tabela 40, observou-se que 26,82 kg de CO₂eq são liberados anualmente pela COMVAP devido à aplicação de nitrogênio à torta de filtro.

De acordo com Soares et al. (2009), existem 5,5g de N em cada quilograma de torta de filtro e, normalmente, são adicionados 10t da torta no sulco, por hectare. Esse contexto constitui uma adição de 55kg/ha de N no plantio, ou 9,1 kg/ha.ano.

Adenda-se que, segundo o IPCC (2006), 1% do nitrogênio aplicado é emitido como N₂O.

Registra-se que sem embargo a reduzida literatura acerca da emissão de CH₄ ou N₂O a partir da vinhaça, pôde-se verificar que na COMVAP a vinhaça é distribuída por fertirrigação, diluída em água de lavagem da cana e em água do rio Parnaíba, em uma proporção de 10:1, chegando aos locais de aplicação por canais abertos. Nesse sentido, concorda-se com Alves, Boddey e Urquiaga (2009), que as doses de vinhaça, tradicionalmente, variam de 80 a 150 m³/ha.ano, e carregam consigo uma grande quantidade de material orgânico e nutrientes. Logo, a composição da mesma é variável, mas contém aproximadamente 1 a 2% de carbono solúvel e 0,2% do carbono contido é emitido em forma de CH₄.

Sendo assim, apresenta-se na Tabela 41 o cálculo da emissão de CH₄ e N₂O a partir do uso de vinhaça pela COMVAP em 2015.

Tabela 41 - Emissão de metano e de óxido nitroso decorrente da aplicação de vinhaça na COMVAP em 2015

Item	Quantidade	Emissão de CH ₄ (kg/ha.ano) ¹	Emissão de N ₂ O (kg/ha.ano) ²	Potencial de efeito estufa	Emissão de CO ₂ eq (kg/ha.ano)
Vinhaça (m ³ /ha.ano)	80	-	-	-	-
Nitrogênio (kg/ha.ano)	20	-	0,2	298	59,600
Carbono (m ³)	1,6	0,003	-	25	0,075

Fonte: A autora (2017).

Notas: ¹ Calculou-se 0,2% da quantidade de carbono dissolvido na vinhaça.

² Considerou-se que 1% do N aplicado foi liberado na forma de N₂O.

Em consonância com a Tabela 41, identificou-se que a emissão de CO₂ equivalente causada pela aplicação da fertirrigação totalizou 59,67 kg/ha.ano. E que as emissões de N₂O foram estimadas com base em IPCC (2006), que definiu que 1% do N aplicado é emitido em forma de N₂O.

Resende et al. (2006) calcularam que 80m³ de vinhaça contém 23kg de N. Todavia, com vistas a facilitar o cálculo, nesta pesquisa utilizou-se a dose de 80m³/ha.ano de vinhaça, contendo 20kg de nitrogênio e 2% de carbono solúvel, ou seja, 1,6m³.

Continuando a análise, explicita-se na Tabela 42 as emissões dos materiais para a construção da usina.

Tabela 42 - Emissão de GEE dos materiais constituintes da COMVAP em 2015

Material	kg/ha.ano	Fator de Emissão de CO ₂ eq (kg/kg)	Emissão de CO ₂ eq (kg/ha.ano)
Cimento na construção	8,32	0,507	4,2
Aço leve (estrutural)	20,30	1,060	21,5
Aço leve em equipamento	18,20	1,060	19,3
Aço inoxidável	2,90	1,600	4,6

Fonte: A autora (2017).

A Tabela 42 expõe que as emissões de CO₂eq ocasionadas pela construção e manutenção da estrutura física da Usina totalizaram 49,6 kg/ha em 2015. Dessa maneira, para o cálculo usou-se os fatores de emissão do relatório do Painel Intergovernamental sobre Mudanças Climáticas (IPCC) utilizados por Boddey et al. (2008).

Outrossim, enfatiza-se que não se contabilizaram, nessa pesquisa, as emissões decorrentes da queima do bagaço nas caldeiras, pois consoante a COMVAP (2016), a chaminé das caldeiras possui sistema de lavagem de gases, que os libera na atmosfera já

limpos e praticamente isentos de partículas sólidas. Enquanto os sólidos que ficam retidos são aproveitados, pois a filtragem é rica em nutrientes, principalmente em potássio.

Para sumarizar as emissões dos GEE no processo produtivo de açúcar e de etanol pela COMVAP em 2015, as quais são originadas nas atividades agrícolas, industriais e de distribuição, introduz-se a Tabela 43.

Tabela 43 - Emissão de GEE pela atividade sucroalcooleira do Piauí em 2015

Etapas	GEE emitido (kg/ha.ano)				
	CH ₄	N ₂ O	CO ₂	CO ₂ eq	Total CO ₂ eq
Fase agrícola	35,410	14,2	1.067,3	1.246,1	2.313,4
Fase industrial	-	-	-	49,6	49,6
Distribuição	0,002	0,00004	50,2	0,061	50,2
Emissão total	35,400	14,2	1.117,5	1.295,8	2.413,3

Fonte: A autora (2017).

Em conformidade com a Tabela 43, as emissões de CO₂ foram predominantes no cultivo da matéria-prima, cana de açúcar, devido à queima da palha durante a colheita da safra, ao uso da energia dos combustíveis fósseis no maquinário e no transporte, além da aplicação de fertilizantes e de calcário. Patenteia-se que a emissão derivada da infraestrutura das usinas na produção de etanol e de açúcar alcançou aproximadamente 2,0% das emissões calculadas para o ciclo completo. E que a mesma proporção foi encontrada para as emissões oriundas da distribuição desses produtos.

Contrapondo-se aos resultados desta investigação o obtido por Macedo, Leal e Silva (2004), percebeu-se que as emissões totais aqui estimadas (2.413,3 kg CO₂eq/ha.ano) foram menores em comparação com as emissões correspondentes nesse estudo, em virtude de determinarem uma emissão de 34,5 kg CO₂eq por tonelada de cana, enquanto na COMVAP esse valor foi de 29,9 kg CO₂eq por tonelada de cana, considerando a produtividade média de 80,6 Mg/ha. Por conseguinte, revela-se que a principal diferença estava nas emissões correspondentes à queima da cana de açúcar.

Adenda-se que segundo Macedo, Leal e Silva (2004), as emissões oriundas da queima da palhada totalizaram 32,8% das emissões, considerando 100% de eficiência na combustão, diferente desta pesquisa, que foi de 48%. Ainda assim, o montante total de GEE emitidos pela COMVAP em 2015, foi menor que o encontrado pelos referidos autores, que analisaram dois cenários tecnológicos: um representando valores médios de consumo por parte das destilarias e, o outro, valores ótimos de consumo de insumos.

Salienta-se que esta dissertação se adequou ao segundo cenário, uma vez que as

destilarias analisadas destinaram os resíduos da indústria para a agricultura da cana de açúcar, o que contribuía para a diminuição das emissões totais de GEE.

Nesse sentido, os esforços da Usina para reutilizar os resíduos agrícolas e industriais no campo e no processamento de álcool e de açúcar, resultaram em mitigação da quantidade de gases de efeito estufa emitidos em 2015, não obstante a necessidade de continuar aprimorando as técnicas e substituir práticas maléficas para o meio ambiente, como a queima da palhada anterior à colheita.

6.2.3 Análise de impacto

A Análise de Impacto do Ciclo de Vida (AICV) objetiva compreender e avaliar a magnitude e importância dos impactos ambientais potenciais de um sistema, baseada na análise de inventário de ciclo de vida realizada. Nessa etapa, convertem-se os valores obtidos nos resultados do inventário em impactos e danos ao meio ambiente. Segundo a ABNT ISO 14044:2006, a AICV consiste na identificação e seleção de impactos, na classificação e na caracterização.

Nesta investigação, adotou-se uma abordagem do berço ao túmulo para avaliação de etanol e de açúcar. Para ambos os produtos, consideraram-se no balanço energético e na avaliação de emissões de GEE, o consumo direto de combustíveis externos e a energia fóssil necessária para a produção de insumos químicos em processos agrícolas e industriais, como fertilizantes, calcário, pesticidas, etc. Sendo assim, avaliaram-se os impactos referentes ao consumo de água e de energia não-renovável, ao rendimento energético líquido, à eficiência energética, ao uso do solo e às emissões atmosféricas. Salienta-se que a AICV é uma exigência da norma ABNT ISO 14044 e pode ser diretamente utilizada na análise de ecoeficiência, contudo não há relação direta entre os aspectos analisados na AICV e os ecoindicadores selecionados. Logo, evidencia-se que o consumo de água, analisado nessa seção, não foi considerado indicador de ecoeficiência durante este estudo.

6.2.3.1 Consumo de água

Patenteia-se que a demanda de água na agroindústria sucroalcooleira varia conforme a tipologia do processo produtivo da usina e do produto final. Para tanto, exhibe-se na Tabela 44 o consumo de água por atividade em usina produtora de álcool e de açúcar.

Tabela 44 - Consumo de água por atividade em usina com destilaria anexa

Setor	Processo	Uso médio (m ³ /t)	Distribuição (%)
Alimentação	Lavagem de cana	5,33	25,4
Extração (moendas)	Embebição	0,25	1,2
	Resfriamento de Mancais	0,15	0,7
Tratamento de Caldo	Preparo de Leite de cal	0,01	0,1
	Resfriamento na Sulfitação ¹	0,05	0,2
	Embebição dos filtros	0,04	0,2
	Condensadores dos filtros	0,30	1,4
Concentração do Caldo	Condensadores / multijatos evaporação ¹	2,00	9,5
	Condensadores / multijatos cozedores ¹	4,00	19,0
	Diluição de méis	0,03	0,1
	Resfriamento cristalizadores ¹	0,05	0,2
Geração de Energia	Lavagem de açúcar ¹	0,01	0,0
	Produção de vapor	0,50	2,4
Fermentação	Resfriamento tubogeradores	0,20	1,0
	Resfriamento do caldo ²	1,00	4,8
Destilaria	Resfriamento de dornas ²	3,00	14,3
	Resfriamento condensadores ²	4,00	19,0
Outros	Limpeza de pisos e equipamentos	0,05	0,2
	Uso potável	0,03	0,1
Total		21,00	100,0

Fonte: Elia Neto (2005).

Notas: ¹ Somente na produção de açúcar.

² Somente na produção de etanol.

Consoante a Tabela 44, constatou-se uma utilização média de 21 m³ de água por tonelada de cana processada em usina com destilaria anexa. Esse panorama foi condizente com a explicação de Pedrosa (2009), de que o uso específico de água é maior na produção do açúcar, particularmente, para uma usina que produza açúcar e álcool, esse montante de 21 m³ por tonelada de cana processada é o apropriado.

Nessa perspectiva, calculou-se o consumo de água pela COMVAP em 2015, cujos resultados se encontram na Tabela 45.

Tabela 45 - Consumo de água na atividade sucroalcooleira na COMVAP em 2015

Item	Valor
Área colhida (ha)	12.000,00
Cana total (t)	967.427,41
Rendimento da cana (Mg/ha)	80,60
Uso médio de água (m ³ /t)	21,00
Consumo total de água (m ³ /ha)	1.692,60

Fonte: A autora (2017).

Embasado na Tabela 45, identificou-se que durante a safra de 2015 ocorreu um consumo de 1.692,60 metros cúbicos de água por hectare colhido. Contudo, a despeito desse

contexto, reconheceu-se que o dito consumo foi superestimado, em virtude da COMVAP recuperar e reutilizar água através da adoção de circuitos fechados. Outrossim, notou-se que a água condensada durante a produção de vapor é aproveitada no processamento industrial e a água usada para a lavagem da cana é redirecionada para a fertirrigação. Ademais, sublinha-se que apesar da Usina possuir outorga de direito de uso de recursos hídricos do rio Parnaíba válida até o ano 2025, a água empregada para irrigação dos 4.000 ha de canaviais não foi contabilizada na análise.

Compreende-se que a preocupação com a quantidade de água doce consumida na indústria sucroalcooleira deve-se, principalmente, ao fato de se tratar de um recurso limitado e muitas vezes não disponível. Além disso, em regiões do Brasil, como o Nordeste, as chuvas são escassas durante o processamento de cana de açúcar, tornando os níveis de água dos rios muito baixos.

Ressalta-se que Buarque et al. (2003) encontraram uma utilização média inferior a 21 m³/TC de água no estado de Alagoas, variando de 4 a 7 m³/TC em usina de açúcar e álcool, o que pode indicar que a COMVAP apresente necessidade hídrica ainda menor do que a aplicada nesta investigação, embora os autores não tenham explicitado o mecanismo de colheita nas usinas analisadas.

De uso essencial para a produção de açúcar e álcool, a água é empregada em diversas etapas do processamento, como na lavagem da cana após a colheita, na embebição para extração do caldo, na geração de vapor, na lavagem dos filtros, nos condensadores, nas caldeiras, nas máquinas de resfriamento, nos cristalizadores e colunas barométricas, entre outros. A lavagem da cana, realizada em regiões onde a cana é cortada manualmente, é uma das etapas do processo produtivo de açúcar e álcool que mais consome água, derivado da areia, lama, entulhos e até mesmo pedras que acompanham a cana até a usina. Em virtude da lavagem, o consumo de água aumenta muito em comparação com regiões onde toda a colheita, ou pelo menos uma boa parte desta, é feita de forma mecânica, na qual a cana é cortada e levada para transporte sem que haja contato com o solo e, conseqüentemente, carregando uma quantidade mínima de sujeira.

