

**Universidade de São Paulo
Escola Superior de Agricultura “Luiz de Queiroz”**

**Impactos de regulações ambientais sobre o transporte de cargas no Brasil:
uma análise para o transporte de soja**

Ednilson Sebastião de Ávila

Tese apresentada para obtenção do título de Doutor em
Ciências. Área de concentração: Economia Aplicada

**Piracicaba
2016**

Ednilson Sebastião de Ávila
Bacharel em Ciências Econômicas

**Impactos de regulações ambientais sobre o transporte de cargas no Brasil: uma análise
para o transporte de soja**

Orientador:
Prof. Dr. **JOSÉ VICENTE CAIXETA FILHO**

Tese apresentada para obtenção do título de Doutor em
Ciências. Área de concentração: Economia Aplicada

**Piracicaba
2016**

**Dados Internacionais de Catalogação na Publicação
DIVISÃO DE BIBLIOTECA - DIBD/ESALQ/USP**

Ávila, Ednilson Sebastião de
Impactos de regulações ambientais sobre o transporte de cargas no Brasil: uma
análise para o transporte de soja / Ednilson Sebastião de Ávila. - - Piracicaba, 2016.
216 p. : il.

Tese (Doutorado) - - Escola Superior de Agricultura "Luiz de Queiroz".

1. Emissões de CO2 2. Transporte intermodal 3. Programação linear 4. Biodiesel
5. Infraestrutura logística I. Título

CDD 338.17334
A958i

"Permitida a cópia total ou parcial deste documento, desde que citada a fonte – O autor"

AGRADECIMENTOS

Ao completar esta jornada, percebo cada vez mais que tudo aquilo que obtive não consegui sozinho. Foram muitos os que me auxiliaram no desenvolvimento deste trabalho, seja por meio do suporte acadêmico, mas também por meio do suporte emocional e espiritual.

Em primeiro lugar, agradeço a Deus por sempre se fazer presente, seja nos momentos de aflição e cansaço, seja nos momentos de alegrias e realizações. Agradeço meus pais, minha irmã, meus sobrinhos e minha namorada pelo apoio dado e por entenderem minha longa ausência. Aos meus tios e primos, por me acolherem em sua casa durante meus estudos, não existem palavras que sejam capazes de descrever minha gratidão. Aos colegas de curso e de Departamento, agradeço pela ajuda e pelo companheirismo.

Agradeço aos professores e funcionários do Departamento de Economia, Administração e Sociologia da Escola Superior de Agricultura “Luiz de Queiroz” pela colaboração em todas as etapas desta pesquisa. Em especial, agradeço aos professores Maria Pinheiro, José Eduardo Branco e Lilian Maluf pelas sugestões e conselhos durante a etapa de qualificação deste trabalho.

Agradeço de forma especial ao meu orientador, o professor Dr. José Vicente Caixeta Filho, pela paciência, disponibilidade e conhecimento transmitido ao longo desta pesquisa. Agradeço também ao Thiago Péra, do Grupo de Pesquisa e Extensão em Logística Agroindustrial da Escola Superior de Agricultura “Luiz de Queiroz” – ESALQ-LOG por disponibilizar parte dos dados utilizados nesta pesquisa.

Agradeço à Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior (CAPES) pelo apoio financeiro concedido durante parte do doutorado.

A todos os envolvidos, muito obrigado!

“ Um dia me disseram
Que as nuvens não eram de algodão
Um dia me disseram
Que os ventos às vezes erram a direção

Quem ocupa o trono tem culpa
Quem oculta o crime também
Quem duvida da vida tem culpa
Quem evita a dúvida também tem

Somos quem podemos ser
Sonhos que podemos ter ”

Engenheiros do Hawaii

SUMÁRIO

RESUMO	9
ABSTRACT	11
LISTA DE FIGURAS	13
LISTA DE QUADROS	15
LISTA DE TABELAS	17
LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS	21
1 INTRODUÇÃO.....	23
2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	29
2.1 Aquecimento global e políticas de mitigação das emissões	29
2.2 Potencial da logística na redução das emissões de CO ₂	40
2.3 Impactos de políticas ambientais sobre a economia brasileira	49
3 O TRANSPORTE DE CARGAS NO BRASIL E AS EMISSÕES DE GEE	57
3.1 O setor do transporte de cargas brasileiro	57
3.1.1 Modal rodoviário	59
3.1.2 Modal ferroviário.....	63
3.1.3 Modal hidroviário	66
3.2 Projetos de expansão	68
3.3 Emissões de Gases de Efeito Estufa no Brasil	76
4 MATERIAL E MÉTODO	85
4.1 Economia da poluição	85
4.1.1 Poluição ótima	87
4.2 Instrumentos de políticas ambientais.....	89
4.2.1 Política de comando e controle.....	89
4.2.2 Adoção de uma taxa	91
4.2.3 Mercado dos direitos de poluir	91
4.3 Modelo de Fluxo de Custo Mínimo Ambiental.....	94
4.3.1 Limite sobre as emissões de CO ₂	101
4.3.2 Taxa de carbono.....	102
4.3.3 Mecanismo de compra e venda de créditos	103
4.3.4 Mecanismo de compensação de carbono.....	104
4.4 Modelo de otimização proposto	105
4.5 Dados	111
5 RESULTADOS	119
5.1 Análise da simulação no cenário base	121
5.2 Análise da simulação no cenário geral	135

5.3 Análise da simulação nos cenários de projetos de expansão das ferrovias e hidrovias ...	142
5.3.1 Análise da simulação no cenário expansão.....	142
5.3.2 Análise da simulação no cenário futuro	149
5.4 Comparação dos efeitos das medidas analisadas nos cenários adotados	157
5.5 Análise da simulação do cenário de crescimento da produção	165
6 CONCLUSÃO	175
REFERÊNCIAS	179
ANEXOS	189

RESUMO

Impactos de regulações ambientais sobre o transporte de cargas no Brasil: uma análise para o transporte de soja

O aumento da concentração de gases de efeito estufa na atmosfera levou a uma preocupação de como se reduzir as emissões destes gases. Desta preocupação surgiram instrumentos de regulação a fim de reduzir ou controlar os níveis de poluição. Dentro deste contexto, esta pesquisa analisou o setor de transportes de cargas, com ênfase no transporte de soja. No Brasil, o setor de transportes é um dos principais responsáveis pelas emissões de gases de efeito estufa provenientes da queima de combustíveis fósseis. No setor de transportes, as emissões diferem entre os modais, sendo que as ferrovias e hidrovias poluem menos que as rodovias. Desta forma, simulou-se por meio de um modelo de programação linear se a adoção de medidas regulatórias sobre as emissões de CO₂ traria uma alteração no uso das ferrovias e hidrovias. Uma das constatações, ao se utilizar o modelo de Minimização de Fluxo de Custo Mínimo para o transporte de soja em 2013, foi que a capacidade de embarque nos terminais ferroviários e hidroviários desempenha um papel fundamental na redução das emissões de CO₂. Se não houver capacidade suficiente, a adoção de uma taxa pode não provocar a redução das emissões. No caso do sistema de compra e crédito de carbono, seria necessária a compra de créditos de carbono, numa situação em que a capacidade de embarque nos terminais intermodais seja limitada. Verificou-se, ainda, que melhorias na infraestrutura podem desempenhar um papel mitigador das emissões. Um aumento da capacidade dos terminais ferroviários e hidroviários existentes, bem como o aumento da capacidade dos portos, pode provocar a redução das emissões de CO₂. Se os projetos de expansão das ferrovias e hidrovias desenvolvidos por órgãos governamentais saírem do papel, pode-se chegar a uma redução de pouco mais de 50% das emissões de CO₂. Consideraram-se ainda quais seriam os efeitos do aumento do uso de biodiesel como combustível e percebeu-se que seria possível obter reduções tanto das emissões quanto do custo de transporte. Efeitos semelhantes foram encontrados quando se simulou um aumento da eficiência energética. Por fim, percebeu-se nesta pesquisa que a adoção de uma taxa não traria tantos benefícios, econômicos e ambientais, quanto a melhoria da infraestrutura logística do país.

Palavras-chave: Emissões de CO₂; Transporte intermodal; Programação linear; Biodiesel; Infraestrutura logística

ABSTRACT

Impacts of environmental regulations on the freight transport in Brazil: an analysis for soybean transport

The increased concentration of greenhouse gases in the atmosphere has led to a concern of how to reduce emissions of these gases. From this concern, regulatory instruments were conceived in order to reduce or control pollution levels. Within this context, this research examined the freight transport sector, with emphasis on the soybean transport. In Brazil, the transportation sector is a major contributor to the greenhouse gas emissions from burning fossil fuels. In the transportation sector, emissions differ among transportation modes, with the railways and waterways polluting less than the highways. Thus, it is simulated by means of a linear programming model if the adoption of regulatory measures on CO₂ emissions would bring a change in the use of railways and waterways. One of the findings, using the model of Minimum Cost Flow Minimization for soybean transport in 2013, was that the loading capacity on rail and waterway terminals plays a key role in reducing CO₂ emissions. If there is an insufficient capacity, the adoption of a tax may not cause the reduction of emissions. In the case of the cap and trade system, this would require the purchase of carbon credits in a situation where the loading capacity in intermodal terminals is limited. It was found further that improvements in the infrastructure could play a mitigating role for emissions. An increase in capacity of existing rail and waterway terminals, as well as increasing the capacity of ports, can cause the reduction of CO₂ emissions. If the expansion projects of railways and waterways developed by government agencies leave the paperwork, it can be reached a reduction of over 50% of CO₂ emissions. It was still considered what would be the effects of increased use of biodiesel as fuel, being realized that it would be possible to obtain reductions in both emissions and the shipping cost. Similar effects were found when it was simulated an increase of energy efficiency. Finally, it was noted in this study that the adoption of a tax would not bring so many benefits, including the economic and environmental ones, to improve the country's logistics infrastructure.

Keywords: CO₂ emissions; Intermodal transportation; Linear programming; Biodiesel; Logistics infrastructure

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 – Distribuição dos modais de transportes no Brasil	58
Figura 2 – Participação dos modais de transporte	60
Figura 3 – Traçado da Nova Transnordestina	71
Figura 4 – Configuração futura da malha ferroviária brasileira	73
Figura 5 – Participação dos setores nas emissões de CO ₂ e	78
Figura 6 – Emissões de CO ₂ provenientes da queima de combustíveis fósseis no transporte rodoviário de cargas.....	81
Figura 7 – Emissões de CO ₂ das principais concessionárias ferroviárias	82
Figura 8 – Emissão específica por modal de transporte (gCO ₂ /TKU)	83
Figura 9 – Custo marginal privado da poluição x custo marginal social da poluição	86
Figura 10 – Ganhos e perdas das empresas quando se considera a poluição	87
Figura 11 – Gráfico de Turvey com capacidade de absorção da poluição	88
Figura 12 – Estabelecimento de um limite sobre as emissões de poluentes.....	90
Figura 13 – Internalização através de uma tarifa.....	91
Figura 14 – Internalização através de um mercado de direitos de poluir - várias empresas. ...	92
Figura 15 – Internalização por meio do mercado de direitos de poluir	94
Figura 16 – Representação do Modelo de Fluxo de Custo mínimo	95
Figura 17 – Participação das emissões de CO ₂ no transporte de cargas no ano 2013 por modal de transporte	124
Figura 18 – Participação das emissões estimadas de CO ₂ por modal de transporte.....	124
Figura 19 – Variação da quantidade embarcada nos portos em função da capacidade dos portos.....	131
Figura 20 – Variação da quantidade embarcada nos terminais de acordo com a taxa adotada	144
Figura 21 – Variação da quantidade embarcada nos novos terminais de acordo com a capacidade dos terminais existentes	147
Figura 22 – Participação das novas ferrovias e hidrovias no transporte de soja	151
Figura 23 – Variação da carga embarcada nos portos de acordo com os cenários adotados .	163
Figura 24 – Participação das novas ferrovias e hidrovias no transporte de soja no cenário crescimento da produção	167
Figura 25 – Comparação do custo total nos cenários futuro e crescimento da produção.....	172

Figura 26 – Comparação das emissões de CO ₂ entre os cenários futuro e crescimento da produção	173
Figura 27 – Carga transportada nas novas ferrovias/hidroviás nos cenários futuro e crescimento da produção.....	173

LISTA DE QUADROS

Quadro 1 – Síntese dos modelos propostos	110
Quadro 2 – Cenários propostos	110
Quadro 3 – Projetos ferroviários em fase de construção no ano de 2015	142
Quadro 4 – Projetos que ainda não começaram a ser executados em 2015	150

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 – Evolução da pavimentação das rodovias <i>x</i> evolução das ferrovias	60
Tabela 2 – Classificação da qualidade das rodovias.....	61
Tabela 3 – Classificação do estado geral das rodovias: privadas <i>x</i> públicas.....	62
Tabela 4 – Extensão da malha ferroviária brasileira em 2013	64
Tabela 5 – Principais produtos transportados por concessionária ferroviária no Brasil em 2013	65
Tabela 6 – Transporte de carga em TKU por hidrovía brasileira em 2013	67
Tabela 7 – Ferrovia Norte-Sul: trechos em operação, construídos e projetados em 2015	70
Tabela 8 – Projeto Ferrovia de Integração Oeste-Leste (FIOL).....	71
Tabela 9 – Projetos Ferrovia do Pantanal e corredor ferroviário de Santa Catarina	72
Tabela 10 – Projeto Ferrovia de Integração do Centro-Oeste	73
Tabela 11 – Programa de Investimento em Logística (1ª e 2ª etapas) – ferrovias	74
Tabela 12 – Projetos propostos pelo Plano Hidroviário Estratégico (2013)	75
Tabela 13 – Evolução das emissões de CO ₂ provenientes da queima de combustíveis, por modal de transporte no Brasil (mil t).....	78
Tabela 14 – Consumo de óleo diesel no Brasil (milhões de m ³).....	79
Tabela 15 – Emissões de CO ₂ e no setor de transporte brasileiro em 2013 (Total: 212,2 MtCO ₂ e).....	80
Tabela 16 – Emissões totais do transporte ferroviário de carga entre 2006 e 2013	81
Tabela 17 – Estimação das equações de frete.....	113
Tabela 18 – Consumo específico médio das concessionárias ferroviárias.....	115
Tabela 19 – Taxas adotadas sobre as emissões de CO ₂ e.....	116
Tabela 20 – Preço do crédito/permissão de carbono	117
Tabela 21 – Minimização do custo de transporte, do custo ambiental e das emissões no cenário base	122
Tabela 22 – Tonelada transportada no modelo de minimização do custo e no modelo de minimização das emissões	123
Tabela 23 – Emissões de CO ₂ estimadas <i>x</i> Emissões de CO ₂ no transporte de cargas medidas em toneladas	125
Tabela 24 – Efeitos da adoção de uma taxa no cenário base.....	126

Tabela 25 – Efeitos da adoção do mecanismo de compra e venda de créditos de carbono no cenário base.....	127
Tabela 26 – Efeitos de medidas estruturais no cenário base.....	129
Tabela 27 – Minimização do custo e minimização das emissões com capacidade irrestrita dos terminais de embarque no cenário base	130
Tabela 28 – Medidas de desenvolvimento tecnológico no cenário base	133
Tabela 29 – Comparação das medidas analisadas no cenário base.....	134
Tabela 30 – Minimização do custo de transporte, do custo ambiental e das emissões no cenário geral	136
Tabela 31 – Efeitos da adoção de uma taxa no cenário geral	137
Tabela 32 – Efeitos da adoção do mecanismo de compra e venda de créditos de carbono no cenário geral.....	138
Tabela 33 – Efeitos de mudanças estruturais no cenário geral	139
Tabela 34 – Efeitos de mudanças tecnológicas no cenário geral	140
Tabela 35 – Comparação das medidas analisadas no cenário geral.....	140
Tabela 36 – Minimização do custo de transporte, do custo ambiental e das emissões no cenário expansão.....	143
Tabela 37 – Variação da quantidade embarcada de acordo com o modelo de otimização....	143
Tabela 38 – Efeitos da adoção de uma taxa no cenário expansão	144
Tabela 39 – Efeitos da adoção do mecanismo de compra e venda de créditos de carbono no cenário expansão.....	145
Tabela 40 – Efeitos de mudanças estruturais no cenário expansão	146
Tabela 41 – Efeitos de mudanças tecnológicas no cenário expansão.....	148
Tabela 42 – Comparação das medidas analisadas no cenário expansão.....	149
Tabela 43 – Minimização do custo de transporte, do custo ambiental e das emissões no cenário futuro.....	151
Tabela 44 – Efeitos da adoção de uma taxa no cenário futuro	152
Tabela 45 – Efeitos da adoção do mecanismo de compra e venda de créditos de carbono no cenário futuro	153
Tabela 46 – Efeitos da adoção do mecanismo de compensação das emissões no cenário futuro	154
Tabela 47 – Efeitos de mudanças estruturais no cenário futuro	154
Tabela 48 – Minimização do custo e minimização das emissões com capacidade irrestrita dos terminais de embarque no cenário futuro	155

