

UNIVERSIDADE TECNOLÓGICA FEDERAL DO PARANÁ
DEPARTAMENTO ACADÊMICO DE MECÂNICA
CURSO DE ENGENHARIA INDUSTRIAL MECÂNICA

LUIZ FERNANDO GRABARSKI FILHO

**OTIMIZAÇÃO DA MISTURA DO BODIESEL QUANTO ÀS EMISSÕES
DE GASES DE EFEITO ESTUFA NO BRASIL**

TRABALHO DE CONCLUSÃO DE CURSO

CURITIBA
2012

LUIZ FERNANDO GRABARSKI FILHO

**OTIMIZAÇÃO DA MISTURA DO BIODIESEL QUANTO ÀS EMISSÕES
DE GASES DE EFEITO ESTUFA NO BRASIL**

Monografia do Projeto de Pesquisa apresentada à disciplina de Trabalho de Conclusão de Curso 2 do curso de Engenharia Industrial Mecânica da Universidade Tecnológica Federal do Paraná, como requisito parcial para aprovação na disciplina.

Orientador: Prof^a. Dr^a. Cássia Maria Lie Ugaya

CURITIBA

2012

TERMO DE APROVAÇÃO

Por meio deste termo, aprovamos a monografia do Projeto de Pesquisa "Otimização da Mistura do Biodiesel quanto às Emissões de Gases de Efeito Estufa no Brasil", realizado pelo aluno Luiz Fernando Grabarski Filho, como requisito parcial para aprovação na disciplina de Trabalho de Conclusão de Curso 2, do curso de Engenharia Industrial Mecânica da Universidade Tecnológica Federal do Paraná.

Prof^a. Dr^a. Cassia Maria Lie Ugaya
Damec, UTFPR
Orientadora

Prof. Dr. Alfredo Vrubel
Damec, UTFPR
Avaliador

Prof. Dr. Luiz Carlos de Abreu Rodrigues
Damec, UTFPR
Avaliador

Curitiba, 30 de outubro de 2012.

RESUMO

GRABARSKI FILHO, Luiz Fernando. **Otimização da Mistura do Biodiesel quanto às Emissões de Gases de Efeito Estufa no Brasil**. 2012. 70 p. Trabalho de Conclusão de Curso (Graduação em Engenharia Industrial Mecânica) - Universidade Tecnológica Federal do Paraná. Curitiba, 2012.

A produção e uso de biocombustíveis em substituição aos combustíveis fósseis é uma estratégia para mitigação das mudanças climáticas, através da redução da emissão de Gases de Efeito Estufa (GEE). Existem diversas fontes para produção de biocombustíveis, cada uma responsável por diferentes impactos ambientais. No Brasil, existe o Programa Nacional de Produção e Uso do Biodiesel (PNPB) que incentiva a produção e uso do biodiesel misturado ao diesel de petróleo. Sabendo que o crescimento da demanda por biodiesel poderá levar a expansão das fronteiras agrícolas, têm-se uma contradição. Por um lado, há a necessidade de substituir o diesel por um combustível renovável e, por outro, a conversão do uso do solo para produzir biodiesel pode aumentar significativamente a emissão de GEE. O objetivo deste projeto é avaliar a mistura mais adequada do biodiesel, em termos ambientais, no Brasil. São utilizadas técnicas de Pesquisa Operacional (PO) e Avaliação do Ciclo de Vida (ACV). O resultado obtido foi que, do ponto de vista do impacto ambiental mudanças climáticas, utilizar o B100 é a melhor alternativa, desde que sejam utilizadas as áreas desmatadas da Amazônia Legal para a produção de óleo de dendê (palma) como matéria-prima.

Palavras-chave: Mudanças Climáticas. Gases de Efeito Estufa (GEE). Biodiesel. Pesquisa Operacional (PO). Avaliação do Ciclo de Vida (ACV).

ABSTRACT

GRABARSKI FILHO, Luiz Fernando. **Biodiesel Blending Optimization concerning Greenhouse Gas Emissions in Brazil**. 2012. 70 p. Trabalho de Conclusão de Curso (Graduação em Engenharia Industrial Mecânica) - Universidade Tecnológica Federal do Paraná. Curitiba, 2012

Biofuels production and use replacing fossil fuels is a strategy to mitigate climate changes by reducing greenhouse gas (GHG) emissions. There are many ways to produce biofuels each one leading to different environmental impacts. Biodiesel Production and Use Nacional Program (PNPB) is a program that encourage the production and use of biodiesel and petroleum diesel blending in Brazil. There is the need to replace diesel by a renewable fuel but that can increase GHG emissions due to land use change for feedstock production. The objective is to optimize the biodiesel blending in Brazil regarding climate changes. Life Cycle Assessment (LCA) and Operational Research (OR) techniques are applied. The outcome is that from climate change point of view the best alternative is B100 provided palm oil cultivated in deforested areas of Legal Amazon is used as feedstock.

Keywords: Climate Changes. Greenhouse Gases (GHG). Biodiesel. Operational Research (OR). Life Cycle Assessment (LCA).

LISTA DE FIGURAS

FIGURA 1 – ESQUEMA EXEMPLIFICANDO O CICLO DE VIDA DE UM PRODUTO.	21
FIGURA 2 – ESQUEMA DE UMA UNIDADE DE PROCESSO MOSTRANDO AS ENTRADAS E SAÍDAS DE ENERGIA OU MATERIAL.....	22
FIGURA 3 – PLANILHA NO <i>EXCEL</i> APÓS A SOLUÇÃO DO PROBLEMA DA WYNDOR GLASS CO.....	28
FIGURA 4 – FLUXOGRAMA DO PROCESSO DE PRODUÇÃO DO BODIESEL. ..	29
FIGURA 5 – MAPA DE BIOMAS BRASILEIROS, DELIMITAÇÃO DA AMAZÔNIA LEGAL E ÁREAS DESMATADAS.....	36
FIGURA 6 – ETAPAS DO CICLO DE VIDA DO DIESEL DO PETRÓLEO.	40
FIGURA 7 – ETAPAS DO CICLO DE VIDA DO BODIESEL.....	43
FIGURA 8 – PLANILHA DO <i>MICROSOFT EXCEL 2010</i> ANTES DA APLICAÇÃO DO MÉTODO <i>SIMPLEX</i> , ATRAVÉS DA FERRAMENTA <i>SOLVER</i>	54
FIGURA 9 – JANELA DO <i>SOLVER</i> NO <i>EXCEL 2010</i> , PREENCHIDA COM OS PARÂMETROS UTILIZADOS PARA A EXECUÇÃO DO MÉTODO <i>SIMPLEX LP</i> . ..	55
FIGURA 10 – MAPA DE ZONAS CLIMÁTICAS.....	68
FIGURA 11 – MAPA DE BIOMAS (ZONAS ECOLÓGICAS).....	69
FIGURA 12 – MAPA DOS TIPOS DE SOLO.	70

LISTA DE GRÁFICOS

GRÁFICO 1 – EMISSÕES GLOBAIS DE DIÓXIDO DE CARBONO (GT CO ₂) DEVIDO À QUEIMA DE COMBUSTÍVEIS FÓSSEIS NO PERÍODO DE 1850 A 2000.	12
GRÁFICO 2 – DISTRIBUIÇÃO DAS EMISSÕES GLOBAIS DE GEE POR SETOR EM 2004.	13
GRÁFICO 3 - PRODUÇÃO GLOBAL DE BIODIESEL E ETANOL EM BILHÕES DE LITROS POR ANO, POR PAÍS, EM 2010.	15
GRÁFICO 4 – REDUÇÃO PERCENTUAL DAS EMISSÕES DE GEE, RELATIVAMENTE AO DIESEL DE PETRÓLEO, EM DIFERENTES CENÁRIOS DE PRODUÇÃO DE BIODIESEL.	17
GRÁFICO 5 - PROJEÇÃO DO CONSUMO DE COMBUSTÍVEIS FÓSSEIS NO BRASIL PARA 2020.	19
GRÁFICO 6 – PERFIL NACIONAL DAS MATÉRIAS-PRIMAS UTILIZADAS PARA PRODUÇÃO DE BIODIESEL (JULHO 2012).	30
GRÁFICO 7 – EVOLUÇÃO ANUAL DA PRODUÇÃO, DEMANDA COMPULSÓRIA E CAPACIDADE INSTALADA AUTORIZADA PELA ANP.	31
GRÁFICO 8 – CONTRIBUIÇÃO DAS EMISSÕES DE GEE DE CADA ETAPA DO CICLO DE VIDA DO ÓLEO COMBUSTÍVEL DE ACORDO COM A MATÉRIA-PRIMA E CATEGORIA DE MUDANÇA DE USO DO SOLO.	49
GRÁFICO 9 – TOTAL DE EMISSÕES DE GEE POR SOLUÇÃO EM COMPARAÇÃO COM O DIESEL PURO.	57

LISTA DE QUADROS

QUADRO 1 - ALGUNS PROGRAMAS (<i>SOLVER</i>) COMERCIAIS E LIVRES EXISTENTES NO MERCADO	25
QUADRO 2 – CATEGORIAS DE MUDANÇA DE USO NO SOLO CONSIDERANDO AS ÁREAS COM POTENCIAL DE EXPANSÃO AGRÍCOLA.....	47

LISTA DE TABELAS

TABELA 1 - PRINCIPAIS GASES DE EFEITO ESTUFA (GEE) E VALORES DE POTENCIAL DE AQUECIMENTO GLOBAL (GWP).....	23
TABELA 2 - DADOS PARA O PROBLEMA DA WYNDOR GLASS CO.....	27
TABELA 3 – PRODUTIVIDADE, TEOR DE ÓLEO E RENDIMENTO DA PRODUÇÃO DE ÓLEO VEGETAL DAS PRINCIPAIS ESPÉCIES DE OLEAGINOSAS.....	32
TABELA 4 – PODER CALORÍFICO E MASSA ESPECÍFICA DO BIODIESEL DE DENDÊ, BIODIESEL DE SOJA E DIESEL DE PETRÓLEO.	32
TABELA 5 – CLASSIFICAÇÃO DAS ÁREAS DESMATADAS NA AMAZÔNIA LEGAL, POR ESTADO, QUANTO A APTIDÃO PARA O CULTIVO DE DENDÊ.....	37
TABELA 6 – ÁREAS DO DOMÍNIO DO CERRADO APTAS À AGRICULTURA, RESPEITANDO O CÓDIGO FLORESTAL (LEI Nº 4.771/65).....	37
TABELA 7 - DISTRIBUIÇÃO NACIONAL DAS ÁREAS PLANTADAS EM 2010 E DAS ÁREAS COM POTENCIAL AGRÍCOLA DE ACORDO COM A NOMENCLATURA DO IPCC (2006).....	38
TABELA 8 - EMISSÕES DE GEE POR PROCESSO PARA A PRODUÇÃO DE 1KG DE ÓLEO DIESEL DE PETRÓLEO.	40
TABELA 9 - EMISSÕES DE GEE POR PROCESSO PARA A PRODUÇÃO DE 1KG DE BIODIESEL DE SOJA.	44
TABELA 10 - EMISSÕES DE GEE POR PROCESSO PARA A PRODUÇÃO DE 1KG DE BIODIESEL DE SOJA.	45
TABELA 11 - EMISSÕES DE GEE POR PROCESSO PARA A PRODUÇÃO DE 1KG DE BIODIESEL DE DENDÊ.....	45
TABELA 12 - DADOS UTILIZADOS PARA OS CÁLCULO DAS EMISSÕES DE GEE DEVIDO ÀS MUDANÇAS NO USO DO SOLO (ELUC) E RESULTADOS POR CATEGORIA DE MUDANÇA DE USO.....	48

LISTA DE SÍMBOLOS

ΔC_{LUC}	Varição total no estoque de carbono do solo e da biomassa
ΔC_{SO}	Varição no estoque de carbono orgânico no solo
ΔC_{AB}	Varição no estoque de carbono na biomassa acima do solo
ΔC_{BB}	Varição no estoque de carbono na biomassa abaixo do solo
ΔC_{DW}	Varição no estoque de carbono na matéria orgânica morta
F_{LU}	Fator de conversão de base
F_{MG}	Fator de conversão de intensidade de cultivo
F_I	Fator de conversão de nível de entrada
CF	Fração de carbono
SOC_{ref}	Valor de referência do estoque de carbono no solo
η	Rendimento da produção de óleo vegetal
A	Área agrícola
E_{LUC}	Emissões de GEE devido às mudanças no uso do solo
E_P	Emissões de GEE devido às etapas de produção (excluindo as mudanças no uso do solo)
E_C	Emissões de GEE devido à combustão (uso final)
μ	Massa específica
c	Poder calorífico
D	Demanda energética nacional de óleo diesel
PA	Produção anual de biodiesel de soja
i	Subíndice indicando a categoria de mudança de uso do solo
E	Total de emissões para produzir uma quantidade x de combustível
x	Produção anual de um combustível
e	Emissões para produzir 1 kg de um combustível
E_{PA}	Emissões de GEE da produção atual de biodiesel de soja
Z	Total de emissões da mistura

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO	12
1.1	CONTEXTUALIZAÇÃO	12
1.2	CARACTERIZAÇÃO DO PROBLEMA.....	16
1.3	OBJETIVOS DA PESQUISA.....	18
1.3.1	Objetivo Principal.....	18
1.3.2	Objetivos Específicos	18
1.4	JUSTIFICATIVA.....	19
1.5	ESTRUTURA DO TRABALHO	20
2	FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA	21
2.1	AVALIAÇÃO DO CICLO DE VIDA (ACV).....	21
2.1.1	Análise de Inventário do Ciclo de Vida (AI)	21
2.1.2	Avaliação de Impactos do Ciclo de Vida (AICV).....	22
2.1.2.1	<i>Aquecimento Global</i>	<i>23</i>
2.2	PESQUISA OPERACIONAL (PO)	24
2.3	BIODIESEL	28
2.3.1	Processo de Produção	28
2.3.2	Matérias-Primas	29
2.3.3	Capacidade Instalada da Produção de Biodiesel	31
2.3.4	Rendimento da Produção de Óleo Vegetal	31
2.3.5	Poder Calorífico e Massa Específica.....	32
2.4	EMISSÕES DE GEE DEVIDO ÀS MUDANÇAS NO USO DO SOLO	32
3	PROCEDIMENTOS METODOLÓGICOS.....	35
3.1	ÁREAS COM POTENCIAL DE EXPANSÃO AGRÍCOLA	35
3.1.1	Cultivo de Dendê.....	35
3.1.2	Cultivo de Soja	37
3.2	CLASSIFICAÇÃO DAS ÁREAS DE POTENCIAL AGRÍCOLA.....	38
3.3	QUANTIFICAÇÃO DAS EMISSÕES NO CICLO DE VIDA DOS COMBUSTÍVEIS.....	39
3.3.1	Diesel.....	39
3.3.2	Biodiesel.....	43
3.3.2.1	<i>Cálculo das Emissões de GEE devido às Mudanças no Uso do Solo.....</i>	<i>46</i>
3.4	REDEFINIÇÃO DO PROBLEMA SOB PERSPECTIVA DA PO	50
3.5	CONSTRUÇÃO DO MODELO	51
3.6	SOLUÇÃO DO MODELO	53
4	RESULTADOS E ANÁLISE DOS RESULTADOS.....	56
5	CONCLUSÕES E RECOMENDAÇÕES PARA TRABALHOS FUTUROS	59
	REFERÊNCIAS.....	60
	APÊNDICE A – Solução A.....	65
	APÊNDICE B – Solução B.....	66
	APÊNDICE C – Solução C.....	67
	ANEXO A – Mapa de Zonas Climáticas	68
	ANEXO B – Mapa de Biomas ou Zonas Ecológicas	69
	ANEXO C – Mapa dos Tipos de Solo	70

1 INTRODUÇÃO

1.1 CONTEXTUALIZAÇÃO

Desde a Pré-História o ser humano modifica o ambiente que o cerca, extraindo recursos naturais como pedra, madeira e metais para a fabricação de utensílios. Segundo Ugaya (2001) “praticamente todas as atividades humanas impactam o meio ambiente”. A partir de 1850, com a intensificação do processo de industrialização, os impactos ambientais das atividades antropogênicas passaram a ser mais significativos (gráfico 1), principalmente devido ao maior uso de combustíveis fósseis como carvão, petróleo e gás (IPCC, 2012).

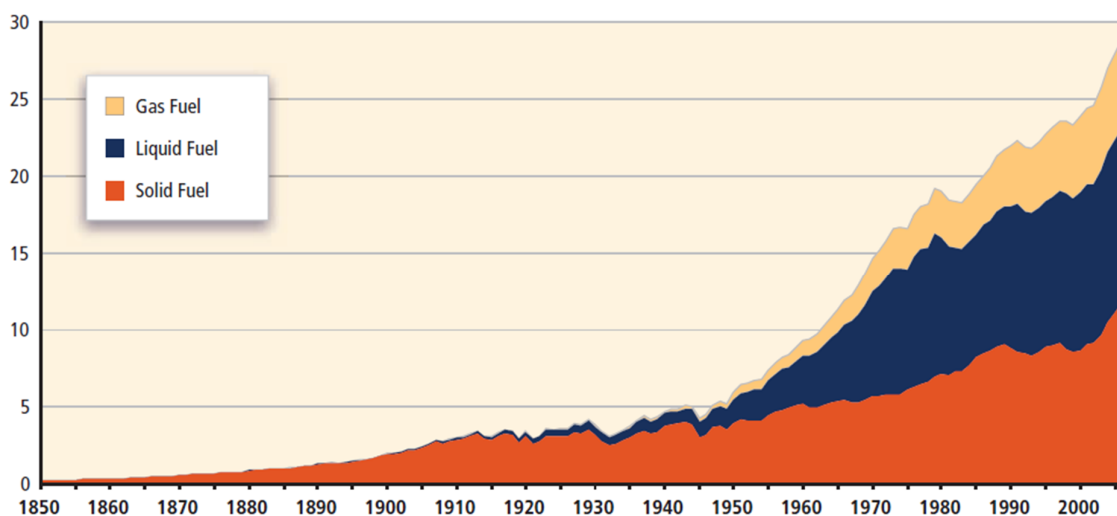


Gráfico 1 – Emissões globais de dióxido de carbono (Gt CO₂) devido à queima de combustíveis fósseis no período de 1850 a 2000.

Fonte: IPCC (2012).

Acordos internacionais como o protocolo de Quioto, a publicação do quarto relatório do Painel Intergovernamental de Mudanças Climáticas (IPCC) e filmes como o documentário “Uma Verdade Inconveniente” contribuíram para aumentar a pressão social em relação aos problemas ambientais, especialmente às mudanças climáticas (ARTAXO *et al.*, 2008). As mudanças climáticas podem ser entendidas

como qualquer mudança no clima, ao longo dos anos, devido a variabilidade natural ou como resultado da atividade humana (IPCC, 2007).