Nesse sentido, certificou-se que análise de Ingaramo et al. (2009), do consumo de água durante a fabricação de açúcar a partir da cana, sugere como solução para o uso excessivo de recursos hídricos, o aumento da porcentagem de recuperação da água presente na cana de açúcar, para suprir as necessidades do processamento industrial, a qual não se aplica à COMVAP, haja vista o caldo claro e o melaço resultantes do processamento da cana (Figura 7) serem direcionados para a produção de etanol, além de a vinhaça ser aproveitada na

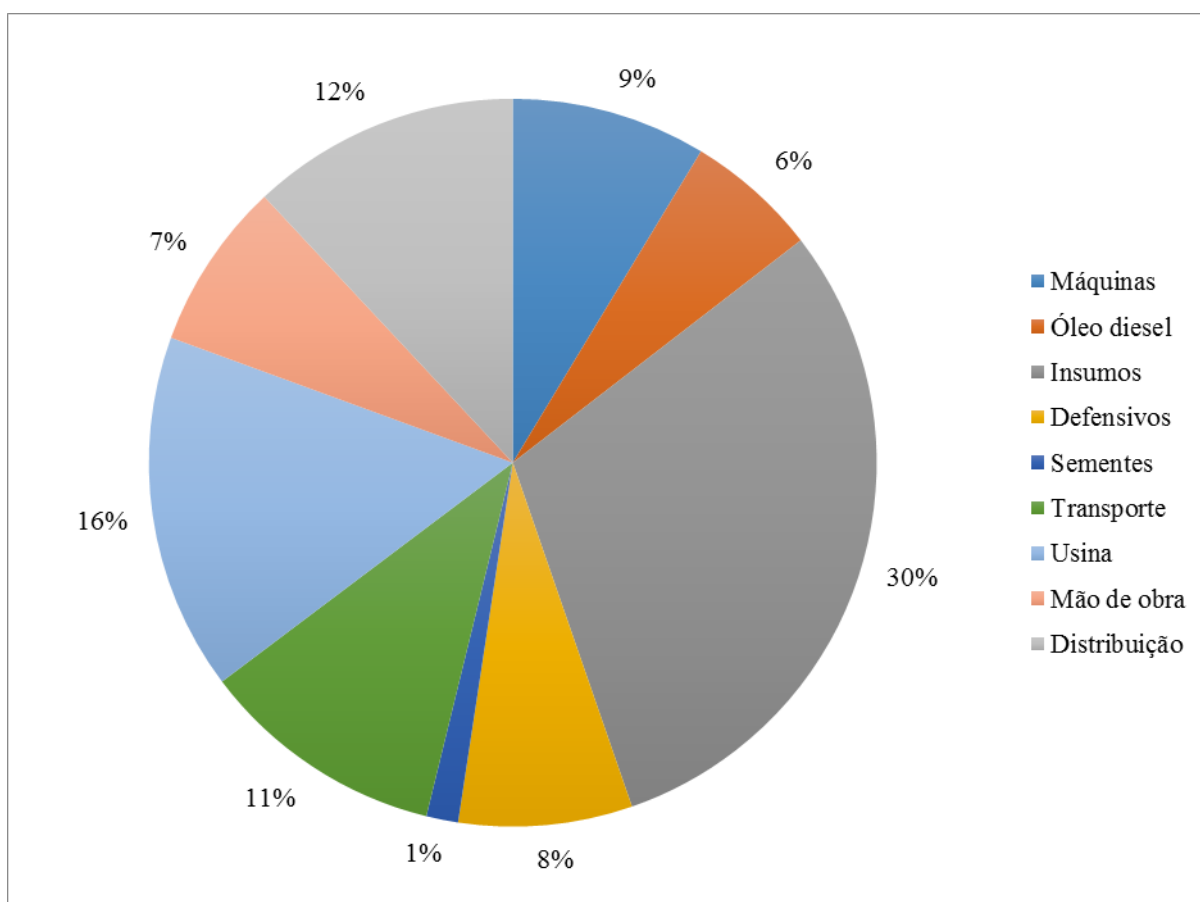
fertirrigação. Por conseguinte, faz-se necessária uma boa gestão da água, através da implementação de reciclagem da água no interior da planta industrial, o que proporciona a diminuição do consumo de água externa e a geração de efluentes.

6.2.3.2 Consumo de energia não-renovável

Embora cientistas caracterizem os biocombustíveis como CO₂-neutros porque as plantas absorvem CO₂ enquanto se desenvolvem, parece crucial incluir a quantidade de energia requerida para cultivar, colher, transportar, processar e distribuir o combustível, assim como a liberação de CO₂ durante a queima. Consequentemente, entende-se que o nível que qualquer biocombustível pode diminuir as emissões de CO₂, quando comparado à emissão por gasolina, dependerá dos métodos de produção e refinamento utilizados.

Destaca-se a relevância do consumo de energia das atividades do ciclo de vida do etanol e do açúcar, como constante na Tabela 26, por meio da Figura 12.

Figura 12 - Uso de energia fóssil na produção de etanol e açúcar por atividade na COMVAP em 2015



Fonte: A autora (2017).

Em consonância com a Figura 12, observou-se a predominância da aplicação de fertilizantes, como consumidora de 30% da energia total, derivada principalmente da energia investida na produção desses insumos. Em segundo lugar, detectou-se a etapa de processamento na usina, com 16%, durante a qual a energia é consumida majoritariamente no processo de produção de materiais de construção, seguida pelas etapas de distribuição, com 12%, transporte, com 11%, devido ao alto consumo de óleo diesel pelos caminhões, uso de maquinário agrícola, com 9%, defensivos agrícolas, com 8%, mão de obra humana, com 7%, queima de óleo diesel, com 6%, e aplicação das sementes, com 1%.

Comparativamente ao estudo de Salla et al. (2009), que investigaram duas usinas paulistas e obtiveram um consumo total de 14.370,9 MJ/ha.ano na etapa agrícola e 139.532,2 MJ/ha.ano na etapa industrial, o gasto energético da COMVAP durante igual período foi inferior, derivado da utilização do bagaço da cana para abastecer a Usina de energia, o que redundou em 2.131,07 MJ/ha.ano.

Adicionalmente, sabendo que o processo produtivo da COMVAP foi responsável pelo consumo de 13.446,31 MJ/ha em 2015 e que cada hectare originou 6.228,00 L de etanol, calculou-se a demanda energética de 2,16 MJ por litro de álcool. O custo energético encontrado nesta dissertação aproximou-se do apresentado por Salla et al. (2009), de 2,0 MJ/L, e por Urquiaga, Alves e Boodey (2005), de 2,7 MJ/L, em relação às operações agrônômicas de produção de cana de açúcar. Todavia, Salla et al. (2009) calcularam uma demanda de 19,4MJ/L nas etapas de processamento industrial, resultando em um custo energético total de 21,4MJ/L. A produção da COMVAP em 2015 requereu menor quantidade de energia fóssil por ter usado o bagaço da cana para ativar a Usina.

O investimento de *Megajoules* no sistema produtivo da COMVAP indica que o cultivo e o processamento da cana de açúcar nesta Usina foi potencialmente sustentável.

6.2.3.3 Rendimento energético líquido

Salienta-se que o rendimento energético líquido, expresso em MJ por hectare num período de um ano, é a diferença entre a energia fornecida pelo processo e a energia consumida no processo, ou o uso de recursos, o qual permite avaliar a eficiência energética da cultura considerada. Para tanto, calculou-se a quantidade de energia fornecida pelo etanol produzido na COMVAP em 2015, como exposto na Tabela 46.

Tabela 46 - Saída de energia do sistema produtivo da COMVAP em 2015

Item	Cálculo	Quantidade
a. Densidade do etanol anidro (kg/m ³)		791,00
b. Densidade do etanol hidratado (kg/m ³)		809,00
c. Energia contida no etanol anidro (kcal/kg)		6.750,00
d. Energia contida no etanol hidratado (kcal/kg)		6.300,00
e. Energia contida no etanol anidro (MJ/kg)	$c \div 238,84$	28,26
f. Energia contida no etanol hidratado (MJ/kg)	$d \div 238,84$	26,38
g. Poder calorífico do etanol anidro (MJ/L)	$(e \times a) \div 1000$	22,35
h. Poder calorífico do etanol hidratado (MJ/L)	$(f \times b) \div 1000$	21,34
i. Produção de etanol total (L/ha) ¹		6.228,00
j. Energia fornecida pelo etanol (MJ/ha) ²	$i \times g$	138.398,26

Fonte: A autora (2017).

Notas: ¹ Considerou-se a produtividade de 80,6 TC/ha e o rendimento de 77,27 L/TC.

² A produção de etanol anidro correspondeu a cerca de 90% da produção total de etanol, por isso considerou-se o seu poder calorífico para os cálculos.

Alicerçado na Tabela 46, detectou-se que cada hectare cultivado com cana de açúcar direcionado à produção de etanol, produziu 138.398,26 MJ. Entretanto, conforme a Tabela 26, cada hectare demandou 13.446,31 MJ, denotando em um rendimento energético líquido de 124.951,95 MJ/ha.ano.

Donde concluiu-se que, na safra de 2015, o rendimento energético líquido da produção sucroalcooleira da COMVAP foi positivo, pois a energia fornecida pelo sistema foi superior à consumida. Ademais, realça-se que a atividade prevalecente na COMVAP é produção de açúcar, o que manifesta que grande parte da energia foi gasta na produção dessa *commodity*, que não gera energia. Mas, sem embargo esse cenário, o balanço energético foi favorável. Destaca-se, também, que ocorreu geração de energia elétrica via combustão do bagaço de cana, o que redundou na geração de 10.727,644 MW de energia elétrica, em 2015 na COMVAP.

Todavia, o rendimento energético líquido da COMVAP em 2015 foi inferior ao encontrado por Urquiaga, Alves e Boodey (2005), que pesquisaram em São Paulo, onde a produtividade média de cana de açúcar era de 84 Mg/ha e a produção de etanol de cana foi próxima de 86 litros/TC. Utilizando um valor calorífico de etanol de 22,3 MJ/L, o montante foi de 141.120 MJ/ha.ano. O resultado mais baixo deveu-se tanto a um menor rendimento na produção de cana por hectare, quanto na produção de etanol por tonelada de cana na COMVAP, derivado das condições distintas de qualidade de solo e de clima.

6.2.3.4 Eficiência energética

Acentua-se que a eficiência energética do sistema foi definida através da razão entre a quantidade de energia oferecida e a consumida, ou razão saída/entrada, o que possibilitou avaliar que o sistema é uma opção viável como fonte de energia, por fornecer volume maior de energia do que a consumida nos processos. Ou seja, entende-se que a razão fornecimento por consumo deve ser superior a 1, indicando a eficiência do sistema na conversão de biomassa em combustível. O que evidencia que quanto maior o valor, maior o rendimento em relação à energia investida, ou consumida e, portanto, maior a eficiência do sistema (MACEDO et al., 2008).

Nessa perspectiva, apresenta-se na Tabela 47 a eficiência energética do etanol de cana de açúcar produzido pela COMVAP em 2015.

Tabela 47 - Eficiência energética do etanol de cana de açúcar da COMVAP em 2015

Item	Cálculo	Quantidade
a. Demanda de energia do sistema produtivo (MJ/ha.ano)		13.446,31
b. Oferta de energia do sistema produtivo (MJ/ha.ano)		138.398,26
c. Eficiência energética	$b \div a$	10,30

Fonte: A autora (2017).

Consoante a Tabela 47, verificou-se que o valor de eficiência energética, calculado dividindo o valor da energia fornecida pela demanda energética, foi 10,30, que configura-se em montante superior a 1, o que revelou a viabilidade do sistema como fonte de energia, ficando acima dos valores encontrados por Boddey et al. (2008), de 9,0, por Pereira (2008), de 8,2 e por Urquiaga, Alves e Boddey (2005), de 8,0.

Destarte, sublinha-se que a contextura evidenciou que grande parte da energia que entrou no sistema foi destinada à produção de açúcar.

Outrossim, destaca-se que relativamente à entrada e saída de energia fóssil do sistema produtivo de açúcar e de álcool no Piauí, a relação obtida foi de 10,3:1, o que significa que para cada 1,0 MJ de energia fóssil consumida se produziu 10,3 MJ de energia renovável, na forma de etanol da cana. Acrescenta-se que esse valor difere do valor internacionalmente reconhecido para o NEB do etanol, que é de 9, e está acima dos valores encontrados por Leite e Cortez (2013) para etanol de outras biomassas: o álcool de milho (NEB entre 1,0 e 1,4), e de beterraba (NEB aproximadamente 2).

Sendo assim, ressalta-se que sem embargo a energia fóssil ter sido direcionada majoritariamente para a produção de açúcar, o balanço energético da produção de etanol da

cana na COMVAP foi superior ao de outras biomassas. Este resultado se deveu, principalmente, à grande produtividade alcançada por área na etapa agrícola, juntamente com a eficiência na utilização de subprodutos industriais. Como também, registra-se que outros fatores, como utilização de insumos na etapa agrícola, fertilidade do solo e manejo podem interferir no balanço energético final.

Constatou-se ainda que, derivado do bagaço ter sido usado para gerar energia, não houve demanda por combustíveis fósseis na fase industrial, o que redundou em grande benefício, não apenas para o balanço energético, mas, sobretudo para as emissões de GEE associadas à produção de açúcar e etanol.

6.2.3.5 Uso do solo

Com vistas ao prosseguimento do estudo, calculou-se o uso do solo para a safra de 2015 da COMVAP, como demonstrado na Tabela 48.

Tabela 48 - Cálculo do uso de solo para produção de 1 tonelada de cana na COMVAP em 2015

Item	Cálculo	Valor
a. Rendimento médio (Mg/ha)		80,6
b. Área necessária para produzir 1 tonelada (ha)	$1 \div 80,6$	0,012
c. Área necessária para produzir 1 tonelada (m ²) ¹		120

Fonte: A autora (2017).

Nota: ¹ 1 hectare equivale a 10.000 m².

De acordo com a Tabela 48, identificou-se o valor de 120 m² de solo usado para produzir uma tonelada de cana de açúcar. Para tanto, considerou-se o rendimento médio de 80,6 toneladas de cana por hectare para o cálculo.

Dando continuidade à análise, determinou-se a área necessária para a COMVAP produzir um litro de etanol e um quilo de açúcar, cujo resultado mostra-se na Tabela 49.

Tabela 49 - Cálculo da área necessária para produzir um litro de etanol e um quilo de açúcar na COMVAP em 2015

Item	Cálculo	Valor
a. Rendimento médio da produção de açúcar (kg/t)		82,09
b. Rendimento médio da produção de etanol total (L/t)		77,27
c. Área necessária para produzir 1 tonelada de cana (m ²)		120
d. Área necessária para produzir 1 quilo de açúcar (m ²)	$c \div a$	1,46
e. Área necessária para produzir 1 litro de etanol (m ²)	$c \div b$	1,55

Fonte: COMVAP (2016).