Tabela 49 – Efeitos de mudanças tecnológicas no cenário futuro.....	156
Tabela 50 – Comparação das medidas analisadas no cenário futuro	156
Tabela 51 – Modelo de minimização do custo	157
Tabela 52 – Minimização das emissões	159
Tabela 53 – Adoção de uma taxa de R\$ 50,00/tCO ₂	160
Tabela 54 – Adoção do mecanismo de compra e venda de créditos de carbono com meta de redução de 20% nas emissões de CO ₂ e preço do crédito de R\$ 21,00.....	160
Tabela 55 – Elevação de 100% na capacidade de embarque dos terminais de transbordo	161
Tabela 56 – Aumento de 100% na capacidade dos portos	162
Tabela 57 – Uso integral de biodiesel em todos os modais.....	164
Tabela 58 – Aumento de 10% na eficiência energética em todos os modais.....	164
Tabela 59 – Minimização do custo de transporte, do custo ambiental e das emissões no cenário crescimento da produção	166
Tabela 60 – Efeitos da adoção de uma taxa no cenário crescimento da produção.....	168
Tabela 61 – Efeitos da adoção do mecanismo de compra e venda de créditos de carbono no cenário expansão da produção	169
Tabela 62 – Efeitos de mudanças estruturais no cenário de crescimento da produção	170
Tabela 63 – Efeitos de mudanças tecnológicas no cenário de crescimento da produção.....	170
Tabela 64 – Comparação das medidas analisadas no cenário de expansão da produção	171

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

CO₂/l - Emissões de dióxido de carbono por litro de combustível

CO₂e - Dióxido de carbono equivalente

g/t.km - grama dividido pela tonelada a cada quilômetro

gCO₂/TKU - grama de dióxido de carbono emitido dividido pela tonelada útil transportada por quilômetro

Gt - Bilhões de toneladas

Gt CO₂e - Bilhões de toneladas de dióxido de carbono equivalente

GWP - *Global Warming Potential* (Potencial de aquecimento global)

Mt - Tonelada métrica

Mt C/ano - Tonelada métrica de carbono por ano

Mt CO₂e - Tonelada métrica de dióxido de carbono equivalente

tCO₂ - Tonelada de dióxido de carbono

TEU - *Twenty Foot Equivalent Unit* – (unidade equivalente a vinte pés)

TU - Tonelada útil

TKU - Tonelada útil por quilômetro

1 INTRODUÇÃO

O desenvolvimento econômico obtido por meio da evolução da atividade produtiva permitiu a consolidação de um sistema econômico mais eficiente, capaz de atender a demanda mundial por diversos bens. No entanto, à medida que se produzia mais e novas técnicas eram incorporadas ao processo produtivo, houve um consequente aumento da poluição.

A partir da Revolução Industrial, com as inovações obtidas, foi crescente o uso de combustíveis fósseis. A consequência direta deste uso é o aumento dos gases de efeito estufa (GEE) no meio ambiente. Assim, atribui-se este aumento ao crescimento econômico. Por isso, durante certo tempo, o crescimento econômico foi visto como o responsável pela poluição gerada, tanto que na década de 1970 havia a opinião de que crescimento econômico e um ambiente limpo jamais coexistiriam (De BRUYN, 2000).

Porém, com o passar do tempo, houve uma maior disponibilidade de dados, o que permitiu a percepção de que seria possível um ambiente menos degradado sem ser necessária a redução do crescimento econômico. Isto ocorreria se fossem tomadas medidas de controle das emissões de poluentes, em especial dos gases de efeito estufa (GEE), sendo o principal deles o gás carbônico - CO₂ (GROSSMAN; KRUEGER, 1995).

Dados da *International Energy Agency* - IEA (2015) mostram que, desde a Revolução Industrial, as emissões de CO₂ passaram de 0 para 32 Gt em 2013, apresentando um crescimento exponencial no período entre 1870 e 2013. Segundo a IEA (2013), as características socioeconômicas e tecnológicas da trajetória de desenvolvimento dos países afetam de forma significativa as emissões de poluentes, que por sua vez são responsáveis por efeitos climáticos indesejáveis, como o efeito estufa e o aquecimento global.

Segundo o Painel Intergovernamental de Mudança Climática - IPCC (2014), num cenário pessimista, a previsão de elevação da temperatura terrestre deve oscilar entre 2,6°C e 4,8°C, entre 2010 a 2100; a projeção de elevação do nível dos mares entre 45 cm a 82 cm. O maior alerta do IPCC (2014) é que o processo de aquecimento dos oceanos deve continuar por muito tempo, mesmo se as emissões diminuïrem ou se mantiverem constantes.

Em virtude destes impactos, um debate crescente vem ocorrendo a respeito dos níveis das emissões de GEE e das possíveis regulações que podem ser aplicadas. Diante da necessidade de uma cooperação para diminuir tais impactos foi realizado o Encontro da Terra, em 1992, no Rio de Janeiro. Nesta conferência 186 países adotaram a Convenção Quadro das

Nações Unidas sobre Mudança Climática – CQNUMC, onde ficou estabelecido o objetivo de estabilizar as concentrações de GEE num nível que permita a vida no planeta.

A partir daí, foram e continuam sendo realizadas diversas reuniões anuais denominadas Conferência das Partes (COP). Sem dúvida, a mais conhecida e controversa foi a realizada em Quioto, em 1997. Nesta COP foi elaborado o Protocolo de Quioto, com a meta de reduzir as emissões de GEE em 5,5%, abaixo dos níveis de 1990 para os países industrializados. No entanto, o protocolo entrou em vigência apenas em 2005, quando a Rússia o ratificou, pois eram necessárias 55 partes, representando 55% do total das emissões de GEE, para a entrada em vigência do mesmo. Não existe ainda um consenso a respeito dos efeitos alcançados pelo Protocolo de Quioto e muitas críticas foram feitas aos mecanismos de redução das emissões de poluentes permitidas aos países que ratificaram o protocolo.

No ano de 2015, foi realizada em Paris a COP 21, onde se estabeleceu o compromisso de conter a elevação da temperatura em 2°C até o fim do século. Segundo o Observatório do Clima (2015b), existe um comprometimento para que o aumento da temperatura se limite em 1,5°C. O acordo foi bem recebido por sinalizar um avanço dos efeitos nocivos ao ambiente do uso de combustíveis fósseis e do desmatamento. Porém, resta saber quais serão os mecanismos utilizados pelos países para conseguir evitar a elevação da temperatura.

Cabe destacar que o Brasil, por ser um país emergente, nunca esteve sujeito a metas de redução das emissões de GEE: apenas havia o incentivo à redução voluntária das emissões. Segundo o Ministério da Ciência e Tecnologia e Inovação (2011), as emissões brasileiras de GEE caíram 38,7% entre 2005 e 2010. Esta redução deve-se, em parte, à queda do desmatamento, principalmente na floresta amazônica. No entanto, quando se considera a atividade produtiva, houve um aumento nas emissões dos setores de energia, processos industriais, agropecuária e resíduos sólidos. Desde 2010 o setor agropecuário lidera o *ranking* de maior emissor de GEE, sendo seguido pelo setor energético.

Apesar da redução de emissões apontada pelo Ministério da Ciência e Tecnologia e Inovação (2011), o país ocupava o terceiro lugar no *ranking* dos maiores emissores de GEE em 2010, segundo a IEA (2013). Pelo fato de a matriz energética brasileira ser relativamente limpa, ela exerce um pequeno impacto no total de gases emitidos.

No que diz respeito às emissões de combustíveis fósseis, o país tem pouca participação no total emitido no mundo - algo em torno de 1,3% - sendo que o setor de transporte responde por 43% das emissões de CO₂, seguido pelo setor industrial, responsável por 29% das emissões de gás carbônico. Diante desse quadro, pode-se perceber que a

agropecuária exerce um impacto decisivo nas emissões de GEE no país, seja pela emissão direta destes gases durante a produção, seja pelo transporte ou mesmo pelo desmatamento de florestas para expansão da atividade.

Tendo em conta que o Brasil é um país agrário-exportador, mitigar a poluição gerada da atividade produtiva é um desafio. Mesmo porque esta mitigação pode implicar a redução da quantidade produzida ou o encarecimento da produção. Desta forma, uma possibilidade de se obter níveis menores de poluição pode ser observada por meio da otimização da operação do setor de transporte de cargas no país. Dados do IPCC (2014) mostram que em 2010 o setor de transporte foi responsável por 23% das emissões mundiais de CO₂, apresentando uma tendência de crescimento no longo prazo principalmente em países em desenvolvimento e emergentes, como é o caso do Brasil.

Tendo em vista que o país é dependente do modal mais poluidor - o rodoviário - para escoar a produção, a literatura mostra que é possível obter reduções nas emissões de poluentes quando o transporte é direcionado para modais menos poluentes. No entanto, é certo que existe um *trade-off* entre os custos de transporte e redução das emissões, no sentido de que a redução do primeiro implica a elevação do segundo e vice-versa (WINEBRAKE et al., 2008).

Uma forma de lidar com este *trade-off* pode ser por meio do transporte intermodal. Entende-se por transporte intermodal aquela combinação de diferentes tipos de transporte, como por exemplo, o transporte rodoviário combinado com o transporte ferroviário (ZHANG et al., 2011). Sendo assim, uma combinação efetiva dos modais de transporte disponíveis pode aumentar a competitividade dos produtores por um lado e por outro, pode permitir a sustentabilidade do sistema de transporte.

Esta sustentabilidade decorre do fato de que cada modal emite uma quantidade diferente de poluentes. No Brasil, de acordo com o Sistema de Estimativa de Emissão de Gases de Efeito Estufa – SEEG (2015), no transporte de cargas em 2013, o setor rodoviário foi responsável por 93,42% das emissões de dióxido de carbono provenientes da queima de combustíveis, enquanto as emissões das ferrovias e das hidrovias foram, respectivamente, 2,77% e 3,81% do total emitido.

Desta forma, conforme será mostrado no capítulo 2 deste trabalho, muitos autores encontraram indícios de que o transporte intermodal pode ser um meio de se obter um nível menor de emissões em decorrência do uso do transporte intermodal. No entanto, pode ocorrer uma situação em que os custos logísticos sejam maiores quando existe uma preocupação ambiental. Ou seja, uma situação em que a questão ambiental tenha maior peso

que a questão custo total. Sendo assim, não necessariamente se obtém uma configuração de custo mínimo.

Tendo em vista que o objetivo do produtor ou embarcador é obter o menor custo possível, quais seriam os incentivos necessários para que optem pela intermodalidade, tendo em vista que a infraestrutura das ferrovias e hidrovias não é a adequada? Ainda, estariam os agentes propensos a escolher emissões mínimas ao invés de custo mínimo?

Provavelmente a resposta para a segunda pergunta é não. Isto porque não parece existir uma consciência ambiental que desperte nas pessoas a necessidade de reduzir a poluição. Então, seria utópico afirmar que os agentes buscam a minimização das emissões de poluentes, em detrimento de uma situação em que o custo é mínimo. Mesmo que se considerem os custos ambientais nos custos totais de transporte, a falta de regulação das emissões impede que o agente adote uma escolha sustentável em suas decisões de transporte.

Neste caso, um sistema que regulasse e limitasse as emissões de GEE poderia ser um ‘incentivo’ para que os agentes optassem por um modal menos poluidor. Por exemplo, se houvesse uma taxa aplicada às emissões de GEE, esta seria incluída como um custo. Ou então, que houvesse o restabelecimento do mercado de carbono, para que fosse possível atingir uma meta de redução das emissões. Dado que o objetivo dos produtores seja minimizar o custo de transporte, neste caso a escolha pelo modal menos poluidor ocorreria de uma forma natural.

Para isso ocorrer seria necessário que houvesse alternativas suficientes ao modal rodoviário. No entanto, como mostra a Confederação Nacional do Transporte (2015c), um dos maiores problemas apontados pelos embarcadores que utilizam o modal ferroviário é a pequena disponibilidade das ferrovias. Sendo assim, talvez a adoção de medidas ambientais possa não significar um grande impacto sobre as emissões do setor de transporte de cargas, uma vez que podem não existir alternativas suficientes para escoar a produção. No caso da adoção de uma taxa, por exemplo, poderia apenas ocorrer uma elevação no custo do transporte, sem, contudo obter um nível desejado da redução das emissões.

Neste caso, medidas que ampliem a capacidade das ferrovias e hidrovias, ou que aumentem a oferta de terminais de embarque, podem ter efeito semelhante ou superior às medidas de mitigação tradicionais, já que possibilitariam o uso maior de modais de transporte que poluem menos. Outro conjunto de medidas que pode reduzir as emissões está associado ao uso de combustíveis menos poluentes, como o biodiesel. Ou ainda, medidas tecnológicas que tornem o transporte de cargas mais eficiente em termos de consumo de combustível, pois

um consumo menor de combustível implicaria uma emissão menor de CO₂ em todos os meios de transporte de cargas.

Considerando estes aspectos, surgem algumas questões: uma vez que os custos de transporte já são relativamente elevados, a imposição de uma taxa seria a melhor alternativa? Ou ainda, dos meios regulatórios conhecidos qual deles seria a melhor opção, em termos de custos logísticos e em termos de redução das emissões? Seria justificável a adoção destas medidas regulatórias ou existiriam outros meios de promover a redução das emissões de CO₂?

A resposta para essas perguntas é o objetivo geral deste trabalho. O problema a ser pesquisado é: como as medidas regulatórias das emissões de GEE impactam nas decisões de escolha do modal de transporte disponível? As medidas regulatórias consideradas neste trabalho serão: taxa sobre as emissões de CO₂, mecanismo de compra e venda de créditos de carbono e mecanismos de compensação das emissões. Apesar de existir um debate em torno do futuro do mercado de carbono, com a decisão da COP21 talvez este mecanismo ganhe força. Por isso, é importante considerar o mecanismo de compra e venda de créditos de carbono uma vez que nada impede que este mecanismo seja adotado novamente no futuro, ainda que de forma diferente.

Como objetivo específico, este trabalho busca comparar as medidas de mitigação citadas acima, com medidas que não foram, necessariamente, designadas para redução das emissões de CO₂, como melhorias na infraestrutura e capacidade das ferrovias, hidrovias e portos. Para verificar se de fato esta situação ocorre, serão considerados os impactos de um aumento da capacidade de embarque nos terminais ferroviários e hidroviários, assim como o aumento da capacidade dos portos. Além destas variações, serão considerados também os projetos de expansão das ferrovias e hidrovias que estão sendo implementados pelo Programa de Aceleração do Crescimento (PAC I e II), pelo Programa de Investimento em Logística (PIL) e Plano Hidroviário Estratégico (PHE). Serão considerados ainda projetos futuros, que ainda estão em fase de avaliação.

Além de medidas de infraestrutura, é objetivo deste trabalho analisar os efeitos do aumento do uso de biocombustível sobre o nível das emissões de CO₂. E, também, os efeitos de um aumento da eficiência energética dos combustíveis, o que implicaria em um consumo menor de combustíveis e, em consequência, um menor nível das emissões de CO₂.

Portanto, neste trabalho será desenvolvido um modelo de programação linear, com o objetivo de redução dos custos logísticos do transporte de soja. Porém, além das restrições tradicionais, serão incluídas restrições que modelem todas as medidas descritas

anteriormente. Espera-se que a melhor medida seja aquela em que as emissões são reduzidas, porém a um menor custo de transporte. Mesmo porque é necessário que, do ponto de vista econômico, a redução das emissões tenha um impacto pequeno na configuração dos custos totais de transporte.