É importante destacar que o clima da Terra esteve, desde sempre, sujeito à mudanças, produzidas por ciclos longos ou curtos [...] Esses ciclos podem ter sua origem explicada por processos naturais, ligados a alterações no eixo de rotação da Terra, explosões solares e dispersão de aerossóis emitidos por vulcões (ARTAXO *et al.*, 2008).

Entretanto, segundo o IPCC (2007), há 90% de chance de que o aquecimento global ocorrido nos últimos 50 anos tenha sido causado por atividades humanas, principalmente devido à emissão de gases de efeito estufa¹ (GEE) resultantes da queima de combustíveis fósseis e das mudanças no uso do solo². Cerca de 39% das emissões de GEE globais em 2004 foram devido ao setor de energia e transporte, 17,4% foram devido às mudanças no uso do solo (gráfico 2).

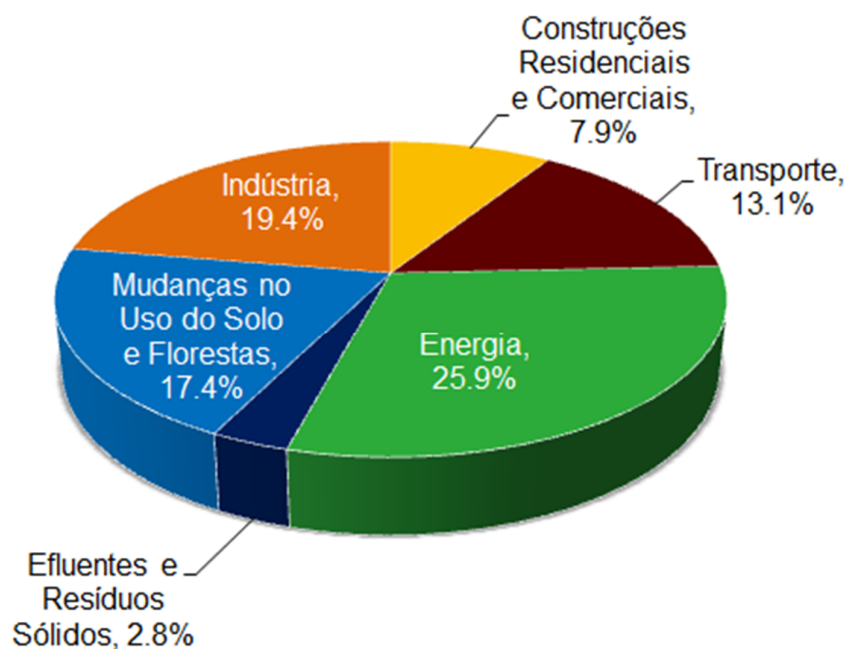


Gráfico 2 – Distribuição das Emissões Globais de GEE por Setor em 2004.

Fonte: IPCC (2007).

¹ Gases de Efeito Estufa (GEE): Dióxido de Carbono (CO₂), Metano (CH₄), Óxido Nitroso (N₂O) e Clorofluorcarbonos (CFCs).

² Mudanças no Uso do Solo: conversão do uso do solo de uma categoria de uso para outra (e.g.: floresta para pastagens).

Tendo em vista a prática do desenvolvimento sustentável muitas empresas e governos têm adotado políticas ambientais (ADAMS, 2006). Para este fim são utilizadas ferramentas da Ecologia Industrial, disciplina que considera o sistema industrial e seus fluxos de energia e material como parte integrante da biosfera, ao contrário da concepção de “tratamento de fim de tubo” (*end of pipe*), que concebe o sistema produtivo separado do meio ambiente (ERKMAN, 1997). Algumas ferramentas da Ecologia Industrial são: Projeto para o Meio Ambiente (*DfE* - do Inglês, *Design for Environment*), Análise do Ciclo de Vida (ACV), Prevenção da Poluição e Desmaterialização.

Uma das estratégias para mitigação das mudanças climáticas é o uso de biocombustíveis em substituição aos combustíveis fósseis (IPCC, 2007). Muitos países têm estabelecido metas de expansão da produção e uso de biocombustíveis (IEA, 2006). Políticas comuns são: apoio à implantação das indústrias; subsídios para os agricultores; isenção de impostos e percentuais obrigatórios para a mistura do biocombustível ao combustível fóssil (SEBRAE, 2010). A União Européia, por exemplo, tem como meta atingir 10% de consumo de energia renovável³ em todo o setor de transportes até o ano de 2020 (REN 21, 2011). No Brasil, toda a gasolina comercializada é obrigatoriamente misturada a 25% de etanol e todo o diesel é misturado a 5% de biodiesel (MME, 2011).

A produção global de biocombustíveis cresceu 17% em 2010, alcançando 105 bilhões de litros, em relação aos 90 bilhões de litros produzidos em 2009 (REN 21, 2011). Como causas principais desse crescimento podem ser citadas a segurança energética, devido à finitude dos combustíveis fósseis e instabilidades políticas, o desenvolvimento rural e a mitigação de mudanças climáticas (MENICHETTI e OTTO, 2009). Porém, questões como a concorrência por terras agriculturáveis entre produção de alimentos e biocombustíveis e o desmatamento para expansão agrícola podem limitar a produção de biocombustíveis utilizando a tecnologia atual (IEA, 2006).

Os principais biocombustíveis produzidos são o etanol e o biodiesel (DEMIRBAS, 2009). Os Estados Unidos e o Brasil são os dois maiores produtores de etanol (gráfico 3). Em 2010, os Estados Unidos produziram 43 bilhões de litros e

³ Considerando biocombustíveis e veículos movidos a energia elétrica.

o Brasil 28 bilhões de litros correspondendo a 57% e 33% da produção global, respectivamente (WORLDWATCH INSTITUTE, 2011). A União Européia é o maior produtor de biodiesel, produzindo 53% do biodiesel global em 2010 (WORLDWATCH INSTITUTE, 2011).

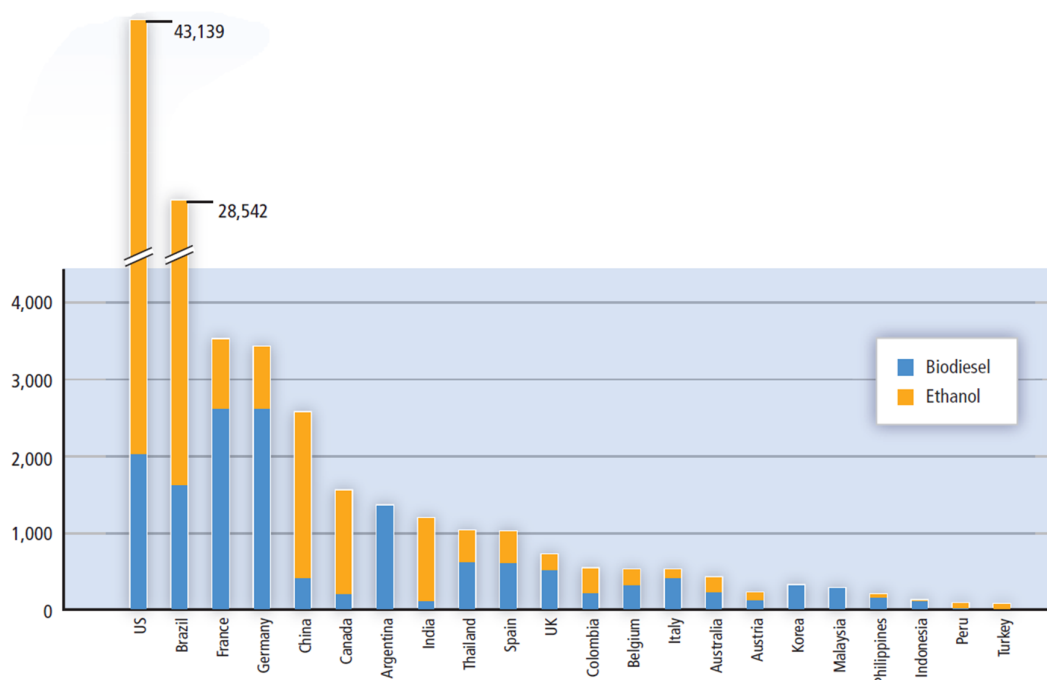


Gráfico 3 - Produção global de biodiesel e etanol em bilhões de litros por ano, por país, em 2010.

Fonte: IPCC (2012).

No Brasil, em 2004, o governo federal introduziu o Programa Nacional de Produção e Uso do Biodiesel (PNPB). Esse programa tem como objetivo reduzir a emissão de GEE, expandir os mercados de oleaginosas, impulsionar a demanda por combustíveis renováveis e a inclusão social através da agricultura familiar (SEBRAE, 2010). Através da lei nº 11.097/05 foi estabelecido o percentual mínimo obrigatório de 5% em volume de biodiesel que deve ser misturado ao diesel. No mercado de biocombustíveis, adota-se a expressão “BX” na qual B significa biodiesel e X a proporção em volume de biodiesel misturada ao diesel de petróleo (SEBRAE, 2010).

A mistura obrigatória do biodiesel no diesel foi implementada em percentuais crescentes a partir de 2% (B2) em 2008 até 5% (B5) em 2010. A previsão é que a demanda de óleo diesel salte de cerca de 46 bilhões de litros, em 2011, para 70 bilhões de litros, em 2020 (EPE, 2011). Com isso, espera-se que a demanda compulsória por biodiesel aumente de 2,5 para 3,8 bilhões de litros entre 2011 e 2020, considerando que seja mantido constante o percentual da mistura em 5% durante o período de projeção (EPE, 2011).

1.2 CARACTERIZAÇÃO DO PROBLEMA

Um dos objetivos do PNPB é contribuir com a redução do aquecimento global, utilizando biodiesel em substituição ao diesel, baseado na hipótese de que os biocombustíveis emitem menos GEE do que os combustíveis fósseis (SEBRAE, 2010). Porém, Fargione *et al.* (2008) e Gibbs *et al.* (2008) mostram que quando ecossistemas naturais são convertidos em monoculturas para produção de biocombustíveis, grandes quantidades de carbono são emitidas para a atmosfera. Esse fenômeno ocorre devido ao fato de ecossistemas naturais armazenarem enormes quantidades de carbono, acima e abaixo do solo, e quando a vegetação original é removida o carbono é liberado através de queimadas e da decomposição da matéria orgânica (IPCC, 2006). Florestas tropicais podem armazenar até 340 bilhões de toneladas de carbono, o equivalente a mais de 40 vezes as emissões mundiais da queima de combustíveis fósseis em um ano (GIBBS, JOHNSTON, *et al.*, 2008).

Para quantificar as emissões de GEE de um biocombustível é necessário somar todas as emissões em cada etapa do ciclo de vida⁴ desse produto (MORAES e PEREIRA, 2008). Lange (2010) quantifica as emissões de GEE no ciclo de vida do biodiesel considerando diversos cenários (país, matéria-prima e uso do solo). Os resultados são mostrados no gráfico 4 e são expressos como a redução percentual de emissões, relativamente ao ciclo de vida do diesel de petróleo. Ou seja, resultados positivos significam que houve redução de emissões em relação ao diesel

⁴ O ciclo de vida compreende todas as etapas da cadeia produtiva de um produto, desde a extração dos recursos naturais até o descarte ou reciclagem (ABNT, 2001).

de petróleo. Resultados negativos, por sua vez, indicam que houve aumento de emissões em relação ao diesel de petróleo.

Da análise do gráfico 4, a autora conclui que o biodiesel produzido a custos da expansão agrícola sobre a Floresta Amazônica, para o cultivo de soja, emitiria 804% mais GEE do que o diesel que ele estaria substituindo. Por outro lado, o biodiesel produzido com soja cultivada em pastagens degradadas⁵, reduziria em 25% as emissões. Assim, fica claro que, do ponto de vista das emissões de GEE, nem sempre é vantajoso a produção de biodiesel, dependendo das características da cadeia produtiva.

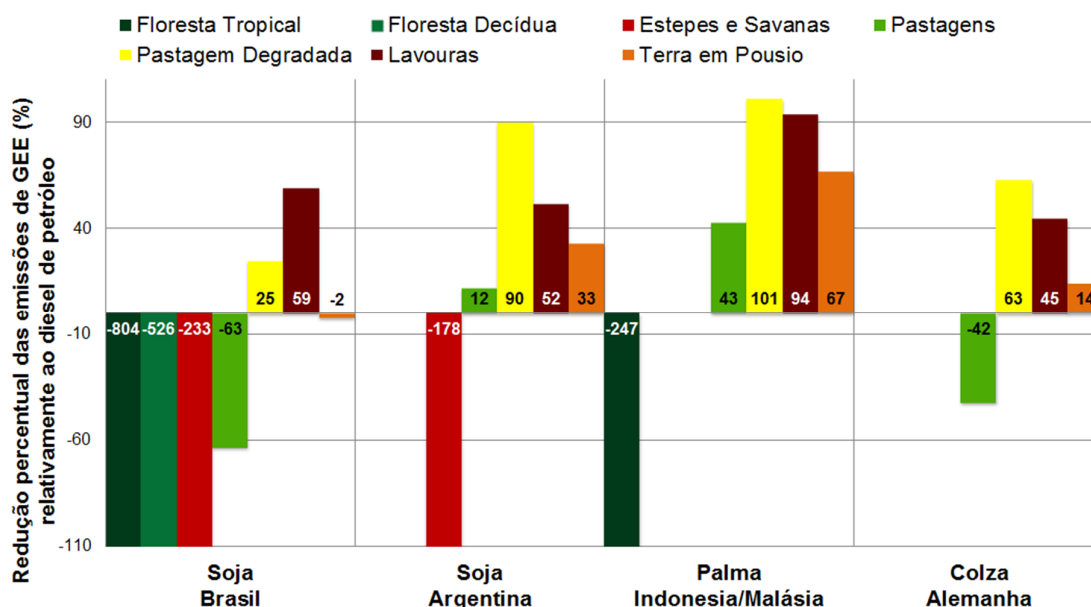


Gráfico 4 – Redução percentual das emissões de GEE, relativamente ao diesel de petróleo, em diferentes cenários de produção de biodiesel.

Fonte: LANGE (2010).

Sabendo que o crescimento da demanda por biodiesel poderá levar a expansão das fronteiras agrícolas, têm-se uma contradição. Por um lado há a necessidade de substituir o diesel por um combustível renovável com a finalidade de

⁵ Pastagens inadequadas para a criação de gado devido a baixa qualidade e produtividade (MACEDO, KICHEL e ZIMMER, 2000).

reduzir as emissões de GEE, e por outro, a conversão do uso do solo para produzir biodiesel pode aumentar significativamente a emissão desses gases.

O presente trabalho baseia-se no trabalho de Silva e Ferreira (2009) em que são utilizadas técnicas de Pesquisa Operacional⁶ para encontrar o valor da quantidade ideal de biodiesel na mistura de forma a minimizar as emissões de GEE. A principal diferença em relação ao trabalho citado é que serão consideradas as emissões causadas pela mudança no uso do solo. Assim, a área de potencial agrícola deixará de ser apenas uma restrição física do problema, contribuindo significativamente no cálculo das emissões.

1.3 OBJETIVOS DA PESQUISA

1.3.1 Objetivo Principal

O objetivo principal a ser alcançado com este trabalho é avaliar a mistura mais adequada de biodiesel e diesel, no Brasil, em termos da categoria de impacto ambiental mudanças climáticas.

1.3.2 Objetivos Específicos

Para atingir o objetivo principal será necessário o atendimento dos seguintes objetivos específicos:

1. Identificar as etapas do ciclo de vida do diesel e do biodiesel;
2. Coletar dados relevantes sobre cada etapa do ciclo de vida;
3. Quantificar as emissões de GEE em cada etapa do ciclo de vida;
4. Construir um modelo matemático que represente o problema;
5. Solucionar o modelo;
6. Avaliar os resultados.

⁶ Uso de modelos matemáticos e de algoritmos com o objetivo de otimizar processos ou sistemas (HILLIER e LIEBERMAN, 2011).

1.4 JUSTIFICATIVA

A importância de atingir os objetivos propostos está em otimizar a matriz energética brasileira, reduzindo o impacto ambiental do diesel de petróleo, que é o combustível mais consumido no país (BRASIL, 2011). A projeção é que o consumo de diesel aumente de 39776 tep⁷ para 60857 tep entre 2011 e 2020 (gráfico 5). Conseqüentemente, ocorrerá o crescimento proporcional da demanda por biodiesel, devido à mistura compulsória do biodiesel ao diesel (lei nº 11.097/05). Além do conhecimento dos percentuais mais adequados do biodiesel na mistura, o resultado deste trabalho permitirá a avaliação do cenário mais adequado para a produção da matéria-prima, também do ponto de vista das mudanças climáticas.

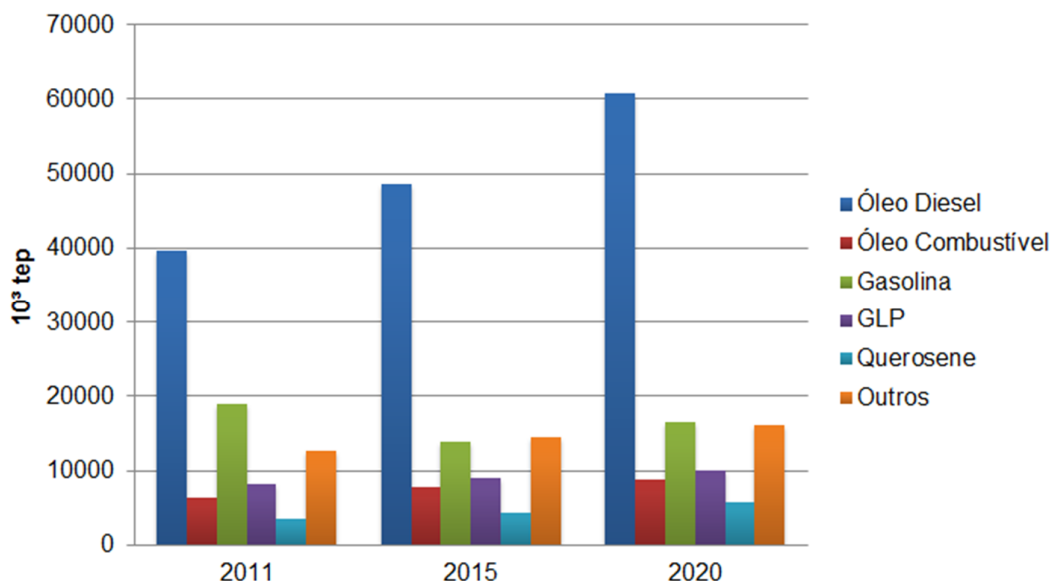


Gráfico 5 - Projeção do consumo de combustíveis fósseis no Brasil para 2020.

Fonte: Brasil (2011).