Através da Tabela 49, detectou-se que para produzir um litro de etanol fez-se necessário 1,55 m² de solo e que para produzir um quilo de açúcar, foi requerido 1,46 m². Tal constatação decorreu do prévio conhecimento do rendimento médio da COMVAP, de 82,09 kg de açúcar e 77,27 litros de etanol por tonelada de cana colhida.

Nessa perspectiva, explicitam-se na Tabela 50, os valores constantes na literatura para o uso do solo na produção de etanol produzido a partir de diferentes biomassas e o valor obtido nesta investigação.

Tabela 50 - Uso do solo para produção de 1 litro de etanol a partir de diferentes matérias-primas

Matéria-prima	Uso do solo	Fonte
Cana de açúcar (Brasil)	1,55 m ²	Pesquisa de campo
Cana de açúcar (Brasil)	1,40 m ²	Oliveira; Serra; Magalhães (2012)
Milho (USA)	3,15 m ²	Tyner et al. (2010)
Mandioca (Brasil)	3,86 m ²	Oliveira; Serra; Magalhães (2012)
Sorgo (Brasil)	3,33 m ²	Cunha; Severo Filho (2010)

Fonte: A autora (2017).

Diante do exposto na Tabela 50, verificou-se a preponderância da produtividade da cana de açúcar por necessitar de menor área para produzir a mesma quantidade de etanol. Salienta-se que esse panorama diferiu da análise de Oliveira, Serra e Magalhães (2012), cujo estudo indicou a necessidade de 1,40 m² de solo para produção de um litro de etanol, registrando uma maior produtividade.

Como também, sublinha-se que não se encontrou na literatura informações acerca do uso de solo para produção de açúcar oriundo de outras biomassas.

No que concerne ao uso do solo, a comparação dos dados constantes na Tabela 49 indicou que a produção de etanol a partir de cana de açúcar requereu área inferior do que o etanol originário de outras matérias-primas, como milho, sorgo ou mandioca.

Consoante a ANP (2015), foram consumidos 41,13 bilhões de litros de gasolina no Brasil em 2015.

Em função desse cenário, expõe-se de acordo com MAPA (2013b), que a área necessária para a substituição total deste volume de gasolina por etanol, sem considerar a diferença de consumo médio entre os veículos movidos à gasolina e a etanol, corresponde a 6,37 milhões de hectares. E que, conforme CONAB (2016), este montante aproxima-se da área total de plantio de cana no Brasil na safra 2015/2016, que foi de 8,6 milhões de hectares. Ou seja, para substituir completamente o uso da gasolina por etanol, seria preciso dobrar a área hoje destinada ao plantio de cana de açúcar, o que pode levar a outras consequências

como desmatamento, competição com culturas alimentícias e desapropriação.

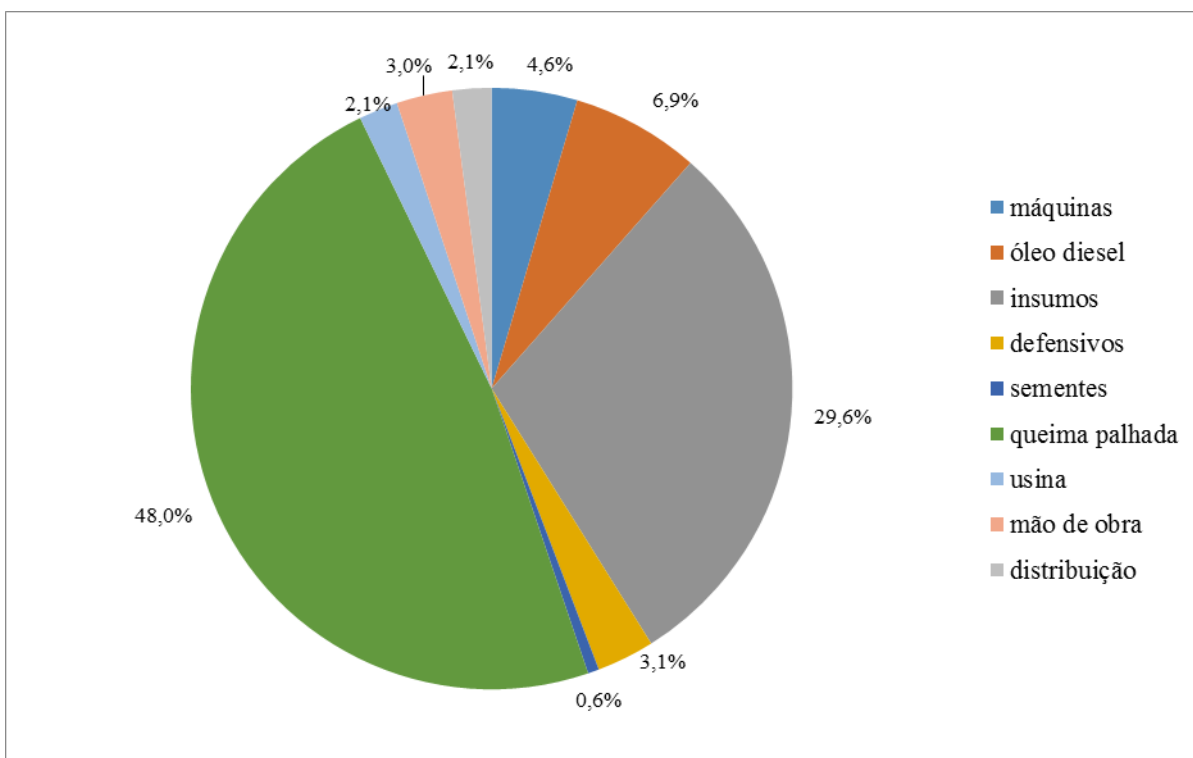
Ressalta-se que devido as perspectivas de ampliação das áreas plantadas serem limitadas, a elevação da produtividade no campo e na indústria tende a ser uma das únicas saídas viáveis para a sustentação do setor, a qual está diretamente relacionada com a adoção de novas tecnologias e, conseqüentemente, com a realização de investimentos.

6.2.3.4 Emissões atmosféricas

Como explicitado anteriormente na Tabela 43, o nível de CO₂ predominou na emissão de gases durante a cadeia produtiva da cana de açúcar, o qual derivou da queima da palhada durante a colheita, do uso de combustíveis fósseis no maquinário e no transporte, além da aplicação de fertilizantes e calcário.

Em consonância com esta investigação, o ciclo de vida do etanol e do açúcar na COMVAP em 2015, gerou a quantidade de 2.413,3 quilogramas de CO₂eq por hectare cultivado, por ano. Dessa forma, apresenta-se na Figura 13, a proporção de emissões atmosféricas referentes às diferentes etapas do sistema produtivo.

Figura 13 - Emissões atmosféricas de GEE por atividade na COMVAP em 2015



Fonte: A autora (2017).

Nota: ¹ As emissões referentes à aplicação de torta de filtro e vinhaça foram contabilizadas juntamente com as dos insumos.

Com base na Figura 13, atestou-se que a etapa que emitiu a maior quantidade de GEE em unidades de CO₂eq foi a agrícola, principalmente a colheita, correspondente à queima da palha (48% das emissões), e em parte à aplicação de fertilizantes (29,6%). Adenda-se que a queima de óleo diesel ocasionada pelo transporte de insumos para a lavoura e para a Usina, da cana do campo para a Usina e para a distribuição do açúcar e do álcool, foi responsável por 9% das emissões totais.

Acentua-se que as emissões de CO₂ na queima da cana de açúcar não foram levadas em conta, em virtude do carbono liberado ser reassimilado pela vegetação durante o cultivo seguinte. Sublinha-se que não obstante esse procedimento, essa foi a etapa da produção de açúcar e de álcool que mais liberou gases de efeito estufa na atmosfera.

Uma vez que a produção sucroalcooleira da COMVAP em 2015 encarregou-se da emissão de 2.413,3 kg de CO₂eq por hectare cultivado e processado, sendo que cada hectare gerou 6.228,00 L de etanol, calculou-se a emissão de 0,39 kg de Gases de Efeito Estufa por litro de álcool fabricado.

Comparando este resultado com o estudo de Macedo, Seabra e Silva (2008) que, considerando ambas as fases agrícola e industrial, obtiveram emissões totais de 0,42 e 0,43 kg CO₂eq durante a produção de etanol hidratado e anidro, respectivamente, observou-se que a quantidade de GEE emitida pela COMVAP foi inferior e mais próxima do cenário previsto pelos autores supracitados para 2020, quando espera-se a emissão média de 0,33 kg CO₂eq.

Para Oliveira, Vaughan e Rykiel Jr. (2005), as emissões de GEE da produção de etanol de cana de açúcar no Brasil em dois cenários distintos, variando o rendimento de cana por hectare, a taxa de conversão de litros de etanol por Mg de cana e a demanda energética, e alcançaram uma emissão de 0,46 kg CO₂eq/L sob as melhores condições e 0,57 kg CO₂eq/L sob as piores.

Já na COMVAP o valor obtido em 2015 se encontra abaixo do estimado sob as circunstâncias mais vantajosas. Enfatiza-se que tal contextualização revela um procedimento favorável ao meio ambiente.

Logo, em conformidade com esse resultado, conclui-se que a maior parte das emissões ocorria principalmente durante a queima da palha, na qual havia emissão de CH₄ e N₂O. Contudo, a despeito dessa problemática, reconhece-se que a introdução de colheita mecanizada poderá reduzir parcialmente as emissões da queima, uma vez que a mesma também gera emissões.

Assim, derivado da real possibilidade da inserção de 100% de colheita mecânica (supondo-se que haja disponibilidade de terras planas no Piauí para emprego de colheitadeiras

mecânicas), o maquinário utilizado (colhedora de cana combinada) apresenta um consumo de 74 L/ha (MACEDO; LEAL; SILVA, 2004).

Dessa maneira, as emissões de GEE oriundos da colheita mecânica da safra da COMVAP, em 2015, redundariam em um consumo adicional de 2.628,48 MJ/ha.ano e uma liberação aproximada de 194,7 kg CO₂eq/ha.ano. Já que as emissões provenientes da queima no canavial seriam nulas, logo deixariam de ser emitidos (Tabela 39) 1.159,3 CO₂eq/ha.ano.

Por conseguinte, infere-se que essa diminuição nas emissões de GEE seria compensada pelo aumento nas emissões, devido à colheita mecânica, denotando, então, em uma redução líquida de 83% nas emissões originadas da queima da palha na ocasião da colheita. Tendo em vista essa diminuição, a substituição da colheita manual pela mecanizada configura-se em alternativa viável para tornar o processo produtivo da COMVAP mais sustentável.

6.3 Ecoeficiência na produção de etanol e de açúcar

Destaca-se que os elementos de ecoeficiência buscam esclarecer as tomadas de decisões dos empreendedores, na medida em que se consubstanciam em metas que as empresas almejam para reduzir o consumo de recursos, o impacto sobre a natureza e para aumentar o valor do produto. Todavia, a avaliação dos elementos de ecoeficiência requer a identificação de indicadores que reflitam o impacto econômico e o ambiental de determinado produto.

Nesse sentido, enfatiza-se que a avaliação dos elementos e indicadores de ecoeficiência no processo de produção de etanol e açúcar constituiu-se da verificação da quantidade dos insumos utilizados e os possíveis efeitos sobre a eficiência ambiental da atividade e da construção e análise de indicadores gerais de ecoeficiência, considerando as informações colhidas na pesquisa direta, em 2015, na usina COMVAP.

6.3.1 Elementos e indicadores de ecoeficiência na produção de etanol e de açúcar

No processo de produção de etanol e de açúcar, identificaram-se os impactos ambientais relacionados com o consumo de energia, as emissões de GEE, a geração de resíduos sólidos e o uso da terra. Registra-se que tais impactos foram analisados em quatro subseções, por meio de indicadores de influência ambiental.

Adenda-se que a produção de cana de açúcar, implementada pela COMVAP em

2015, foi completada em 167 dias de safra, o que equivaleu a 3.694,03 horas efetivas de trabalho, com aproveitamento de 93,8% do tempo, redundando no cultivo de 967.427,41 toneladas de cana, das quais 152.282,14 t foram direcionadas para a produção de etanol. Com base nesse cenário, detectou-se que 3.340,530 m³ de álcool hidratado e 29.338,987 m³ de álcool anidro foram produzidos em 2015, totalizando uma produção de 32.679,517 m³ de etanol. Esse panorama possibilitou a geração de uma receita informada de R\$55.663.683,00 a um custo total comunicado de R\$50.390.400,00.

Adicionalmente, salienta-se que na safra de 2015, o montante de 815.145,269 toneladas de cana originou 1.338.292 sacas de açúcar, o que equivale a 66.914.600 kg, o qual foi responsável por uma receita de R\$ 93.390.689,00 e um custo total de R\$ 48.951.361,00, com um lucro bruto de R\$ 44.439.328,00, conforme balanço patrimonial. Assim, conheceu-se os indicadores de ecoeficiência para a dimensão valor do etanol e do açúcar, como explicitado na Tabela 51.

Tabela 51 - Indicadores de valor para o processo de produção de etanol e de açúcar da COMVAP em 2015

Indicador de valor	Valor	Unidade
<i>Etanol</i>		
(a) Quantidade produzida	32.679.517,00	L
(b) Lucro bruto	5.273.283,00	R\$
<i>Açúcar</i>		
(a) Quantidade produzida	66.914.600,00	kg
(b) Lucro bruto	44.439.328,00	R\$

Fonte: A autora (2017).

Sublinha-se que a Tabela 51 apresenta os indicadores de ecoeficiência para a dimensão valor do etanol e do açúcar distinguidos em quantidade produzida (a) e lucro (b). Salienta-se que a escolha da variável lucro bruto se deu, consoante COMVAP (2016), devido à impossibilidade de determinar o lucro líquido da produção de etanol, uma vez que existiram despesas comuns aos produtos açúcar e álcool. Destarte, o lucro bruto foi calculado subtraindo-se o custo total da produção de cada produto da receita informada pela Usina.