O presente trabalho contém 6 capítulos, incluindo esta introdução. No capítulo 2 será apresentada uma breve revisão bibliográfica; no capítulo 3 será desenvolvido um estudo a respeito do panorama do transporte de carga no país e as respectivas emissões de poluentes. No capítulo 4 será apresentado o modelo matemático a ser adaptado para este trabalho e no capítulo 5 serão apresentados os resultados. Por fim, no capítulo 6 serão apresentadas as principais conclusões.

2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

Em virtude da complexidade envolvida na análise de medidas ambientais, o presente capítulo foi dividido em três seções. A primeira seção aborda os estudos referentes aos possíveis impactos do aquecimento global e também das políticas de mitigação das emissões. A segunda seção aborda a literatura a respeito de como a logística pode colaborar com um ambiente mais limpo, seja por meio do uso do transporte intermodal seja por meio de determinadas políticas aplicadas diretamente ao setor de transportes.

Por fim, na última seção serão apresentados estudos que tratam dos efeitos da adoção de políticas ambientais sobre a economia brasileira. A opção por utilizar tais estudos se deve ao fato de que o método que será desenvolvido nesta tese não contempla os impactos de adoção de políticas sobre toda a economia, mas apenas sobre o transporte de cargas. Estes estudos serão utilizados apenas como referência do que poderia ocorrer com o restante da economia mediante políticas aplicadas no setor de transporte, visando o incentivo para a troca por modais de transporte menos poluentes¹.

2.1 Aquecimento global e políticas de mitigação das emissões

A possibilidade de que as emissões de GEE podem acentuar o processo de aquecimento global e em consequência elevar a temperatura do planeta Terra gerou uma série de estudos sobre os impactos decorrentes desta temperatura mais elevada.

De acordo com a literatura, uma forma de lidar com aquecimento global é fazer com que um país ou região se adapte a esta temperatura maior. Porém, como ressalta Moraes (2007), os países em desenvolvimento seriam os mais prejudicados por mudanças climáticas, sendo o setor agrícola um dos mais afetados por essas mudanças. Os efeitos de tais mudanças levariam a uma redução 0,18% do PIB real no curto prazo e de 0,92% no longo prazo, caso ocorra um choque mais severo, representado por uma queda de 6% na demanda mundial por exportações. Neste cenário, o índice do volume exportado teria uma queda de 11,2%.

Estes resultados apontam que, caso o ocorra de fato uma queda na demanda de exportações em função do aquecimento global, a economia brasileira sofrerá os impactos destas mudanças. E, como relata o autor, em economias pequenas (neste caso, inclua-se o Brasil), por não terem desenvolvimento tecnológico suficiente para se adaptarem às mudanças climáticas, poderia ocorrer uma redução da atividade produtiva em função da queda da

¹ No Anexo A pode ser consultada a síntese dos trabalhos apresentados neste capítulo.

produtividade da terra. Além disso, por dependerem das exportações para garantir renda, ocorreria também um efeito da queda do PIB decorrente da queda das exportações.

Além da renda, Barbieri et al. (2010) mostram que como a elevação da temperatura pode prejudicar a agricultura, um impacto destas mudanças seria o aumento dos fluxos migratórios das regiões que seriam mais afetadas. Os autores utilizaram um modelo de Equilíbrio Geral para analisar estes efeitos na Região Nordeste. Os efeitos de mudanças climáticas sobre os fluxos migratórios tornam-se mais intensos num cenário de altas emissões, representado por um aumento na temperatura de 4°C, principalmente entre 2035 e 2050. Os autores salientam que devido à perda de produtividade agrícola decorrente da elevação da temperatura, a emigração seria mais intensa nas regiões que fossem mais dependentes da agricultura.

O impacto do aquecimento global sobre os fluxos migratórios pode ser ainda mais agravante dependendo da orientação destes fluxos. Como mostram Ferreira Filho e Horridge (2010), se o aumento da temperatura for equivalente a um cenário mais severo, aquele com temperaturas mais elevadas, haveria um aumento dos fluxos migratórios para o Norte do país. Tal fato deve ser visto como sinal de alerta, pois de acordo com os autores, o aumento da ocupação da região amazônica pode significar aumento do desmatamento da floresta, o que agravaria ainda mais as emissões brasileiras ao longo dos anos. Cabe destacar, porém, que as regiões tradicionais receptoras destes fluxos (o Sudeste e o Sul) continuariam recebendo um fluxo de migrantes, principalmente de algumas regiões do Nordeste e do Mato Grosso do Sul. No geral, os autores salientam que o aumento deste fluxo não é muito expressivo. Por exemplo, em São Paulo, o aumento do fluxo seria de 2,7%.

Com relação à produção, a soja seria a cultura com maiores perdas decorrentes da elevação das temperaturas. Os autores estimam que em 2044 ocorreria uma queda de 44% na produção do país, o que afetaria consideravelmente o estado do Mato Grosso do Sul, que apresentaria uma queda de 60% na produção de soja em 2020, levando a uma redução de 4,13% no PIB da região. Porém, no nível agregado, a queda do PIB real não seria tão elevada: aproximadamente 0,82%.

Assim como os estudos anteriores, Faria e Haddad (2013) mostram, por exemplo, que o aumento da temperatura e da precipitação também levariam a uma redução do PIB real. Estes efeitos de mudanças climáticas se tornariam mais intensos à medida que o intervalo de tempo aumentasse. Cabe destacar que estas mudanças poderiam levar a um menor uso da terra, já que o modelo tornaria o fator terra mais escasso, o que elevaria seu preço. E que poderia levar a uma queda do desmatamento em virtude da redução das

atividades agrícolas. É válido ressaltar que a queda do desmatamento se daria porque a terra estaria mais cara e não porque houve alguma medida ambiental. Ou seja, a referida queda se deve muito mais a razões econômicas do que a razões ambientais.

Com base nestes estudos, pode-se perceber que os impactos do aquecimento global sobre a economia podem afetar diversos componentes. A partir desta possibilidade surgiram diversos estudos para apontar quais medidas deveriam ser adotadas para tentar conter esta possível elevação da temperatura, além dos possíveis impactos destas medidas sobre diversas variáveis macroeconômicas. A discussão se concentra sobre qual instrumento deve ser adotado. De uma forma mais específica ao setor de transportes, existe a discussão se o setor deve ou não estar sujeito a tais medidas.

Uma das medidas mais recorrentes na literatura é a adoção de uma taxa de carbono. A ideia de impor este tipo de taxa é justificada por diversos autores. Como salientam Kennedy, Obeiter e Kaufman (2015), quando uma atividade causa um dano que não é refletido no preço do bem ou do serviço, taxar a atividade leva a uma redução da atividade poluidora, o que pode corrigir a falha de mercado resultante de tal atividade. Porém, como ressaltam Edenhofer, Bauer e Kriegler (2005), a adoção de uma taxa de carbono pode levar a uma redução do PIB mundial e causar uma elevação dos custos do transporte.

Apesar disso, Marron e Toder (2014) afirmam que uma taxa de carbono pode reduzir o risco das possíveis mudanças climáticas, já que pode ser um incentivo para o desenvolvimento de novas tecnologias. Teoricamente, o melhor modo de taxar o dióxido de carbono seria, na visão dos autores, o monitoramento de todas as fontes emissoras e taxa-las com um valor uniforme. Porém, na prática este monitoramento seria improvável, mesmo porque, identificar todas as fontes de emissões seria algo difícil de ser atingido. Portanto, os autores sugerem que uma forma adequada de taxação seria o aumento gradual da alíquota, partindo de valores baixos para preparar a população para futuros reajustes.

Tendo em vista que uma taxa de carbono pode reduzir o crescimento econômico, surge a questão de como deve ser o direcionamento desta taxa. Stram (2014) afirma que mesmo uma pequena taxa de carbono pode favorecer o financiamento de mais pesquisa e desenvolvimento em energia. Se os países que cooperam criarem um fundo destinado a este tipo de pesquisa, isto pode funcionar como um incentivo para que mais países adotem medidas semelhantes. Uma taxa de carbono, na visão do autor, pode ser benéfica para a sociedade, pois fornece incentivos para reduzir as emissões e, ao mesmo tempo, incentiva a busca por alternativas tecnológicas que sejam menos poluentes.

Stram (2014) ressalta ainda que o ideal seria uma taxa neutra em relação à receita tributária, no sentido de que deveria haver um retorno para aquelas que pagaram a taxa. Uma forma de se conseguir tal retorno seria por meio de um direcionamento da receita tributária arrecadada a partir de projetos de pesquisa e desenvolvimento em energia limpa. Assim, para a utilização de uma taxa fazer sentido, os benefícios da imposição de uma taxa deveriam ser maiores que os custos de tal decisão.

Um outro aspecto que pode justificar a adoção de uma taxa de carbono é ressaltado por Kennedy, Obeiter e Kaufman (2015). Estes afirmam que como as emissões de GEE impõem custos à sociedade, uma taxa sobre as emissões desloca o ônus da sociedade para as entidades responsáveis pelas emissões. Daí pode surgir um incentivo para reduzir as emissões. A adoção de uma taxa sobre as emissões pode significar um aumento de receita para o governo. Porém, esta receita deveria retornar para os consumidores, seja por meio de investimento em tecnologias alternativas ou como redução de outros impostos.

Dentro da discussão a respeito da taxa de carbono, surge a questão de qual deveria ser o valor ótimo da taxa. Van der Ploeg e Withagen (2014) salientam que talvez seja preciso uma taxa de carbono crescente, não apenas para reduzir a demanda por combustíveis fósseis, mas também para promover a transição da economia baseada em carbono para uma que seja relativamente livre do mesmo. Sendo assim, uma taxa ótima deveria ser aquela em que fosse considerado o custo social do carbono², que seria definido como o valor presente dos danos marginais futuros do aquecimento global.

Nas simulações desenvolvidas, por meio de um modelo de crescimento de Ramsey, os autores encontram indícios de que a taxa ótima de carbono aumenta durante a trajetória de crescimento da economia, se essa economia utilizasse apenas óleo combustível. Ou seja, não seria considerado a princípio o uso de alternativas renováveis. Neste caso, à medida que o estoque de carbono na atmosfera aumenta, o custo marginal do aquecimento global também aumentaria, o que implicaria uma taxa cada vez maior.

Além de uma taxa de carbono, outro mecanismo de política ambiental utilizado é o sistema compra e venda de créditos de carbono (*cap and trade*). De acordo com Betsill e Hoffman (2011), este sistema foi adotado como medida de redução das emissões no Protocolo de Quioto, uma vez que já tinha sido adotado como mecanismo de redução da chuva ácida nos Estados Unidos e na Europa. No entanto, a partir de 2010, o sistema passou a enfrentar a incerteza quanto ao seu futuro em países como Estados Unidos e Austrália. Mesmo na

² Van der Ploeg e Withagen (2014) salientam que o custo social do carbono depende do nível de consumo e capital na economia.

Europa, onde o mercado de carbono era mais robusto, havia a incerteza sobre quem deveria regular o mecanismo e quais deveriam ser as regras.

Uma das vantagens deste mecanismo, segundo Kennedy, Obeiter e Kaufman (2015) é permitir que se atinja o nível desejado de emissões, uma vez que este limite é estabelecido pelas autoridades competentes. Porém, conforme se verificou no caso do mercado de carbono europeu³, neste sistema há uma instabilidade maior, pois o preço do carbono é determinado por meio mercado. O sistema europeu entrou em colapso devido, em parte, à alocação excessiva de permissões, o que pressionou negativamente o preço das permissões. Uma vez que o preço é excessivamente baixo, perde-se o incentivo de reduzir a poluição, já que o custo de abatimento das emissões é, provavelmente, maior que o benefício econômico de tal redução.

Os impactos deste mecanismo sobre o PIB podem ser menores que a adoção de uma taxa. Como mostram Goettle e Fawcett (2009), nos custos para a economia norte americana de um mecanismo de compra e venda de créditos de carbono, as perdas econômicas seriam pequenas, porém o setor agrícola seria o mais prejudicado⁴. Os autores ressaltam que os incentivos de mercado diante a adoção do sistema de compra e venda de créditos de carbono asseguram a redução das emissões por meio da queda da produção, reestruturação do processo produtivo e variações tecnológicas.

Já o custo marginal de abatimento (curva MAC) aumenta à medida que o número de toneladas de CO₂ reduzidas aumenta. Ou seja, quanto maior for a redução das emissões, maior será o sacrifício de uma redução adicional das emissões (medidas em uma tonelada). Sendo assim, de acordo com a simulação desenvolvida, quanto mais restritivo for o limite estabelecido, maior seria o preço da permissão. Por exemplo, para um limite de 287 Gt CO₂ o preço da permissão seria de US\$ 2.00 a US\$ 4.00. Porém, se o limite estabelecido fosse de 167 Gt CO₂, o preço passaria a ser de US\$ 24.00 a US\$ 45.00. Como consequência a este limite estabelecido, o PIB americano poderia reduzir de 0,7% a 7,3% em 2050, de acordo com o cenário adotado.

Existe uma discussão na literatura a respeito de qual mecanismo seria o ideal: o sistema de compra e venda de créditos de carbono ou a adoção de uma taxa sobre as emissões. Como ressaltam Lippke e Perez-Garcia (2008), existe uma complexidade em se definir os créditos que podem ser gerados de atividades compensatórias. Por isso, os custos de transação associados a esta definição podem ser elevados, o que pode tornar a taxa sobre o carbono mais

³ EU ETS: *EU Emissions Tradings System*.

⁴ Estas conclusões foram obtidas por meio de um modelo de equilíbrio geral intertemporal.

interessante e menos onerosa. Por outro lado, conforme ressaltam os autores, ao se taxar os combustíveis fósseis, possivelmente a demanda pelos combustíveis alternativos se elevaria, o que teria como consequência uma elevação no preço dos mesmos.

Uma alternativa ao problema descrito no parágrafo anterior é a combinação de políticas, apontada por Fisher e Newell (2008) como uma forma de se conseguir uma maior redução das emissões a um custo mais baixo⁵ do que seria obtido com uma política isolada de imposição de uma taxa de carbono. Isto porque, segundo os autores, um preço direto sobre o carbono⁶ pode reduzir de forma significativa a atividade econômica dos setores que utilizam a energia de forma mais intensiva. Desta forma, medidas como taxa de carbono podem ser pouco atraentes, ainda mais quando se considera que os impactos distributivos recairão tanto sobre os proprietários de combustíveis fósseis quanto sobre os consumidores. Além do que, segundo os autores, apenas precificar o carbono pode não ser incentivo suficiente para o desenvolvimento de tecnologias limpas. Na visão dos autores, a melhor saída seria a adoção de uma combinação de políticas ótimas que incluiria um sistema de preço das emissões e subsídios para pesquisa e desenvolvimento de tecnologias alternativas.

O desenvolvimento tecnologias alternativas mencionado por Fisher e Newell (2008) é apontado na literatura como uma forma mais eficiente de reduzir as emissões, uma vez que a queda no produto poderia ser menor que quando se adota uma taxa de carbono. Como ressaltam por Edenhofer, Bauer e Kriegler (2005)⁷, a substituição de combustíveis fósseis por renováveis pode ser a melhor opção para reduzir as emissões, uma vez que as perdas de bem-estar, medidas pelo consumo e produto mundial bruto, seriam menores quando comparadas com medidas de eficiência energética. Assim, o desenvolvimento tecnológico pode ser considerado como medida factível de controle das emissões, uma vez que o custo de tal medida, em termos de perda de bem-estar, não é tão elevado quando comparado a outros cenários.

Pois, como enfatizado por Eliasson e Proost (2015), a melhor medida de controle das emissões seria um desenvolvimento tecnológico que permitisse o surgimento de combustíveis menos poluentes. Se esta tecnologia implicar combustíveis mais baratos e menos poluentes, gradualmente o mundo poderia mudar para a alternativa menos poluente e com isso, promover a redução das emissões globais das emissões.