Outro aspecto importante é que existem evidências de que, nas últimas duas décadas, a produção de soja e dendê (palma) para produção de biodiesel

⁷ 1 tep – tonelada equivalente de petróleo – equivale a 42GJ.

contribuíram com o desmatamento da Amazônia (KOH e WILCOVE, 2008). Assim, é importante o conhecimento de até que ponto o biodiesel pode ser produzido para efetivamente reduzir as emissões de GEE e não o contrário.

1.5 ESTRUTURA DO TRABALHO

No capítulo 2 é apresentada a fundamentação teórica dos conceitos e ferramentas necessários para a elaboração e execução deste trabalho. Apresentam-se as ferramentas de Pesquisa Operacional (PO), Avaliação do Ciclo de Vida (ACV) e as Diretrizes do IPCC para Inventários de GEE. Também são apresentadas informações acerca do biodiesel e do seu ciclo de vida.

No capítulo 3 faz-se o levantamento das áreas com potencial agrícola. São quantificadas as emissões de GEE no ciclo de vida do diesel e do biodiesel. As áreas de potencial agrícola são classificadas de acordo com as categorias de mudança de uso no solo. Enuncia-se o problema sob a perspectiva da PO e as hipóteses e considerações adotadas. São elaboradas as equações e o modelo matemático que representa o problema. No final do capítulo, procede-se com a solução do modelo.

No capítulo 4 são apresentados os resultados obtidos e a análise dos resultados através de gráficos e tabelas.

No capítulo 5 o trabalho é concluído, apontando as dificuldades encontradas e considerações para trabalhos futuros.

2 FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

2.1 AVALIAÇÃO DO CICLO DE VIDA (ACV)

A Avaliação do Ciclo de Vida (ACV) é uma metodologia para avaliar os impactos ambientais de um sistema de produto, processo ou atividade econômica, considerando todo o seu ciclo de vida (UGAYA, 2011). O ciclo de vida é definido como os estágios sucessivos e encadeados de um sistema de produto⁸, desde a extração de matéria-prima da natureza até o descarte ou reciclagem (ABNT, 2001). Na figura 1 é esquematizado um exemplo do ciclo de vida de um produto genérico.

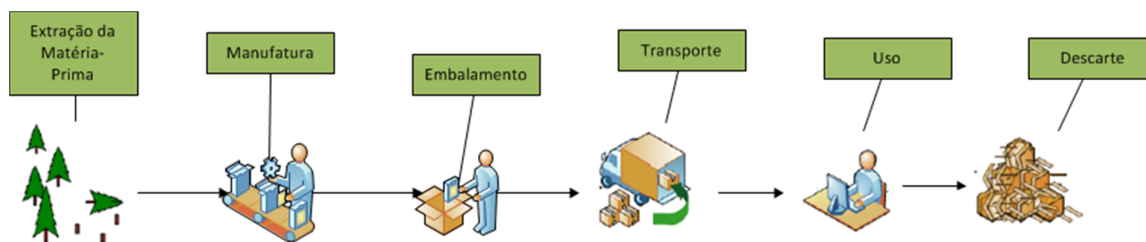


Figura 1 – Esquema exemplificando o ciclo de vida de um produto.

Fonte: adaptado de Ugaya (2011) .

2.1.1 Análise de Inventário do Ciclo de Vida (AI)

As etapas do ciclo de vida podem ser divididas em unidades de processo (processos unitários ou elementares), que correspondem a menor porção de um sistema de produto para a qual podem ser coletados dados em uma ACV (ABNT, 2001). Na figura 2 está esquematizado uma unidade de processo, mostrando os fluxos de entradas e saídas de energia ou material.

⁸ Na norma NBR ISO 14040 e no presente trabalho o termo “produto” pode significar, além de sistema de produto, sistemas de serviço ou de processo.



Figura 2 – Esquema de uma unidade de processo mostrando as entradas e saídas de energia ou material

Fonte: elaboração do autor.

A análise de inventário de ciclo de vida (AI) envolve a coleta de dados e procedimentos de cálculo para a quantificação dos fluxos de energia e material, nas entradas e nas saídas, para todas as unidades de processo de um sistema de produto (ABNT, 2001). Em virtude dos inventários serem necessários para estudos de ACV, existem iniciativas nacionais e internacionais para a criação e manutenção de bases de dados. Algumas iniciativas são o *Spold (Society for Promotion of Life-Cycle Assessment Development)*, *SPINE (Sustainable Product Information Networks for the Environment)*, *ELCD (European Life Cycle Database)* e o *Ecoinvent* (base de dados suíça).

2.1.2 Avaliação de Impactos do Ciclo de Vida (AICV)

Avaliação do Impacto do Ciclo de Vida (AICV) é a etapa da ACV em que se mensura e avalia os impactos ambientais do sistema do produto (UGAYA, 2011). Existem inúmeras categorias de impacto ambiental, dentre os quais podem ser citados: destruição da camada de ozônio, perda de biodiversidade, ecotoxicidade, toxicidade humana, aquecimento global, uso da água e eutrofização⁹.

Na AICV as emissões da análise de inventário (AI) são agrupadas de acordo com as categorias de impacto ambiental. A contribuição de cada emissão é avaliada através de fatores de caracterização (UGAYA, 2001). O fator de caracterização permite o cálculo da equivalência entre as diferentes emissões possibilitando a comparação do impacto ambiental das mesmas (ABNT, 2001).

⁹ Fenômeno causado pelo excesso de nutrientes na água, provocando o aumento excessivo da população de algas.

2.1.2.1 Aquecimento Global

A atmosfera é composta por 78% de nitrogênio, 21% de oxigênio e 1% de outros gases (ROZA e FREITAS, 2010). Por serem pouco reativos, o nitrogênio e o oxigênio não absorvem calor da radiação solar (PIMENTEL, 2011). Outros gases presentes na atmosfera, chamado de gases de efeito estufa (GEE), absorvem uma parte da radiação infravermelha emitida pela superfície, mantendo o planeta aquecido (ROZA e FREITAS, 2010).

Segundo o IPCC (2007), o aquecimento global é devido principalmente ao aumento das emissões de dióxido de carbono (CO_2), metano (CH_4), óxido nitroso (N_2O) e halocarbonos. O CO_2 é principal gás de efeito estufa, apresentando um crescimento de 80% de emissões entre os anos de 1970 e 2004, correspondendo a 77% do total de emissões antropogênicas (IPCC, 2007).

Tabela 1 - Principais Gases de Efeito Estufa (GEE) e valores de Potencial de Aquecimento Global (GWP).

Gases de Efeito Estufa (GEE)	Fórmula Química	Potencial de Aquecimento Global (GWP)
Dióxido de Carbono	CO_2	1
Metano	CH_4	25
Óxido Nitroso	N_2O	298
Hidrofluorcarbonos	HFC_s	460 - 9100
Perfluorcarbonos	PFC_s	16300
Hexafluoreto de Enxofre	SF_6	4400 - 6200

Fonte: (UNFCCC, 2008)

Cada gás têm um potencial para “aprisionar” o calor na atmosfera. O potencial de aquecimento global (GWP, do Inglês, *Global Warming Potential*) é uma medida de quanto um gás de efeito estufa contribui para o aquecimento global relativamente ao CO_2 (IPCC, 2007). A tabela 3 mostra os valores de GWP para os principais gases de efeito estufa. Para os HFCs e PFCs são mostradas faixas de valores pois estes correspondem à diversos gases. O potencial de aquecimento

global é o fator de caracterização para avaliação da categoria de impacto aquecimento global. Multiplicando-se a massa de um gás por seu GWP resulta no equivalente de CO₂ (CO₂eq), que é a quantidade de CO₂ que teria o mesmo potencial de aquecimento global desse gás. Dessa forma, é possível expressar o equivalente de CO₂ de uma mistura de gases.

2.2 PESQUISA OPERACIONAL (PO)

A Pesquisa Operacional (PO) é uma disciplina que auxilia na tomada de decisões, através da aplicação de métodos analíticos, com o objetivo de melhorar o desempenho ou otimizar as operações ou atividades de um sistema (HILLIER e LIEBERMAN, 2011). O termo “pesquisa” significa que a PO apresenta uma abordagem científica na investigação do problema a ser solucionado. A aplicação mais comum da PO é na solução de problemas de alocação de recursos limitados entre atividades concorrentes, da melhor maneira possível. Ou seja, especificar quanto de cada recurso deve ser consumido em cada atividade para atingir o melhor desempenho. A PO tem sido largamente utilizada em diversas áreas como manufatura, transporte, construção, telecomunicações e economia (HILLIER e LIEBERMAN, 2011).

Em PO, são usados modelos matemáticos, que consistem em conjuntos de equações, inequações e dependências lógicas, para representar o funcionamento de sistemas reais (LISBOA, 2002). Segundo Lisboa (2002), os modelos são formados pelos seguintes componentes:

- a. Variáveis de decisão: são as variáveis do modelo matemático (e.g.: x_1, x_2, \dots, x_n) cujos valores devem ser determinados através da solução;
- b. Função objetivo: função matemática das variáveis de decisão (e.g.: $E = 3x_1 + 2x_2 + \dots + 5x_n$) que representa o desempenho do sistema. Os valores constantes são chamados de parâmetros do modelo ou dados de entrada;
- c. Restrições: limitações impostas pelo sistema às variáveis de decisão, geralmente representadas por inequações (e.g.: $3x_1 - 10x_6 \leq 7$).

A formulação do modelo matemático depende da complexidade do sistema e, conseqüentemente, diferentes técnicas de solução são empregadas de modo a resolver cada tipo de modelo existente (MAGATÃO, 2009). Modelos em programação¹⁰ linear, em que todas as equações do modelo são lineares, podem ser resolvidos através do método *Simplex* (HILLIER e LIEBERMAN, 2011). O método *Simplex* é um procedimento iterativo¹¹ ou algoritmo que encontra, algebricamente, uma solução ótima, se ela existir (MAGATÃO, 2009). Atualmente, existem vários programas (quadro 1) que dispõem de ferramentas ou *solvers* que utilizam de algoritmos para solução de modelos conhecidos.

Desenvolvedor	Solver	Licença
<i>Cplex</i>	<i>CPLEX</i>	Comercial
<i>Dash Corporation</i>	<i>XPress</i>	Comercial
<i>IBM</i>	<i>OSL</i>	Comercial
<i>Lindo Systems</i>	<i>LINDO/LINGO</i>	Comercial
<i>Microsoft</i>	<i>Solver do Excel</i>	Comercial
<i>LGPL (Lesser General Public License)</i>	<i>LP_Solve</i>	Livre
<i>GLPK (GNU Linear Programming Kit)</i>	<i>GLPK</i>	Livre

Quadro 1 - Alguns programas (*solver*) comerciais e livres existentes no mercado

Fonte: Magatão (2009).

A seguir é apresentado um exemplo de aplicação da PO, retirado de Hillier e Lieberman (2011).

A Wyndor Glass CO é uma empresa que produz janelas e portas de vidro. A empresa possui três plantas. Molduras de alumínio são fabricadas na planta 1, molduras de madeira são fabricadas na planta 2. A planta 3 produz vidro e realiza a montagem dos produtos. A empresa passará a fabricar dois novos produtos (produto 1 e produto 2):

Produto 1: porta de vidro com moldura de alumínio;

¹⁰ Programação é o termo utilizado em Pesquisa Operacional para planejamento e não deve ser confundido com programação de computadores (HILLIER e LIEBERMAN, 2011).

¹¹ Método de solução em que é escolhida uma solução inicial e, a partir desta, é determinada uma nova solução, geralmente melhor que a anterior. O procedimento é repetido até que a solução “ótima” seja alcançada (MAGATÃO, 2009).

Produto 2: janela com moldura de madeira.

O produto 1 precisa utilizar parte da capacidade de produção das plantas 1 e 3. O produto 2 precisa utilizar parte da capacidade de produção das plantas 2 e 3. É necessário, então, determinar qual o *mix* de produção que resulta na maior lucratividade. O problema é enunciado da seguinte forma: determinar quais devem ser as taxas de produção para os dois produtos de forma a maximizar o lucro total, sujeito às restrições impostas pelo limite da capacidade produtiva disponível nas três plantas.

Considerações:

- a. Toda a produção será vendida;
- b. Cada produto será produzido em lotes de 20 unidades, assim a taxa de produção é definida como o número de lotes por semana;
- c. Qualquer combinação de taxas de produção é permitida, inclusive produzir somente um dos produtos.

O grupo de pesquisa operacional identificou os dados necessários para solução do problema:

1. Número de horas disponíveis por semana, em cada planta, para a produção dos novos produtos;
2. Número de horas necessárias para a produção de um lote de cada produto em cada planta;
3. Lucro por lote produzido de cada produto;

Os dados levantados são resumidos na tabela 2. Utilizando esses dados a equipe de PO procedeu com a programa linear do problema, sendo:

x_1 = número de lotes do produto 1 produzido por semana;

x_2 = número de lotes do produto 2 produzido por semana;

Z = lucro total por semana (em milhares de dólares) devido à produção dos dois produtos.

Então, x_1 e x_2 são as variáveis de decisão do modelo. Da última linha da tabela 2 obtem-se a equação (1).

$$Z = 3x_1 + 5x_2 \quad (1)$$

O objetivo é escolher os valores das variáveis x_1 e x_2 que maximizam o valor de Z , sujeito às restrições impostas pela capacidade de produção. Essas restrições são representadas matematicamente pelas desigualdades das equações (2), (3) e (4).

$$x_1 \leq 4 \quad (2)$$

$$2x_2 \leq 12 \quad (3)$$

$$3x_1 + 2x_2 \leq 18 \quad (4)$$

Tabela 2 - Dados para o problema da Wyndor Glass CO.

Planta	Tempo de Produção por Lote (horas)		Tempo de produção disponível por semana (horas)
	Produto		
	1	2	
1	1	0	4
2	0	2	12
3	3	2	18
Lucro por lote	\$3.000	\$5.000	

Fonte: adaptado de Hiller e Lieberman (2011).

A ferramenta *Solver* do *Microsoft Excel* pode ser utilizada aplicar o método *Simplex* para a solução deste problema. A figura 3 mostra a planilha no *Excel* já otimizada, após a aplicação do método.

	A	B	C	D	E	F
1		Tempo de Produção por Lote				
2		Produto				
3		1	2	Totais		Horas Disponíveis
4	Planta 1	1	0	2	≤	4
5	Planta 2	0	2	12	≤	12
6	Planta 3	3	2	18	≤	18
7	Lucro por Lote (\$)	3000	5000	36000		
8	Solução	2	6			

Figura 3 – Planilha no Excel após a solução do problema da Wyndor Glass CO.

Fonte: adaptado de Hiller e Lieberman (2011).

Assim, a solução ótima é $x_1 = 2$ e $x_2 = 6$, com $Z = 36.000$. Ou seja, essa solução indica que a Wyndor Glass CO deve produzir dois lotes por semana do produto 1 e 6 lotes por semana do produto 2 para um lucro máximo de \$36.000 por semana. Nenhuma outra combinação de produtos teria um lucro maior que este.

2.3 BIODIESEL

2.3.1 Processo de Produção

A produção de biodiesel é realizada através de uma reação química de transesterificação, na qual um éster (óleo vegetal ou animal) e um álcool (etanol ou metanol) reagem na presença de um catalisador (SEBRAE, 2010). A figura 4 mostra os principais processos para produção de biodiesel. A glicerina é gerada como co-produto e é utilizada na indústria farmacêutica e de explosivos.

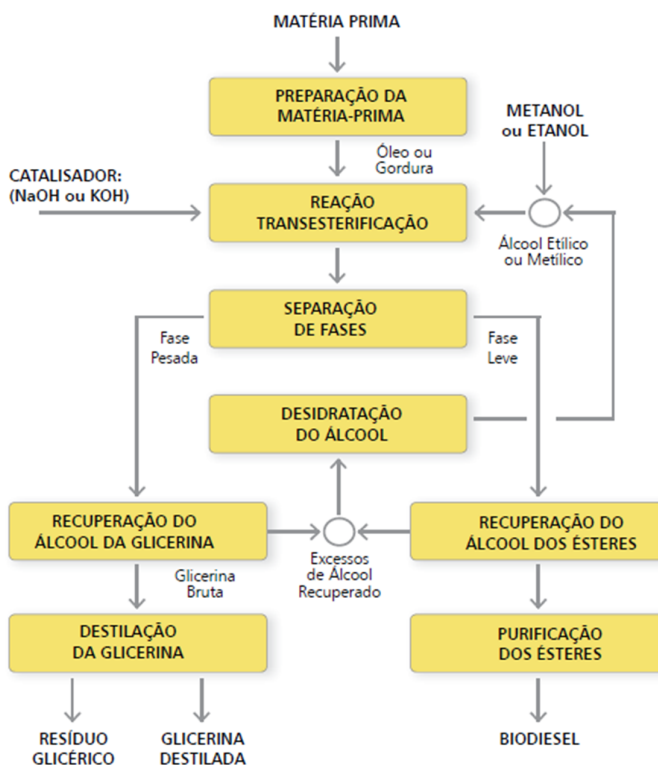


Figura 4 – Fluxograma do processo de produção do biodiesel.

Fonte: (SEBRAE, 2010).

A tecnologia predominante para a produção de biodiesel é a transesterificação metílica, na qual ocorre uma reação química de transesterificação entre óleos vegetais ou sebo animal e metanol, na presença de um catalizador (ROZA e FREITAS, 2010).

2.3.2 Matérias-Primas

O biodiesel é um combustível obtido a partir de fontes renováveis tais como óleos vegetais ou animais (SEBRAE, 2010). As matérias-primas vegetais são derivadas de óleos vegetais, tais como soja, mamona, colza (canola), dendê, girassol, pinhão manso e amendoim, entre outros. As de origem animal podem ser obtidas do sebo bovino, suíno e de aves. Incluem-se entre as alternativas de matérias-primas os óleos utilizados em fritura (cocção) (ROZA e FREITAS, 2010). O

gráfico 6 mostra o perfil nacional de utilização das matérias-primas para produção de biodiesel. A soja é a matéria-prima dominante, com 78,69%, seguida da gordura bovina, com 16,71%. Há a perspectiva de expandir a cultura do dendê na Amazônia Legal¹² para a produção do biodiesel (EMBRAPA, 2010).

Como cultura perene, o dendê tem potencial para gerar renda com produção sustentada e ecologicamente limpa; protege o solo contra o efeito da erosão e previne a degradação das terras; oferece alta taxa de seqüestro de carbono e é uma opção de reflorestamento para as áreas desmatadas em grau avançado de esgotamento (EMBRAPA, 2010).