Dando prosseguimento à análise, determinou-se os ecoindicadores da dimensão ambiental, os quais são o consumo de energia (c), as emissões de GEE (d), a geração de resíduos sólidos (e) e o uso da terra (f). Para tanto, fez-se necessário estabelecer os indicadores ambientais de consumo energético e a emissão de GEE para a área de 12.000 hectares de cana colhidos e processados em 2015, pois na AICV esta investigação tomou como unidade funcional para obtenção dos dados do ICV, conforme a norma ABNT ISO

14040:2009, a medida de 1 hectare, cultivado com cana de açúcar por um período de 1 ano.

6.3.1.1 Consumo de energia

Sabendo que o processo produtivo da COMVAP foi responsável pelo consumo de 13.446,31 MJ/ha em 2015, calculou-se a demanda energética total da Usina (c), como exposto na Tabela 52.

Tabela 52 – Demanda energética total pela COMVAP em 2015

Item	Valor	Unidade
Consumo de energia por hectare (MJ/ha)	13.446,31	MJ/ha
Área colhida e processada (ha)	12.000,00	ha
(c) Consumo total de energia (MJ)	161.355.720,00	MJ

Fonte: A autora (2017).

Através da Tabela 52, verificou-se que o processamento da safra da COMVAP em 2015 demandou um investimento de 161.355.720 MJ. Outrossim, realça-se que não houve distinção desse montante entre o açúcar e o etanol, pois o valor estava relacionado ao cultivo da matéria-prima, que é comum a ambos. O processamento industrial, onde ocorre a separação entre o etanol e o açúcar, foi abastecido por gerador próprio, utilizando a energia proveniente da queima do bagaço da cana.

6.3.1.2 Emissões de Gases de Efeito Estufa (GEE)

De acordo com a Tabela 43, a produção sucroalcooleira da COMVAP em 2015 encarregou-se da emissão de 2.413,3 kg de CO₂eq por hectare cultivado e processado, sendo 29,9 kg CO₂eq por tonelada de cana, considerando a produtividade média de 80,6 t/ha. Assim, calculou-se a emissão total de GEE (d) pela COMVAP em 2015, como demonstrado na Tabela 53.

Tabela 53 - Emissões de Gases de Efeito Estufa pela COMVAP em 2015

Item	Valor	Unidade
Emissão de CO ₂ eq por hectare	2.413,30	kg/ha
Área colhida e processada	12.000,00	ha
(d) Emissão total de CO ₂ eq	28.959.600,00	kg

Fonte: A autora (2017).

Consoante a Tabela 53, observou-se que a atividade sucroalcooleira da COMVAP liberou 28.959.600 kg de GEE em 2015. Registra-se que esse montante foi comum às etapas produtivas de açúcar e de etanol, uma vez que foi derivado principalmente da etapa agrícola da produção da cana.

Essa constatação foi inferior às estimativas do Sistema de Estimativas de Emissões de Gases de Efeito Estufa (SEEG³⁵) para 2015, que foi de 32.543,2 kg de CO₂eq provenientes da queima de resíduos agrícolas do cultivo de cana de açúcar. Atesta que as emissões brasileiras de GEE vêm crescendo continuamente desde 1970, totalizando cerca de 4,5 Mt CO₂eq no ano de 2015, das quais a agropecuária foi responsável por cerca de 32%. Desse montante, 1% foi relacionado à queima de resíduos de cana de açúcar (SEEG, 2016).

Segundo o Instituto de Manejo e Certificação Florestal e Agrícola (IMAFLOA), as emissões de CO₂eq derivadas da queima dos resíduos da cana no Brasil passaram de 0,8 Mt em 1970 para 5,4 Mt em 2010, voltando a cair para 4,5 Mt em 2013. Contudo, ressalta que a emissão de GEE para se produzir uma tonelada de cana de açúcar reduziu 80% desde 1995, quando ocorreu a proibição da queima definida no Decreto Federal n.º 2.661, que determinava que essa prática fosse eliminada em todo o Brasil até 2021, de forma gradativa em áreas passíveis de mecanização da colheita (cuja declividade fosse inferior a 12%) e 2031, para áreas não mecanizáveis. No estado de São Paulo, onde mais de 80% da área colhida de cana na safra de 2013/2014 foi feita sem queima, as emissões de GEE foram 70% menor que a média nacional. Todavia, o Nordeste ainda não tem previsão para regularizar o fim da queima da cana (IMAFLOA, 2015).

Esse panorama assinala o benefício da extinção da queimada do canavial previamente à colheita e conforma-se em um estímulo para que essa prática seja abolida em todo o território brasileiro.

6.3.1.3 Geração de resíduos sólidos

A quantidade de resíduo sólido gerado na produção de etanol e de açúcar corresponde ao peso total do bagaço residual da cana e o peso total de torta de filtro produzida, visto que são resíduos comuns aos dois processos produtivos. Contudo, enfatiza-se que por um lado, o primeiro não pôde ser contabilizado pela Usina em virtude de ter sido

³⁵ O SEEG é uma iniciativa do Observatório do Clima que compreende a produção de estimativas anuais das emissões de GEE no Brasil, documentos analíticos sobre a evolução das emissões e um portal na internet para disponibilização de forma simples e clara dos métodos e dados gerados no sistema (SEEG, 2016).

totalmente aproveitado na geração de energia para o acionamento da mesma e outras eventualidades, e que por outro lado, essa quantidade pode ser estimada, pois consoante COMVAP (2016), cada tonelada de cana processada resulta em aproximadamente 324,07 kg de bagaço e a produção da Usina foi de 967.427,41 TC, gerando 24.123,03 t de torta de filtro na safra de 2015, como exibido na Tabela 54.

Tabela 54 - Quantidade de resíduos sólidos produzidos pela COMVAP em 2015

Item	Valor	Unidade
Quantidade de torta de filtro	24.123.030,00	kg
Quantidade de bagaço	313.514.200,00	kg
(e) Quantidade de resíduos sólidos	337.637.230,00	kg

Fonte: A autora (2017).

Por meio da Tabela 54, identificou-se a geração de 337.637.230 kg de resíduos sólidos durante o processamento da safra de 2015 da COMVAP.

Para cada mil toneladas de cana moída, as usinas produzem de 30 a 35 toneladas de torta de filtro (AQUINO, et al., 2014), o qual é um montante superior ao encontrado nesta investigação, que foi de 24,9 toneladas de torta de filtro para mil toneladas de cana. Essa diferença pode ser um indicativo de menor perda de matéria orgânica durante o processamento industrial.

Segundo Cruz et al. (2016), resíduos sólidos como bagaço, torta de filtro e levedura seca provocam degradação ambiental, que pode ser evitada por meio do reaproveitamento destes resíduos como subprodutos da cana de açúcar. Desde 1980 a torta de filtro passou a ser empregada como um subproduto orgânico para recuperação de solos exauridos ou de baixa fertilidade, fornecendo nutrientes e reduzindo os custos de adubação.

Inclusive, salienta-se que a totalidade de bagaço e de torta de filtro foi aplicada na própria Usina, seja como adubo nos campos de cultivo de cana de açúcar ou como fonte de energia para o acionamento da mesma, configurando-se em subprodutos que, em conformidade com Aquino et al. (2014), viabilizaram economicamente e ambientalmente essa produção, pois diminuíram a necessidade de compra e aplicação de fertilizantes químicos e de consumo de energia.

6.3.1.4 Uso do solo

Através da Tabela 49, verificou-se que a área necessária para produzir um quilo de açúcar e um litro de etanol, foi de 1,46 m² e 1,55m², respectivamente, o que possibilitou

calcular a proporção da área da COMVAP destinada à fabricação de açúcar e de etanol em 2015, como mostra a Tabela 55.

Tabela 55 - Uso do solo para produção de açúcar e etanol pela COMVAP em 2015

Item	Valor	Unidade
Área necessária para produção de 1kg de açúcar	1,46	m ²
Produção total de açúcar	66.914.600,00	kg
(f) Área total destinada à produção de açúcar	97.695.316,00	m ²
Área necessária para produção de 1L de etanol	1,55	m ²
Produção total de etanol diretamente de cana ¹	11.766.521,39	L
(f) Área total destinada à produção de etanol	18.238.108,15	m ²

Fonte: A autora (2017).

Nota: ⁽¹⁾ Produção calculada excluindo a quantidade de etanol que derivou do melão, conforme Figura 7. Consoante COMVAP (2016), em 2015 foram geradas 63.376,55 t de melão, com um rendimento de 329,98 litros de etanol por tonelada de mel, o que resultou na produção de 20.912.995,61 L de etanol.

Diante do exposto na Tabela 55, detectou-se que dos 12.000 hectares cultivados e processados pela COMVAP durante a safra de 2015, 97.695.316 m² foram destinados à produção de açúcar, o que equivale a 81,4% da área total.

Acentua-se que esse cenário manifestou um montante superior ao encontrado para o Nordeste e para o Brasil em 2015, que foram de 48% e 40% da área total, respectivamente (CONAB, 2016), reforçando o foco da produção brasileira para a fabricação de etanol naquele ano.

6.3.2 Ecoindicadores consolidados

Os indicadores de ecoeficiência consolidados (IC) mostram a razão entre duas dimensões: valor e influência ambiental. O valor foi representado pela quantidade produzida (a) e o lucro bruto (b); e a influência ambiental pelos indicadores consumo de energia (c), emissões de GEE (d), geração de resíduos sólidos (e) e uso do solo (f).

Dois indicadores foram calculados para cada produto: o indicador consolidado 1 e o indicador consolidado 2. O primeiro destaca a relação, isoladamente, entre a quantidade de produto e as variáveis ambientais, enquanto o segundo expõe a razão entre o lucro e as variáveis ambientais.

$$\text{IC 1} = \frac{\text{Quantidade de etanol/açúcar (a)}}{\text{Impacto ambiental (c), (d), (e) ou (f)}}$$

$$\text{IC 2} = \frac{\text{Lucro (b)}}{\text{Impacto ambiental (c), (d), (e) ou (f)}}$$

Ressalta-se que, por um lado, no contexto desta dissertação, o sistema produtivo foi considerado ecoeficiente para determinada categoria de impacto ambiental se ambos IC1 e IC2 forem maiores (>) que 1,0. E que, por outro lado, o sistema produtivo não foi considerado ecoeficiente para determinada categoria de impacto ambiental se ambos IC1 e IC2 forem menores ou iguais (\leq) a 1,0.

Demonstra-se na Tabela 56, os indicadores de ecoeficiência consolidados para o processo de produção de etanol pela COMVAP em 2015.

Tabela 56 - Indicadores de ecoeficiência consolidados no processo de produção de etanol pela COMVAP em 2015

Indicadores de ecoeficiência	Ecoindicador Consolidado 1			Ecoindicador Consolidado 2		
	Fórmula	Valor	Unidade	Fórmula	Valor	Unidade
c	a/c	0,20	L/MJ	b/c	0,03	R\$/MJ
d	a/d	1,13	L/kg	b/d	0,18	R\$/kg
e	a/e	0,09	L/kg	b/e	0,01	R\$/kg
f	a/f	1,79	L/m ²	b/f	0,28	R\$/m ²

Fonte: A autora (2017).

Em consonância com a Tabela 56, verificou-se que, quanto ao consumo de energia, relativamente ao IC1, para cada 1 MJ de energia consumida, gerou-se 0,2 L de etanol. Realça-se que esse cenário evidenciou baixa eficiência, devido revelar grande consumo de energia por litro de álcool produzido. E que referente ao IC 2, revelou uma contribuição de R\$0,03 ao lucro bruto para cada 1 MJ de energia consumida, o que expressou pouca agregação de valor por 1 MJ que entrou no sistema de produção, na medida em que cada MJ de energia fóssil consumida rendeu apenas três centavos de Real, em lucro bruto.

Concernente à emissão de GEE, o IC 1 mostrou que cada kg de CO₂eq emitido gerou 1,13 L de etanol, constituindo um certo grau de eficiência. Já o IC 2 indicou que cada kg de emissão produziu R\$ 0,18 de lucro bruto, sinalizando pouca eficiência na emissão de GEE.

No tocante à geração de resíduos sólidos, o IC 1 atestou que para cada kg de resíduo, produziu-se apenas 0,09 L de etanol, denotando um lucro bruto de R\$0,01 (IC 2), apontando pouca eficiência nesse quesito na fabricação de álcool, ou seja, houve uma grande produção de resíduo e pouco lucro. Como exposto anteriormente, reconheceu-se que o aproveitamento

do bagaço e da torta de filtro, pelas características naturais próprias, criaram uma compensação na geração de resíduos.

O IC 1 para o uso do solo manifestou que para cada m² cultivado, houve a fabricação de 1,79 L de etanol, enquanto o IC 2 exprimiu o lucro bruto de R\$0,28 por m² de terra. Ressalta-se que esse panorama assinalou eficiência no tocante ao uso do solo para produção de etanol, principalmente no que concerne a quantidade de etanol.

A Tabela 57 exhibe os indicadores de ecoeficiência consolidados para o processo de produção de açúcar pela COMVAP em 2015.

Tabela 57 - Indicadores de ecoeficiência consolidados no processo de produção de açúcar pela COMVAP em 2015

Indicadores de ecoeficiência	Ecoindicador Consolidado 1			Ecoindicador Consolidado 2		
	Fórmula	Valor	Unidade	Fórmula	Valor	Unidade
c	a/c	0,41	kg/MJ	b/c	0,27	R\$/MJ
d	a/d	2,31	kg/kg	b/d	1,53	R\$/kg
e	a/e	0,19	kg/kg	b/e	0,13	R\$/kg
f	a/f	0,68	kg/m ²	b/f	0,45	R\$/m ²

Fonte: A autora (2017).

Consoante a Tabela 57, observou-se que o IC 1, alusivo ao consumo de energia, mostrou que para cada 1 MJ de energia consumida, produziu-se 0,41 kg de açúcar, o que denotou baixa eficiência, uma vez que o indicador ambiental foi maior que o de valor, explicitando que ocorreu consumo excessivo de energia por quilograma de açúcar produzido. O IC 2 patenteou uma contribuição de R\$0,27 ao lucro bruto para cada 1 MJ de energia consumida, o que demonstrou pouca agregação de valor por 1MJ que entrou no sistema de produção, na medida em que cada MJ de energia fóssil consumida gerou apenas vinte e sete centavos de Real, em lucro bruto.