⁵ Neste caso, a maior parte da redução seria em função da adoção de uma taxa sobre as emissões. Porém, combinada com os subsídios a redução seria maior e menos custosa que com a adoção isolada de uma taxa.

⁶ Pode ser tanto uma taxa como o mecanismo de compra e venda de créditos de carbono.

⁷ Por meio do modelo de equilíbrio geral MIND.

Os autores ressaltam que as reduções das emissões por um país isoladamente podem ter apenas um pequeno impacto sobre as emissões globais, mesmo que o país seja um grande poluidor. Então, o ideal seria um consenso entre os países a respeito das medidas de controle das emissões. Porém, em virtude de visões distintas quanto ao custo-benefício da redução das emissões, é pouco provável que ocorra um esforço conjunto. Desta forma, medidas locais podem ter apenas um impacto local em termos de redução das emissões. Por exemplo, se um país escolher reduzir o consumo de combustível por meio de medidas que limitem a produção, pode-se gerar um processo conhecido como vazamento de carbono⁸. Neste caso, a produção de combustíveis migraria para países nos quais a lei fosse menos restritiva, ou nem existisse. Assim, nem o consumo não seria afetado, nem as emissões globais, já que a redução do consumo no país onde foi adotada a medida seria compensada pelo aumento do consumo no país para onde a produção foi transferida.

Na literatura de medidas que controlem as emissões de GEE, o setor de transporte desempenha um papel importante. Como mostram Creutzig et al. (2011), as medidas mais comuns do setor de transporte são aquelas que incentivam o uso de combustíveis alternativos menos poluentes e mudanças tecnológicas que tornam o consumo de combustível dos veículos mais eficiente.

Além destas medidas, os autores mencionam que políticas baseadas em preços e limite sobre as emissões podem ser importantes para amenizar os efeitos negativos que podem surgir da troca do combustível padrão ou de tecnologia. Supondo que o combustível alternativo seja mais barato que o combustível fóssil, apesar de menos poluente, pode haver o incentivo a um uso maior dos veículos, o que leva a um nível maior de emissões. A mesma situação pode ocorrer no caso do aumento da eficiência energética, uma vez que se o veículo consome menos combustível, o gasto menor com combustível pode levar a um uso maior destes veículos.

Sendo assim, os autores sugerem que a produção de veículos mais eficientes deveria gerar créditos para os produtores. E, para a produção de veículos menos eficientes, deveria ser exigida uma permissão de carbono, uma vez que estes veículos poluem mais. Sendo assim, os veículos mais poluentes seriam mais caros, o que reduziria a demanda por este tipo de veículo.

⁸ Do termo *carbon leakage*.

No entanto, segundo Creutzinger et al. (2011), a adoção de padrões para combustíveis⁹ pode não ser tão eficiente, em termos ambientais, quanto a adoção de políticas de mitigação tradicionais, uma vez que a adoção de um padrão pode incentivar a produção do biocombustível mais barato, o que não garante que seja o menos poluidor.

A questão em torno de que apenas o desenvolvimento de combustíveis menos poluentes pode não ser a única saída também é abordada por Proost e van Dender (2012). Os autores afirmam que apesar do crescimento do uso de combustíveis limpos, a preocupação com a poluição do ar ainda continua, uma vez que aumentou-se, também, o uso de automóveis. E a situação agrava-se, porque o dano ambiental causado pelo transporte não leva a uma redução do uso dos veículos. E ainda, reduzir o uso de veículos talvez não seja a melhor saída.

Os autores mostram que uma possível forma de lidar com este problema é por meio da combinação de taxas (seja sobre as emissões ou sobre o combustível) com padrões de eficiência energética. E salientam que uma taxa sobre o combustível pode ser vista como uma taxa sobre as emissões, já que incentivam um uso menor do veículo. No entanto, usualmente, taxas sobre os combustíveis não têm um objetivo ambiental mas sim um objetivo de arrecadar mais receita.

De acordo com Proost et al. (2009), a Europa já possui elevadas taxas sobre os combustíveis, que não foram criadas com o objetivo de reduzir as emissões mas agem como se fossem taxas de carbono. Em virtude deste fato, os autores sugerem que se o setor de transporte pagasse o custo externo marginal de sua atividade, isto implicaria uma orientação das taxas para o uso do veículo e não sobre o combustível. Desta forma, a taxa sobre o combustível se reduziria, pois haveria uma taxa adicional sobre a quilometragem percorrida.

Para medir os efeitos desta mudança, os autores utilizaram o modelo de transporte TREMOVE¹⁰, pelo qual foi possível constatar que haveria uma elevação nos custos do transporte por meio de caminhões e também nos demais modais, caso houvesse a reforma no sistema de taxaço europeu. O problema é que esta elevação nos preços levaria a uma redução na quantidade transportada (o que não seria desejável, apesar de ocorrer uma redução nas emissões).

Ainda no mesmo trabalho, Proost et al. (2009) mostram que se a Bélgica adotasse um limite sobre as emissões semelhante aos níveis observados em 1990, seria

⁹ Por exemplo, uma quantidade pré-definida de biocombustível misturada na gasolina. Ou então a determinação de uma quantidade mínima de biocombustível utilizado no país.

¹⁰ *Economic Transport and Emissions Model.*

necessária uma redução de 48% das emissões do setor de transporte. Para isso, seria necessária uma redução de 15% das atividades dos caminhões. Entretanto, uma melhora na eficiência dos combustíveis levaria a uma redução do consumo dos mesmos e, em consequência, menos emissões de GEE. Sendo assim, os autores apontam que a redução das emissões poderia ocorrer de forma mais acentuada via desenvolvimento tecnológico que uma taxa de carbono, uma vez que tal desenvolvimento seria uma alternativa à redução da atividade do setor de transporte apontada nas simulações.

No entanto, boa parte da literatura de políticas ambientais aplicadas ao setor de transportes concentra-se na análise do uso de automóveis e transporte público. De acordo com Stelling (2014), isto implica a escassez de trabalhos a respeito destas medidas sobre o transporte de cargas. A autora comenta que o setor de transporte ainda não está incluído no esquema de gerar créditos de carbono e que este setor deveria ser incluído num sistema global com várias indústrias, o que permitiria que as empresas com menores custos fossem as que reduzissem as emissões, para assim obter os créditos que seriam vendidos para os setores que não conseguissem reduzir as emissões. Outra medida apontada pela autora como passível para a redução das emissões é a adoção de uma taxa sobre os combustíveis, que pode funcionar como uma taxa sobre o carbono. Além disso, uma taxação diferenciada entre os modais de transporte também pode incentivar o uso de modais menos poluentes.

A autora salienta que instrumentos econômicos como o sistema de compra e venda de créditos de carbono e taxas podem reduzir as emissões no curto prazo; porém, no longo prazo, reduções adicionais das emissões só seriam possíveis caso houvesse um desenvolvimento tecnológico, que por meio de uma melhora na eficiência energética tornaria o transporte menos dependente de combustíveis fósseis.

Desta forma, para garantir uma redução das emissões no longo prazo seria necessária a adoção de combustíveis menos poluentes, ou melhora da eficiência tecnológica dos veículos. Como ressaltado por Pérez-Martínez (2009), é necessário garantir oportunidades para melhorar a eficiência do transporte de carga nas rodovias, uma vez que existem custos¹¹ não contabilizados diretamente como acidentes nas rodovias, barulho, custos irrecuperáveis e poluição do ar. Se os usuários do setor de transporte pagarem por estes custos, pode ocorrer uma pressão para melhorar a eficiência do setor e reduzir os impactos ambientais. O problema seria, na visão do autor, a identificação de quem estaria disposto a pagar por este custo. Pois conforme mostra a literatura, na maioria dos casos, o custo do transporte aumenta quando se

¹¹ O autor chama este custo de *external cost*.

tenta internalizar este custo por meio de uma taxa, por exemplo. E, em consequência, pode ocorrer uma redução do uso de transporte, o que pode não ser desejável, já que uma redução do transporte de cargas pode ser uma consequência de redução da produção.

Uma saída para este problema pode envolver políticas que incentivem o uso de modais de transporte menos poluentes. Pois como relatam Liimatainen e Pöllänen (2013), o futuro das emissões de CO₂ no transporte de cargas é afetado pelo crescimento de cada setor. Desta forma, diferentes setores possuem diferentes eficiências energéticas e conseqüentemente diferentes níveis de emissões de CO₂. Assim, as políticas adotadas devem considerar que o crescimento do setor irá exigir cada vez mais o transporte. Políticas que incentivem a troca de modal podem ser uma saída para reduzir as emissões de CO₂. Ou então, investimentos em pesquisa e desenvolvimento, que possam aumentar a eficiência energética dos veículos, também podem ser um meio de assegurar um ambiente menos poluído sem, contudo, afetar a quantidade transportada.

Outro estudo que procura mostrar uma forma de reduzir as emissões sem reduzir a quantidade de transporte é o desenvolvido por Stanley, Hensher e Loader (2011). Os autores afirmam que para garantir uma redução significativa das emissões seria necessária uma redução da intensidade das emissões veiculares, pois caso isso não ocorresse, seria necessária, além da maior participação das ferrovias, uma mudança na demanda, o que possivelmente equivaleria a uma redução da quantidade transportada.

Na simulação desenvolvida pelos autores, num universo de seis medidas possíveis¹², uma melhora na eficiência do combustível seria responsável pela redução de 1/3 das emissões na Austrália. Num cenário de extrema eficiência dos combustíveis, apenas um ganho de eficiência dos automóveis e caminhões poderia garantir a redução de 80% das emissões do setor. Entretanto, este ganho de eficiência deveria ser extremamente alto, algo em torno de 92% para automóveis e 89% para caminhões, o que parece ser pouco provável de ocorrer, pelo menos no curto prazo.

A combinação de políticas é apresentada por autores como Nocera, Tonin e Cavallaro (2015) como uma forma de conseguir uma maior redução das emissões. Os autores procuram quantificar o impacto de medidas de controle de poluentes sobre o setor de transportes. Os autores constatam que numa situação em que novos limites de emissões veiculares são estabelecidos, ocorreria uma redução de 41% das emissões, em 2050, em

¹² As demais medidas estariam associadas ao transporte de passageiros: (1) redução do uso de automóveis, (2) aumento das viagens a pé e via bicicletas, (3) aumento do transporte público, (4) aumento da taxa de ocupação dos veículos, (5) redução da previsão do uso de combustíveis do transporte de carga, (6) eficiência dos veículos.

relação ao cenário sem tais medidas. E, num cenário em que esse limite fosse reforçado por medidas como transporte intermodal e adoção de taxas, por exemplo, a queda das emissões seria de aproximadamente 91%, em 2050.

No entanto, existem autores que consideram que o melhor seria isentar o setor de transporte de medidas ambientais. Pois, na visão de Abrell (2010), a existência de elevadas taxas sobre os combustíveis na Europa já funcionariam como uma taxa sobre o carbono emitido. Por meio de um modelo de equilíbrio geral, o autor mostra que adoção de metas de mitigações, via adoção de uma taxa sobre as emissões, levaria a uma perda de bem-estar. Porém, se o comércio de permissões fosse permitido, haveria uma redução do custo das medidas de mitigação, uma vez que a redução aconteceria nos setores que fossem capazes de promovê-la a um custo mais baixo. O autor constata que a exclusão do setor de transportes do mercado de venda de permissões de carbono levaria a um aumento do bem-estar. Isto pode se explicado pelo fato de que, como já mencionado, as taxas sobre os combustíveis são elevadas na Europa, funcionando como uma medida de controle das emissões.

O ganho de bem-estar descrito anteriormente pode ser explicado pelo fato de que a redução das emissões seria mais desejável em setores onde o custo de redução fosse mais baixo. Mesmo porque, como mostram Eng-Larsson et al. (2012), o crescimento econômico é geralmente considerado o principal fator do aumento do transporte de cargas. Em virtude deste fato, a redução das emissões pode não ser desejável em todos os setores, uma vez que podem existir setores em que o custo de redução seja mais baixo. No estudo desenvolvido, os autores encontraram evidências de que o crescimento do PIB na Suécia era responsável por 47% das emissões de CO₂, seguido pela intensidade do uso do transporte, responsável por 38% das emissões. Por outro lado, uma mudança estrutural seria o fator individual mais importante para evitar um aumento ainda maior nas emissões. Este fator seria responsável por uma redução de 50% das emissões, *ceteris paribus*.

Conforme já mencionado por diversos autores, o uso de combustíveis menos poluentes pode ser uma alternativa para reduzir tais emissões. Porém, há que se considerar que os biocombustíveis, por exemplo, podem ser menos poluentes, mas emitem poluição durante o processo produtivo. Cientes deste fato, Grahn, Azar e Lindgren (2009) mostram quais seriam os impactos sobre os biocombustíveis caso fosse adotado um limite sobre as emissões em dois cenários distintos: (1) todos os países do mundo e (2) apenas para os países industrializados. Os autores constatam que o uso de biocombustíveis no setor de transportes não aumentaria em grande escala caso houvesse um acordo mundial de redução das emissões.

Isso porque a produção de biocombustíveis pode implicar o aumento das emissões, decorrente de mudanças no uso da terra e desmatamentos.

Por isso, mesmo com uma meta de redução das emissões, a gasolina e diesel ainda seriam as principais fontes de energia (52%) e seriam seguidos por gás natural (26%). O uso de biocombustíveis pode se tornar mais intenso apenas se não for possível reduzir as emissões de outras atividades, o que poderia ocorrer se o limite sobre as emissões fosse tão restritivo que se tornariam alternativas para o setor de transportes.

A literatura apresentada até o momento foca-se nas possibilidades de redução das emissões de uma forma geral, assim como de uma forma específica ao setor de transportes. Porém, pelo lado metodológico, a literatura apresentada ainda está distante da estratégia que será adotada neste trabalho. Portanto, na próxima seção, serão apresentados os trabalhos ligados diretamente à análise logística, com ênfase direcionada aos estudos que procuraram enfatizar as questões ambientais.

2.2 Potencial da logística na redução das emissões de CO₂

O desenvolvimento da logística enquanto ciência proporcionou uma série de estudos. Problemas referentes à localização de centros de distribuição, armazéns intermodais, rotas alternativas para o transporte de carga, transporte intermodal, entre outros, já foram explorados por diversos autores. Por exemplo, Zucchi, Zeng e Caixeta-Filho (2011) desenvolveram uma modelagem de localização ótima de abatedouros voltados à exportação de carne no Mato Grosso. Entre os principais resultados, o modelo indicou que deveriam ser construídos três abatedouros na região analisada, o que responderia a 79% do custo total mínimo.

Já Oliveira e Caixeta-Filho (2007) estudaram a localização ótima dos armazéns intermodais de açúcar, para potencializar o uso de ferrovias. Os autores constataram que a curtas distâncias, o modal ferroviário é menos competitivo. Porém, mesmo que subutilizado, se este modal for usado conjuntamente com as rodovias, pode ocorrer uma redução no custo total do transporte.

Os estudos citados anteriormente são uma amostra dos tipos de problemas que podem ser analisados quando se consideram as questões logísticas. No entanto, boa parte dos estudos não consideram os impactos ambientais que a atividade logística pode causar. Além disso, também são raros os estudos que apontem medidas para se reduzir a poluição neste tipo de atividade.

Zhang et al. (2011), por exemplo, afirmam que é importante considerar as emissões de CO₂ em um cenário de análise ambiental, pois os resultados da otimização do modelo de transporte seriam enganosos, uma vez que o custo total, quando se considera o custo das emissões de CO₂, tende a ser mais elevado que na ausência de tais custos. Os autores utilizaram a programação inteira para resolver o modelo de transporte intermodal. No modelo proposto, a função custo a ser minimizada era composta por cinco elementos: custos do transporte, custos de transferência entre os modais, custos de penalidade (caso não fossem respeitados os limites de tempo estabelecidos) e o custo das emissões de CO₂.

Usando dados hipotéticos, os autores constataram a suposição de que em um cenário que havia restrição das emissões, o custo seria mais elevado. Neste caso, houve a inclusão das emissões na função objetivo. Para este cenário o valor da função objetivo foi de US\$ 53,103.00 e os modais utilizados em maior intensidade seriam o hidroviário e o ferroviário. Já na situação em que não foi imposta uma restrição sobre os níveis de emissões de CO₂ a função custo atingiu um valor US\$ 24,811.60. Esta redução se deve ao fato de que as emissões foram desconsideradas da função custo. Neste cenário, o modal a ser utilizado com mais intensidade seria o rodoviário. Sendo assim, fica claro que quando se restringe as emissões de CO₂, a prioridade é dada para um modal menos poluidor.