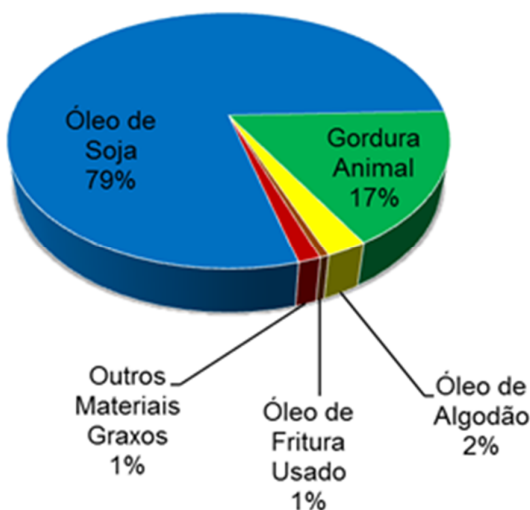


Gráfico 6 – Perfil nacional das matérias-primas utilizadas para produção de biodiesel (julho 2012).

Fonte: ANP (2012).

O Brasil tem uma série de vantagens para a produção de biomassa para geração de biocombustíveis: posição geográfica favorável (situado nas faixas tropical e subtropical), grande disponibilidade de expansão de áreas agriculturáveis e a possibilidade de cultivos sem irrigação (MAPA, 2006). Há aproximadamente 532 milhões de hectares em potencial para expansão agrícola no mundo. Desse total,

¹² A Amazônia Legal abrange a região compreendida pelos Estados do Acre, Pará e Amazonas, pelos Territórios Federais do Amapá, Roraima e Rondônia, e ainda pelas áreas do Estado de Mato Grosso a norte do paralelo de 16°, do Estado de Goiás a norte do paralelo de 13° e do Estado do Maranhão a oeste do meridiano de 44° (Lei nº 5.173 de 27 de outubro de 1966).

quase 80%, ou 415 milhões de hectares estão no hemisfério sul, sendo 187 milhões de hectares apenas no Brasil¹³ (WWF - Brasil, 2009).

2.3.3 Capacidade Instalada da Produção de Biodiesel

No gráfico 7 é mostrada a evolução anual da produção de biodiesel, a demanda compulsória e a capacidade instalada autorizada pela ANP no período de 2005 a 2011. Segundo o MEE (2011) “a capacidade instalada em agosto de 2011 ficou em 6.028 mil m³/ano”.

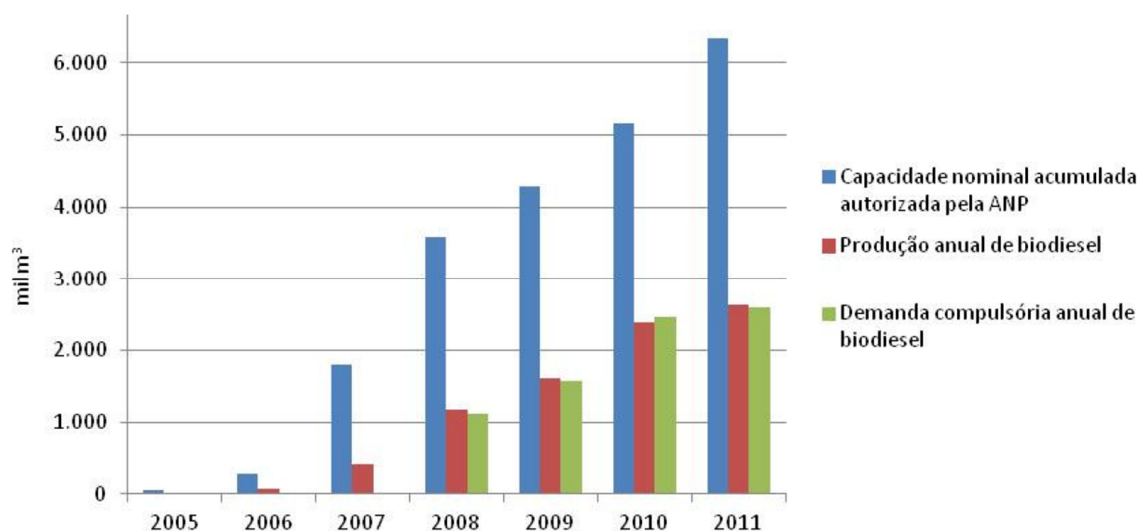


Gráfico 7 – Evolução anual da produção, demanda compulsória e capacidade instalada autorizada pela ANP.

Fonte: ANP (2012).

2.3.4 Rendimento da Produção de Óleo Vegetal

Cada oleaginosa apresenta valores de produtividade e rendimento que variam dependendo da região em que são cultivadas. As condições de clima e solo, tecnologias de cultivo, qualidade da semente e tecnologias de processamento

¹³ Em 25 de maio de 2012 foi estabelecido o novo Código Florestal (Lei nº 12.651). O estudo de WWF-Brasil (2009) considera a Lei nº 4.771/65.

praticadas influenciam no percentual de óleo obtido do grão (SEBRAE, 2010). A tabela 3 apresenta faixas de valores para a produtividade, teor de óleo e rendimento das principais oleaginosas produzidas no Brasil para extração de óleo vegetal.

Tabela 3 – Produtividade, teor de óleo e rendimento da produção de óleo vegetal das principais espécies de oleaginosas

Espécie	Produtividade (t.ha ⁻¹ .ano ⁻¹)	Teor de Óleo (%)	Rendimento (t óleo.ha ⁻¹ .ano ⁻¹)
Algodão	0.86	15	0.1 a 0.2
Amendoim	1.5 a 2	40 a 43	0.6 a 0.8
Dendê	15 a 25	20	3 a 6
Girassol	1.5 a 2	28 a 48	0.5 a 0.9
Mamona	0.5 a 1.5	43 a 45	0.5 a 0.9
Pinhão Manso	2 a 12	50 a 52	1 a 6
Soja	2 a 3	17	0.2 a 0.4

Fonte: SEBRAE (2010)

2.3.5 Poder Calorífico e Massa Específica

A tabela 4 contém valores médios do poder calorífico e da massa específica do biodiesel de dendê e soja em comparação com o diesel de petróleo.

Tabela 4 – Poder calorífico e massa específica do biodiesel de dendê, biodiesel de soja e diesel de petróleo.

Combustível	Poder Calorífico (MJ/kg)	Massa Específica (kg/m ³)
Biodiesel de Dendê	33,5	880
Biodiesel de Soja	33,5	885
Diesel de Petróleo	43,8	855

Fonte: Santos (2008).

2.4 EMISSÕES DE GEE DEVIDO ÀS MUDANÇAS NO USO DO SOLO

As emissões de GEE devido às mudanças no uso do solo ocorrem, principalmente, devido à variação do estoque de carbono orgânico do solo e da biomassa acima e abaixo do solo (IPCC, 2006).

As Diretrizes do IPCC (2006) apresentam orientações específicas para a realização de inventários de GEE devido à mudanças no uso do solo e disponibilizam equações e dados padrão nacionais e internacionais. Para o cálculo é necessário classificar o solo em categorias de uso, que englobam a zona climática, o tipo de vegetação original, o tipo de solo e as práticas de manejo (aração ou plantio direto). Nos anexos A, B e C estão disponíveis os mapas que devem ser usados para a classificação de Zonas Climáticas, Biomas e Tipos de Solo, respectivamente.

A variação total do estoque de carbono (ΔC_{LUC}) é representada pela equação (5), e é igual a soma das variações nos estoques de carbono na biomassa acima do solo (ΔC_{AB}), abaixo do solo (ΔC_{BB}), na matéria orgânica morta (ΔC_{DW}) e no solo (ΔC_{SO}), considerando uma profundidade de 30 cm. Essas emissões geralmente são expressas em termos de toneladas de carbono por hectare [tC/ha].

$$\Delta C_{LUC} = \Delta C_{SO} + \Delta C_{AB} + \Delta C_{BB} + \Delta C_{DW} \quad (5)$$

As Diretrizes do IPCC (2006) possuem vários níveis (*tiers*) de complexidade de metodologia. O nível 1 possibilita a utilização dos inventários de dados padrão, que é o mais extenso disponível nessa área (LANGE, 2010). Nessa metodologia, toda a biomassa e a matéria orgânica morta são, por hipótese, destruídas quando uma área é limpa para ser convertida em terra agrícola. Assim, os valores finais dos termos ΔC_{AB} , ΔC_{BB} e ΔC_{DW} são assumidos como sendo iguais a zero e a equação (5) que pode ser escrita apenas em função dos valores iniciais resultando na equação (6).

$$\Delta C_{LUC} = \Delta C_{SO} + C_{AB} + C_{BB} + C_{DW} \quad (6)$$

O termo ΔC_{SO} é calculado a partir de um valor de referência para o carbono do solo SOC_{ref} , ao qual são aplicados fatores de conversão, como é mostrado na equação (7). Os fatores de conversão são: fator de base (F_{LU}), fator de intensidade

de cultivo (F_{MG}) e fator de nível de entrada (F_I). O fator de base representa a mudança de categoria de uso, o fator de intensidade de cultivo representa as práticas de manejo e o fator de nível de entrada representa a quantidade de matéria orgânica incorporada aos solos.

$$\Delta C_{SO} = (F_{LU} * F_{MG} * F_I * SOC_{ref})_{antes} - (F_{LU} * F_{MG} * F_I * SOC_{ref})_{depois} \quad (7)$$

Os valores de C_{AB} , C_{BB} , C_{DW} , SOC_{ref} , F_{LU} , F_{MG} e F_I são obtidos diretamente das tabelas das Diretrizes do IPCC (2006), sem a necessidade de cálculos. C_{AB} e C_{BB} são dados em termos de toneladas de matéria seca (tdm) por hectare. Por isso, esses termos devem ser multiplicados pela fração de carbono (CF – do Inglês, *carbon fraction*), que corresponde à quantidade de carbono contida em uma tonelada de matéria seca¹⁴ (tC/tdm), como é mostrado na equação (8).

$$\Delta C_{LUC} = (C_{AB} + C_{BB}) * CF + C_{DW} + \Delta C_{SO} \quad (8)$$

O resultado da equação (8) representa o total de carbono que será emitido para a atmosfera em tC/ha. Porém, algumas emissões são imediatas e outras, como o decaimento da matéria orgânica, ocorrem ao longo do tempo. Por isso o IPCC (2006) sugere que essas emissões sejam distribuídas ao longo de um período de 20 anos. A equação (9) converte as emissões para kgCO₂eq/kg combustível, através do rendimento da produção de óleo vegetal η (t óleo/ha.ano), e distribui essas emissões num período de 20 anos.

$$E_{LUC} = \frac{\Delta C_{LUC}}{20} * \left(\frac{44}{12}\right) * \eta \quad (9)$$

¹⁴ Do Inglês, *tonnes of dry matter (tdm)*.

3 PROCEDIMENTOS METODOLÓGICOS

3.1 ÁREAS COM POTENCIAL DE EXPANSÃO AGRÍCOLA

Nessa seção são levantadas as áreas com potencial de expansão agrícola para os cultivos de soja e dendê. Durante a execução deste trabalho houve alteração no Código Florestal vigente. A lei nº 4.771 foi revogada pela lei nº 12.651, que institui o novo Código Florestal. Segundo WWF-Brasil (2012)

“a legislação resultante desse movimento, apesar dos vetos e decretos [...] está longe do que a Ciência indica como necessário e do que a Constituição estabelece para a manutenção de um meio ambiente equilibrado. Mesmo que tais medidas tenham melhorado trechos do projeto aprovado no Congresso, os níveis de proteção de matas ciliares, reservas legais, topos de morro, encostas e mangues são inferiores aos da legislação anterior”.

Assim, visto que os níveis de proteção e reservas legais são inferiores ao da legislação anterior, para os fins desse trabalho, considera-se a lei nº 4.771. Dessa forma, serão obtidos resultados mais conservativos.

3.1.1 Cultivo de Dendê

A figura 5 mostra as áreas desmatadas aptas para a expansão do cultivo de dendê nos estados da Amazônia Legal, excluídas as áreas de reserva legal.

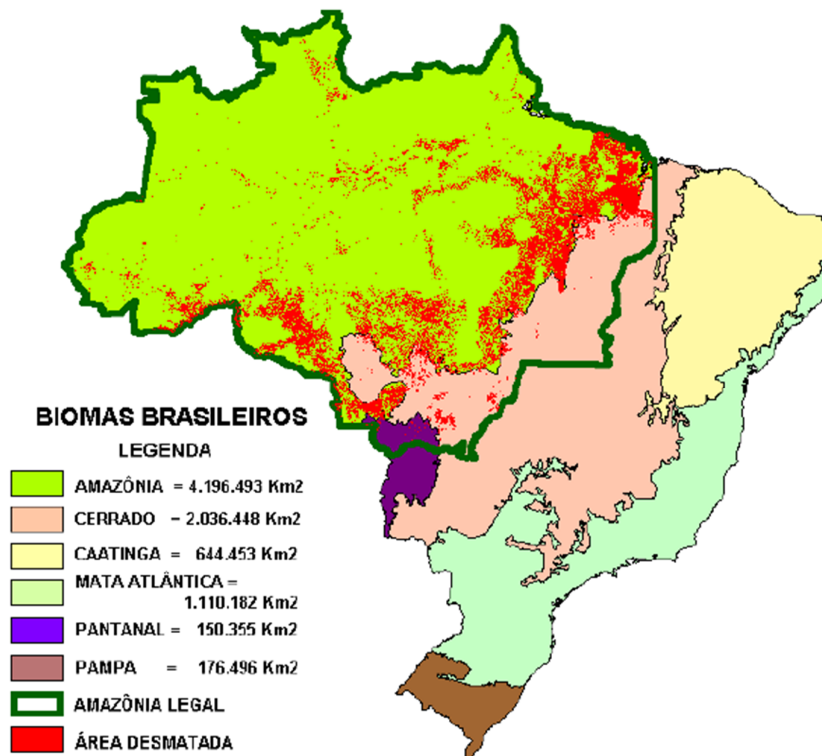


Figura 5 – Mapa de biomas brasileiros, delimitação da Amazônia Legal e áreas desmatadas.

Fonte: Embrapa (2010).

Segundo o Embrapa (2010), a maior parte dessas áreas correspondem a pastagens em variados níveis de degradação ou abandonadas. Na tabela 5 quantifica-se as áreas com potencial para o cultivo de dendê. São consideradas aptas as áreas “preferencial” e “regular”, considerando um nível de manejo de modesto investimento de capital, tecnologia e insumos.

O estado da Bahia também apresenta potencial agrícola para cultivo de dendê, contando com aproximadamente 750 mil hectares em regiões litorâneas (COSTA, 2007). Segundo Costa (2007) existe uma preocupação ambiental devido a essas áreas se situarem em regiões de Mata Atlântica e, com projetos de expandir a cultura dos dendezais, corre-se o risco de eliminar a vegetação remanescente.

Tabela 5 – Classificação das áreas desmatadas na Amazônia Legal, por estado, quanto a aptidão para o cultivo de dendê.

Estado	Área Preferencial (ha)	Área Regular (ha)	Área Marginal (ha)	Área Inapta (ha)
AC	416.037,00	1.087.772,00	913,32	306.879,00
AM	1.461.375,00	889.466,00	8.337,00	415.517,00
AP	20.334,00	137.844,00	11.205,00	125.232,00
MA	-	246,96	109.515,00	10.090.105,00
MT	203.959,00	6.779.357,00	786.999,00	12.806.582,00
PA	2.327.674,00	10.448.374,00	345.718,00	9.926.744,00
RO	2.720.638,00	2.775.935,00	550.294,00	1.834.577,00
RR	187.409,00	218.712,00	207.898,00	144.684,00
TO	-	-	-	2.949.021,00
TOTAL	7.337.426,00	22.337.706,96	2.020.879,32	38.730.565,00

Fonte: Embrapa (2010).

3.1.2 Cultivo de Soja

Na tabela 6 são mostradas as áreas com potencial para o cultivo de soja. São consideradas apenas áreas do domínio do Cerrado, descontando as áreas de preservação e reserva legal, de acordo com o Código Florestal (WWF-Brasil, 2009).

Tabela 6 – Áreas do domínio do Cerrado aptas à agricultura, respeitando o Código Florestal (Lei nº 4.771/65).

Estado	Área de Cerrado potencialmente agrícola (ha)	Área de pastagem aptas à agricultura (ha)
MT	8.059.505,00	1.254.811,00
MS	812.673,00	4.377.003,00
GO	8.615.829,00	4.727.000,00
TO	13.886.195,00	999,85
DF	128.597,00	42.817,00
PR	-	928.611,00
SC	-	12.780,00
RS	-	35.160,00

Fonte: WWF-BRASIL (2009).

3.2 CLASSIFICAÇÃO DAS ÁREAS DE POTENCIAL AGRÍCOLA

Os dados apresentados na tabela 5 e na tabela 6 estão organizados de acordo com a divisão política do país em estados. Porém, para a análise deste trabalho, é necessário que as áreas cultivadas e áreas com potencial agrícola sejam classificadas de acordo com as categorias de mudança de uso do solo do quadro 2. Para realizar esta conversão foram feitas as seguintes considerações, com base no mapa de biomas brasileiros (Figura 5) e nos mapas de zonas climáticas (anexo A) e biomas (anexo B):

- i. Áreas desmatadas da Amazônia Legal são consideradas pastagens degradadas;
- ii. As áreas desmatadas da Amazônia Legal possuem clima Equatorial e as demais áreas possuem clima Tropical Úmido;
- iii. Matas e florestas pertencentes aos biomas Cerrado, Caatinga e Mata Atlântica são consideradas Florestas Decíduas¹⁵;

Levando em conta as considerações anteriores as áreas de potencial agrícola são classificadas como mostrado na tabela 7.

Tabela 7 - Distribuição nacional das áreas plantadas em 2010 e das áreas com potencial agrícola de acordo com a nomenclatura do IPCC (2006).

(continua)

UF	Clima	Uso do Solo (antes)	Área	Potencial	
AC	Equatorial	Pastagem Degradada	1.503.809,00	Dendê	A ₁
AM	Equatorial	Pastagem Degradada	2.350.841,00	Dendê	A ₂
AP	Equatorial	Pastagem Degradada	158.178,00	Dendê	A ₃
PA	Equatorial	Pastagem Degradada	12.776.048,00	Dendê	A ₄
RO	Equatorial	Pastagem Degradada	5.496.573,00	Dendê	A ₅
RR	Equatorial	Pastagem Degradada	406.121,00	Dendê	A ₆
TO	Tropical Úmido	Pastagem Degradada	999,85	Soja	A ₇
		Cerrado	13.886.195,00	Soja	A ₈

¹⁵ Florestas decíduas são aquelas que perdem parcial ou totalmente suas folhas durante determinados períodos do ano.

Tabela 7 - Distribuição nacional das áreas plantadas em 2010 e das áreas com potencial agrícola de acordo com a nomenclatura do IPCC (2006).