Concernente à emissão de GEE, o IC 1 apontou que cada kg de CO₂eq emitido gerou 2,31 kg de açúcar, caracterizando eficiência na produção, pois o indicador consolidado foi maior que um (>1). Já o IC 2 ilustrou que cada kg de emissão produziu R\$ 1,53 (>1) de lucro bruto, implicando em ecoeficiência na emissão de GEE.

O IC 1 para a geração de resíduos sólidos revelou que para cada kg de resíduo, produziu-se apenas 0,19 kg de açúcar e o IC 2 evidenciou um lucro líquido de R\$0,13, sinalizando pouca eficiência na geração de resíduos sólidos na produção de açúcar, ou seja, houve uma grande formação de resíduo e pouca geração de lucro por produto.

Quanto ao uso da terra, o IC 1 manifestou que para cada m² de terra cultivada, houve a fabricação de 0,68kg de açúcar, enquanto o IC 2 expressou o lucro bruto de R\$0,45 por m² de terra. Acentua-se que esses resultados assinalaram baixa eficiência no uso da terra.

De acordo com a ISO 14045:2014, a ecoeficiência é um conceito relativo e um sistema de produto pode ser apenas classificado como mais ou menos ecoeficiente em relação a outro sistema de produto. Portanto, assentado nessa contextualização, apresenta-se na Tabela 58 os resultados da avaliação para os sistemas produtivos de açúcar e de etanol.

Tabela 58 - Resultados relativos da análise de ecoeficiência de acordo com as categorias de impacto escolhidas para a produção da COMVAP em 2015

Resultado da análise de ecoeficiência	Indicador consolidado 1		Indicador consolidado 2	
	Açúcar	Etanol	Açúcar	Etanol
Consumo de energia	0,41	0,20	0,27	0,03
Emissões de GEE	2,31	1,13	1,53	0,18
Resíduos sólidos	0,19	0,09	0,13	0,01
Uso do solo	0,68	1,79	0,45	0,28

Fonte: A autora (2017).

A partir da Tabela 58, inferiu-se que, mesmo sem uma avaliação temporal de desempenho da atividade, a produção de açúcar apresentou maior ecoeficiência nas categorias consumo de energia, emissões de GEE e geração de resíduos sólidos, considerando a relação entre a quantidade do produto e as variáveis ambientais, e entre o lucro e as mesmas. Evidencia-se que, quanto ao uso do solo, o sistema produtivo de açúcar foi mais ecoeficiente do que o de etanol, segundo o lucro bruto gerado. Todavia, o sistema produtivo de etanol foi mais ecoeficiente quanto ao uso do solo no tocante à quantidade produzida. Esse panorama pode ser explicado pelo uso do melaço residual do processamento industrial da fabricação de açúcar, como fonte de etanol, diminuindo a quantidade de cana plantada direcionada a essa produção.

Consoante Silalertruksa, Gheewala e Pongpat (2015), a vantagem de calcular o indicador de ecoeficiência de maneira relativa entre dois sistemas de produto, assenta-se em evitar o problema de unidades desconhecidas e viabilizar comparações sucessivas para um mesmo sistema ao longo do tempo.

Alicerçado na impossibilidade de confrontar o resultado da referida pesquisa com o resultado desta dissertação, salienta-se o enfrentamento dessa dificuldade ao longo deste estudo, em função do reconhecimento de que para comparar os resultados de ecoeficiência faz-se mister que os indicadores e o escopo sejam semelhantes para garantir uma comparação justa. Destarte, registra-se que não se encontrou na literatura, no período desta pesquisa,

outros trabalhos que analisaram a ecoeficiência da produção de açúcar e de etanol embasado na norma ABNT ISO 14045:2014 e nos mesmos parâmetros.

Por conseguinte, depreendeu-se que os ecoindicadores propostos, através da combinação de indicadores econômicos e ambientais, foram úteis para comparar a ecoeficiência dos sistemas produtivos de açúcar e de etanol em 2015, na qual a produção de açúcar obteve maior ecoeficiência em três dos quatro parâmetros estudados. Contudo, registra-se a necessidade de buscar alternativas para tornar ambos os sistemas mais ecoeficientes, com vistas a gerar mais lucro e minimizar os impactos negativos sobre o meio ambiente, principalmente no que diz respeito ao consumo de energia fóssil, devido à parca quantidade de etanol e de açúcar gerada, o baixo lucro por MJ consumido, e a emissão de GEE, que obteve lucro baixo para cada kg de GEE emitido. Entretanto, não obstante esse panorama, ressalta-se que a atividade da COMVAP e a produção sucroalcooleira de 2015 provocaram reduzido impacto sobre o meio ambiente.

7 CONCLUSÃO

Conforme a pesquisa em foco, identificou-se que a atividade canavieira é importante para a economia do Brasil, por consubstanciar-se em matéria-prima para dois produtos impactantes no mercado, o açúcar e o etanol. Salienta-se que o primeiro é predominante na dieta moderna, pois diariamente encontra-se presente na forma básica, através do adoçamento, ou na processada, em massas, refrigerantes, pães, etc. E que o segundo está constantemente na vida dos brasileiros, por meio do abastecimento de veículos, puro ou misturado com gasolina. Ademais, é relevante como fonte de energia renovável, diminuindo a necessidade de energia fóssil, contribuindo para o bem estar do meio ambiente, por reduzir a carga de poluentes lançados na atmosfera, devido à queima de combustíveis derivados de petróleo.

Todavia, apesar desse cenário, realça-se que o cultivo da cana de açúcar e o processamento industrial do açúcar e do etanol são causadores de impactos ambientais negativos, haja vista a ocorrência de desmatamento para plantação de canaviais, a excessiva demanda hídrica no cultivo, a perda de biodiversidade, a erosão e o declínio da fertilidade do solo, o uso de agroquímicos, a poluição da água, a demanda de combustíveis fósseis nas etapas de processamento, a geração de resíduos de transformação, entre outros. Portanto, a despeito do álcool e do açúcar serem benéficos para a economia do Brasil e do mundo, é essencial que medidas sejam tomadas para assegurar que a produção possa ser considerada vantajosa para o meio ambiente e a população.

Em função dessa contextualização, reconheceu-se a necessidade de investigar se a produção sucroalcooleira no Piauí se processa de forma ecoeficiente. Nesse sentido, constatou-se a hipótese levantada nesta dissertação, de que a produção de açúcar e de álcool no estado em 2015 não ocorreu de forma ecoeficiente.

Dessa maneira, destaca-se que a análise da ecoeficiência na produção de etanol revelou grande consumo de energia fóssil por litro de produto, ainda que o processamento industrial tenha sido completamente abastecido por energia proveniente da queima do bagaço da própria cana de açúcar cultivada no local.

Sublinha-se que o rendimento energético líquido calculado de 124.951,95 MJ/ha.ano sinaliza que o sistema produtivo de etanol gerou mais energia do que consumiu, mesmo que ela tenha sido direcionada majoritariamente à produção de açúcar, e que essa energia produzida foi considerada renovável por derivar de matéria vegetal. Ademais, o balanço

energético de 10,3:1 MJ indica que essa energia renovável foi 10,3 vezes maior que a energia fóssil que adentrou o sistema produtivo. Ainda assim, a produção de etanol consumiu energia fóssil em excesso, e gerou resíduos sólidos e líquidos, ainda que orgânicos e reciclados, em quantidades abundantes.

Outrossim, enfatiza-se que referente às emissões de GEE e a quantidade de etanol produzido, o sistema produtivo da COMVAP foi considerado eficiente, reduzindo o efeito potencial para o efeito estufa ao minimizar a emissão de poluentes atmosféricos, na medida em que apresentou um indicador positivo relativamente às emissões aéreas. Contudo, notou-se que esse panorama não resultou em ecoeficiência porque, ao analisar conjuntamente os ecoindicadores consolidados para emissão de GEE, o lucro bruto associado ao produto final não foi maior do que o impacto causado pelo seu processo produtivo.

Com base na pesquisa, verificou-se que a ecoeficiência na produção de açúcar foi muito semelhante à do álcool, ao demonstrar o consumo excessivo de energia fóssil, a geração descomedida de resíduos sólidos e o elevado uso da terra por quilograma de produto, unidos à baixa quantidade de açúcar produzido e de lucro bruto agregado. Todavia, concernente às emissões de GEE, o sistema foi considerado ecoeficiente pois ambos os ecoindicadores consolidados para esse parâmetro foram positivos, apontando que a quantidade de açúcar e o lucro bruto associado foram maiores do que os impactos que seu sistema produtivo causou quanto às emissões de GEE. Assim, os ecoindicadores investigados revelaram que não obstante o reaproveitamento dos resíduos sólidos e líquidos, a produção de açúcar na COMVAP foi parcialmente ecoeficiente em 2015.

Logo, comprovou-se a hipótese sugerida nesta pesquisa, pois dos oito parâmetros analisados (consumo de energia fóssil, emissão de GEE, geração de resíduos sólidos e uso do solo para os sistemas produtivos de açúcar e etanol), apenas um pôde ser considerado ecoeficiente, o que levou à conclusão de que a produção de açúcar e de álcool no Piauí em 2015 não ocorreu de forma ecoeficiente.

Comparativamente, o sistema produtivo de açúcar obteve melhores resultados que o de álcool no que diz respeito ao consumo de energia fóssil, às emissões de GEE e à geração de resíduos sólidos, por ter evidenciado maior valor e menor impacto ambiental negativo durante a produção do que durante a produção do álcool. Porém, por outro lado, detectou-se que quanto ao uso do solo, a produção de etanol foi mais ecoeficiente, em função do aproveitamento de resíduo do processamento da cana, o melaço, em parte do processo produtivo.

Dessa maneira, reconheceu-se a necessidade de estudos técnicos que permitam encontrar alternativas para aumentar os indicadores de valor analisados para o açúcar e o etanol. Nessa perspectiva, patenteia-se que em virtude da matéria-prima ser responsável pela maior parte dos custos de produção do etanol, é imperativo que impactos expressivos ocorram na fase agrícola, em particular através de redução de custos, que possibilita a elevação da produtividade de toneladas de cana de açúcar por hectare/ano, derivado da introdução de novas variedades de cana, mais adaptadas ao solo, ao clima e ao regime pluviométrico da região. E por meio da otimização do uso do diesel e da mudança dos sistemas que empregam diesel, do controle biológico de pragas e do desenvolvimento de tecnologias para evitar os efeitos de possíveis estiagens e adequação do processo de colheita.

Além disso, frisa-se que durante o processamento industrial, é essencial que haja melhorias nas diversas etapas da produção, como eliminação da lavagem da cana, potencialização da moagem e da fermentação, e o aumento do grau alcoólico do vinho. Ressalta-se, ainda, que outra forma de incorporar valor aos produtos da indústria sucroalcooleira consiste na venda da energia produzida pela queima do bagaço para a concessionária de distribuição de energia elétrica. E que, apesar desse panorama, o lucro obtido pela venda de energia da COMVAP não foi contabilizado nesta investigação, derivado da impossibilidade de direcionar esse lucro para um dos produtos analisados.

Ao mesmo tempo, acentua-se que a realização desta pesquisa foi alvo de dificuldades quanto ao acesso de dados, principalmente na etapa de inventário, devido à impossibilidade de obter informações exatas das quantidades de insumos e defensivos aplicados, da água utilizada na irrigação e da quantidade e proporção do maquinário agrícola usado na safra, o que obrigou o uso de estudos similares na literatura. Acrescenta-se que não obstante esse procedimento, os dados viabilizaram o entendimento do nível de impacto ambiental da atividade. Inclusive, porque o levantamento de parâmetros da produção de açúcar e de etanol no Piauí foi fator importante como comparativo para outros estabelecimentos sucroalcooleiros em condições análogas à COMVAP, interessados em avaliar o nível de impacto sobre o meio ambiente.

Por conseguinte, concluiu-se que a produção de etanol e a de açúcar no Piauí, ainda que a Usina não tenha adotado os princípios de ecoeficiência como uma prática cotidiana, foi pouco agressiva ao meio ambiente, mas não obteve indicadores de valor adequados para ser considerada ecoeficiente. Sendo assim, compreendeu-se que a ecoeficiência como premissa para a produção de etanol e de açúcar pode garantir, ao longo do tempo, a elevação do desempenho econômico.

REFERÊNCIAS

ABNT. ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **Conheça a ABNT**. 2016. Disponível em: <<http://www.abnt.org.br/abnt/conheca-a-abnt>>. Acesso em: 29 jun. 2016.

_____. ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR ISO 14040:2009**. Gestão ambiental - Avaliação do ciclo de vida - Princípios e estrutura. 2009.

_____. ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR ISO 14044:2009**. Gestão ambiental - Avaliação do ciclo de vida - Requisitos e orientações. 2009.

_____. ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR ISO 14045:2014**. Gestão ambiental - Avaliação da eco eficiência de sistemas de produto - Princípios, requisitos e orientações. 2014.

ABRAMOVAY, R. Eficiência e contestação socioambiental no caminho do etanol brasileiro. **Política externa**, USP, v.17, n. 2, 2008.

ALCARDE, A. R. **Processamento da cana de açúcar**. Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária – Embrapa, 2007.

ALCOPAR. ASSOCIAÇÃO DE PRODUTORES DE BIOENERGIA DO ESTADO DO PARANÁ. **Estatísticas**. 2016. Disponível em: <<http://www.alcopar.org.br>>. Acesso em: 5 mar. 2016.

ALMEIDA, A. R.; GONÇALVES, F. W. A. S. **COMVAP: uma história de suor e sangue**. Teresina: CEPAC, 1990.

ALVES, B. J. R.; BODDEY, R. M.; URQUIAGA, S. **Mitigação das emissões de gases efeito estufa pelo uso de etanol da cana de açúcar produzido no Brasil**. 2009. Circular Técnica, EMBRAPA, Seropedica - RJ, 13p.