A questão dos impactos de medidas ambientais sobre os custos logísticos foi apontada por Harris et al. (2011). Os autores afirmam que reduzir o impacto ambiental das atividades logísticas frequentemente resulta em uma configuração da rede de distribuição mais cara. Os níveis de emissão são relacionados a fatores como distância percorrida, peso da carga e a velocidade do veículo. Os autores analisaram o impacto de decisões estratégicas e operacionais nos custos de transporte e estoques contra os impactos em termos de emissões de CO₂ para uma rede de distribuição de automóveis que opera em diversos países europeus. A análise partiu de uma localização de centros de distribuição existentes, com a possibilidade de se instalar novos centros.

Quando se considera a utilização dos centros de distribuição já existentes, se houver um aumento de 15% na utilização dos veículos, haverá uma redução de 7,5% nos custos logísticos e uma queda de 10% nas emissões. Neste caso, os autores mostraram que o aumento do fator de utilização do veículo tanto pode reduzir os custos logísticos quanto reduzir as emissões.

Outra forma possível de se obter a redução nas emissões de gases de efeito estufa provenientes do setor de transporte é considerar a possibilidade do transporte intermodal. Bauer, Bektaş e Grainic (2010) afirmam que diferentes modais de transporte

emitem quantidades de gases de efeito estufa distintas. Os autores então propõem um modelo de programação inteira com o objetivo de minimizar os custos ambientais das emissões de gases de efeito estufa, considerando uma situação de transporte intermodal. Foram considerados três conjuntos de dados, que se referiam a 5, 10 e 15 tipos de bens, analisando a rede de transporte ferroviário que opera na Áustria, República Tcheca e Polônia.

Os autores compararam os resultados do modelo proposto com os resultados de um modelo de minimização de tempo, proposto por Andersen e Christiansen (2009). Os resultados obtidos mostraram que a minimização do tempo de transporte leva a uma utilização mais frequente do mesmo modal de transporte, enquanto que o modelo que minimiza o custo das emissões fornece uma utilização mais diversificada dos modais. No entanto, ao se utilizar o modelo ambiental, o tempo gasto em todo o processo de transporte foi 250% maior. Os autores explicam que tal fato decorre do longo tempo que as mercadorias ficaram nos terminais intermodais esperando pelo próximo modal. No entanto, a redução das emissões obtida no modelo de minimização do custo ambiental foi por volta de 30%.

Seguindo a linha de se considerar os custos de carbono no custo total, Qu, Bektaş e Bennel (2014) consideram o sistema intermodal de transporte, utilizando um modelo de programação inteira mista não-linear, cuja função objetivo (a ser minimizada) envolve os custos totais (fixos e variáveis), inclusive o custo de transferências entre os modais e o custo das emissões de gases de efeito estufa. Os autores utilizaram informações sobre a rede de distribuição no Reino Unido, para o escoamento de 30 tipos de produtos, entre os modais disponíveis. Um dos resultados do modelo mostra que o custo do transporte intermodal é 22,4% menor quando se compara com uma situação em que apenas o modal rodoviário é utilizado. No entanto, à medida que o custo variável aumenta a economia com a adoção da intermodalidade no transporte é de 41,2%. Outro ponto a ser destacado é que, como o modal rodoviário é o mais poluente, os custos das emissões de carbono pelas rodovias é 3 vezes maior que o custo das emissões provenientes das ferrovias. Já os custos de transferência são pouco expressivos na composição do custo total.

Conforme pode se verificar nos estudos citados, quando as emissões de CO₂ são consideradas no modelo de otimização, surge uma configuração que favorece os modais menos poluidores. No entanto, como afirmam Winebrake et al. (2008), existe um *trade-off* entre os objetivos ambientais e os objetivos de custo mínimo. Utilizando um modelo geoespacial da rede de transporte intermodal, foram analisadas três rotas da costa leste americana. Os autores constataram que quando se escolhe minimizar as emissões, o modal

selecionado é o ferroviário; porém, se o objetivo for minimizar o tempo, o modal escolhido é o rodoviário. Comparando as emissões dos dois modais, a diferença é de 998 kg/TEU¹³.

Já quando se compara o caso em que se minimiza o custo com o modelo de emissões mínimas, os modais utilizados seriam o marítimo e o ferroviário, respectivamente, sendo que a diferença entre as emissões do modal marítimo com aquelas provenientes do modal ferroviário seria de aproximadamente 900 kg/TEU. Os autores argumentam que seria necessária uma taxa de US\$ 75.00/t de carbono para que o vendedor mudasse de modal, no caso, do modal marítimo para o ferroviário.

Apesar da aceitação a respeito de que o transporte intermodal, quando disponível, é um meio de se obter emissões menores, em certos casos a intermodalidade tem pouco efeito sobre as emissões. Esse é o caso analisado por Nieuwenhuis, Beresford e Choi (2012), que consiste numa análise feita para montadoras de automóveis na Coreia do Sul, em que parte da produção se destina às exportações. Os autores argumentam que, dada a distância das montadoras em relação aos mercados consumidores (EUA e Europa), a empresa sempre se depara com o *trade-off* entre produzir localmente, transportando a produção por longas distâncias; ou produzir próximo aos mercados de destino.

A análise ambiental desenvolvida mostrou que quando a produção está próxima do mercado importador, as emissões são menores quando se compara com a situação de produção local (no país produtor). E isso independe do modal utilizado, uma vez que no caso em questão, é necessário o transporte marítimo. Quando se compara as emissões de uma montadora localizada na Coreia do Sul com as emissões de uma filial localizada nos Estados Unidos, as emissões são 743,73 kg/carro e 149,32kg/carro, respectivamente¹⁴. Sendo assim, os autores afirmam que mesmo usando modais menos poluentes, dada a longa distância, o transporte intercontinental sempre vai gerar níveis mais altos de CO₂.

Outra abordagem comum é analisar como o setor de transporte se comporta nos casos em que políticas ambientais são consideradas. Neste contexto, Pan, Ballot e Fontane (2013) calcularam qual seria o impacto ambiental do agrupamento de cadeias de abastecimento. Os autores explicam que tal procedimento consiste em enviar conjuntamente os produtos de diferentes fornecedores ao centro de distribuição dos varejistas. Os dados foram obtidos de duas grandes cadeias de varejo francesas, tendo sido desenvolvido um modelo de otimização que consiste na minimização das emissões de CO₂ considerando dois

¹³ Medida volumétrica que representa o volume de container de 20 pés.

¹⁴ Os modais utilizados foram: ferroviário, marítimo, ferroviário, rodoviário (fábrica localizada na Coreia do Sul) e ferroviário e rodoviário (fábrica localizada nos Estados Unidos).

modais: rodoviário e ferroviário. Além disso, foi desenvolvido um modelo de minimização de custos para confrontar os resultados. A resolução do problema de minimização das emissões apontou para uma redução de 15% a 62% das emissões se o modal utilizado fosse o ferroviário, no caso de agrupamento da carga.

Porém, apesar dos resultados apontarem para uma redução das emissões, os custos associados são elevados. No cenário em que ocorreu a redução das emissões em 52%, houve um aumento de 85% no custo total. Os autores salientam que não existe interesse, por parte dos agentes pertencentes à cadeia de distribuição, em escolher um cenário de minimização das emissões em detrimento a um cenário de custo mínimo, tendo em vista a elevação considerável do custo total.

Do ponto de vista teórico, a minimização das emissões consiste em encontrar um nível mínimo das emissões que atenda as restrições de produtividade, de demanda, entre outros. No entanto, é razoável supor que os agentes não busquem emissões mínimas, que normalmente são associadas a custos mais elevados. Pelo contrário, o objetivo sempre em mente, de acordo com a teoria microeconômica, é a maximização de lucros ou redução dos custos. Sendo assim, pode-se supor novamente que as emissões seriam minimizadas se houvesse um incentivo ou punição. Desta forma, alguns trabalhos buscam analisar os impactos que as políticas ambientais causam na economia ou em um setor específico.

No caso do setor de transportes, um estudo a ser destacado é o desenvolvido por Palak, Ekşioğlu e Geunes (2014). Os autores analisaram o impacto que os mecanismos de regulação de carbono nas decisões de reabastecimento (reposição de estoques) e transporte em uma cadeia de distribuição de biocombustíveis, por meio de um modelo de minimização de custos. Os mecanismos considerados pelos autores foram: imposição de limite para as emissões de CO₂, taxa de carbono, comércio de créditos de carbono e mecanismos de compensação. A justificativa de tal análise é obter indícios de como a seleção dos modais de transporte é afetada quando se impõe cenários em que uma medida regulatória sobre as emissões de dióxido de carbono é tomada. E também, os impactos destas limitações sobre as decisões de reposição do inventário, uma vez que o modelo leva em conta que as emissões resultam não só do transporte, mas também do armazenamento dos biocombustíveis. Foi considerado ainda que o desenvolvimento tecnológico pode permitir a melhora da eficiência dos combustíveis, o que, conseqüentemente, reduz as emissões de CO₂.

Os resultados obtidos apontam para uma tendência de se escolher fornecedores localizados mais próximos à instalação quando: o limite imposto sobre as emissões se torna mais restritivo (diminui), a taxa sobre as emissões aumenta, o preço das permissões aumenta.

Nestes casos, a fim de se reduzir os custos, usa-se o modal rodoviário; porém, somente a curtas distâncias. No que se refere ao desenvolvimento tecnológico, os impactos de tal melhoria são mais eficientes quando o limite máximo permitido é mais restritivo ou quando a taxa imposta é mais elevada. Nestes casos, quanto maior for a eficiência dos combustíveis, menores serão os custos e as emissões.

Entre os mecanismos analisados, aquele que limita a quantidade de emissões foi o que produziu uma maior redução nas emissões a um custo mais baixo. Porém, é válido ressaltar que os agentes não têm incentivo em reduzir as emissões abaixo do valor estabelecido. Sendo assim, se o limite máximo permitido for elevado, a redução das emissões será pequena.

Seguindo a mesma linha do estudo anterior, o modelo proposto por Hoen et al. (2014) parte da seleção de modais de transporte para incorporar três tipos de regulação: taxa de carbono, mercado de créditos de carbono e restrição da quantidade de CO₂ emitido. Sendo assim, trata-se de um modelo no qual o modal de transporte que minimiza o custo total, incluindo o custo das emissões, é o selecionado. Foram utilizados quatro tipos de produtos, de diferentes dimensões: açúcar, ouro em barra, televisão e material isolante.

Na ausência de mecanismos de regulação para as emissões, os modais escolhidos foram: hidroviário (açúcar), rodoviário (ouro), hidroviário (material isolante) e aeroviário (televisão). Nesta configuração, quando o modal hidroviário é o escolhido, já se atinge o mínimo das emissões. No entanto, quando ocorre a troca do modal rodoviário pelo ferroviário, a redução das emissões é de 54%; se a troca for feita para o modal hidroviário, a redução atinge 71%.

Um fato interessante ocorre com relação ao preço das permissões de carbono. Os autores avaliam que, se o preço fosse de € 15,00/t, o único modal afetado seria o aeroviário. Neste caso, o transporte seria feito pelo modal ferroviário, acarretando uma redução de 98% nas emissões. Mas, se o sistema adotado for aquele de taxa de carbono, para o transporte de ouro, por exemplo, seria necessária uma taxa de € 237,00/t, para promover uma troca entre os modais.

A diferença entre o mecanismo de compra e venda de permissões de carbono e a imposição de uma taxa está na possibilidade de se adquirir livremente uma quantidade de permissão de carbono, o que reduz o custo total, se comparado com a imposição de uma taxa.

No que se refere ao mercado de carbono, Chaabane, Ramudhin e Paquet (2012) argumentam que as taxas de carbono e o mecanismo de venda de créditos de carbono criam novas oportunidades de investimento que podem ser direcionadas à criação de um fundo para

que seja desenvolvida uma tecnologia menos poluente. Os autores estudaram o impacto de variações no preço das emissões de carbono em uma rede de suprimentos da indústria de alumínio, por meio da metodologia de Avaliação do Ciclo de Vida, incluindo a possibilidade de reciclagem e logística reversa. Os autores argumentam que se o preço do carbono aumentar ao longo do tempo, haverá um impacto no custo total, porém sem consequências na estruturação da rede de distribuição. Pois, a melhor decisão é comprar créditos de carbono para atender ao limite estabelecido. Quando o limite das emissões se torna mais restritivo, o uso de produtos reciclados se torna maior, já que neste caso, torna-se possível reduzir as emissões de gases de efeito estufa e atingir a meta de emissões. Mas, a possibilidade de comprar os créditos de carbono, quando o preço é baixo, impacta de forma negativa na reciclagem, já que é possível atingir o limite de emissões a um custo mais baixo.

A questão em torno do preço do carbono também foi discutida por Fahimnia et al. (2013). No estudo, os autores utilizaram um modelo de otimização não-linear para representar o *trade-off* entre o custo do transporte e os custos das emissões de carbono e consumo de combustível, em uma companhia que produz e distribui motores refrigerados na Austrália. Os autores constataram que com o esquema de precificação do carbono, as emissões reduzem. Porém, a redução das emissões depende do preço estabelecido. Quanto maior o preço, maior será a redução das emissões. Porém, maior também será o custo total do transporte. No que diz respeito ao consumo de combustível, os autores verificaram que a qualidade das rodovias permite uma redução de 18,5% no consumo de combustível. Tem-se assim, também, uma redução da quantidade de CO₂ emitido.

Abdallah et al. (2012) afirmam que devido à pressão por reduzir os impactos ambientais das atividades de distribuição dos produtos, as empresas buscam minimizar tais impactos por meio da escolha dos fornecedores de insumos. Em uma situação de certificação ambiental, a empresa se depara com o *trade-off* entre custos e as respectivas emissões. Por isso, os autores desenvolveram um modelo de programação inteira mista, para uma companhia que monta e distribui computadores. Esta empresa adquire os produtos necessários de vários ofertantes, sendo que quanto mais sustentável for a produção, mais elevado é o preço do produto.

A análise foi desenvolvida em duas etapas: minimização dos custos totais e minimização das emissões de carbono provenientes de toda a rede de suprimentos. Numa situação em que a comercialização de créditos de carbono é implementada, o custo associado às emissões torna o custo total mais elevado. Porém, quando se minimiza as emissões, ocorre uma redução em tais custos, uma vez que podem ser vendidos créditos de carbono. No setor

analisado, o transporte tem um impacto relativamente pequeno nas emissões totais¹⁵, considerando-se todo o ciclo de produção e distribuição do setor de computadores.

Contrários aos estudos apresentados, Bouchery e Fransoo (2015) afirmam que de acordo com a configuração logística do país, o transporte intermodal pode levar a um percurso maior via rodovias até chegar ao terminal de transbordo. Sendo assim, pode ocorrer uma intensidade maior das emissões por meio da intermodalidade¹⁶.

Os autores salientam que a adoção de uma taxa de carbono sobre o transporte rodoviário aumentaria o custo do transporte, favorecendo o transporte intermodal. Mesmo em situações onde o transporte direto fosse preferível, por exemplo, se o terminal de embarque estivesse localizado distante do porto e da origem. Nas simulações, os autores constataram que a adoção de uma taxa de carbono levava a uma elevação de 50% no custo total do transporte¹⁷, porém as emissões ficariam apenas a 0,20% acima do nível ótimo de emissões. Sendo assim, os autores concluem que quando o objetivo é minimizar o custo, o terminal intermodal deveria estar localizado próximo ao porto. Se o objetivo for minimizar as emissões, o terminal deveria estar distante do porto, para que o trajeto percorrido pelas ferrovias fosse maior.