(conclusão)

UF	Clima	Uso do Solo (antes)	Área	Potencial	
BA	Tropical Úmido	Mata Atlântica	750.000,00	Dendê	A ₉
MA	Equatorial	Pastagem Degradada	246,96	Dendê	A ₁₀
GO	Tropical Úmido	Pastagem Degradada	4.769.817,00	Soja	A ₁₁
	Tropical Úmido	Cerrado	8.744.426,00	Soja	A ₁₂
MS	Tropical Úmido	Pastagem Degradada	4.377.003,00	Soja	A ₁₃
	Tropical Úmido	Cerrado	812.673,00	Soja	A ₁₄
	Tropical Úmido	Pastagem Degradada	1.254.811,00	Soja	A ₁₅
MT	Equatorial	Pastagem Degradada	6.983.316,00	Dendê	A ₁₆
	Tropical Úmido	Cerrado	8.059.505,00	Soja	A ₁₇
PR	Tropical Úmido	Pastagem Degradada	928.611,00	Soja	A ₁₈
RS	Tropical Úmido	Pastagem Degradada	35.160,00	Soja	A ₁₉
SC	Tropical Úmido	Pastagem Degradada	12.780,00	Soja	A ₂₀

Fonte: elaboração do autor.

3.3 QUANTIFICAÇÃO DAS EMISSÕES NO CICLO DE VIDA DOS COMBUSTÍVEIS

3.3.1 Diesel

As etapas do ciclo de vida do diesel de petróleo são mostradas, simplificada, na figura 6. Cada etapa é composta por numerosas unidades de processo, cada um responsável por uma parcela das emissões de GEE.

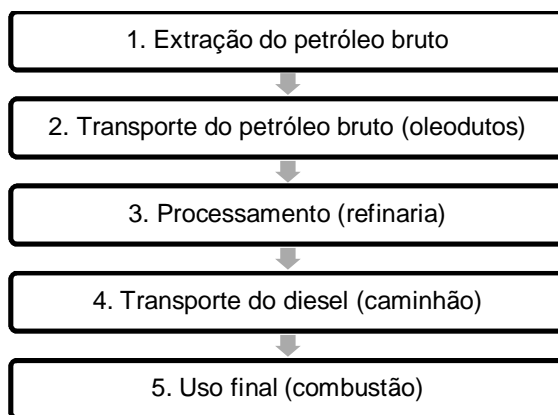


Figura 6 – Etapas do ciclo de vida do diesel do petróleo.

Fonte: elaboração do autor.

Não foram levadas em conta as emissões devido à mudança no uso do solo para a produção de diesel de petróleo. Usou-se a hipótese de que a área convertida para produzir 1 kg de diesel é de uma ordem de grandeza desprezível em comparação com a área transformada para produzir 1 kg de biodiesel, que é de milhares de hectares.

A tabela 8 resume as emissões de GEE nos processos das etapas 1 a 4 do ciclo de vida do diesel do petróleo (figura 6). Essas emissões serão designadas por $E_{P,diesel}$, e correspondem às emissões para a produção de 1kg de diesel. Da última linha da tabela 8, $E_{P,diesel}$ totaliza 4.29E-01 kgCO₂eq/kg.

Tabela 8 - Emissões de GEE por processo para a produção de 1kg de óleo diesel de petróleo.

(continua)

Quantidade		Processo	Emissão	(kg)	GWP	Total (kgCO ₂ eq/kg)
1.02E+00	kg	diesel, at refinery	N2O	9.44E-07	298	2.87E-04
			CH4	3.86E-05	25	9.84E-04
4.43E-01	tkm	transport, lorry > 16t	-	-	-	-
2.03E-01	kg	crude oil, production RU	CH4	1.60E-06	25	8.12E-06
2.79E-01	kg	crude oil, production RME	CH4	1.60E-06	25	1.12E-05
1.19E-01	kg	crude oil, production RAF	CH4	1.60E-06	25	4.76E-06
3.76E-02	kg	crude oil, production NG	CH4	1.60E-06	25	1.50E-06
2.48E-01	kg	crude oil, production NO	CH4	1.60E-06	25	9.92E-06
1.98E-01	kg	crude oil, production GB	CH4	1.60E-06	25	7.92E-06

Tabela 8 - Emissões de GEE por processo para a produção de 1kg de óleo diesel de petróleo.

(continua)

Quantidade		Processo	Emissão	(kg)	GWP	Total (kgCO ₂ eq/kg)
2.24E+00	MJ	refinerygas, burned in furnace	CH4	4.97E-06	25	2.78E-04
			CO2	5.61E-02	1	1.26E-01
7.70E-01	MJ	heavy fuel oil, burned in refinery furnace	CO2	7.56E-02	1	5.82E-02
			CH4	4.85E-06	25	9.34E-05
9.46E-02	MJ	refinery gas, burned in flare	CH4	4.00E-06	25	9.46E-06
			CO2	5.61E-02	1	5.31E-03
4.36E-02	kg	naphtha, at regional storage	-	-	-	-
2.03E-01	kg	crude oil, at production onshore	Halon 1301	5.82E-08	7140	8.44E-05
			CH4	2.50E-05	25	1.27E-04
2.15E+00	tkm	transport, crude oil pipeline, onshore	-	-	-	-
2.92E-01	kg	crude oil, at production onshore	Halon 1301	5.82E-08	7140	1.21E-04
6.70E+00	tkm	transport, transoceanic tanker	-	-	-	-
1.20E-01	kg	crude oil, at production onshore	Halon 1301	5.82E-08	7140	4.99E-05
			CH4	2.50E-05	25	7.50E-05
3.81E-02	kg	crude oil, at production onshore	Halon 1301	5.81E-08	7140	1.58E-05
3.81E-02	kg	crude oil, at production onshore	CO2	9.35E-04	1	3.56E-05
			Halon 1211	7.30E-10	1890	5.26E-08
			CH4	1.97E-04	25	1.88E-04
4.46E-02	kg	refinery gas, at refinery	N2O	1.41E-06	298	1.87E-05
4.36E-02	kg	naphtha, at refinery	N2O	5.64E-07	298	7.33E-06
			CH4	3.85E-05	25	4.19E-05
1.38E-05	m	well for exploration and production, onshore	-	-	-	-
1.10E-09	p	production plant crude oil, onshore	-	-	-	-
2.63E-03	m3	natural gas, vented	CO2	1.40E-02	1	3.68E-05
			CH4	5.85E-01	25	3.85E-02
4.64E-01	MJ	natural gas, sour, burned in production flare	CH4	6.97E-06	25	8.09E-05
			CO2	6.81E-02	1	3.16E-02
1.49E-01	MJ	heavy fuel oil, burned in industrial furnace 1MW, non-modulating	CH4	3.00E-06	25	1.12E-05
			CO2	7.79E-02	1	1.16E-02
			N2O	1.60E-06	298	7.10E-05
3.30E-05	m	pipeline, crude oil, onshore	-	-	-	-
6.70E+00	tkm	operation, transoceanic tanker	CH4	3.61E-08	25	6.05E-06
			CO2	4.00E-03	1	2.68E-02

Tabela 8 - Emissões de GEE por processo para a produção de 1kg de óleo diesel de petróleo.
(conclusão)

Quantidade		Processo	Emissão	(kg)	GWP	Total (kgCO ₂ eq/kg)
5.92E-01	MJ	natural gas, sweet, burned in production flare	N2O	1.04E-07	298	2.08E-04
			CH4	6.97E-06	25	1.03E-04
3.88E-03	m3	sweet gas, burned in gas turbine, production	CO2	6.81E-02	1	4.03E-02
			-	-	-	-
3.97E-01	MJ	diesel, burned in diesel-electric generating set	CO2	7.30E-02	1	2.90E-02
			N2O	6.00E-06	298	7.10E-04
			CH4	1.67E-07	25	1.66E-06
5.78E-01	MJ	electricity, medium voltage, at grid	S6	6.74E-08	2280	8.89E-04
			-	-	-	-
1.31E-02	kg	heavy fuel oil, at regional storage	-	-	-	-
9.43E-02	MJ	diesel, burned in building machine	CO2	7.30E-02	1	6.88E-03
			N2O	2.80E-06	298	7.87E-05
			CH4	3.75E-06	25	8.84E-06
9.74E-03	kg	reinforcing steel, at plant	-	-	-	-
2.13E-01	MJ	sweet gas, burned in gas turbine, production	CH4	2.43E-05	25	1.29E-04
			CO2	6.69E-02	1	1.42E-02
			N2O	2.50E-07	298	1.59E-05
5.98E-01	MJ	electricity, high voltage, production UCTE, at grid	N2O	5.00E-06	298	8.91E-04
			-	-	-	-
3.18E-02	kg	heavy fuel oil, at refinery	N2O	6.57E-07	298	6.23E-06
			CH4	3.84E-05	25	3.05E-05
7.07E-03	kg	steel, converter, unalloyed, at plant	CO2	7.56E-02	1	5.34E-04
			-	-	-	-
6.04E-01	MJ	electricity, production mix	-	-	-	-
6.85E-03	kg	pig iron, at plant	CO2	8.49E-01	1	5.82E-03
2.84E-02	MJ	electricity, natural gas, at power plant	-	-	-	-
			CH4	1.97E-03	25	5.00E-03
5.08E-01	MJ	electricity, hydropower, at reservoir power plant	CH4	1.97E-03	25	5.00E-03
7.49E-02	MJ	natural gas, burned in power plant	CO2	5.60E-02	1	4.19E-03
			N2O	1.00E-06	298	2,23E-05
			CH4	1.00E-06	25	1.87E-06
Total						4.29E-01

Fonte: adaptado de Pré-Consultants (2008).

As emissões devido ao uso final (etapa 5 na figura 6) de 1 kg de diesel é igual a 3,20 kgCO₂eq (PRÉ-CONSULTANTS, 2008) e será designada por E_{C,diesel}.

3.3.2 Biodiesel

As principais etapas do ciclo de vida do biodiesel são mostradas na figura 7.

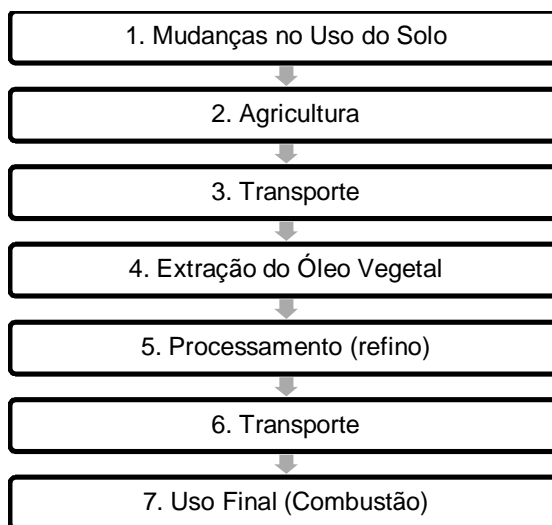


Figura 7 – Etapas do ciclo de vida do biodiesel.

Fonte: elaboração do autor.

Assim como para o diesel de petróleo, todas as emissões de GEE de todas as etapas precisam ser quantificadas. A diferença é que as emissões do ciclo de vida do biodiesel dependem da matéria-prima utilizada e da categoria de mudança de uso do solo (seção 3.3.2.1). As matérias-primas consideradas serão o dendê e a soja. A soja é a oleaginosa mais produzida no Brasil, com uma cadeia produtiva bem estabelecida, e o dendê tem o maior rendimento de óleo produzido por hectare (SEBRAE, 2010).

A tabela 9 e a tabela 11 resumem as emissões de GEE das etapas 2 a 6 (Figura 7) para a produção de 1 kg de biodiesel de dendê e de soja, respectivamente. Essas emissões serão designadas por $E_{P,dendê}$ e $E_{P,soja}$. Da última linha da tabela 9, $E_{P,soja} = -1.42 \text{ kgCO}_2\text{eq/kg}$. Da última linha da tabela 11, $E_{P,dendê} = -1.08 \text{ kgCO}_2\text{eq/kg}$. Os valores negativos dessas emissões significam seqüestro de carbono da atmosfera devido à fotossíntese.

Tabela 9 - Emissões de GEE por processo para a produção de 1kg de biodiesel de soja.

(continua)

Quantidade		Processo	Emissão	(kg)	GWP	Total (kgCO ₂ eq/kg)
9.46E-01	kg	soybean oil, at oil mill	CO2	3.65E-01	1	3.65E-01
1.05E-01	kg	methanol, at plant	CH4	9.80E-04	25	2.57E-03
1.58E-01	tkm	transport, lorry > 16t fleet average				
1.08E-02	kg	phosphoric acid, industrial grade, 85% in H2O, at plant				
2.11E+00	kg	soybeans, at farm	N2O	9.80E-04	298	6.16E-01
			CO2	1.37E+00	-1	-2.89E+00
2.12E-01	tkm	transport, lorry 3.5-16t, fleet average				
2.92E-01	MJ	heat, at hard coal industrial furnace 1-10MW				
1.93E+00	MJ	heat, natural gas, at industrial furnace >100kW				
8.08E-01	MJ	natural gas, burned in industrial furnace low-Nox	CH4	2.00E-06	25	4.04E-05
			CO2	5.60E-02	1	4.52E-02
			N2O	1.00E-07	298	2.41E-05
1.10E-02	kg	phosphoric acid, fertiliser grade, 70% in H2O, at plant				
2.55E-04	m2	tillage, ploughing	CO2	8.12E+01	1	2.07E-02
			CH4	3.37E-03	25	2.15E-05
			N2O	3.13E-03	298	2.38E-04
9.42E-02	kg	pea sed IP, at regional storehouse				
1.32E-01	m2	provision, stubbed land	CH4	5.14E-02	25	1.70E-01
			N2O	1.52E-03	298	5.98E-02
9.32E-02	m	operation, lorry 3.5-16t, fleet average	CO2	5.24E-01	1	4.89E-02
			CH4	2.50E-05	5	5.83E-05
			N2O	3.00E-05	298	5.83E-05
3.91E-01	MJ	hard coal, burned in industrial furnace 1-10MW	CO2	9.15E-02	1	3.58E-02
			N2O	1.00E-06	298	1.17E-04
			CH4	1.00E-05	25	9.78E-05
			CH4	3.85E-05	25	3.76E-04
2.13E+00	MJ	natural gas, burned in industrial furnace >100kW	CH4	2.00E-06	25	1.07E-04
			CO2	5.60E-02	1	1.19E-01
			N2O	1.00E-07	298	6.35E-05
2.39E-02	kg	phosphoric acid, fertiliser grade, 70% in H2O, at plant	CO2	1.23E-01	1	2.93E-03
9.42E-02	kg	protein peas, IP, at farm	N2O	1.49E-03	298	4.20E-02
			CO2	1.20E+00	-1	-1.13E-01
4.12E+00	MJ	natural gas, high pressure, at consumer	CH4	1.09E-05	25	1.12E-03
			CO2	9.30E-08	1	3.83E-07
2.45E-05	m2	green manure IP, until January	CO2	4.29E+00	1	1.05E-04

Tabela 10 - Emissões de GEE por processo para a produção de 1kg de biodiesel de soja.

(conclusão)

Quantidade	Processo	Emissão	(kg)	GWP	Total (kgCO ₂ eq/kg)	
		N ₂ O	3.28E+00	298	2.40E-02	
1.14E-01	m ³	natural gas, at long-distance pipeline				
3.89E-02	m ³	natural gas, production RU, at long-distance pipeline	CH ₄	7.16E-05	25	6.96E-05
			CO ₂	1.00E-07	1	3.89E-09
1.86E-01	tkm	transport, natural gas, pipeline, long distance	CH ₄	2.09E-03	25	9.70E-03
			CO ₂	2.92E-06	1	5.43E-07
			HCFC-22	6.93E-08	1810	2.33E-05
			Halon 1211	2.24E-08	18.9	7.87E-06
Total					-1.42E+00	

Fonte: Pré-Consultants (2008).

Tabela 11 - Emissões de GEE por processo para a produção de 1kg de biodiesel de dendê.

(continua)

Quantidade	Processo	Emissão	GWP	Total (kgCO ₂ eq/kg)		
8.95E-01	kg	palm oil, at oil mill	N ₂ O	3.12E-05	298	8.31E-03
			CH ₄	5.68E-06	25	1.27E-04
			CO ₂	1.56E+00	1	1.40E+00
9.90E-02	kg	methanol, at plant	CH ₄	9.80E-04	25	2.43E-03
1.33E+00	MJ	heat, natural gas, at industrial furnace >100kW	-	-	-	-
3.37E+00	kg	palm fruit bunches, at farm	CO ₂	1.15E+00	-1	-3.87E+00
			N ₂ O	2.18E-04	298	2.19E-01
			CO ₂	9.45E-02	1	3.19E-01
3.38E-01	tkm	transport, lorry 3.5-16t, fleet average	-	-	-	-
7.66E-01	MJ	natural gas, burned in industrial furnace low-Nox >100kW	CH ₄	2.00E-06	25	3.83E-02
			CO ₂	5.60E-02	1	4.29E-02
			N ₂ O	1.00E-07	298	2.28E-05
1.56E+00	MJ	natural gas, burned in industrial furnace >100kW	CH ₄	2.00E-06	25	7.80E-05
			CO ₂	5.60E-02	1	8.74E-02
			N ₂ O	1.00E-07	298	4.65E-05
2.13E-02	kg	ammonium sulphate, as N, at regional storehouse	-	-	-	-
2.36E-04	m ²	irrigating	CO ₂	1.17E+01	1	2.76E-03
			CH ₄	4.88E-04	25	2.88E-06

Tabela 10 - Emissões de GEE por processo para a produção de 1kg de biodiesel de dendê.

(conclusão)

Quantidade		Processo	Emissão	GWP	Total (kgCO ₂ eq/kg)
3.66E+00	kg	wood chopping, mobile chopper, in forest	N2O 4.54E-04	298	3.19E-05
			-	-	-
5.40E-02	m2	provision, stubbed land	CO2 9.54E+00	1	5.15E-01
			CH4 4.09E-02	25	5.52E+00
			N2O 1.21E-03	298	1.94E-02
1.49E-01	m	operation, lorry 3.5-16t, fleet average	CO2 5.24E-01	1	7.81E-02
			CH4 2.50E-05	25	9.30E-05
			N2O 3.00E-05	298	1.33E-03
3.43E+00	MJ	natural gas, high pressure, at consumer	CH4 1.09E-05	25	9.35E-04
			CO2 9.30E-08	1	3.19E-07
5.85E-01	MJ	diesel, burned in building machine	CO2 7.30E-02	1	4.27E-02
			N2O 2.80E-06	298	4.88E-04
			CH4 3.75E-06	25	5.48E-05
9.40E-02	m3	natural gas, at long-distance pipeline	-	-	-
Total					-1.08E+00

Fonte: Pré-Consultants (2008).

Segundo Dorado *et al.* (2003)¹⁶ *apud* Juliato (2006) as emissões devido à combustão de 1 kg de biodiesel são 8,6% menores em relação à combustão da mesma quantidade de diesel do petróleo (seção 3.3). Portanto, o valor adotado para as emissões da queima do biodiesel (etapa 7 do ciclo de vida) será de 2,93 kgCO₂eq por kg de biodiesel. Essas emissões serão representadas por $E_{C,biodiesel}$ e são iguais tanto para o biodiesel de soja como para o biodiesel de dendê.