ANDRADE JUNIOR, A. S.; BASTOS, E. A.; RIBEIRO, V. Q.; DUARTE, J. A. L. Níveis de água, nitrogênio e potássio por gotejamento subsuperficial em cana de açúcar. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, Brasília, v. 47, n. 1, p. 76-84, 2012.

ANDRADE, M. C. **A terra e o homem do Nordeste**. 4. ed. São Paulo: Ciências Humanas, 1980. 278p.

_____. **Formação territorial e econômica do Brasil**. Recife: Massangana, 2007. 310p.

ANFAVEA. ASSOCIAÇÃO NACIONAL DOS FABRICANTES DE VEÍCULOS AUTOMOTORES. **Anuário da Indústria Automobilística Brasileira**. 2016. Disponível em: <<http://www.anfavea.com.br/anuario.html>>. Acesso em: 22 fev. 2016.

ANP. AGÊNCIA NACIONAL DO PETRÓLEO, GÁS NATURAL E BIOCOMBUSTÍVEIS. **Anuário estatístico brasileiro do petróleo, gás natural e biocombustíveis 2015**. Rio de Janeiro: MME, ANP, 2015. 249p

_____. AGÊNCIA NACIONAL DO PETRÓLEO, GÁS NATURAL E BIOCOMBUSTÍVEIS. **SLP** – Sistema de Levantamento de Preços. 2016. Disponível em: <http://www.anp.gov.br/preco/prc/Resumo_Ultimos_Meses_Index.asp>. Acesso em 20 mai. 2016.

AQUINO, J. A.; BIDÔ, E. S.; GALVÃO, M. L. M; OLIVEIRA, V. N. Etanol da cana de açúcar: possibilidades energéticas da região de Ceará-Mirim-RN. **Holos**, v. 30, n. 01, p. 105-125, 2014.

BANDEIRA, W. J. Notas sobre a posse e uso da terra no Piauí. **Carta CEPRO**, Teresina, v. 7, n. 1, p. 29-56, jan./jul. 1981.

BARTRA, J.; MULLOL, J.; CUVILLO, A.; DÁVILA, I.; FERRER, M.; JÁUREGUI, I. Air pollution and allergens. **Journal of investigational allergology and clinical immunology**, Spain, v. 17, n. 2, p. 3-8, 2007.

BASF. **Estratégia e organização**. 2016. Disponível em: <<https://www.basf.com/br/pt.html>>. Acesso em 07 jun. 2016.

BEN. **Balanco Energético Nacional**. 2015. Ministério de Minas e Energia, Brasília, 155p.

BNDES. **Bioetanol de cana de açúcar** - Energia para o desenvolvimento sustentável. 2008. CEPAL, v. 1, Rio de Janeiro, p. 72-76.

BODDEY, R. M.; SOARES, L. H. B.; ALVES, B. J. R.; URQUIAGA, S. **Biofuels, solar and wind as renewable energy systems**. Bio-ethanol production in Brazil. 2008. In: PIMENTEL, D. (Ed.), New York, USA, Springer, p. 321-356.

BRASIL. Decreto n.º 19.717, de 20 de fevereiro de 1931. Estabelece a aquisição obrigatória de álcool, na proporção de 5% da gasolina importada, e dá outras providências. **Diário Oficial da União**, Poder Executivo, Brasília, DF, 13 mar. 1931a. Seção 1, p. 3736.

_____. Decreto n.º 20.356, de 1º de setembro de 1931. Institui, no Ministério da Agricultura, o serviço de fiscalização técnica das medidas decretadas pelo Governo com o intuito de desenvolver, no país, o uso do álcool-motor e dá outras providências. **Diário Oficial da União**, Poder Executivo, Brasília, DF, 11 set. 1931b.

_____. Decreto n.º 20.761, de 7 de dezembro de 1931. Cria a Comissão de Defesa da Produção do Açúcar e dá outras providências. **Diário Oficial da União**, Poder Executivo, Brasília, DF, 10 dez. 1931c. Seção 1, p. 19733.

_____. Decreto n.º 21.010, de 1º de Fevereiro de 1932. Aprova o regulamento para execução do decreto n.º 20.761, de 7 de dezembro de 1931. **Diário Oficial da União**, Poder Executivo, Brasília, DF, 20 fev. 1932a. Seção 1, p. 3050.

_____. Decreto n.º 22.152, de 28 de novembro de 1932. Limita a produção de açúcar no território nacional, incrementa o fabrico do álcool-motor, e dá outras providências. **Diário Oficial da União**, Poder Executivo, Brasília, DF, 30 nov. 1932b. Seção 1, p. 21819.

_____. Decreto n.º 22.789, de 1º de Junho de 1933. Cria o Instituto do Açúcar e do Álcool e

dá outras providências. **Diário Oficial da União**, Poder Executivo, Brasília, DF, 6 jun. 1933. Seção 1, p. 11195.

_____. Decreto-Lei n.º 737, de 23 de setembro de 1938. Torna obrigatória a adição de álcool anidro à gasolina produzida no país, qualquer que seja o método ou processo de sua fabricação, e dá outras providências. **Diário Oficial da União**, Poder Executivo, Brasília, DF, 26 set. 1938. Seção 1, p. 19269.

_____. Lei n.º 9.433, de 8 de janeiro de 1997. Institui a Política Nacional de Recursos Hídricos, cria o Sistema Nacional de Gerenciamento de Recursos Hídricos e dá outras Providências. **Diário Oficial da União**, Poder Executivo, Brasília, DF, 9 jan. 1997a.

_____. Lei n.º 9.478, de 6 de agosto de 1997. Dispõe sobre a política energética nacional e as atividades relativas ao monopólio do petróleo, cria o Conselho Nacional de Política Energética (CNPE) e a ANP. **Diário Oficial da União**, Poder Executivo, Brasília, DF, 7 ago. 1997b.

_____. Lei n.º 9.605, de 12 de fevereiro de 1998. Dispõe sobre as sanções penais e administrativas derivadas de condutas e atividades lesivas ao meio ambiente, e dá outras providências. **Diário Oficial da União**, Poder Executivo, Brasília, DF, 13 fev. 1998a.

_____. Decreto n.º 2.661, de 8 de julho de 1998. Regulamenta o parágrafo único do Art. 27 da Lei n.º 4.771, de 15 de setembro de 1965, mediante o estabelecimento de normas de precaução relativas ao emprego do fogo em práticas agropastoris e florestais, e dá outras providências. **Diário Oficial da União**, Poder Executivo, Brasília, DF, 9 jul. 1998b.

_____. Lei n.º 9.782, de 26 de janeiro 1999. Define o Sistema Nacional de Vigilância Sanitária, cria a Agência Nacional de Vigilância Sanitária, e dá outras providências. **Diário Oficial da União**, Poder Executivo, Brasília, DF, 27 jan. 1999.

_____. Decreto n.º 6.961, de 17 de setembro de 2009. Aprova o zoneamento agroecológico da cana-de-açúcar e determina ao Conselho Monetário Nacional o estabelecimento de normas para as operações de financiamento ao setor sucroalcooleiro, nos termos do zoneamento. **Diário Oficial da União**, Poder Executivo, Brasília, DF, 18 set. 2009.

_____. Lei n.º 12.651, de 25 de maio de 2012. Dispõe sobre a proteção da vegetação nativa e dá outras Providências. **Diário Oficial da União**, Poder Executivo, Brasília, DF, 28 mai. 2012.

_____. MINISTÉRIO DE AGRICULTURA, PECUÁRIA E ABASTECIMENTO. **Brasil é líder mundial no setor de agroenergia**. Brasília: MAPA, 2011. Disponível em: <<http://www.agricultura.gov.br/comunicacao/noticias/2011/12/brasil-e-lider-mundial-no-setor-de-agroenergia>>. Acesso em: 10 set. 2015.

_____. MINISTÉRIO DE AGRICULTURA, PECUÁRIA E ABASTECIMENTO. **Cana-de-Açúcar**. Brasília: MAPA, 2014. Disponível em: <<http://www.agricultura.gov.br/vegetal/culturas/cana-de-acucar>>. Acesso em: 12 set. 2015.

_____. MINISTÉRIO DAS RELAÇÕES EXTERIORES. **Banco Mundial**. 2016. Disponível em: <<http://www.itamaraty.gov.br/pt-BR/politica-externa/diplomacia-economica-comercial-e>>

financeira/120-banco-mundial>. Acesso em 19 mai. 2016.

BREHMER, B.; SANDERS, J. Assessing the current Brazilian sugarcane industry and directing developments for maximum fossil fuel mitigation for the international petrochemical market. **Biofuels, Bioproducts & Biorefining**, n. 3, p. 347-360, 2009.

BUARQUE, D. C.; BUARQUE, D. C.; PEDROSA, V. A. **Critérios de demandas hídricas para a outorga de uso da água**: setor sucro-alcooleiro. XV Simpósio Brasileiro de Recursos Hídricos, Curitiba, 2003.

CAMPOS, A. T.; CAMPOS, A. T.; KLOSOWSK, E. S.; SOUZA, C. V.; ZANINI, A. Análise energética da produção de soja em sistema plantio direto. **Global science and technology**, v. 02, n. 02, p.38 - 44, mai/agos. 2009.

CANO, W. América Latina: notas sobre a crise atual. **Economia e sociedade**, v. 18, n. 3 Campinas, dez. 2009. 19 p.

CASTRO, S. S.; ABDALA, K.; SILVA, A. A. A expansão da cana de açúcar no cerrado e no estado de Goiás: elementos para uma análise espacial do processo. **Boletim Goiano de Geografia**, Goiânia, v. 30, n. 1, p. 171-191, jan./jun. 2010.

CEBDS. CONSELHO EMPRESARIAL BRASILEIRO PARA O DESENVOLVIMENTO SUSTENTÁVEL. **Relatório de Sustentabilidade Empresarial**. 2007. Disponível em: <<http://cebds.org/>>. Acesso em: 12 abr. 2016.

CEPRO. **Piauí em números**. Fundação CEPRO, 10. ed. Teresina, 2013.

CLANCY, J. S. Are biofuels pro-poor? Assessing the evidence. **The European journal of development research**, The Netherlands, v. 20, n. 3, p. 416-431, 2008.

CNA. **Ativos Cana de açúcar**. Confederação da agricultura e pecuária do Brasil, Brasília, n. 9, nov. 2014.

CODATO, A. N. Uma história política da transição brasileira: da ditadura militar à democracia. **Revista de Sociologia e Política**, Curitiba, n. 25, p. 83-106, nov. 2005.

COMVAP. Comparativo de safras: resumo anual. **Relatório**. 2015.

_____. **Relatório acerca da safra 2015**. Teresina, 2016.

CONAB. COMPANHIA NACIONAL DE ABASTECIMENTO. **Acompanhamento da safra brasileira**: cana de açúcar. Safra 2015/16, v. 2, n. 4, Brasília, p. 1-76, abril 2016.

_____. COMPANHIA NACIONAL DE ABASTECIMENTO. Séries históricas de área plantada, produtividade e produção, relativas às safras 2005/06 a 2014/15 de cana-de-açúcar. **Relatório**. 2014. Disponível em: <<http://www.conab.gov.br/conteudos.php?a=1252&ordem=produto>>. Acesso em: 24 fev. 2015.

CRUZ, I. S.; ANDRADE, I. C.B.; SOUZA, R. R. S.; FACCIOLI, G. F. Gestão ambiental ISO 14001 nas indústrias sucroalcooleiras em Sergipe. **Interfaces Científicas - Exatas e**

Tecnológicas, Aracaju, v. 2, n. 1, p. 51-60, fev. 2016.

CUNHA, S. P.; SEVERO FILHO, W. A. Avanços tecnológicos na obtenção de etanol a partir de sorgo sacarino. **Tecno-lógica**, Santa Cruz do Sul, v.14, n.2, p.69-75, 2010.

DAROS, E.; OLIVEIRA, R. A.; BARBOSA, G. V. S. **45 anos de variedades RB de cana-de-açúcar**: 25 anos de RIDESA. 1. ed. Curitiba: Graciosa, 2015. 156p.

DIAZ, M. A. D. **Análise do ciclo de vida do etanol brasileiro visando à certificação ambiental**. 2011. 115 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Mecânica), Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro, 2011.

EARTH INSTITUTE. **Solutions for sustainable development**. 2016. Disponível em: <<http://www.earthinstitute.columbia.edu/articles/view/1791>>. Acesso em 07 jun. 2016.

ELIA NETO, A. **Gestão dos recursos hídricos na agroindústria canavieira**. 2005. Disponível em: <www.unica.com.br/download.php?idSecao=17&id=12610505>. Acesso em 15 jul. 2016.

EMBRAPA. EMPRESA BRASILEIRA DE PESQUISA AGROPECUÁRIA. **Balanco energético da produção de etanol a partir de cana-de-açúcar e redução na emissão de gases de efeito estufa (GEE)**. 201?. Disponível em: <<https://www.embrapa.br/busca-de-produtos-processos-e-servicos/-/produto-servico/874/balanco-energetico-da-producao-de-etanol-a-partir-de-cana-de-acucar-e-reducao-na-emissao-de-gases-de-efeito-estufa-GEE>>. Acesso em 05 mar. 2016.

_____. **Destilação**. 2016. Disponível em: <http://www.agencia.cnptia.embrapa.br/gestor/cana-de-acucar/arvore/CONTAG01_106_22122006154841.html>. Acesso em 23 jun. 2016.

FERREIRA, A. L.; TSAI, D. S.; CREMER, M. S.; CUNHA, K. B.; VISCONDI, G. F. **Evolução das emissões de gases de efeito estufa no Brasil (1970-2013)**: setor de energia e processos industriais. Instituto de Energia e Meio Ambiente (IEMA), São Paulo: Observatório do Clima, 2015. 64p.

FISCHER, G.; TIXEIRA, E.; HIZSNYINK, E. T.; VELTHUIZEN, H. Land use dynamics and sugarcane production. In: ZUURBIER, P. e VOOREN, J. V. (Org.). **Sugarcane Ethanol: contributions to climate change mitigation and the environment**. Laxenburg: Wageniguen Academic Publishers, p. 29-62, 2008.