Apesar da vasta literatura desenvolvida por autores brasileiros, a respeito das questões logísticas, quando se trata da questão da análise ambiental dos impactos deste tipo de atividade, ou mesmo das possibilidades que o setor de transporte pode fornecer à redução das emissões de gases de efeito estufa, a literatura não é abundante. Entre os trabalhos pode-se citar o desenvolvido por Bartholomeu e Caixeta-Filho (2009). Os autores argumentam que a qualidade de conservação das rodovias pode ter um impacto no consumo de combustível e, conseqüentemente, nas emissões de CO₂. Assim, rodovias com melhor qualidade tornam a eficiência energética maior e propiciam um nível menor de emissões.

Por meio do cálculo dos benefícios ambientais que a qualidade das rotas analisadas geraria, os autores mostram que o consumo de combustível seria 5,07% menor em rotas de melhor qualidade, quando comparado às rotas em pior estado de conservação. E, se a pior rota analisada tivesse a mesma qualidade da melhor rota, haveria uma redução de 45,7g de dióxido de carbono por tonelada de mercadoria a cada 100 km percorridos.

¹⁵ Essa constatação foi possível porque os autores utilizaram ainda um modelo de avaliação do ciclo de vida, que permite calcular as emissões de todo o processo produtivo.

¹⁶ Cabe destacar aqui que tal fato não deve se verificar no Brasil, uma vez que existem grandes distâncias para serem percorridas, a intermodalidade ocorreria como forma de reduzir os custos, o que implicaria uma redução da distância percorrida e não em um aumento.

¹⁷ Se o terminal estiver localizado distante do porto.

Apesar de que, em termos absolutos, a redução parece ser pequena, se os resultados fossem extrapolados para todas as rodovias brasileiras, que em média têm um estado de conservação ruim, a redução das emissões seria significativa, caso se desenvolvesse uma política de melhora na infraestrutura rodoviária do país. Os autores salientam que, desconsiderando as rodovias do estado de São Paulo¹⁸, se as demais rodovias brasileiras tivessem um estado de conservação semelhante, o valor agregado do benefício ambiental estimado seria de US\$ 32.2 milhões no ano de 2004.

Além do problema da qualidade das rodovias, outro problema recorrente no Brasil é a estrutura deficiente dos demais modais brasileiros. Pinheiro (2012) argumenta que os portos brasileiros não possuem capacidade de armazenamento suficiente, o que limita a quantidade de carga recebida. E a deficiência da ligação entre os terminais de armazenamento e as ferrovias faz com que a prioridade do transporte de cargas seja direcionada ao modal rodoviário.

Tendo em vista estas limitações, a autora utilizou um modelo de minimização de custos de transporte e um modelo de minimização das emissões para o setor sucoenergético brasileiro. O estudo direcionou atenção à expansão da rede ferroviária e dutoviária prevista nas obras do Programa de Aceleração do Crescimento (PAC I e PAC II). Conforme já discutido nesta revisão, constatou-se um *trade-off* entre o custo mínimo e emissões mínimas. Por exemplo, para o transporte do açúcar em grão, uma redução de 3,34% nas emissões de gases de efeito estufa acarretaria numa elevação de 3% nos custos de transporte quando se considerou o cenário atual¹⁹. Já quando se considerou o cenário no qual a expansão prevista pelos PAC I e PAC II fosse realizada, a redução das emissões por meio do transporte intermodal seria 9,77%, porém à custa de uma elevação no custo total de 5,5%.

Apesar do *trade-off* entre minimizar as emissões e minimizar o custo, a possibilidade de usar o transporte intermodal pode reduzir tanto os custos de transporte quanto as emissões. Caso as obras de expansão previstas sejam de fato concretizadas, quando se compara o cenário atual com o cenário projetado, utilizando o modelo de minimização das emissões, a redução das emissões seria de aproximadamente 47,69%. Além disso, mesmo que o modelo de minimização das emissões não busque uma configuração de custo mínimo, o custo se torna menor pelo uso do transporte intermodal, sendo verificada uma queda de 18,67% no custo total caso as obras de expansão aconteçam.

¹⁸ Pois são as rodovias com melhor estado de conservação no Brasil.

¹⁹ Por cenário atual entende-se aquela configuração existente na época em que o estudo foi realizado. Contando com a produção corrente e com a capacidade dos modais de transporte sendo limitadas pelas quantidades que de fato foram transportadas em cada um dos modais.

Um ponto importante a ser lembrado é que a adoção de medidas ambientais, independente da natureza da medida, pode causar impactos sobre toda a economia. Por exemplo, uma taxa sobre o setor de transportes pode impactar, além deste setor, todas as demais atividades. Embora o método a ser utilizado neste trabalho não contemple tais impactos, é preciso considerar quais seriam as possibilidades decorrentes da adoção destas medidas em determinado setor. Por isso, a próxima seção irá abordar estudos que analisam os impactos de medidas de controle das emissões sobre toda a economia brasileira.

2.3 Impactos de políticas ambientais sobre a economia brasileira

O Brasil, por ser um país emergente, nunca esteve sujeito a metas obrigatórias de redução das emissões de GEE. Exatamente por isso, não foi adotada, ainda, uma política ambiental como uma taxa sobre o carbono. Porém, Szklo et al. (2005) mostram que alguns programas energéticos no Brasil conseguiram reduzir as emissões de CO₂, apesar de não terem como objetivo principal promover esta redução. Um exemplo desta situação é o programa Proálcool, cujo objetivo era deixar o país menos dependente dos derivados do petróleo e que apresentou um impacto positivo sobre o meio ambiente. Os autores mencionam que o uso do etanol como combustível evitou 5,4 MtC/ano (toneladas métricas de carbono por ano) em 2000, sendo que 53% deste valor se deve à adição de etanol anidro na gasolina.

Outras medidas também foram analisadas²⁰, como o uso do bagaço de cana-de-açúcar como geração de energia, substituição de óleo combustível por gás natural na indústria, fontes alternativas de energia e redução de impostos (IPI) para automóveis com motores menos potentes (<1.000cc). Os autores mostram, por meio de simulação, que as emissões de dióxido de carbono no Brasil seriam 20% maiores se essas medidas não tivessem sido adotadas. E, se essas medidas continuarem²¹ no país, em 2020 as emissões evitadas seriam de 44,6 MtC/ano. O que sinaliza que, certas medidas, podem funcionar como uma política ambiental, sem necessariamente ser criada para isso. No caso do trabalho de Szklo et al. (2005), a manutenção destas medidas poderia ser vista como uma política ambiental.

A função esperada de uma boa política ambiental é permitir que ocorra a redução das emissões, afetando da menor forma possível o crescimento econômico. Isso porque, economias em desenvolvimento como o Brasil, ainda não alcançaram um nível de renda *per capita* adequado. Pois, como mostram Carvalho e Perobelli (2009), no curto prazo

²⁰ Maiores detalhes a respeito das emissões evitadas podem ser encontrados em Szklo et al. (2005).

²¹ São feitas algumas suposições como aumento dos carros que usam apenas o etanol para 10%, capacidade de conservação de energia elétrica em torno de 10% do consumo em 2010 e 20% do consumo entre 2020, entre outras.

as emissões só se reduziriam se houvesse uma redução do nível de atividade. Cabe destacar que os autores não consideraram medidas de mitigação, mas apenas um choque sobre a demanda final, assim como a forma com que os setores da economia reagiriam a este choque.

As evidências encontradas por Carvalho e Perobelli (2009) podem ser utilizadas como justificativa para a importância da adoção de políticas de mitigação das emissões. No entanto, estas medidas vão ter um efeito sobre toda a economia. Como mostram Ferreira Filho e Rocha (2005), o efeito da adoção de um imposto de R\$ 10,00/tCO₂ pode levar a uma queda de 0,32% no PIB real. Haveria também uma redução do nível das emissões, porém esta redução seria maior se o imposto abrangesse não apenas o uso de combustíveis fósseis mas também fosse aplicado sobre a atividade produtiva. De acordo com o cenário analisado²², os preços dos produtos do setor agrícola poderiam ser afetados pela adoção desse tipo de imposto. O preço da soja, por exemplo, poderia variar de 0,24% a 1,20%. No caso de uma política restrita ao uso do combustível, o preço aumentaria aproximadamente 0,55%.

Os autores mostram também que o desenvolvimento tecnológico pode potencializar o efeito das políticas adotadas, em termos de redução das emissões. Apesar da queda do PIB real ser semelhante, neste cenário as emissões totais teriam a maior queda, de aproximadamente 8,5%. Assim, em termos ambientais, a melhor medida poderia ser a adoção de um imposto tanto sobre o nível da atividade quanto sobre o consumo de combustíveis. Porém, a queda no PIB real seria inevitável, dentro do contexto analisado.

Um outro estudo que mostra a redução do PIB como consequência da adoção de uma taxa sobre as emissões é o desenvolvido por Tourinho, Motta e Alves (2003). Os autores mostram que a adoção de taxas sobre as emissões, apesar de reduzirem as emissões de CO₂, tornariam menores a renda das famílias e o valor do PIB²³. A redução das emissões seria proporcional ao valor da taxa aplicada. Por exemplo, uma taxa de US\$ 3.00 levaria a uma redução de 0,198% nas emissões. Já uma taxa de US\$ 20.00 tornaria as emissões 1,36% menores. Neste caso, os setores que mais reduziriam as emissões ao se aplicar uma taxa seriam os de transporte, siderurgia e açúcar. No caso específico do setor de transporte, uma taxa de US\$ 200.00 levaria a uma elevação de 5,3% no preço praticado pelo setor. Porém, a esta taxa a redução das emissões seria de aproximadamente 2,541%, o que pode estar associado a um menor uso do setor de transporte em virtude da elevação dos custos do setor.

²² Os cenários variam de acordo com: (1) a elasticidade substituição de gasolina por álcool, (2) os impostos, que podem ser aplicados sobre combustíveis ou também sobre o nível de atividade, (3) a taxação das atividades incluídas no *European Trade Scheme* (EU/ETS), (4) o Coeficiente GWP, que para o metano é igual a 6.

²³ A queda no PIB seria um valor pouco expressivo de 0,002% a 0,026%, dependendo da taxa adotada.

Um ponto importante com relação à imposição de uma taxa sobre o carbono é a forma como a receita obtida deve ser direcionada. Wills e Lefevre (2012) mostram que o impacto negativo sobre o PIB, decorrente da adoção de uma taxa sobre o carbono, depende do destino dado à receita obtida. Os autores mencionam que uma taxa de R\$ 200,00/tCO₂ pode acarretar numa queda de 1% a 4% do PIB brasileiro. Esta variação depende de como a receita obtida com a taxa é utilizada. Assim, os autores mostram que se a receita obtida com a taxa for direcionada ao desconto de outros impostos²⁴, a queda no PIB seria menor que a que ocorreria caso a receita fosse utilizada apenas como forma de redução do déficit do governo. Quanto ao nível de emprego, este cenário de utilização da receita como fonte de financiamento do déficit governamental seria responsável por uma elevação de 12% no nível de desemprego.

Outro possível destino da receita arrecadada com a taxa é mostrado por Grottera (2013). A autora mostra que se a receita obtida com a taxa for direcionada como transferência para as famílias, a queda no PIB seria menor; neste caso, haveria também uma redução da desigualdade. A queda nas emissões, por outro lado, seria menor, uma vez que haveria um aumento no consumo o que impactaria de forma positiva nas emissões. A autora mostra que o melhor cenário, em termos de impactos sobre o PIB, seria direcionar a receita proveniente da taxa das emissões para reduzir a oneração do trabalho. Neste caso, haveria uma elevação do PIB e a queda do nível de emprego seria menor que nos outros cenários. As emissões, porém, teriam uma menor redução, em virtude, como já mencionado, do aumento do consumo.

É possível chegar a uma constatação interessante: um direcionamento da receita das emissões de forma a favorecer o PIB leva a uma menor redução das emissões. Mas, se essa receita fosse utilizada para financiar o desenvolvimento tecnológico, como mostrado por Magalhães e Domingues (2013), seria possível uma redução das emissões com um comprometimento menor do PIB. Os autores salientam que, caso houvesse um desenvolvimento tecnológico, o impacto da adoção de uma taxa sobre o PIB real poderia ser amenizado. Por exemplo, para atingir uma redução de 25% das emissões, seria necessária uma taxa de R\$ 177,00 por tonelada de carbono, o que levaria a uma redução do PIB real em 4,57%. Na ausência da suposição de desenvolvimento tecnológico, esta mesma meta de redução levaria a uma queda de 11,29% no PIB real, sendo que a taxa correspondente deveria ser de R\$ 380,00 por tonelada de carbono.

²⁴ Neste caso específico existe a restrição de manutenção da receita governamental em relação ao PIB.

Assim como Magalhães e Domingues (2013), Silva e Gurgel (2012) também analisam os impactos de limites sobre as emissões. Na visão dos autores, devem ser implementadas reduções graduais que variem de 3% a 30% das emissões setoriais. Embora levem a uma queda no PIB no ano de 2050, estas metas setoriais podem levar a uma redução de 54% das emissões. Para o setor de transporte²⁵, o imposto deveria ser equivalente a US\$ 151.00 por tonelada de carbono para se alcançar o nível de redução esperado. Com isso, ocorreria uma queda de 17,21% na atividade do setor de transporte. Este valor, na visão dos autores, decorre da pouca capacidade de se utilizar fontes alternativas de energia. No entanto, os autores salientam que o controle do desmatamento seria a opção mais barata como meio de reduzir as emissões de gases de efeito estufa no Brasil. Isso porque, possivelmente, o custo de redução das emissões originadas de mudanças do uso da terra seria mais baixo que o custo de outros setores.

Hilgemberg (2004), por sua vez, mostra quais seriam os impactos de políticas de redução das emissões de CO₂ decorrentes do uso de gás natural, álcool e derivados do petróleo no Brasil, para 18 setores da economia. Para isso, o autor analisou qual seria o impacto da adoção de uma política ambiental de um setor específico para os demais setores da economia. O efeito de um limite (-1%) sobre as emissões do setor de combustíveis levaria a uma redução do PIB de todos os setores considerados na pesquisa. Esta queda seria mais intensa naqueles setores onde a ligação com o restante da economia fosse maior. O autor mostra ainda que se fosse adotado um imposto sobre o setor de outros transportes, isto levaria a uma queda na demanda por insumos deste setor pelo setor agropecuário.

Caso a política adotada seja um limite sobre as emissões, também haveria uma queda no PIB de vários setores. No caso de um limite sobre setor de transportes²⁶, haveria uma queda no PIB de todas as regiões brasileiras, independentemente de como os setores redirecionam a demanda final²⁷. Os maiores impactos de políticas de restrição das emissões variam entre os setores e entre as regiões brasileiras. O setor de transporte rodoviário, por exemplo, sofre mais com os efeitos nas regiões Nordeste, São Paulo²⁸, resto do Sudeste e Sul. E, que os setores chaves para a redução das emissões de CO₂ seriam os de Transporte rodoviário e outros transportes, além dos setores de agropecuária, alimentos e bebidas, outros produtos, comércio e serviços e administração pública.

²⁵ O setor de interesse neste trabalho.

²⁶ Tanto o setor transporte rodoviário quanto outros transportes.

²⁷ Uma das hipóteses do trabalho é que os setores podem ou não redirecionar a produção para a demanda final.

²⁸ O estado de São Paulo foi considerado como uma região.

Uma forma de amenizar os impactos da adoção de uma taxa é apontada por Feijó e Porto Júnior (2009). Os autores mostram que o sistema de venda de créditos de carbono seria preferível à imposição de uma taxa, uma vez que a venda de créditos poderia gerar um fluxo positivo de renda. Mas, se as medidas forem muito severas, o PIB sofreria com uma redução maior, o que indicaria que o custo de internalização da externalidade seria muito alto. É evidente que este seria o cenário com maior redução das emissões. Ou seja, níveis maiores de redução das emissões possivelmente estariam associados a custos mais elevados²⁹.

Os autores ainda mostram que o preço das *commodities* de energia pode variar, de acordo com o cenário adotado³⁰. Assim, num cenário mais rigoroso, o preço do carvão, por exemplo, aumentaria 49,52% o que implicaria uma redução da demanda de 22,11% e em consequência, as emissões seriam 22,26% menores. O petróleo cru também seria afetado pela redução da quantidade demandada, o que levaria a uma redução de 14,43% das emissões resultantes.