3.3.2.1 Cálculo das Emissões de GEE devido às Mudanças no Uso do Solo

As emissões devido às mudanças no uso do solo foram calculadas tomando como base as Diretrizes do IPCC (2006).

¹⁶ DORADO, M. P.; BALLESTEROS, E.; ARNAL, J. M.; GOMEZ, J.; LOPEZ, F. J. Exhaust emissions from a Diesel engine fueled with transesterified waste olive oil. **Spain Fuel**, Valencia, v. 82, p. 1311-1315, mar. 2003.

Inicialmente é necessário definir quais serão as categorias de mudança no uso do solo. No quadro 2, são apresentadas as categorias de mudança no uso do solo consideradas para os cultivos de soja e de dendê de acordo com as áreas com potencial de expansão agrícola. Para a montagem deste quadro foram utilizados os mapas disponíveis nos anexos A, B e C.

Categoria de Mudança no Uso do Solo	Clima¹⁷	Tipo de Solo	Uso do Solo (Antes)	Uso do Solo (Depois)
1	Equatorial	Solo Argiloso de Baixa Atividade (LAC ¹⁸)	Pastagem Degradada na Amazônia	Lavoura de Dendê
2	Tropical Úmido		Floresta Decídua (Mata Atlântica) na Bahia	
3			Pastagem Degradada no Centro-Sul	Lavoura de Soja
4			Floresta Decídua (Cerrado)	

Quadro 2 – Categorias de Mudança de Uso no Solo considerando as áreas com potencial de expansão agrícola.

Fonte: elaboração do autor.

Através da equação (7), equação (8) e equação (9) foram calculadas as emissões de GEE devido à mudança do uso do solo para a produção de 1 kg de biodiesel para cada uma das categorias de mudança no uso do solo. Todos os dados foram obtidos dos inventários do IPCC (2006), com exceção do rendimento η , que foi retirado da tabela 3. Os dados utilizados para os cálculos e os resultados são mostrados na Tabela 12. Resultados positivos significam emissões para a atmosfera e negativos significam maior fixação de carbono no solo.

¹⁷ Os climas Equatorial e Tropical Úmido correspondem ao *Tropical Wet* e *Tropical Moist*, respectivamente.

¹⁸ *Low Activity Clay*.

Tabela 12 - Dados utilizados para os cálculos das emissões de GEE devido às mudanças no uso do solo (ELUC) e resultados por categoria de mudança de uso.

Parâmetro	Categoria 1	Categoria 2	Categoria 3	Categoria 4	Unidades
C_{AB}	6.2	6.2	6.2	6.2	tdm/ha
C_{BB}	9.9	9.9	9.9	9.9	tdm/ha
CF	0.5	0.5	0.5	0.5	tC/tdm
C_{DW}	0.0	0.0	0.0	0.0	tC/ha
SOC_{ref}	60.0	47.0	47.0	47.0	tC/ha
$F_{LU \text{ antes}}$	1.0	1.0	0.6	1.0	N.A.
$F_{LU \text{ depois}}$	1.0	1.0	0.5	0.5	N.A.
$F_{MG \text{ antes}}$	0.7	1.0	0.7	1.0	N.A.
$F_{MG \text{ depois}}$	1.2	1.2	1.2	1.2	N.A.
$F_I \text{ antes}$	1.0	1.0	1.0	1.0	N.A.
$F_I \text{ depois}$	1.0	1.0	1.0	1.0	N.A.
$C_{SO \text{ antes}}$	42.0	47.0	19.7	47.0	tC/ha
$C_{SO \text{ depois}}$	73.2	57.3	27.5	27.5	tC/ha
ΔC_{SO}	-31.2	-10.3	-7.8	19.5	tC/ha
Tempo	20.0	20.0	20.0	20.0	anos
ΔC_{LUC}	-1.2	-0.1	0.0	1.4	tC/ha.ano
η	4.5	4.5	0.3	0.3	t óleo/ha.ano
E_{LUC}	-0.9	-0.1	0.2	16.8	kgCO ₂ eq/kg

Fonte: elaboração do autor.

Finalmente, a contribuição das emissões de GEE de cada etapa do ciclo de vida (E_{LUC} , E_P e E_C) para produção de 1kg de combustível são resumidas no gráfico 8. A soma das emissões de todas as etapas do ciclo de vida é representada por “e”, como mostrado na equação (10), em termos de kgCO₂eq/kg. As emissões devido às mudanças no uso do solo serão representadas por $E_{LUC,i}$, sendo “i” o subíndice que representa a categoria de mudança de uso do solo conforme o Quadro 2.

$$e = E_{LUC,i} + E_P + E_C \quad (10)$$

Analisando o gráfico 8 pode-se perceber que nem sempre o biodiesel leva a emissões menores do que o diesel de petróleo. O biodiesel de soja produzido com a categoria de mudança de uso do solo 4 (cenário correspondente à remoção do

Cerrado para plantação de soja) emite 18,31 kgCO₂eq/kg, ou seja, aproximadamente cinco vezes mais que o diesel de petróleo.

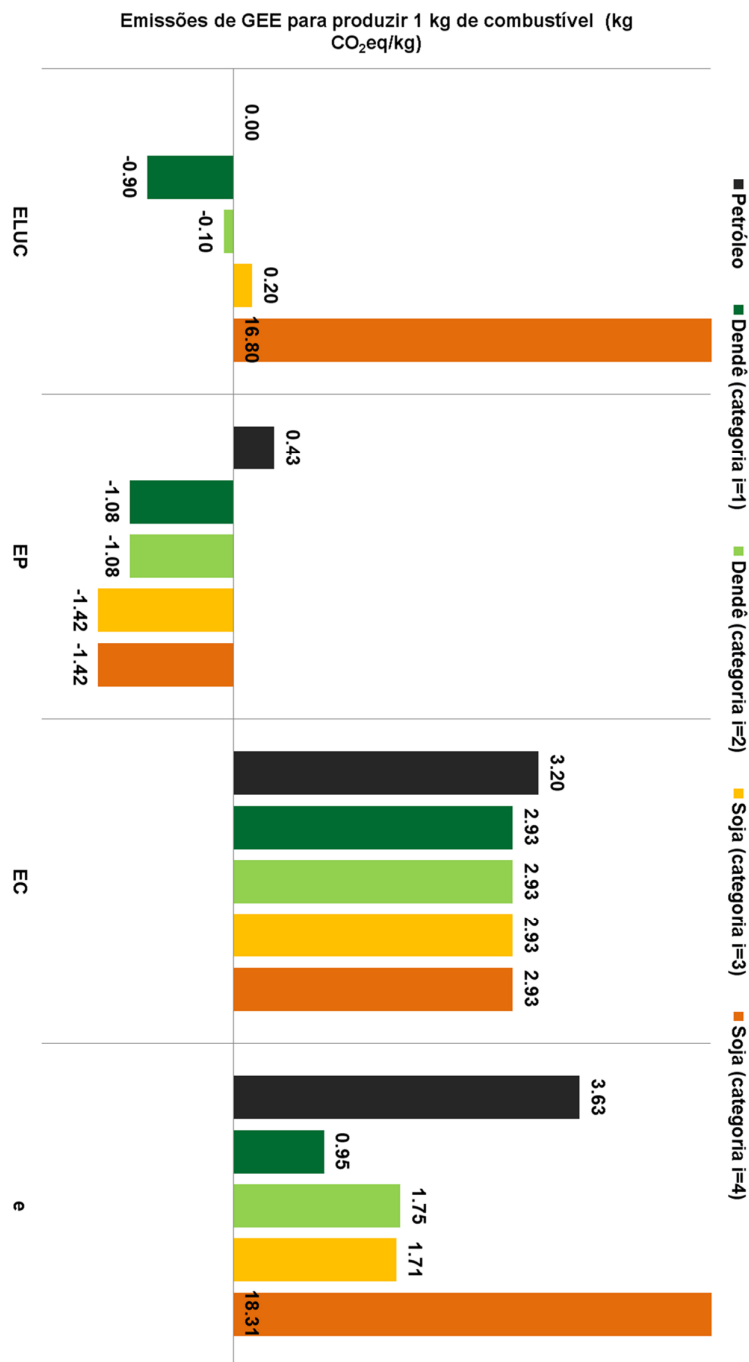


Gráfico 8 – Contribuição das emissões de GEE de cada etapa do ciclo de vida do óleo combustível de acordo com a matéria-prima e categoria de mudança de uso do solo.

Fonte: Elaboração do autor.

3.4 REDEFINIÇÃO DO PROBLEMA SOB PERSPECTIVA DA PO

O problema já foi definido na seção 1.2. Aqui, porém, o problema será enunciado sob a perspectiva da Pesquisa Operacional (PO), de modo a facilitar a solução.

Problema: o Brasil produz e usa o diesel de petróleo e o biodiesel. Considera-se que as matérias-primas para a produção de biodiesel são o óleo de dendê e óleo de soja e que toda a produção de diesel e biodiesel será integralmente utilizada (queimada). Deseja-se saber qual a quantidade a ser produzida de cada combustível, de forma a minimizar as emissões de GEE, e com isso determinar a porcentagem de biodiesel na mistura.

Sabe-se que:

- a. $E_{LUC,1} = -0,90 \text{ kgCO}_2\text{eq/kg}$;
- b. $E_{LUC,2} = -0,10 \text{ kgCO}_2\text{eq/kg}$;
- c. $E_{LUC,3} = 0,20 \text{ kgCO}_2\text{eq/kg}$;
- d. $E_{LUC,4} = 16,80 \text{ kgCO}_2\text{eq/kg}$;
- e. $E_{P,diesel} = 0,43 \text{ kgCO}_2\text{eq/kg}$;
- f. $E_{P,dendê} = -1,08 \text{ kgCO}_2\text{eq/kg}$;
- g. $E_{P,soja} = 1,42 \text{ kgCO}_2\text{eq/kg}$;
- h. $E_{C,diesel} = 3,20 \text{ kgCO}_2\text{eq/kg}$;
- i. $E_{C,biodiesel} = 2,93 \text{ kgCO}_2\text{eq/kg}$;
- j. A massa específica do diesel de petróleo é igual a 855 kg/m^3 (μ_{diesel}), do biodiesel de dendê é 880 kg/m^3 ($\mu_{dendê}$) e do biodiesel de soja é 885 kg/m^3 (μ_{soja});
- k. O poder calorífico do diesel de petróleo é igual a 43800 kJ/kg (C_{diesel}), do biodiesel de dendê é 33500 kJ/kg ($C_{dendê}$) e do biodiesel de soja é 33500 kJ/kg (C_{soja});

- l. O rendimento da produção de óleo de dendê é 4,5 t óleo/ha ($\eta_{\text{dendê}}$) e do óleo de soja é 0,3 t óleo/ha (η_{soja}). Esses valores foram obtidos através da média dos valores da tabela 3;
- m. A demanda nacional de diesel de petróleo (D) é igual a 60.857 tep (considerando a projeção para o ano de 2020);
- n. O valor da produção atual¹⁹ de biodiesel é 149.080,00 m³ (PA);
- o. Área correspondente à categoria 1 equivale a 29.675.132,96 ha;
- p. Área correspondente à categoria 2 equivale a 750.000,00 ha;
- q. Área correspondente à categoria 3 equivale a 11.379.181,85 ha;
- r. Área correspondente à categoria 4 equivale a 31.502.799,00 ha.

As restrições são:

1. Área com potencial agrícola: limitação do espaço físico;
2. Demanda energética nacional por diesel de petróleo: a produção deve ser maior que a demanda energética por diesel de petróleo;
3. A produção não pode assumir valores negativos: inconsistência física.

As variáveis de decisão são as quantidades de biodiesel e de diesel produzidas.

3.5 CONSTRUÇÃO DO MODELO

O total de emissões (E) para produzir uma quantidade x de combustível, é obtida multiplicando-se a quantidade produzida x , em kg, pelas emissões unitárias desse combustível (e), em kgCO₂eq/kg, como mostrado na equação (11) para o diesel de petróleo, equação (12) para o biodiesel de dendê e equação (13) para o biodiesel de soja.

¹⁹ O total de biodiesel produzido é de 200 mil m³/ano (Gráfico 7). Porém será considerado como produção atual (PA) apenas o biodiesel de soja, que corresponde a 74,54% do total de biodiesel produzido (ANP, 2012).

$$E_{\text{diesel}} = X_{\text{diesel}} * e_{\text{diesel}} \quad (11)$$

$$E_{\text{dendê}} = X_{\text{dendê},1} * e_{\text{dendê},1} + X_{\text{dendê},2} * e_{\text{dendê},2} \quad (12)$$

$$E_{\text{soja}} = X_{\text{soja},3} * e_{\text{soja},3} + X_{\text{soja},4} * e_{\text{soja},4} \quad (13)$$

A equação (14) corresponde ao cálculo do total de emissões para a produção atual de biodiesel (E_{PA}). O valor do biodiesel que já é produzido atualmente (PA) é conhecido e é um valor constante. Nesse cálculo E_{LUC} é igual a zero pois a produção já está estabelecida, não havendo mudanças no uso no solo.

$$E_{PA} = \mu_{\text{soja}} * PA * (E_{P,\text{soja}} + E_{C,\text{soja}}) \quad (14)$$

De posse do total de emissões de cada combustível (E) é possível calcular o total de emissões da mistura (Z) através da equação (15).

$$Z = E_{\text{diesel}} + E_{\text{dendê}} + E_{\text{soja}} + E_{PA} \quad (15)$$

A função objetivo, que minimiza o total de emissões, pode então ser escrita como mostrado na equação (16):

$$\text{Minimizar } Z = E_{\text{diesel}} + E_{\text{dendê}} + E_{\text{soja}} + E_{PA} \quad (16)$$

Sujeito às restrições:

$$\frac{X_{\text{dendê},1}}{\eta_{\text{dendê}}} \leq A_1 + A_2 + \dots + A_6 + A_{10} + A_{16} \quad (17)$$

$$\frac{X_{\text{dendê},2}}{\eta_{\text{dendê}}} \leq A_9 \quad (18)$$

$$\frac{X_{\text{soja},3}}{\eta_{\text{soja}}} \leq A_7 + A_{11} + A_{13} + A_{15} + A_{18} + A_{19} + A_{20} \quad (19)$$

$$\frac{X_{soja,4}}{\eta_{soja}} \leq A_8 + A_{12} + A_{14} + A_{17} \quad (20)$$

$$D \leq PA * \mu_{dendê} + C_{diesel} * X_{diesel} + C_{dendê} * (X_{dendê,1} + X_{dendê,2}) + C_{soja} * (X_{soja,3} + X_{soja,4}) \quad (21)$$

A equação (17) restringe a produção de dendê às áreas desmatadas da Amazônia Legal (categoria 1). A equação (18) restringe a produção de dendê às áreas aptas na Bahia (categoria 2). A equação (19) restringe a produção de soja nas áreas de pastagens degradadas no Centro-Sul (categoria 3) e a equação (20) restringe a produção de soja em áreas de cerrado com potencial agrícola na região Central (categoria 4). A restrição da equação (21) considera que a produção deve atender a demanda energética nacional por diesel em quilo Joules (kJ).

3.6 SOLUÇÃO DO MODELO

Para a solução do modelo foi montada uma planilha (figura 8) utilizando o programa Microsoft Excel 2010.

As variáveis de decisão (x) estão na linha 12 (células B12 a F12, em verde). São os valores que devem ser determinados para minizar a função objetivo.

A função objetivo, que corresponde ao total de emissões, está na célula G13, em alaranjado. Percebe-se que mesmo que as variáveis de decisão sejam inicialmente iguais a zero a função objetivo não é zero. Essas emissões são devido à produção atual (célula G17).

As variáveis de decisão multiplicadas pela área utilizada por unidade produzida²⁰ de cada categoria de uso (destacadas em amarelo) são iguais a área utilizada (células G4, G5, G6, G7, em azul). Essas células estão com valor zero, pois as variáveis de decisão estão assumindo o valor zero. As áreas são restringidas pelas células I4, I5, I6 e I7, também em azul, que representam a área com potencial agrícola.

²⁰ Corresponde ao inverso da produtividade de óleo por hectare.

O total de energia produzida pela mistura de combustíveis (célula I19, em rosa) deve ser menor ou igual que a demanda energética por diesel (célula G19, também destacada em rosa).

	A	B	C	D	E	F	G	H	I	J	
1		Área Utilizada por Unidade Produzida (ha/kg)									
2		Biodiesel de Palma		Biodiesel de Soja		Diesel	Total		Disponível	Unidades	
3		Categoria 1	Categoria 2	Categoria 3	Categoria 4						
4		2.22E-04	2.22E-04	3.33E-03	3.33E-03		-	≤	29,675,132.96	ha	
5		2.22E-04	2.22E-04	3.33E-03	3.33E-03		-	≤	750,000.00	ha	
6		2.22E-04	2.22E-04	3.33E-03	3.33E-03		-	≤	11,379,181.85	ha	
7		2.22E-04	2.22E-04	3.33E-03	3.33E-03		-	≤	31,502,799.00	ha	
8	E _{LUC}	-0.90	-0.10	-0.20	16.80	0				kgCO ₂ eq/kg	
9	E _P	-1.08	-1.08	-1.42	-1.42	0.429				kgCO ₂ eq/kg	
10	E _C	2.93	2.93	2.93	2.93	3.20				kgCO ₂ eq/kg	
11	e	0.95	1.75	1.31	18.31	3.629	0.00E+00			kgCO ₂ eq/kg	
12	x	0.00E+00	0.00E+00	0.00E+00	0.00E+00	0.00E+00	0.00E+00			kg	
13	E	0.00E+00	0.00E+00	0.00E+00	0.00E+00	0.00E+00	1.99E+08			kgCO ₂ eq	
14	Volume	0.00E+00	0.00E+00	0.00E+00	0.00E+00	0.00E+00	0.00E+00			m ³	
15	c	33500	33500	33500	33500	43800				kJ/kg	
16	μ	880	880	885	885	855				kg/m ³	
17	PA						1.49E+05			m ³	
18	E _{PA}						1.99E+08			kgCO ₂ eq/kg	
19	D						2.56E+15	≤	4.42E+12	kJ	
20	% BX								100.00%	N.A.	

Figura 8 – Planilha do *Microsoft Excel 2010* antes da aplicação do método *Simplex*, através da ferramenta *Solver*.

Fonte: elaboração do autor.

Para solucionar o modelo foi utilizada a ferramenta *Solver* do *Microsoft Excel 2010*, devido à conveniência dos dados poderem ser expressos em forma de planilha. Essa ferramenta permite a utilização de vários métodos para a solução de modelos matemáticos lineares e não lineares (*Evolutionary*, *GRG Nonlinear* e *Simplex LP*).