FIVE WINDS INTERNATIONAL. **The Role of Eco-Efficiency: Global Challenges and Opportunities in the 21st Century Part 1: Overview and Analysis**, 50 p., maio 2000.

FONSECA, M. A. P.; MARTINS, M. F. **Produção mais limpa no setor de cachaça**: estudo em um engenho no estado da Paraíba. XVII ENGEMA. São Paulo, 17 p., 30 nov. e 01 dez. 2015.

FURTADO, C. **Formação econômica do Brasil**. 34. ed. São Paulo: Companhia das letras, 2007. 352p.

GARCIA, J. C. C.; SPERLING, E. V. Emissão de gases de efeito estufa no ciclo de vida do

etanol: estimativa nas fases de agricultura e industrialização em Minas Gerais. **Engenharia Sanitaria e Ambiental**, Rio de Janeiro, v. 15, n. 3, p. 217-222, set. 2010.

GIAMPIETRO, M.; PIMENTEL, D. Assessment of the energetics of human labor. **Agriculture, Ecosystems and Environment**, Amsterdam, v. 32, 1990, p. 257-272.

GILLANI, S.T.; BELAUD, J. P.; SABLAYROLLES, C.; VIGNOLES, M.; LANN, J. M. Review of Life Cycle Assessment in Agro-Chemical Processes. **Chemical Product and Process Modeling**, v. 5, n. 1, 2010. 29 p.

GODOY, M. M. Persistência do tradicional. O processo de modernização da agroindústria canavieira do Brasil e a sobrevivência de formas produtivas não-capitalistas. **Revista Brasileira de História e Ciências Sociais**, v. 5, n. 10, dez. 2013.

GOES, T.; MARRA, R. **A expansão da cana de açúcar e sua sustentabilidade**. EMBRAPA, 2008.

GOLDENBERG, J.; COELHO, S. T.; GUARDABASSI, P. The sustainability of ethanol production from sugarcane. **Energy Policy**, v. 36, n. 6, p. 2086-2097, 2008.

GOLDENBERG, J. Ethanol for a sustainable energy future. **Science**, v. 315, p. 808-810, 2007.

GOLDENBERG, M. **A arte de pesquisar**: como fazer pesquisa qualitativa em ciências sociais. Rio de Janeiro: Record, 2005. 112 p.

HAHN-HÄGERDAL, B.; LINDEN, G.; ZACCHI, G. Bio-ethanol – the fuel of tomorrow from the residues of today. **Trends biotechnology**, n. 24, p. 549-556, 2006.

HART, S. L. **Capitalism at the Crossroads: Aligning Business, Earth, and Humanity**, 2 ed., Wharton School Publishing, USA, 2007.

HISTORY. **American Civil War History**. 2009. Disponível em: <<http://www.history.com/topics/american-civil-war/american-civil-war-history>>. Acesso em 16 mai. 2016.

IBGE. INSTITUTO BRASILEIRO DE GEOGRAFIA E ESTATÍSTICA. **Anuário Estatístico do Brasil 2015**. Rio de Janeiro, v. 75, 2015. 456 p.

_____. INSTITUTO BRASILEIRO DE GEOGRAFIA E ESTATÍSTICA. **Censo demográfico 2010**. Disponível em: <<http://www.censo2010.ibge.gov.br/>>. Acesso em: 11 fev. 2016.

_____. INSTITUTO BRASILEIRO DE GEOGRAFIA E ESTATÍSTICA. Estimativas de população para os municípios e para as Unidades da Federação brasileiros 2016. **Diário Oficial da União**, Poder Executivo, Brasília, DF, 30 ago. 2016. Disponível em: <http://www.ibge.gov.br/home/estatistica/populacao/estimativa2016/estimativa_dou.shtm>. Acesso em: 08 nov. 2016.

_____. INSTITUTO BRASILEIRO DE GEOGRAFIA E ESTATÍSTICA. **Malha digital do Piauí**. Rio de Janeiro: IBGE, 2010. Disponível em:

<ftp://geofpt.ibge.gov.br/organizacao_do_territorio/malhas_territoriais/malhas_de_setores_censitarios__divisoes_intramunicipais/censo_2010/setores_censitarios_shp/pi/> . Acesso em: ago. 2015.

IEL/SEBRAE. **O novo ciclo da cana**: estudo sobre a competitividade do sistema agroindustrial da cana de açúcar e prospecção de novos empreendimentos. Brasília: IEL/NC, SEBRAE, 2005. 337 p.

IMAFLOA. **Evolução das emissões de gases de efeito estufa no Brasil (1970-2013)**: setor agropecuário. Instituto de Manejo e Certificação Florestal e Agrícola, São Paulo: Observatório do Clima, 2015. 57 p

INGARAMO, A.; HELUANE, H.; COLOMBO, M. Water and wastewater eco-efficiency indicators for the sugar cane industry. **Journal of Cleaner Production**, v. 17, 2009, p. 487–495.

IPCC. Good Practice Guidance and Uncertainty Management in National Greenhouse Gas Inventories. In: **IPCC. 2006 IPCC Guidelines for National Greenhouse Gas Inventories**. IPCC, Suíça, 2006.

IPEA. Petróleo: da crise aos carros flex. **Desafios do Desenvolvimento**, v. 7, n. 59, mar. 2010. Disponível em: <http://www.ipea.gov.br/desafios/index.php?option=com_content&view=article&id=2321:catid=28&Itemid=23>. Acesso em: 06 jan. 2017.

ISO. INTERNATIONAL ORGANIZATION FOR STANDARDIZATION. **ISO 14000 - Environmental management**. 2016. Disponível em: <<http://www.iso.org/iso/home/standards/management-standards/iso14000.htm>>. Acesso em: 07 jun. 2016.

LEITE, R. C.; CORTEZ, L. A. B. **O etanol combustível no Brasil**. 2013. Disponível em: <https://www.agencia.cnptia.embrapa.br/Repositorio/etanol3_000g7gq2cz702wx5ok0wtedt3xdrmfk.pdf>. Acesso em 26 fev. 2016.

MACEDO. I. C. **A Energia da cana de açúcar**. Doze estudos sobre a agroindústria da cana de açúcar no Brasil e a sua sustentabilidade. São Paulo: Berlendis & Vertecchia: UNICA – União da Agroindústria Canavieira de São Paulo, 2 ed., 2007. 231p.

MACEDO, I. C. Greenhouse gas emissions and energy balances in bio-ethanol production and utilization in Brazil. **Biomass and Bioenergy**, v. 14, n. 1, p. 77 - 81, 1998.

MACEDO, I. C.; LEAL, M. R. L. V.; SILVA, J. E. A. R. **Balanço das emissões de gases do efeito estufa na produção e no uso do etanol no Brasil**. São Paulo: Secretaria de Meio Ambiente do Estado de São Paulo, 2004. 37 p.

MACEDO, I. C.; SEABRA, J. E. A.; SILVA, J. E. A. R. Greenhouse gases emissions in the production and use of ethanol from sugarcane in Brazil: The 2005/2006 averages and a prediction for 2020. **Biomass and Bioenergy**, v. 32, n. 7, p. 582 - 595, 2008.

MAGALHÃES, D.; BRUNS, R. E.; VASCONCELLOS, P. C. Hidrocarbonetos policíclicos aromáticos como traçadores da queima da cana-de-açúcar: uma abordagem estatística. **Química Nova**, v. 30, n. 3, p. 577-581, 2007.

MANZATTO, C. V.; ASSAD, E. D.; BACCA, J. F. M.; ZARONI, M. J. **Zoneamento agroecológico da cana de açúcar**. Rio de Janeiro: Embrapa Solos, 2009. 55 p.

MAPA. MINISTÉRIO DA AGRICULTURA, PECUÁRIA E ABASTECIMENTO. **Anuário estatístico da agroenergia 2012**. Secretaria de Produção e Agroenergia. Bilíngüe. Brasília: MAPA/ACS, 2013a. 284 p.

_____. MINISTÉRIO DA AGRICULTURA, PECUÁRIA E ABASTECIMENTO. **Perfil do setor do açúcar e do álcool no Brasil**. Edição para a safra 2011-2012. Brasília, v.5, p. 1 - 88, 2013b.

_____. MINISTÉRIO DA AGRICULTURA, PECUÁRIA E ABASTECIMENTO. Base cadastral completa de instituições. **Relatório**. Sistema de Acompanhamento da Produção Canavieira. Brasília, 2016. Disponível em: <<http://sistemasweb.agricultura.gov.br/sapcana/downloadBaseCompletaInstituicao.action?sgJAAplicacaoPrincipal=sapcana>>. Acesso em: 06 jan. 2017.

MARCONI, M. A.; LAKATOS, E. M. **Fundamentos de metodologia científica**. São Paulo: Atlas, 2010. 320 p.

_____. **Metodologia do trabalho científico**. São Paulo: Atlas, 2009. 228 p.

_____. **Técnicas de pesquisa**. São Paulo: Atlas, 6. ed., 2007. 290 p.

MELLO, M.C.A. **Produção mais limpa**: um estudo de caso na AGCO do Brasil. Dissertação (mestrado). Programa de Pós-graduação em Administração, UFRGS. Porto Alegre, 2002.

MELO, N. A. Do complexo rural à modernização agrícola brasileira: a modernização da agricultura paranaense e os impactos na vida rural – uma análise do programa vilas rurais no norte do Paraná. **GeoAtos**, Presidente Prudente, n. 11, v.1, p. 58-76, jan./jun. 2011.

MMA. MINISTÉRIO DO MEIO AMBIENTE. **Acordo de Paris**. 2016. Disponível em: <<http://www.mma.gov.br/clima/convencao-das-nacoes-unidas/acordo-de-paris>>. Acesso em: 08 nov. 2016.

MUNCK, L.; DIAS, B. G.; SOUZA, R. B. Sustentabilidade organizacional: uma análise a partir da institucionalização de práticas ecoeficientes. **REBRAE**, Curitiba, v. 1, n. 3, p. 285-295, 2008.

OECD. ORGANISATION FOR ECONOMIC CO-OPERATION AND DEVELOPMENT. 2015. **OECD-FAO Agricultural Outlook 2015**, OECD Publishing, Paris. Disponível em: <http://dx.doi.org/10.1787/agr_outlook-2015-en>. Acesso em: 02 mar. 2016.

OLIVEIRA, B. B.; FEITOSA, M. L. A. M. Regulação ambiental e responsabilidade socioambiental no setor empresarial privado. **Prim@ Facie**, Aracaju, v. 14, n. 26, p. 1-28, 2015.

- OLIVEIRA, L. M.; SERRA, J. C. V.; MAGALHÃES, K. B. M. Estudo comparativo das diferentes tecnologias utilizadas para produção de etanol. **Geoambiente online**, Jataí- GO, n. 19, jul. /dez. 2012, 23p.
- OLIVEIRA, M. E. D.; VAUGHAN, B. E.; RYKIEL JR., E. J. Ethanol as fuel: energy, carbon dioxide balances, and ecological footprint. **Bioscience**, v. 55, n. 07, jul. 2005, 10p.
- OMETTO, A. R. **Avaliação do ciclo de vida do álcool etílico hidratado combustível pelos métodos edip, exergia e emergia**. 2005. 209 f. Tese (Doutorado em Engenharia - Hidráulica e Saneamento), Escola de Engenharia de São Carlos, USP, 2005.
- ONU. **Eco-efficiency indicators: measuring resource-use efficiency and the impact of economic activities on the environment**. United Nations, ESCAP, 2009.
- OTTONI, M. A. M. Etanol da cana de açúcar: consequências sociais e ambientais. **Saber Acadêmico**, n. 09, p. 175-185, jun. 2010.
- PEARCE, F. **O aquecimento global**. São Paulo-SP: Publifolha, 2002. 72 p.
- PEDROSA, V. A. **Curva de demanda pela água para irrigação de cana de açúcar**. XVIII Simpósio Brasileiro de Recursos Hídricos, Campo Grande – MS, 2009.
- PEREIRA, C. L. F. **Avaliação de sustentabilidade ampliada de produtos agroindustriais**. Estudo de caso: suco de laranja e etanol. 2008. Dissertação (Mestrado em Engenharia de Alimentos) – Faculdade de Engenharia de Alimentos – Universidade Estadual de Campinas, Campinas.
- PEREIRA, C. P.; PAES, D. P.; PRATA, D. M.; MONTEIRO, L. P. C. Desenvolvimento de índice de comparação de ecoeficiência a partir de ecoindicadores. **Sistemas & Gestão**, v. 9, n. 2, p. 168-180, 2014.
- PIAUI. **Lei Complementar n.º 87 de 22 de agosto de 2007**. Define quatro macro regiões, onze territórios de desenvolvimento e vinte e oito aglomerados de municípios. Disponível em: <<http://legislacao.pi.gov.br/legislacao/default/ato/13144>>. Acesso em 17 mai. 2016.
- PIAUI. **Piauí passa a ter 12 Territórios do Desenvolvimento**. 2016. Disponível em: <<http://www.piaui.pi.gov.br/noticias/index/id/26562>>. Acesso em: 01 fev. 2017.
- PIMENTEL, D. **Handbook of energy utilization in agriculture**. 1980. 487 p.
- PIMENTEL, D.; PATZEK, T. Ethanol production: energy and economic issues related to U.S. and Brazilian sugarcane. **Natural Resources Research**, v. 16, n. 3, p. 235 - 242, 2007.
- PINHEIRO, N. S. **Trabalhadores migrantes no corte da cana de açúcar: precarização e exploração do trabalho**. 2013. 164 f. Dissertação (Mestrado em Serviço Social) – Centro de Ciências Humanas, Letras e Artes, Universidade Federal da Paraíba, João Pessoa, 2013.
- PRADO JUNIOR, C. **A questão agrária no Brasil**. 5. ed. São Paulo: Brasiliense, 2000. 189p.
- _____. **História econômica do Brasil**. 47. ed. São Paulo: Brasiliense, 2006. 365p.

RESENDE, A. S. D.; SANTOS, A.; XAVIER, R. P.; COELHO, C. H.; GOLDIM, A. Efeito da queima da palhada da cana-de-açúcar e de aplicações de vinhaça e adubo nitrogenado em características tecnológicas da cultura. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v. 30, p. 937-941, 2006.