Quando a adoção de uma tarifa sobre as emissões não for aplicada em vários países, pode ocorrer uma espécie de vazamento das emissões. Isto ocorre porque a produção pode migrar para regiões onde a lei ambiental é mais branda. Então, pode ser conveniente a imposição de um imposto de compensação sobre os produtos importados destas regiões. Neste contexto. França e Gurgel (2011) mostram que a adoção desta tarifa de compensação pelos países desenvolvidos pode levar a uma perda de bem-estar na economia brasileira. Embora em magnitude esta perda seja pequena, a redução é maior que num cenário em que tantos os Estados Unidos quanto a Europa participassem do mercado de carbono. Quanto às emissões, os autores salientam que no horizonte de análise, as evidências apontam para uma pequena redução das mesmas, o que indica a necessidade de mais países atuando na tentativa de redução das emissões. Sendo assim, na visão dos autores, políticas isoladas não seriam capazes de alterar de uma forma contundente a concentração de gases de efeito estufa na atmosfera.

Apesar deste fato, Lima e Gurgel (2012) mostram que se os Estados Unidos e Europa adotarem medidas ambientais, haveria impactos na economia brasileira. Os autores simularam uma situação em que houvesse o desenvolvimento de um biocombustível que fosse livre de emissões, para substituir o petróleo. Numa situação de livre comércio, o Brasil seria o

²⁹ De acordo com os resultados obtidos pelos autores.

³⁰ Foram considerados 5 cenários: (1) comércio mundial das emissões, (2) comércio das emissões entre as regiões anexo I sem a participação dos EUA, (3) Medidas de abatimento sem o comércio das emissões, (4) comércio mundial das emissões e redução adicional de grandes poluidores, (5) Comércio das emissões entre as regiões anexo I com a participação dos EUA.

maior produtor mundial deste biocombustível de 2ª geração. Porém, internamente, esta situação implicaria a queda da atividade produtiva de todos os demais setores, uma vez que todos os esforços estariam direcionados para a produção e exportação deste bem. Além disso, haveria possivelmente a expansão da produção sobre áreas de vegetação natural para atender a essa nova demanda.

Os autores destacam que esse cenário decorre de suposições fortes como mobilidade perfeita entre os combustíveis e livre comércio entre os países, o que está bem distante da realidade. Porém, os resultados apontam que uma possível manutenção do atual perfil exportador brasileiro, concentrado em produtos de baixo valor agregado, pode não se refletir em ganhos de bem-estar, se este crescimento ocorrer em função de perda de dinamismo de outros setores.

O impacto da adoção de biocombustível sobre a economia brasileira é abordado por Santos (2013), que analisou qual seria a consequência de uma política de inserção gradual de biocombustíveis. Um choque sobre a produção de biodiesel, de forma que houvesse um aumento tanto a quantidade produzida quanto o consumo de biocombustíveis, levaria a uma redução do consumo de óleo diesel, o que levaria a uma redução das emissões deste tipo de combustível em 11,17%. No agregado, a queda das emissões totais equivaleria a 1,922% para o uso de biodiesel e de 0,634% para o caso do etanol. No entanto, estas medidas levariam a um aumento das emissões tanto do setor de açúcar quanto do setor de soja. As emissões do setor de transporte se reduziriam em virtude da troca do combustível fóssil pelos biocombustíveis. A redução das emissões deste setor seria de aproximadamente 10,32%.

É interessante ressaltar que no agregado as variações do PIB foram pequenas; porém, em alguns estados as mudanças foram significativas. Em estados como Goiás, Tocantins e Mato Grosso haveria um crescimento da renda e do nível de emprego. Entretanto, as emissões destes estados aumentariam em virtude do crescimento do setor de biocombustíveis.

Uma discussão mais específica a respeito do aumento da produção de etanol: embora seja um combustível menos poluente, a sua expansão pode significar mudanças no uso da terra, o que pode acarretar maiores emissões. Assim, o potencial de redução das emissões via etanol pode ser questionável. Nardy e Gurgel (2013) mostram que se houvesse a redução das tarifas norte americanas sobre o etanol produzido no Brasil, haveria uma redução das áreas florestais e de pastagem, o que possivelmente levaria a uma elevação das emissões de CO₂ decorrentes de mudanças no uso da terra. Porém, essa elevação poderia ser compensada pela redução das emissões provenientes do uso de combustíveis fósseis. Pois

neste caso, mesmo com uma pequena elevação das emissões brasileiras, a quantidade adicional de etanol contribuiria com a redução das emissões globais de GEE, uma vez que parte desta produção seria direcionada a um mercado altamente poluidor.

Os autores ressaltam que a expansão da produção, no cenário de redução das tarifas comerciais, se daria sobretudo em áreas de pastagens, sendo que a expansão sobre as florestas seria pouco expressiva (0,12%). Neste cenário de redução de tarifas, haveria um aumento 21% na produção de cana-de-açúcar e aumento de 123% nas exportações de etanol. Porém, haveria a redução da produção de outras culturas, uma vez que a área antes destinada a certas culturas passaria a ser ocupada pela produção de cana-de-açúcar.

Como já mencionado por Silva e Gurgel (2012), outra forma de conter as emissões, especialmente no Brasil, é por meio da redução do desmatamento. Cientes dos impactos de mudanças no uso da terra, La Rovere et al. (2013) mostram que diante das metas propostas pelo governo brasileiro de redução de 36,1% a 38,9%, seria necessária uma redução do desmatamento no Brasil, sendo que em 2020 as reduções correspondentes na Amazônia e no Cerrado deveriam ser de 80% e de 40%, respectivamente. Neste cenário, o maior responsável pelas emissões de GEE restantes seria o setor de combustíveis. Os autores salientam que se não forem adotadas medidas de controle deste tipo de poluição, haveria um crescimento das emissões, tanto que em 2025 os níveis das emissões seriam maiores aos das emissões de 2005. Talvez por isso, os autores mencionam que mesmo com a elevação da produção dos biocombustíveis, a queda nas emissões do setor de transporte não seria suficiente para atingir a meta proposta. Isto evidencia a necessidade de se limitar o consumo de óleo combustível pelo setor de transporte e de se incentivar a mudança do modal rodoviário para modais menos poluentes, como ferrovias e hidrovias.

É possível perceber que a intermodalidade pode desempenhar um papel importante na redução das emissões de CO₂ provenientes do transporte de cargas. Então, é relevante analisar a matriz de transportes brasileira, a fim de compreender como está estruturada. Além disso, é importante também verificar qual a participação do setor de transportes nas emissões de CO₂ brasileiras. Assim, no próximo capítulo serão apresentados os principais aspectos referentes ao setor de transportes e às emissões de GEE no Brasil.

3 O TRANSPORTE DE CARGAS NO BRASIL E AS EMISSÕES DE GEE

O desenvolvimento de uma nação está relacionado à infraestrutura existente. Principalmente em um país como Brasil, com dimensões continentais e com vocação agrário-exportadora. Sendo assim, torna-se fundamental o desenvolvimento de uma infraestrutura logística capaz de transportar as mercadorias a longas distâncias.

Como os gastos com transporte representam a maior parcela dos custos logísticos, a existência de uma rede de transporte eficiente representa ganhos de escala e a consequente redução dos custos têm papel fundamental no aumento de competitividade do produto transportado (CONFEDERAÇÃO NACIONAL DO TRANSPORTE, 2015c).

Se por um lado o transporte representa um meio de desenvolvimento do país, no sentido de que é por ele que a produção do país é escoada, por outro lado este setor é um dos principais responsáveis pela poluição proveniente da queima de combustíveis fósseis. A IEA (2013) aponta que no país, as emissões de combustíveis fósseis se devem, sobretudo ao setor de transportes, estando intimamente ligadas ao crescimento do setor.

Em virtude do crescimento da demanda por transporte, a tendência é que o setor de transporte, de cargas e passageiros, continue sendo um dos grandes responsáveis pelas emissões de GEE. O IPCC (2014) estima que as emissões do setor de transportes sejam de 12 Gt CO₂e em 2050, quase o dobro do verificado no ano de 2010. Isto mostra, segundo a publicação, que reduzir as emissões destes gases vai ser um desafio em virtude do crescimento do setor.

O objetivo deste capítulo é apresentar de forma sucinta o transporte de cargas no país, de acordo com os principais modais. Além disso, serão apresentados os principais planos de expansão das ferrovias e hidrovias. Com relação às emissões de GEE, pretende-se mostrar a intensidade das emissões e o consumo de combustível de cada modalidade de transporte.

3.1 O setor do transporte de cargas brasileiro

A distribuição do modal de transporte no Brasil, medida em participação de cada modal, estimado em função das quantidades de toneladas úteis por quilômetro (TKU) é apresentada na Figura 1. Conforme pode se verificar, em 2014, o modal rodoviário foi o predominante quando se considera o transporte de cargas no Brasil. É seguido pelo modal ferroviário com 20,7%. Já o modal hidroviário, incluindo tanto a modalidade de navegação interior quanto a cabotagem, foi responsável por 13,6% do transporte de cargas no Brasil. O

transporte por dutovias e aéreo corresponderam – juntos – a menos de 5% do total transportado.

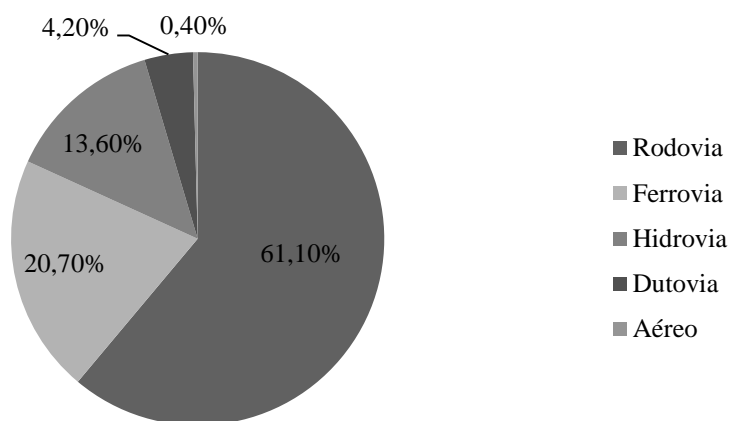


Figura 1 – Distribuição dos modais de transportes no Brasil
Fonte: Confederação Nacional do Transporte (2015b).

Com relação ao transporte de soja, a Confederação Nacional do Transporte (2015c) mostra que 65% da soja produzida no Brasil em 2013 foi escoada nas rodovias. Comparando a situação brasileira com o que ocorreu nos Estados Unidos, naquele país apenas 20% da soja foi escoada pelas rodovias, no ano de 2011. Tal fato evidencia o desbalanceamento da matriz de transportes brasileira. Essa situação complica-se ainda mais, uma vez que distância média da região produtora até o porto é de aproximadamente 1.000 quilômetros.

Em virtude de poucas alternativas de transporte, a soja produzida no Mato Grosso, principal produtor no Brasil em 2013, chega a percorrer mais de 2.000 quilômetros pelas rodovias (CONFEDERAÇÃO NACIONAL DO TRANSPORTE, 2015c). Tal fato acarreta dois problemas principais: elevação do custo do frete em virtude da longa distância percorrida e emissões mais elevadas de gases de efeito estufa.

A baixa capacidade das ferrovias é apontada pelos embarcadores como um dos principais entraves ao escoamento da produção (CONFEDERAÇÃO NACIONAL DO TRANSPORTE, 2015c). Pois, uma vez que o frete ferroviário é cobrado como uma porcentagem do frete rodoviário, o frete praticado nas ferrovias é mais baixo que o das rodovias (ANGELO, 2005 apud PINHEIRO, 2012). Isto implicaria uma redução do custo de transporte, quando este for feito pelas ferrovias, desconsiderando os custos de transbordo. O problema que surge, então, é a disponibilidade reduzida de ferrovias.

Neste caso, a Confederação Nacional do Transporte (2015c) estima que seria necessário um investimento mínimo de R\$ 987 bilhões para melhorar o sistema logístico brasileiro. No caso do transporte de soja e milho, seriam necessários, no mínimo, R\$ 195 bilhões em investimentos, dos quais aproximadamente R\$ 80 bilhões seriam direcionados para obras de melhoria e expansão das ferrovias.

3.1.1 Modal rodoviário

Como já mencionado, no Brasil houve uma priorização do modal rodoviário em detrimento aos demais modais. Branco (2007, p.31) salienta que “as políticas de estímulo ao transporte rodoviário vieram acompanhadas de uma redução dos investimentos nas outras modalidades de transporte”. Este direcionamento tornou o país mais dependente do modal rodoviário. E a dependência do setor de rodovias é maior no setor agrícola, tanto para receber os insumos quanto para escoar a produção para os mercados de destino.

A atual configuração da matriz de transportes brasileiras surgiu por volta dos anos 1960 quando surgiu o Plano Rodoviário Nacional, que consistia no redirecionamento dos impostos provenientes da venda de combustíveis e lubrificantes e sobre a propriedade dos veículos. Desta forma, a receita obtida via tributação era direcionada para a expansão da malha rodoviária, que passou de 8.675 km em 1960, para 47.487 km em 1980. No que se refere à rede ferroviária, no período de 1940 a 1970, houve uma redução da quilometragem, passando de 38 mil km para 30 mil km (CONFEDERAÇÃO NACIONAL DO TRANSPORTE, 2011).

Segundo a Confederação Nacional do Transporte (2014a), no ano de 2014 a extensão das rodovias brasileiras era de aproximadamente 1,7 milhões de quilômetros. Deste total, apenas 12% eram consideradas pavimentadas. Entre os anos de 2004 e 2014 houve um crescimento de 13,8% nas rodovias pavimentadas no país. Um crescimento insuficiente quando comparado ao crescimento de 122% da frota de veículos no mesmo período.

Embora o crescimento das vias pavimentadas tenha sido relativamente pequeno entre 2004 e 2014, quando se amplia o horizonte de tempo para a década de 1990 o crescimento das vias pavimentadas é um pouco maior. Entre 1996 e 2011, por exemplo, o crescimento foi de 43%. E quando se compara tal crescimento com a evolução das ferrovias, é possível verificar pela Tabela 1 que enquanto as rodovias apresentaram uma trajetória de crescimento, as ferrovias mantiveram-se estagnadas, apesar das concessões de ferrovias públicas à iniciativa privada. Isto sinaliza a prioridade dada ao modal rodoviário pelas autoridades brasileiras.

Tabela 1 – Evolução da pavimentação das rodovias x evolução das ferrovias

Ano	Rodovias Pavimentadas (km)	Ferrovias (km)
1996	149.000	29.301
2000	164.997	29.060
2005	196.244	28.977
2006	196.280	29.596
2007	202.964	29.817
2008	211.678	29.596
2009	212.148	29.637
2010	212.618	29.747
2011	213.722	30.111

Fonte: Confederação Nacional do Transporte (2011).

Quando se compara a matriz de transportes brasileira com a matriz de outros países, percebe-se que a configuração brasileira se aproxima mais da configuração de países com extensão territorial pequena, como pode ser verificado pela Figura 2. Nestes países, a concentração da carga ocorre no modal rodoviário em virtude das distâncias mais curtas. Mesmo por que, conforme ressalta Caixeta-Filho (1999), o modal ferroviário é o mais indicado para distâncias longas, enquanto o modal rodoviário é o mais indicado para distâncias curtas.

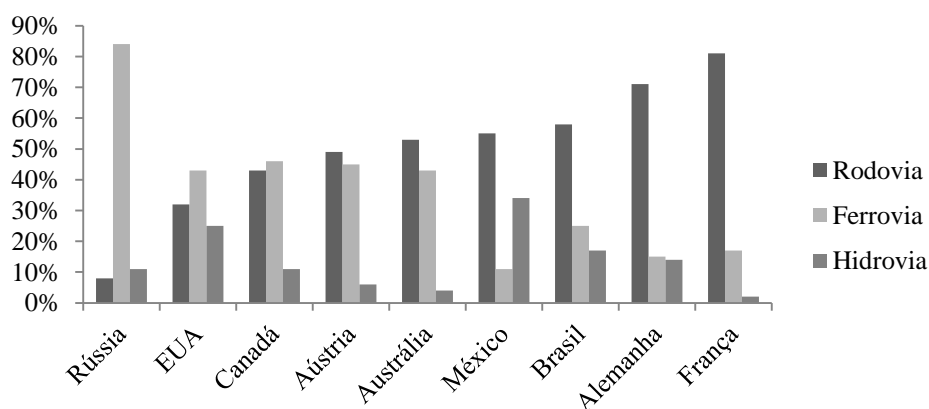


Figura 2 – Participação dos modais de transporte

Fonte: Confederação Nacional do Transporte (2011).