A figura 9 mostra a janela do *Solver* configurada a partir da planilha da figura 8, anteriormente à execução do método. Como o modelo foi desenvolvido em programação linear, utilizou-se o método *Simplex LP*. Em “*Set Objective*” foi selecionada a célula contendo a função objetivo e marcada a opção “*Min*”, pois o objetivo é minimizar as emissões. Em “*By Changing Variable Cells*” foram selecionadas as variáveis de decisão. No campo “*Subject to the Constraints*” foram selecionadas as células com as restrições de área e demanda energética.

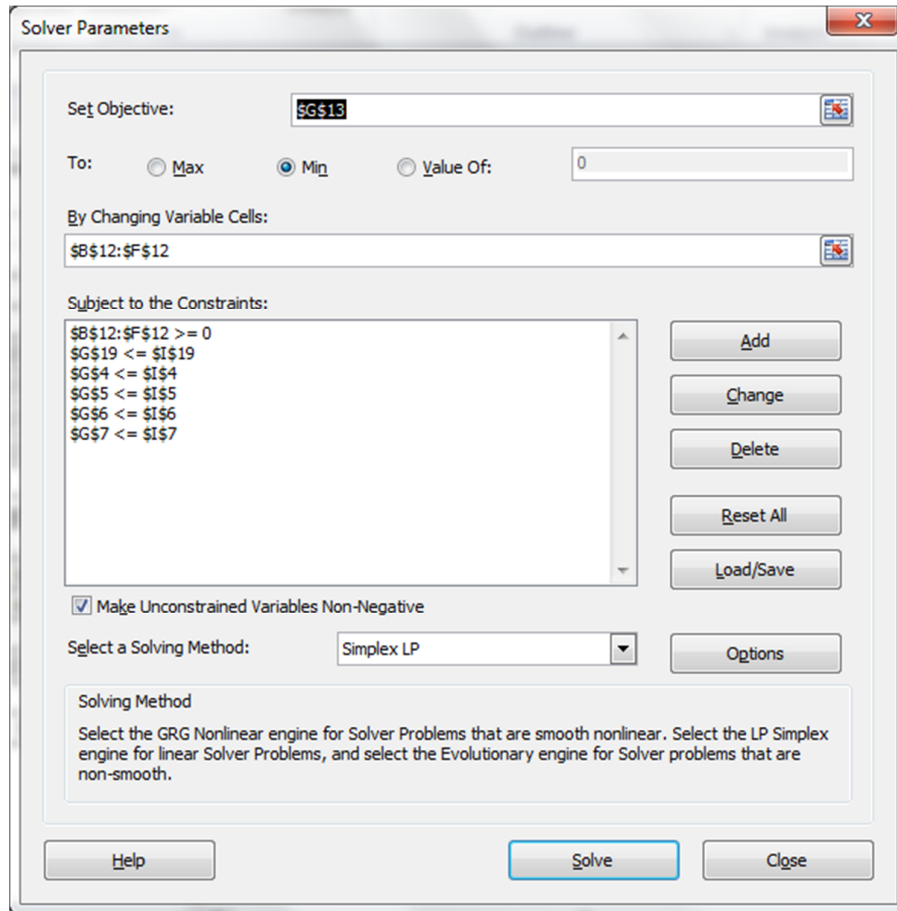


Figura 9 – Janela do *Solver* no *Excel 2010*, preenchida com os parâmetros utilizados para a execução do método *Simplex LP*.

Fonte: elaboração do autor.

4 RESULTADOS E ANÁLISE DOS RESULTADOS

Foram analisados três cenários com respeito à área de potencial agrícola:

- A. Considerando todas as áreas com potencial agrícola;
- B. Desconsiderando as áreas da Amazônia Legal;
- C. Considerando apenas as áreas com potencial de cultivo de soja.

A solução A (Apêndice A) é produzir e utilizar $8,66E07 \text{ m}^3$ de biodiesel puro (B100), utilizando apenas o óleo de dendê produzido em uma área de 16.925.865,01 ha na Amazônia Legal. Essa área corresponde a 63,45% das áreas desmatadas da Amazônia Legal. As emissões totais nesse cenário totalizam $7,26E10 \text{ kgCO}_2\text{eq}$.

A solução B (Apêndice B) é produzir e utilizar a mistura de 11,24% de biodiesel (B11), sendo $3,84E06 \text{ m}^3$ de biodiesel de dendê, $3,86E10^6$ de biodiesel de soja e $6,21E07 \text{ m}^3$ de diesel de petróleo. Nesse cenário o dendê é cultivado em uma área de 750 mil ha de Mata Atlântica na Bahia e a soja em 11.379.181,85 ha de pastagens degradadas no Centro-Sul. As emissões totais equivalem a $2,03E11 \text{ kgCO}_2\text{eq}$.

A solução C (Apêndice C) é produzir e utilizar a mistura de 5,81% (B5) de biodiesel de soja, sendo $3,86E06 \text{ m}^3$ de biodiesel de soja e $6,51E07 \text{ m}^3$ de diesel de petróleo. Nesse cenário a soja é cultivada em 11.379.181,85 ha de pastagens degradadas no Centro-Sul. Esse resultado é próximo do percentual que é usado hoje em dia (5%) quando a produção é predominantemente de óleo de soja. As emissões nesse cenário totalizaram $2,07E11 \text{ kgCO}_2\text{eq}$.

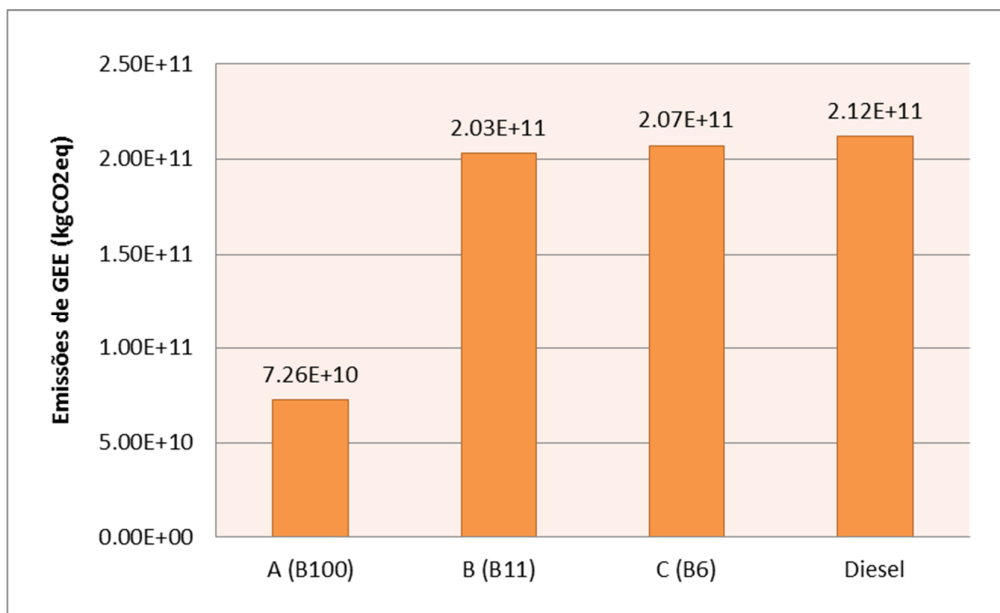


Gráfico 9 – Total de emissões de GEE por solução em comparação com o diesel puro.

Fonte: elaboração do autor.

O gráfico 9 mostra a comparação das emissões de GEE das soluções obtidas com as emissões do diesel de petróleo puro. O cenário A resulta em uma redução de 66,72% de emissões, o cenário B em 4,14% e o cenário C em 2,25%, relativamente ao diesel de petróleo.

Os resultados obtidos mostram que o Brasil tem condições de aumentar a produção de biodiesel contribuindo com a redução das emissões de GEE.

A melhor solução é a solução A, reforçando os benefícios da dendeicultura nas áreas desmatadas da Amazônia Legal, que já é reconhecida como “uma excelente alternativa para produção de óleo para fins alimentares e energéticos, constituindo suporte para o projeto governamental de ampliação e diversificação da matriz energética brasileira” (EMBRAPA, 2012).

Pela comparação entre as soluções B e C percebe-se que a dendeicultura nas regiões aptas da Bahia não oferece grandes vantagens em termos ambientais. Há uma pequena redução de emissões (4,14%). Porém, é provável que outros impactos ambientais devido ao desmatamento da Mata Atlântica, como a perda de biodiversidade, inviabilizem essa solução.

A solução C mostra que a produção e uso do biodiesel como é praticado hoje em dia no Brasil contribui, apesar de modestamente, com a redução das emissões de GEE (redução de 2,25% em relação ao diesel de petróleo).

Observa-se que em nenhum cenário foi necessário o uso das áreas correspondentes ao cultivo de soja sobre o Cerrado. Ou seja, não haveria necessidade de desmatar o Cerrado para expandir a produção, considerando a projeção da demanda energética de diesel para o ano de 2020.

5 CONCLUSÕES E RECOMENDAÇÕES PARA TRABALHOS FUTUROS

Foi determinado o percentual mais adequado para a mistura do biodiesel no diesel (B100) e o melhor cenário de produção (solução A) para minimizar as emissões de GEE. Também foram analisadas outras duas soluções (B e C), em que os percentuais da mistura obtidos foram B11 e B5, respectivamente. Portanto, considera-se que o objetivo deste trabalho foi alcançado.

O objetivo original deste trabalho incluía considerar outras categorias de impacto ambiental além de mudanças climáticas. Entretanto, isso implicaria na utilização de programação não linear ou programação linear com objetivos múltiplos, aumentando muito a complexidade da solução, fugindo do escopo deste trabalho.

É importante destacar que os dados do IPCC (2006), apesar de serem os mais abrangentes disponíveis, são constituídos de valores médios e têm erros significativos associados. Também, a classificação de vegetação padrão do IPCC mostra-se limitado, apresentando apenas três tipos de vegetação para todo o território brasileiro. Como recomendação para trabalhos futuros sugere-se:

- a. analisar o mesmo problema adicionando outras categorias de impacto ambiental (e.g.: acidificação, eutrofização, toxicidade humana e uso da água);
- b. analisar o mesmo problema adicionando outras matérias-primas (e.g.: algodão, mamona, girassol);
- c. utilizar dados regionais, mais precisos, para os inventários de ciclo de vida e cálculo das emissões devido às mudanças no uso do solo.

REFERÊNCIAS

ANP (AGÊNCIA NACIONAL DO PETRÓLEO, GÁS NATURAL E BIOCOMBUSTÍVEIS). **Boletim Mensal de Biodiesel**, ago. 2010. Disponível em <<http://www.anp.gov.br/?pg=61929&m=&t1=&t2=&t3=&t4=&ar=&ps=&cachebust=1348632559988>>. Acesso em: 25 set. 2012.

ADAMS, W. M. *The Future of Sustainability: Re-thinking Environment and Development in the Twenty-first Century*. **Report of the IUCN Renowned Thinkers Meeting**. Cambridge, 2006.

ALMEIDA, R. D. **Diretrizes para Elaboração de Inventários de Emissões de Gases de Efeito Estufa em Municípios de Pequeno e Médio Porte**. 2011. 195 p. Dissertação de Mestrado - Universidade Positivo, Curitiba, 2011.

ACEEE (AMERICAN COUNCIL FOR AN ENERGY-EFFICIENT ECONOMY). **The Twin Pillars of Sustainable Energy: Synergies between energy efficiency and renewable energy technology and policy**. Washington, 2007.

ARTAXO, P. ; BARCELLOS, C.; CARVALHO, M. S.; CORVALÁN, C.; GURGEL, H. C.; HACON, S.; MONTEIRO, A. M. V.; RAGONI, V. **Mudanças Climáticas e Ambientais e seus Efeitos na Saúde: cenários e incertezas para o Brasil**. **Epidemiologia e Serviços de Saúde**, Brasília, v. 18, n. 3, set. 2009. Disponível em <<http://scielo.iec.pa.gov.br>>. Acesso em: 31 mai. 2012.

ABNT (ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS). **NBR ISO 14040: Gestão ambiental - Avaliação do ciclo de vida - Princípios e estrutura**. Rio de Janeiro, 2001.

BILICH, Ferruccio; DASILVA, Ricardo. **Análise multicritério da produção de biodiesel**. **XIII SIMPEP**, Bauru, nov. 2006. Disponível em: <<http://www.simpep.feb.unesp.br>>. Acesso em: 31 mai. 2012.

BRASIL. MME (MINISTÉRIO DE MINAS E ENERGIA), EPE (EMPRESA DE PESQUISA ENERGÉTICA). **Balanco Energético Nacional 2011**. Rio de Janeiro, 2011.

_____. **Plano Decenal de Expansão de Energia 2020**. Brasília, 2011.

COLLARES, Daniela G. B5: Governo Federal antecipa percentual do biodiesel. **Empresa Brasileira de Agropecuária**, 26 out. 2009. Disponível em: <<http://www.embrapa.br/imprensa/noticias/2009/outubro/5a-semana/b5-governo-federal-antecipa-percentual-do-biodiesel>>. Acesso em: 31 mai. 2012.

COSTA, R. E. **Inventário do Ciclo de Vida do Biodiesel obtido a partir do óleo de dendê para as condições do Brasil e da Colômbia**. 2007. 195 p. Dissertação (Mestrado) – Universidade Estadual de Itajubá, Itajubá, 2007.

DEMIRBAS, Ayhan. Political, economic and environmental impacts of biofuels: A review. **Applied Energy**, v. 86, nov. 2009. Disponível em: <<http://www6.svsu.edu/~gmlange/BJLG08F09.pdf>>. Acesso em: 31 mai. 2012.

EMBRAPA (EMPRESA BRASILEIRA DE PESQUISA AGROPECUÁRIA). **Zoneamento Agroecológico do Dendezeiro para as Áreas Desmatadas da Amazônia Legal**. Rio de Janeiro, 2010. Disponível em: <http://www.cnps.embrapa.br/zoneamento_dende/ZonDende.pdf>. Acesso em: 31 mai. 2012.

ERKMAN, S. Industrial ecology: an historical view. **J. Cleaner Prod.**, 1997, v. 5, n. 1-2. Disponível em < <http://thayer.dartmouth.edu/~cushman/courses/engs171/ie-history.pdf>>. Acesso em: 31 mai. 2012.

FARGIONE, J; HILL, J.; TILMAN D.; POLASKY S.; HAWTHORNE P. Land Clearing and the Biofuel Carbon Debt, **Scienceexpress**, 7 fev. 2008. Disponível em <<http://www.sciencemag.org>>. Acesso em: 31 mai. 2012.

GIBBS H. K., JOHNSTON M.; FOLEY, J. A.; HOLLOWAY, T.; MONFREDA, C.; RAAMANKUTTY, R.; ZAKS, D. Carbon payback times for crop-based biofuel expansion in the tropics: the effects of changing yield and technology. **Enviromental Research Letters**, 3, 2008. Disponível em <<http://iopscience.iop.org/1748-9326/3/3/034001>>. Acesso em: 31 mai. 2012.

GOTARDELO, D. R. **Apostila de Pesquisa Operacional**. Juiz de Fora: Faculdade Estácio de Sá, 2009.

HILLIER, F. S.; LIEBERMAN, G. J. **Introduction to Operations Research**. New York: McGraw-Hill, 2011.

IBGE (INSTITUTO BRASILEIRO DE GEOGRAFIA E ESTATÍSTICA). **Censo Agropecuário 2006**: Resultados preliminares. Rio de Janeiro, 2007.

_____. **Mapa de Biomas e de Vegetação**. Disponível em: <<http://www.ibge.gov.br>>. Acesso em: 26 maio 2012.

_____. **Produção agrícola municipal 2010**: Culturas temporárias e permanentes. Rio de Janeiro, 2010.

IPCC (INTERGOVERNMENTAL PANEL ON CLIMATE CHANGE). **2006 IPCC Guidelines for National Greenhouse Gas Inventories**: Agriculture, Forestry and Other Land Use. Hayama, 2006.

_____. **Climate Change 2007**: Synthesis Report. Contribution of Working Groups I, II and III to the Fourth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change. Gênova, 2007.

_____. **Renewable Energy Sources and Climate Change Mitigation**: Special Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change. [S.l.], 2012.

IEA (INTERNACIONAL ENERGY AGENCY). **World Energy Outlook 2006**. Disponível em <<http://www.iea.org/textbase/nppdf/free/2006/weo2006.pdf>>. Acesso em: 31 mai. 2012.

JULIATO, Angelo. **Análise da influência de diferentes misturas de biodiesel no desempenho e emissões de poluentes de um motor diesel agrícola**. 2006. 159 p. Dissertação (Mestrado) – Escola Superior de Agricultura Luiz de Queiroz, Piracicaba, 2006.

KOH, L. P.; WILCOVE, D. S. Is Oil Palm Agriculture Really Destroying Tropical Biodiversity? **Conservation Letters**, [S.l.], v. 1, 15 mai. 2008.

LANGE, Mareike. The GHG Balance of Biofuels Taking into Account Land Use Change. **Kiel Working Papers**, n. 1619, [S.l.], abr. 2010. Disponível em <<http://www.ifw-kiel.de>>. Acesso em: 31 mai. 2012.

LIMA, Ângela F. M.. **Avaliação do Ciclo de Vida no Brasil: Inserção e perspectivas**, 2007, 116 p. Dissertação (Mestrado em Gerenciamento e Tecnologias Ambientais no Processo Produtivo) - Universidade Federal da Bahia, Escola Politécnica, Salvador, 2007.

LISBOA, Érico F. A. **Pesquisa Operacional: Apostila da Disciplina**. Rio de Janeiro, 2002. Disponível em <<http://www.ericolisboa.eng.br>>. Acesso em: 31 mai. 2012.

MACEDO, M. C. M.; KICHEL, A. N.; ZIMMER, A. H. Degradação e Alternativas de Recuperação de Pastagens. **Embrapa Gado de Corte**, n. 62, nov. 2000. Disponível em: <<http://www.cnpqc.embrapa.br/publicacoes/cot/COT62.html>>. Acesso em: 15 mai. 2012.

MAGATÃO, Leandro. **Pesquisa Operacional: Notas de Aula**. Curitiba, 2009.

MENICHETTI, E.; OTTO, M. Energy Balance and Greenhouse Gas Emissions of Biofuels from a Life Cycle Perspective In: **Biofuels: Environmental Consequences and Interactions with Changing Land Use**, Gummersbach, 2009.

MAPA (MINISTÉRIO DA AGRICULTURA, PECUÁRIA E ABASTECIMENTO). **Plano Nacional de Agroenergia 2006-2011**. Brasília, 2006.

MME (MINISTÉRIO DE MINAS E ENERGIA). **Boletim Mensal dos Combustíveis Renováveis**, ed. 44, ago. 2011. Disponível em <http://www.mme.gov.br/spg/galerias/arquivos/publicacoes/boletim_mensal_combustiveis_renovaveis/Boletim_DCR_nx_044_-_agosto_de_2011.pdf>. Acesso em: 15 mai. 2012.