ROCHA, J. Estrutura agrária do Piauí. **Carta CEPRO**, Teresina, v. 8, n. 1, p. 104-120, jan./jun. 1982.

ROSSETTO, R. A cana de açúcar e a questão ambiental. In: DINARDO-MIRANDA, L. L.; VASCONCELOS, A. C. M.; LANDELL, M. G. A. **Cana de açúcar**. Campinas: Instituto Agrônômico, 2008. 882 p.

RSB. ROUNDTABLE ON SUSTAINABLE BIOMATERIALS. **Global Principles and Criteria for Sustainable Biofuels Production**. Version Zero. EPFL, Lausanne, 9 p., 2008.

SACHS, I. Da civilização do petróleo a uma nova civilização verde. **Estudos Avançados**, Instituto de Estudos Avançados da Universidade de São Paulo, v. 19, n. 55, p. 197-214, 2005.

SALLA, D. A.; CABELLO, C. Análise energética de sistemas de produção de etanol de mandioca, cana-de-açúcar e milho. **Energia na Agricultura**, v. 25, n. 2, p. 32-53, 2010.

SALLA, D. A.; FURLANETO, F. P. B.; CABELLO, C.; KANTHACK, R. A. D. Avaliação energética da produção de etanol utilizando como matéria-prima a cana-de-açúcar. **Ciência Rural**, Santa Maria, v.39, n.8, p.2516-2520, nov. 2009.

SALING, P.; KICHERER, A.; DITTRICH-KRAMER, B.; WITTLINGER, R.; ZOMBIK, W.; SCHMIDT, I. Eco-efficiency analysis by BASF: the method. **International Journal of Life Cycle Assessment**, v. 7, n. 4, p. 203-218, 2002.

SANTANA, R. N. M. **Evolução histórica da economia piauiense**. 2. ed. Teresina: Academia Piauiense de Letras, 2001. 133p.

SANTIAGO, A. D.; ROSSETTO, R. **Preparo convencional**. Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária – Embrapa, 2007.

SANTOS, A. P. S. Perspectiva do desenvolvimento econômico para o Piauí. **Carta CEPRO**, Teresina, v. 6, n. 2, p. 29-44, jul./dez. 1980.

SCHAFFEL, S. B.; ROVERE, E. L. The quest for eco-social efficiency in biofuels production in Brazil. **Journal of Cleaner Production**, v. 18, p. 1663-1670, 2010.

SEABRA, J. E. A.; MACEDO, I. C.; CHUM, H. L.; FARONI, C. E.; SARTO, C. A. Life cycle assessment of Brazilian sugarcane products: GHG emissions and energy use. **Biofuels, Bioproducts and Biorefining**, v. 5, p. 519-532, set. 2011.

SEEG. **Base de dados de estimativa de emissões de gases de efeito estufa no Brasil: 1970-2015**. São Paulo: Observatório do Clima, v. 4.0, 2016. Disponível em: <http://plataforma.seeg.eco.br/total_emission>. Acesso em: 11 jan. 2017.

SECEX/MDIC. SECRETARIA DE COMÉRCIO EXTERIOR. MINISTÉRIO DO

DESENVOLVIMENTO, INDÚSTRIA E COMÉRCIO EXTERIOR. **Atlas Nacional de Comércio e Serviços**. Brasília, DF: MDIC, 1ª Edição, 2013. 140 p.

SICSÚ, A. B.; SILVEIRA, S. K.; FERREIRA, S. Indústrias Sucroalcooleiras de Pernambuco: mudanças recentes e seus impactos econômicos. **Economia política do desenvolvimento**, Maceió, v. 4, n. 10, p. 75-102, jan./abr. 2011.

SILALERTRUKSA, T; GHEEWALA, S. H.; PONGPAT, P. Sustainability assessment of sugarcane biorefinery and molasses ethanol production in Thailand using eco-efficiency indicator. **Applied Energy**, v. 160, p. 603 – 609, dez. 2015.

SILVA, E.; SAKATSUME, F. A política brasileira de biocombustíveis. In: **Public Policies: The Brazilian Agriculture and Agro-energy Policies**. Tema 3: The Brazilian Biofuels Policy, Agência Brasileira de Desenvolvimento Industrial, p. 31-38, 2007.

SILVA, J. G. **A nova dinâmica da agricultura brasileira**. 2. ed. Campinas, SP: UNICAMP, 1998.

SMEETS, E.; JUNGINGER, M.; FAAIJ, A.; WALTER, A.; DOLZAN, P. Sustainability of Brazilian bio-ethanol. 2006. **Relatório**. Report NWS-E-2006-110. Universiteit Utrecht Copernicus Institute, Department of Science, Technology and Society and University of Campinas, Brazil.

SOARES, L. H. B.; BIRUIR, D.; BALDOS, U. **Mitigação das emissões de gases efeito estufa pelo uso de etanol da cana de açúcar produzido no Brasil**. Seropédica, RJ: EMBRAPA, 2009, 14p. Relatório Técnico.

SUAREZ, P. A. Z.; SANTOS, A L. F.; RODRIGUES, J. P.; ALVES, M. B. A. Biocombustíveis a partir de óleos e gorduras: desafios tecnológicos para viabilizá-los. **Química Nova**, São Paulo, v. 32, n. 3, 2009.

TERRACAL. **Polo integrado no estado do Piauí**. Rio de Janeiro, 2012. Disponível em: <<http://www.terracal.com.br/atividades>>. Acesso em: 11 fev. 2016.

TETTI, L. M. R. Protocolo de Kyoto: oportunidades para o Brasil com base em seu setor sucroalcooleiro: um pouco da história da questão “mudanças climáticas e efeito estufa”. In: MORAES, M. A. F. Dias; SHIKIDA, P. F. A. (Org.). **Agroindústria canavieira no Brasil: evolução, desenvolvimento e desafios**. São Paulo: Atlas, 2002, 367p.

TURDERA, M. V.; FRANZOTTI, M.; PETERSON, G. **Otimização energética e econômica do transporte de bioetanol no Mato Grosso do Sul**. X Congresso sobre Geração Distribuída e Energia no Meio Rural, USP: São Paulo, nov. 2015.

TYNER, W. E.; TAHERIPOUR, F.; ZHUANG, O. Land use changes and consequent CO₂ emissions due to US corn ethanol production: A comprehensive analysis. **Relatório**. Department of Agricultural Economics, Purdue University, abr. 2010.

UNCTAD. UNITED NATIONS CONFERENCE ON TRADE AND DEVELOPMENT. **A manual for the preparers and users of eco-efficiency indicators**. ONU, Nova York e Genebra, 127 p., 2004.

UNICA. UNIÃO DA AGROINDÚSTRIA CANAVIEIRA DE SÃO PAULO. 2015. **Altos e baixos do etanol, do Proálcool ao flexfuel**. Disponível em: <<http://www.unica.com.br/namidia/36485489920328258727/altos-e-baixos-do-etanol-por-cento2C-do-proalcool-ao-flexfuel/>>. Acesso em: 20 mai. 2016.

_____. UNIÃO DA AGROINDÚSTRIA CANAVIEIRA DE SÃO PAULO. Relatório de Sustentabilidade. **Relatório**. 2010. Disponível em: <<http://www.unica.com.br/gri/>>. Acesso em: 24 fev. 2015.

URQUIAGA, S.; ALVES, B. J. R.; BOODEY, R. M. Produção de biocombustíveis: A questão do balanço energético. **Revista de Política Agrícola**, ano XIV – n. 1 - Jan./Fev./Mar. 2005.

VELLOSO, J. P. R. **O vale da decisão**: o Piauí é rico – em grandes oportunidades. Teresina: Livros do Futuro, 2013. 90p.

VERGARA, S. **Métodos de pesquisa em administração**. São Paulo: Atlas, 2009.

VIDAL, M.F.; SANTOS, J. A. N.; SANTOS, M. A. Setor sucroalcooleiro no Nordeste brasileiro: estruturação da cadeia produtiva, produção e mercado. In: CONGRESSO DA SOCIEDADE BRASILEIRA DE ECONOMIA E SOCIOLOGIA RURAL, 44, 2006, Fortaleza. **Anais...** Fortaleza: SOBER/BNB, 2006.

VIEIRA, M. C. A. **Setor sucroalcooleiro Brasileiro**: evolução e perspectivas. BNDES. 2007.

VINHA, V. As empresas e o desenvolvimento sustentável: da ecoeficiência à responsabilidade social corporativa. In: May, P.H., Lustosa, M.C., Vinha, V. (Eds.), (Org) Economia do Meio Ambiente: Teoria e Prática. **Elsevier**, Rio de Janeiro, p. 173-195, 2009.

WBCSD. WORLD BUSINESS COUNCIL FOR SUSTAINABLE DEVELOPMENT. 2000a. **Eco-efficiency. Creating More Value with Less Impact**. Genebra.

_____. 2000b. **Measuring Eco-efficiency. A Guide to Reporting Company Performance**. Genebra.

_____. 2003. **Eco-efficiency tool box: implementing eco-efficiency**. Disponível em: <http://www.docfoc.com/eco-efficiency-tool-box-learning-unit-c-implementing-eco-efficiency-dedicated-to-making-a-difference>>. Acesso em: 14 abr. 2016.

APÊNDICE A – Roteiro de Entrevista Semiestruturada – COMVAP

Data: ___/___/___

Nº ___

Setor na empresa: Agrícola

- 1) Qual variedade de cana é cultivada na COMVAP?
- 2) Quantos hectares foram cultivados e colhidos em 2015?
- 3) Quando foi iniciado e finalizado o plantio de cana de açúcar em 2015?
- 4) Quando foi iniciado e finalizado o corte/colheita e moagem de cana de açúcar?
- 5) Como se deu a irrigação dos canaviais em 2015?
- 6) Como ocorreu o manejo da cana de açúcar?
- 7) No período da moagem, quantos caminhões, máquinas e tratores foram utilizados?
- 8) No período da moagem, quantas viagens um caminhão fez por dia? E as máquinas? E os tratores?
- 9) Qual a distância percorrida por um caminhão por dia? E uma máquina? E um trator?
- 10) Qual foi o consumo mensal de diesel para maquinários e caminhões?
- 11) Com que frequência foi feita a manutenção do maquinário agrícola e dos caminhões?
- 12) Quais foram os defensivos agrícolas utilizados? Em que quantidade?
- 13) Qual a destinação dada às embalagens desses defensivos?
- 14) Quais foram os insumos agrícolas aplicados? Em que quantidade?
- 15) Qual a destinação dada às embalagens deles?
- 16) Houve esforços para economizar recursos, água, energia? Especificar.
- 17) Há algo a ser melhorado no processo produtivo?

APÊNDICE B – Roteiro de Entrevista Semiestruturada – COMVAP

Data: ___/___/___

Nº ___

Setor na empresa: Industrial

- 1) Como se deu o processo de produção do açúcar?
- 2) Como se deu o processo de produção do etanol?
- 3) O álcool produzido a partir do melaço foi contabilizado separadamente?
- 4) Qual foi a fonte de energia dos processos?
- 5) Quantos quilogramas de bagaço tornaram-se resíduo por tonelada de cana processada?
- 6) Qual foi o destino dado à vinhaça?
- 7) Qual foi o destino dado à torta de filtro?
- 8) Onde ficaram armazenadas a cachaça e a torta de filtro?
- 9) Houve um controle acerca da quantidade de água de arrefecimento?
- 10) Como foi feito o tratamento das leveduras?
- 11) Qual foi o volume de gás emitido pelas caldeiras?
- 12) Como se deu o sistema de lavagem de gases?
- 13) Com que frequência foi medida a transmitância do caldo clarificado?
- 14) Quanto de açúcar e álcool foi produzido por tonelada de cana?
- 15) Quanta energia foi produzida diariamente?
- 16) Existe algum controle de qualidade de produtos? Quais os testes de controle de qualidade?
- 17) Há algo a ser melhorado no processo produtivo?

APÊNDICE C – Roteiro de Entrevista Semiestruturada – COMVAP

Data: ___/___/___

Nº ___

Setor na empresa: Administrativo

- 1) Quando e como foi a aquisição da Comvap?
- 2) Quais produtos são produzidos pela empresa?
- 3) Em quais mercados (interno ou externo) a empresa atua?
- 4) Qual foi o consumo mensal de energia na usina em 2015?
- 5) Qual foi o consumo diário de água, em litros, em 2015?
- 6) Quantos dias foram trabalhados no mês, durante a moagem?
- 7) Como é feita a embalagem do açúcar? Como fica armazenado o açúcar?
- 8) O corte e colheita da cana de açúcar foi manual ou mecanizado?
- 9) A empresa investe em pesquisa e desenvolvimento?
- 10) Houve algum incremento no padrão tecnológico ao longo dos anos?
- 11) A empresa adota padrões de saúde e segurança no trabalho?
- 12) Há algo a ser melhorado no processo produtivo?
- 13) Participa de algum programa de responsabilidade social?
- 14) Existe fiscalização ambiental? Qual órgão?
- 15) Qual o destino dos resíduos líquidos e sólidos na produção de açúcar e etanol?
- 16) A produção de açúcar em 2015 foi menor, igual ou maior que em anos anteriores?
- 17) Qual foi a participação da COMVAP no PIB do Piauí em 2015?
- 18) Qual foi a média de preço do quilo do açúcar comercializado pela COMVAP em 2015?
- 19) Qual foi o lucro líquido obtido da produção de açúcar pela COMVAP em 2015?
- 20) Qual foi a média de preço do litro do etanol hidratado comercializado pela COMVAP em 2015?
- 21) Qual foi a média de preço do litro do etanol anidro comercializado pela COMVAP em 2015?
- 22) Qual foi o lucro líquido obtido da produção de etanol pela COMVAP em 2015?
- 23) Qual foi a receita total das vendas de açúcar em 2015?
- 24) Qual foi a receita total das vendas de etanol em 2015?
- 25) Qual foi o custo total da produção de açúcar em 2015?
- 26) Qual foi o custo total da produção de etanol em 2015?
- 27) Onde fica o centro de distribuição do etanol produzido pela COMVAP?