MORAES, Márcio. A. E. de; PEREIRA, Enio. B. Cenário de Emissões Atmosféricas Decorrentes do Emprego do Biodiesel de Soja. **Congresso Brasileiro de Meteorologia**, São José dos Campos, 2008.

OLIVEIRA, P. P. A.; TRIVELIN, P. C. O.; OLIVEIRA, W. S.; CORSI, M. Fertilização com N e S na Recuperação de Pastagem de *Brachiaria brizantha* cv. Marandu em

em Neossolo Quartzarênico. **Revista Brasileira de Zootecnia**, v. 34, n. 4, Viçosa, ago. 2005.

PIMENTEL, Carlos. Metabolismo de carbono de plantas cultivadas e o aumento de CO₂ e de O₃ atmosférico: situação e previsões. **Bragantia**, v. 70, n. 1. Campinas, 2011

PRE-CONSULTANTS, **Ecoinvent**: Life Cycle Inventory database. In: SimaPro 7.1.8, 2008.

REN 21 (RENEWABLE ENERGY POLICY NETWORK FOR THE 21st CENTURY). **Renewables 2011**: Global Status Report. 2011.

ROZA, F. C.; FREITAS, L. S. **Balço das Emissões de Gases do Efeito Estufa (GEE) na Cadeia Completa de Produção do Biodiesel de Soja**. 2010, 141 p. Trabalho de Conclusão de Curso (Graduação) - Universidade Federal do Rio de Janeiro, Escola Politécnica, Rio de Janeiro, 2010.

SANTOS, Anamélia M. **Análise do Potencial do Biodiesel de Dendê para a Geração Elétrica em Sistemas Isolados na Amazônia**. 2008. 224 p. Dissertação de Mestrado - Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 2008.

SEBRAE (SERVIÇO BRASILEIRO DE APOIO ÀS MICRO E PEQUENAS EMPRESAS). **Cartilha do Biodiesel**, 2010. Disponível em <<http://www.mme.gov.br/programas/biodiesel/menu/Publicacoes.html>>. Acesso em: 31 mai. 2012.

SILVA, E. L. D.; FERREIRA, V. D. O. **Estabelecimento da Quantidade de Biodiesel no Diesel Considerando as Emissões de Gases Causadores do Efeito Estufa**. 2009. 59 p. Trabalho de Conclusão de Curso - Universidade Tecnológica Federal do Paraná. Curitiba, 2009.

TIMILSINA, G. R.; MEVEL, S. Biofuels and Climate Change Mitigation: A CGE Analysis Incorporating Land-Use Change. **World Bank**, Washington, 2011.

UGAYA, Cássia Maria Lie. **Análise de Ciclo de Vida**: estudo de caso para materiais e componentes automotivos no Brasil. 2001. 199 p. Tese (Doutorado) – Universidade Estadual de Campinas (Faculdade de Engenharia Mecânica). Campinas, 2001.

UGAYA, Cássia Maria Lie. **Avaliação do Ciclo de Vida**. Notas de aula da disciplina Ecologia Industrial. UTFPR. Curitiba, 2011.

UNEP (UNITED NATIONS ENVIRONMENT PROGRAMME). **UNEP Guide to Life Cycle Management a bridge to sustainable products**, 2006.

UNITED NATIONS. 2005 **World Summit Outcome**, 2005. Disponível em <<http://www.un.org/summit2005>>. Acesso em 31 mai. 2012.

UNFCCC (UNITED NATIONS FRAMEWORK CONVENTION ON CLIMATE CHANGE). **UNFCCC Data Interface**, 2012. Disponível em: <<http://unfccc.int/di/DetailedByParty/Event.do?event=go>>. Acesso em: 15 Mai 2012.

_____. **Kyoto Protocol Reference Manual on Account of Emissions and Assigned Amount**, 2008.

WORLDWATCH INSTITUTE. **Biofuels Make a Comeback Despite Tough Economy**. Washington, 2011.

WWF – BRASIL (Fundo Mundial para a Natureza). **Florestas seguem carentes de mais proteção**. 2012. Disponível em <http://www.wwf.org.br/natureza_brasileira/reducao_de_impactos2/temas_nacionais/codigoflorestal/?32882/Florestas-seguem-carentes-de-mais-proteo>. Acesso em 29 out. 2012.

_____. **O impacto do mercado mundial de biocombustíveis na expansão da agricultura brasileira e suas consequências para as mudanças climáticas: Documento para consulta e debate**. Brasília, 2009. Disponível em <<http://www.wwf.org.br/informacoes/bliblioteca>>. Acesso em 31 mai. 2012.

APÊNDICE A – Solução A

	A	B	C	D	E	F	G	H	I	J
1		Área Utilizada por Unidade Produzida (ha/kg)								
2		Biodiesel de Palma		Biodiesel de Soja		Diesel	Total		Disponível	Unidades
3		Categoria 1	Categoria 2	Categoria 3	Categoria 4					
4		2.22E-04	2.22E-04	3.33E-03	3.33E-03		16,925,865.01	≤	29,675,132.96	ha
5		2.22E-04	2.22E-04	3.33E-03	3.33E-03		-	≤	750,000.00	ha
6		2.22E-04	2.22E-04	3.33E-03	3.33E-03		-	≤	11,379,181.85	ha
7		2.22E-04	2.22E-04	3.33E-03	3.33E-03		-	≤	31,502,799.00	ha
8	E _{LUC}	-0.90	-0.10	-0.20	16.80	0				kgCO ₂ eq/kg
9	E _P	-1.08	-1.08	-1.42	-1.42	0.429				kgCO ₂ eq/kg
10	E _C	2.93	2.93	2.93	2.93	3.20				kgCO ₂ eq/kg
11	e	0.95	1.75	1.31	18.31	3.629	7.24E+10			kgCO ₂ eq/kg
12	x	7.62E+10	0.00E+00	0.00E+00	0.00E+00	0.00E+00	7.62E+10			kg
13	E	7.24E+10	0.00E+00	0.00E+00	0.00E+00	0.00E+00	7.26E+10			kgCO ₂ eq
14	Volume	8.66E+07	0.00E+00	0.00E+00	0.00E+00	0.00E+00	8.66E+07			m ³
15	c	33500	33500	33500	33500	43800				kJ/kg
16	μ	880	880	885	885	855				kg/m ³
17	PA						1.49E+05			m ³
18	E _{PA}						1.99E+08			kgCO ₂ eq/kg
19	D						2.56E+15	≤	2.56E+15	kJ
20	% BX								100.00%	N.A.

APÊNDICE B – Solução B

	A	B	C	D	E	F	G	H	I	J
1		Área Utilizada por Unidade Produzida (ha/kg)								
2		Biodiesel de Palma		Biodiesel de Soja		Diesel	Total		Disponível	Unidades
3		Categoria 1	Categoria 2	Categoria 3	Categoria 4					
4		2.22E-04	2.22E-04	3.33E-03	3.33E-03		-	≤	-	ha
5		2.22E-04	2.22E-04	3.33E-03	3.33E-03		750,000.00	≤	750,000.00	ha
6		2.22E-04	2.22E-04	3.33E-03	3.33E-03		11,379,181.85	≤	11,379,181.85	ha
7		2.22E-04	2.22E-04	3.33E-03	3.33E-03		-	≤	31,502,799.00	ha
8	E _{LUC}	-0.90	-0.10	-0.20	16.80	0				kgCO ₂ eq/kg
9	E _P	-1.08	-1.08	-1.42	-1.42	0.429				kgCO ₂ eq/kg
10	E _C	2.93	2.93	2.93	2.93	3.20				kgCO ₂ eq/kg
11	e	0.95	1.75	1.31	18.31	3.629	2.03E+11			kgCO ₂ eq/kg
12	x	0.00E+00	3.38E+09	3.41E+09	0.00E+00	5.31E+10	5.99E+10			kg
13	E	0.00E+00	5.91E+09	4.47E+09	0.00E+00	1.93E+11	2.03E+11			kgCO ₂ eq
14	Volume	0.00E+00	3.84E+06	3.86E+06	0.00E+00	6.21E+07	6.98E+07			m ³
15	c	33500	33500	33500	33500	43800				kJ/kg
16	μ	880	880	885	885	855				kg/m ³
17	PA						1.49E+05			m ³
18	E _{PA}						1.99E+08			kgCO ₂ eq/kg
19	D						2.56E+15	≤	2.56E+15	kJ
20	% BX								11.22%	N.A.

APÊNDICE C – Solução C

	A	B	C	D	E	F	G	H	I	J	
1		Área Utilizada por Unidade Produzida (ha/kg)									
2		Biodiesel de Palma		Biodiesel de Soja		Diesel	Total		Disponível	Unidades	
3		Categoria 1	Categoria 2	Categoria 3	Categoria 4						
4		2.22E-04	2.22E-04	3.33E-03	3.33E-03		-	≤	-	ha	
5		2.22E-04	2.22E-04	3.33E-03	3.33E-03		-	≤	-	ha	
6		2.22E-04	2.22E-04	3.33E-03	3.33E-03		11,379,181.85	≤	11,379,181.85	ha	
7		2.22E-04	2.22E-04	3.33E-03	3.33E-03		-	≤	31,502,799.00	ha	
8	E _{LUC}	-0.90	-0.10	-0.20	16.80	0				kgCO ₂ eq/kg	
9	E _P	-1.08	-1.08	-1.42	-1.42	0.429				kgCO ₂ eq/kg	
10	E _C	2.93	2.93	2.93	2.93	3.20				kgCO ₂ eq/kg	
11	e	0.95	1.75	1.31	18.31	3.629	2.06E+11			kgCO ₂ eq/kg	
12	x	0.00E+00	0.00E+00	3.41E+09	0.00E+00	5.56E+10	5.91E+10			kg	
13	E	0.00E+00	0.00E+00	4.47E+09	0.00E+00	2.02E+11	2.07E+11			kgCO ₂ eq	
14	Volume	0.00E+00	0.00E+00	3.86E+06	0.00E+00	6.51E+07	6.89E+07			m ³	
15	c	33500	33500	33500	33500	43800				kJ/kg	
16	μ	880	880	885	885	855				kg/m ³	
17	PA						1.49E+05			m ³	
18	E _{PA}						1.99E+08			kgCO ₂ eq/kg	
19	D						2.56E+15	≤	2.56E+15	kJ	
20	% BX								5.80%	N.A.	

ANEXO A – Mapa de Zonas Climáticas

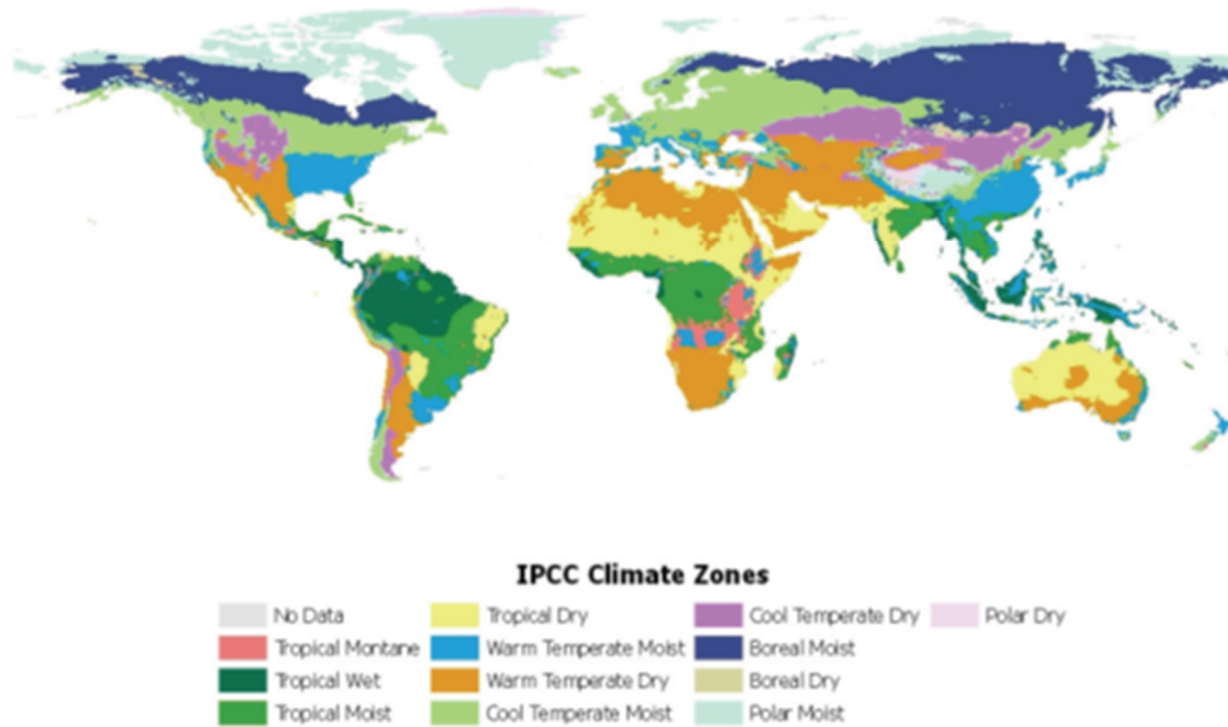


Figura 10 – Mapa de Zonas Climáticas.

Fonte: IPCC (2006)

ANEXO B – Mapa de Biomias ou Zonas Ecológicas

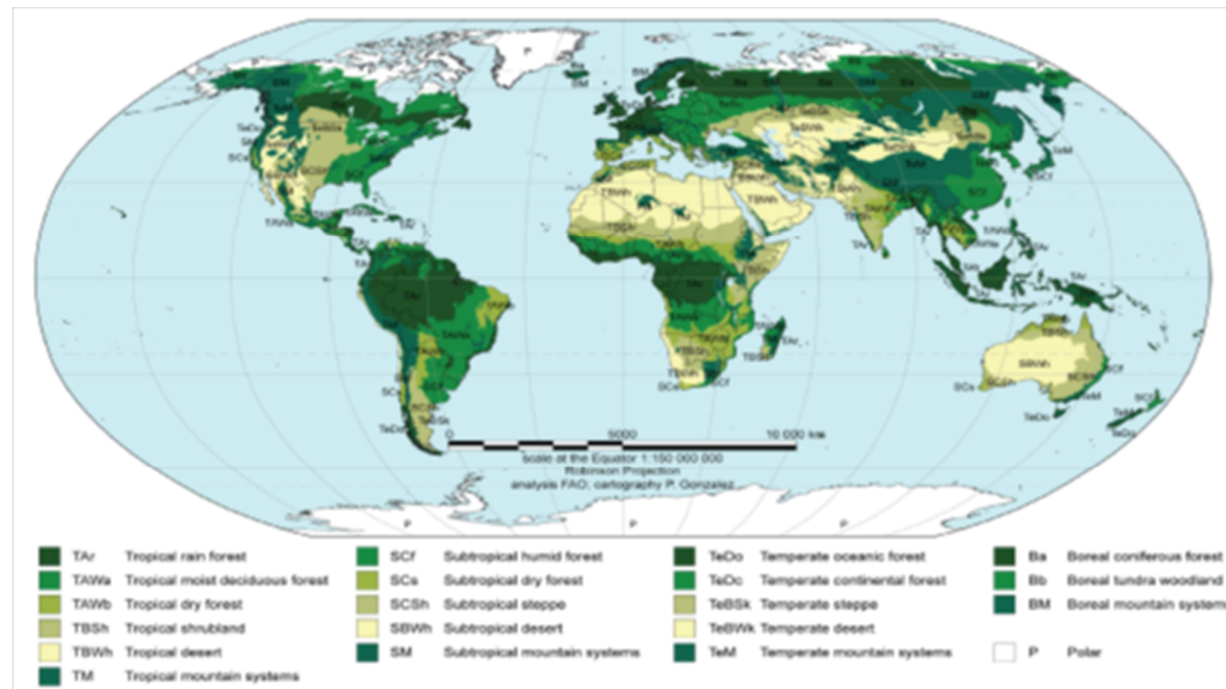


Figura 11 – Mapa de Biomias (Zonas Ecológicas).

Fonte: IPCC (2006).

ANEXO C – Mapa dos Tipos de Solo

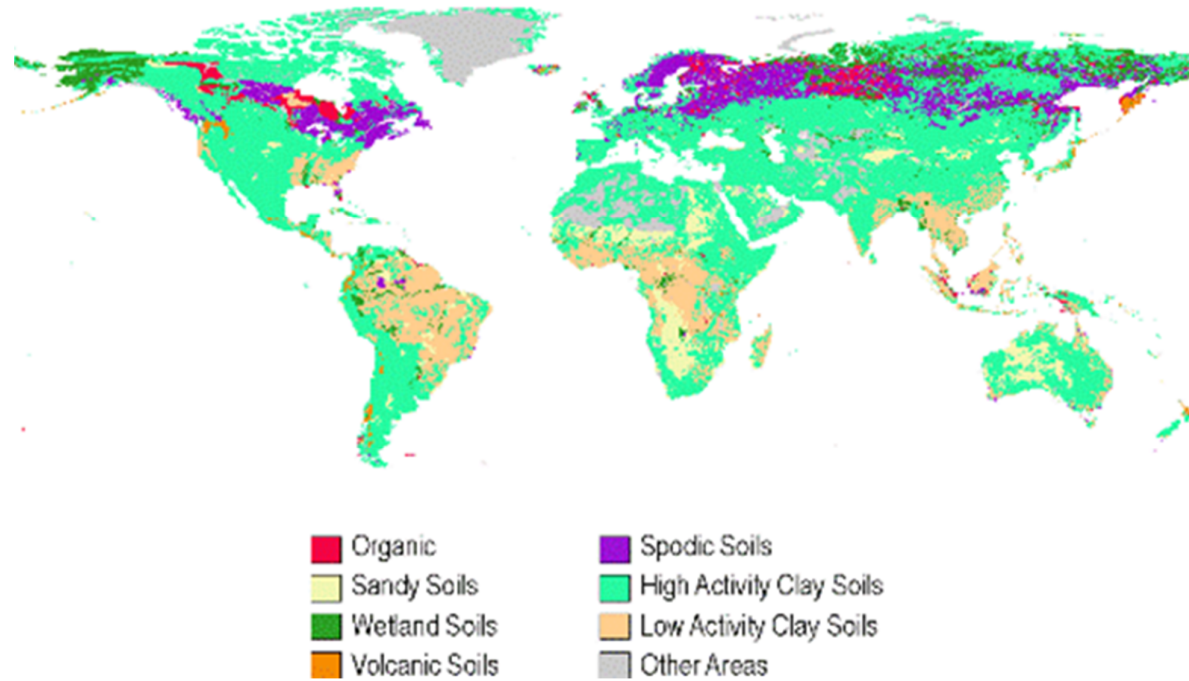


Figura 12 – Mapa dos Tipos de Solo.

Fonte: IPCC (2006).