Observando os dados da Figura 2, pode-se perceber nos países com dimensão territorial maior, como Rússia e Estados Unidos, que o modal rodoviário não é o principal

meio de transporte. Nestes países, o principal modal é o ferroviário. Cabe destacar que, comparando o Brasil e a Austrália, países com dimensões territoriais semelhantes, a preferência é dada ao modal rodoviário, porém a utilização das ferrovias na Austrália é maior que no Brasil.

A questão referente ao desbalanceamento da matriz de transportes brasileira reside no fato de que o uso do modal rodoviário a longas distâncias encarece o preço dos produtos, por meio de um frete mais elevado. E, pelo fato da produção brasileira destinada à exportação ser essencialmente agrícola, há uma elevação do preço do produto, que possui baixo valor agregado. Isto diminui a competitividade do produtor brasileiro na comercialização dos bens produzidos.

E, além do uso intensivo do modal rodoviário, existe a questão da qualidade das rodovias. As condições do pavimento influem significativamente o preço dos fretes, pois em vias mais desgastadas o tempo de viagem é maior, além do aumento do consumo de combustível e desgaste maior dos veículos (CONFEDERAÇÃO NACIONAL DO TRANSPORTE, 2014a). Conforme já destacado por Bartholomeu e Caixeta-Filho (2009), em vias de maior qualidade as emissões de dióxido de carbono são menores que naquelas rodovias em pior estado de conservação.

Dados da pesquisa Rodoviária CNT 2014 desenvolvida pela Confederação Nacional do Transporte (2014a) apontam que o Brasil ocupa o 122º lugar no *ranking* de qualidade das rodovias elaborado pelo Fórum Econômico Mundial. O país está abaixo de diversos países da América Latina, como Chile, Uruguai e Argentina. Os dados da pesquisa também mostram que 62,1% das rodovias brasileiras³¹ são consideradas regulares, ruins ou péssimas e que em aproximadamente metade das rodovias analisadas existe algum tipo de deficiência no pavimento das vias. As Tabelas 2 e 3 mostram os principais resultados da pesquisa em termos de qualidade das rodovias.

Tabela 2 – Classificação da qualidade das rodovias

	Extensão (km)	Total (%)
Ótimo	9.978	10,1
Bom	27.383	27,8
Regular	37.608	38,2

³¹ Foram analisados 98.475 km de rodovias; portanto, não se aplica a todas as rodovias do país.

Tabela 2 – Classificação da qualidade das rodovias

	Extensão (km)	Total (%) (conclusão)
Ruim	16.709	17,0
Péssimo	6.797	6,9
Total	98.475	100,00

Fonte: Confederação Nacional do Transporte (2014a).

Pode-se observar que dos 98.475 km analisados, apenas 37,9% apresentavam um estado de conservação bom ou ótimo. Esta situação reflete a necessidade de maiores investimentos em termos de qualidade das rodovias já que, como mencionado, é neste modal que se concentra o transporte de cargas no país. Sendo assim, uma infraestrutura inadequada dos transportes afeta a atividade produtiva seja por meio do encarecimento dos custos de transporte, seja por meio do tempo de entrega.

Existe uma grande diferença de qualidade em relação às rodovias privadas e as rodovias públicas, que pode ser vista na Tabela 3. Um primeiro aspecto a ser destacado é que, apesar das privatizações, as rodovias públicas ainda são maioria. No entanto, quando se analisa a qualidade das vias, é sob a administração privada que se concentra a maior extensão de rodovias consideradas ótimas.

Tabela 3 – Classificação do estado geral das rodovias: privadas x públicas

	Privada		Pública	
	Extensão (km)	Total (%)	Extensão (km)	Total (%)
Ótimo	7.099	37,4	2.879	3,6
Bom	6.962	36,7	20.421	25,7
Regular	4.125	21,8	33.483	42,1
Ruim	657	3,5	16.052	20,2
Péssimo	117	0,6	6.680	8,4
Total	18.960	100	79.515	100

Fonte: Confederação Nacional do Transporte (2014a).

Quando se considera as rodovias de estado ruim, aquelas sob a tutela da iniciativa privada correspondem a 3,5%, enquanto nas rodovias públicas, em 20,2% da extensão analisada apresentou um estado ruim. E, de uma forma geral, as rodovias com

melhor estado de conservação são as privadas, sendo que 74,1% destas rodovias apresentam um estado de conservação bom ou ótimo. No entanto, quando se considera as rodovias públicas, apenas 29,3% da extensão analisada apresenta uma qualidade ótima ou boa.

Os dados da Confederação Nacional do Transporte (2014a) apontam, também, que a condição das rodovias brasileiras eleva o custo operacional do transporte em média 26%, sendo que na região Norte este custo chega a 37,6% e na região Sudeste corresponde a 20,8%, o menor custo das regiões brasileiras. Dados simulados pela pesquisa mostram que o custo operacional dos caminhões seria 95,1% mais alto quando a rodovia é avaliada como péssima em comparação com uma via considerada ótima. Considerando o estado de conservação regular, que é o predominante no país (42,1%), a elevação do custo operacional seria de 41%, comparado com um estado de conservação ótimo.

Assim, esta elevação do custo operacional certamente deve ser repassada para o preço do frete. E, com isso o preço dos bens pode ser reajustado em virtude do frete mais elevado. Desta forma, “(...) parte do custo elevado dos produtos nacionais deve-se a inadequada gestão das rodovias” (CONFEDERAÇÃO NACIONAL DO TRANSPORTE, 2014a, p.338).

Além de questões associadas ao custo do transporte, a qualidade das vias influi ainda na segurança dos usuários. Os dados da Confederação Nacional do Transporte (2014a) mostram que no ano de 2013 ocorreram aproximadamente 187 mil acidentes nas rodovias federais. E 39% dos casos envolviam acidentes com vítimas, o que levou à morte 6.885 pessoas. Embora seja impossível mensurar o valor de uma vida, os dados da pesquisa mostram que o custo dos acidentes em rodovias foi de R\$ 17,7 bilhões.

3.1.2 Modal ferroviário

O modal ferroviário passou por profundas modificações com o lançamento do Programa Nacional de Desestatização (PND) na década de 1990. Com a lei das concessões (Lei nº 8.987/95), a Rede Ferroviária Federal S.A. – RFFSA foi extinta e em seu lugar várias empresas privadas passaram a operar certos trechos³² (PINHEIRO, 2012).

Na visão de Branco (2007) o crescimento das ferrovias ocorreu de forma desintegrada, com manutenção dos traçados desenvolvidos nas primeiras ferrovias do país. E, além do problema do traçado, o autor ressalta ainda o problema da falta de padronização das bitolas, dificultando e encarecendo o transporte a longas distâncias.

³² Maiores detalhes a respeito do processo de privatização das ferrovias podem ser vistos em Branco (2007) e Pinheiro (2012).

Em decorrência destes fatores e do direcionamento dos investimentos para as rodovias, a malha ferroviária brasileira no ano de 2013 era composta por 28 mil quilômetros, como mostra a Tabela 4.

Tabela 4 – Extensão da malha ferroviária brasileira em 2013

Concessionária	Malha (km)
ALLMN – América Latina Logística Malha Norte S. A.	762
ALLMO – América Latina Logística Malha Oeste S.A.	1.945
ALLMP – América Latina Logística Malha Paulista S. A.	1.989
ALLMS – América Latina Logística Malha Sul S.A.	7.304
EFC – Estrada de Ferro Carajás	892
EFVM – Estrada de Ferro Vitória-Minas	905
FCA – Ferrovia Centro-Atlântica S.A.	7.220
FERROESTE – Estrada de Ferro Paraná-Oeste S.A.	248
FNS – FERROVIA NORTE-SUL S.A	720
FTC – Ferrovia Tereza Cristina S.A.	164
MRS LOGÍSTICA S.A.	1.674
TLSA – Transnordestina Logística S.A.	4.207
TOTAL	28.030

Fonte: Associação Nacional dos Transportadores Ferroviários (2014).

Com relação ao modal ferroviário, conforme já mencionado, o principal produto transportado é o minério de ferro. Dados da Associação Nacional dos Transportadores Ferroviários (2014) mostram que este produto representou 76,72% da carga transportada por ferrovias, em 2013. Foi seguido pelos produtos agrícolas, porém com participação bem menor (13,89%). Esta situação pode ser explicada porque, dados o volume e o peso dos produtos da mineração, não existe alternativa para escoar a produção que não por meio das ferrovias. Na Tabela 5 são apresentadas as informações desagregadas por concessionária.

Tabela 5 – Principais produtos transportados por concessionária ferroviária no Brasil em 2013

Concessionária	Principais Produtos Transportados	Total transportado (1.000 TU)
ALLMN	Soja e farelo de soja (42,9%)	14.711
ALLMO	Minério de Ferro (76,5%)	4.625
ALLMP	Açúcar (54,2%)	5.336
ALLMS	Soja (21,2%)	22.946
EFC	Minério de Ferro (96,3%)	115.006
EFVM	Minério de Ferro (89,32%)	125.296
FCA	Soja (14,16%)	22.923,2
FERROESTE	Soja (52,38%)	304,4
FNS	Soja e farelo de soja (81,4%)	3.112,5
FTC	Carvão mineral (99,93%)	3.240
MRS	Minério de Ferro (85,37%)	130.906
TLSA	Derivados de petróleo (41,6%)	1.211,6

Fonte: Revista Ferroviária (2015).

O termo TU (tonelada útil) refere-se ao transporte remunerado do total da carga movimentada na rede de transporte.

A participação restrita do modal ferroviário se deve, sobretudo, a gargalos físicos, financeiros e institucionais. De acordo com a Confederação Nacional do Transporte (2013a), vários entraves podem ser apontados como causas do baixo uso do modal ferroviário.

Um destes entraves diz respeito às invasões de faixa de domínio, o que forçam a redução da velocidade, tornando o modal ferroviário menos eficiente em virtude da elevação

dos custos operacionais. Na mesma linha de entraves, pode ser destacada a presença de passagens em nível, pois também reduzem a velocidade e dificultam as manobras em áreas urbanas.

A estes fatores, pode ser acrescentado o processo histórico de expansão da malha ferroviária, que foi pautado pela não conformidade de bitolas, o que dificulta a integração do sistema. Esta desconformidade acarreta a elevação do custo logístico, uma vez que podem ser necessárias operações de transbordo, o que resulta em um tempo maior de movimentação. Esses fatores reduzem os ganhos de escala decorrentes do uso do modal ferroviário.

3.1.3 Modal hidroviário

Segundo a Pesquisa CNT de Navegação Interior desenvolvida pela Confederação Nacional do Transporte (2013b), o Brasil possui 41.635 quilômetros de vias navegáveis, porém apenas 50,3% dessa extensão são economicamente utilizados. Das 12 regiões hidrográficas, apenas 6 apresentam informações relacionadas ao transporte de cargas: Amazônica, Tocantins-Araguaia, Paraná, São Francisco, Paraguai e Atlântico Sul.

Entres as vantagens da utilização das hidrovias podem ser destacadas a segurança no transporte da carga, custo mais baixo de transporte, menor consumo de combustível e conseqüentemente emissões mais baixas de gases de efeito estufa.

Os dados da pesquisa da Confederação Nacional do Transporte (2013b) apontam que o uso de combustível para o transporte de uma tonelada de carga por 1.000 km é de 4,1 litros no modal hidroviário, 5,7 litros no ferroviário e 15,4 litros no rodoviário. Em virtude deste menor consumo, o custo de transporte das hidrovias é o mais baixo. Além disso, a capacidade deste modal é a maior, quando se compara com os demais. Enquanto um comboio utilizado na navegação interior pode transportar 6.000 t, no caso das ferrovias são necessários aproximadamente três comboios para transportar a mesma quantidade de carga³³. E, no caso do modal rodoviário, são necessárias 172 carretas para corresponder à referida capacidade de carga.

Apesar das vantagens econômicas e ambientais, e do potencial que o país apresenta, este modal é subutilizado e representa aproximadamente 7% do transporte de carga no país. Dados da Agência Nacional de Transportes Aquaviários (2014) mostram que em

³³ 86 vagões de 70 t.

2013 a navegação por cabotagem em vias interiores³⁴ correspondeu a 38% do transporte de carga em hidrovias, sendo seguido pela navegação de longo curso³⁵ (33,1%) e navegação interior³⁶ (28,9%). O transporte de carga desagregado por hidrovia é apresentado na Tabela 6.

Tabela 6 – Transporte de carga em TKU por hidrovia brasileira em 2013

Tipos de Navegação	Paraguai	Sul	Madeira	Tietê Paraná	Solimões Amazonas	Tocantins Araguaia	São Francisco
Cabotagem em vias interiores	-	0,18	-	-	23,08	1,18	-
Longo curso em vias interiores	-	0,19	-	-	19,30	1,78	-
Navegação Interior	3,43	1,27	5,66	2,12	5,48	0,63	0,03
Total	3,43	1,65	5,66	2,12	47,86	3,59	0,03

Fonte: Agência Nacional de Transportes Aquaviários (2014).

O termo TKU (tonelada por quilômetro útil) representa a somatória da tonelada útil transportada pela distância percorrida na própria malha.

Os dados da Tabela 6 mostram que a hidrovia Solimões-Amazonas é o principal corredor hidroviário do país e tem uma ligação com outras duas hidrovias: Hidrovia do Madeira e a do Tocantins-Araguaia, além de ser uma via de acesso ao mar. Corresponde a 74% dos TKUs movimentados em território brasileiro, sendo que aproximadamente 50% da hidrovia é destinada à navegação de cabotagem. Quando se considera o transporte interestadual nesta hidrovia, destaca-se o transporte de semirreboque baú, soja e milho, sendo que as *commodities* citadas correspondem a 43% do TKU total movimentado.

Outro eixo relevante é o corredor hidroviário do Madeira, uma vez que parte da soja produzida pelo estado do Mato Grosso segue de Porto Velho até os portos de Itacoatiara (AM) ou Santarém (PA), de onde segue para a exportação. Em 2013, era a segunda principal hidrovia brasileira em termos de TKUs produzidos, tendo transportado 4,2 milhões de toneladas de soja e milho.

³⁴ Navegação entre os portos brasileiros, usando neste caso, as vias interiores. Pode também utilizar as vias marítimas, ou a combinação destas com as vias interiores.

³⁵ Navegação entre os portos brasileiros e os portos localizados em outros países, neste caso utilizando vias interiores.

³⁶ Navegação ao longo de canais, rios, lagoas entre portos e terminais localizados no Brasil ou entre portos brasileiros e estrangeiros, quando estiverem localizados numa mesma via fluvial.

A hidrovía Tietê-Paraná é outro corredor que se destaca no transporte de grãos produzidos no Centro-Oeste. Em 2013, foi responsável pelo transporte de 25% da soja e 33,3% do milho que foram movimentados por meio da navegação interior no Brasil. As hidrovias do Sul escoaram 1 milhão de toneladas de soja e farelo de soja enquanto a hidrovía do São Francisco transportou, em termos de cargas agrícolas, apenas caroço de algodão.

As demais hidrovias, Tocantins-Araguaia e a do Paraguai, se dedicaram ao transporte de outro tipo de mercadoria. Cabe destacar que na primeira um grande volume de carga é transportado em virtude da interligação com a hidrovía do Solimões-Amazonas. E a hidrovía do Paraguai foi utilizada como forma de escoar *commodities* minerais que partem de Mato Grosso do Sul em direção a Argentina, respondendo por 97,7% do total transportado

Apesar das vantagens já citadas do modal hidroviário, o principal motivo para a baixa relevância deste modal na matriz de transportes brasileira se deve aos gargalos apresentados enfrentados pelos usuários deste sistema de transporte. A Confederação Nacional do Transporte (2013b) mostra quais são os principais problemas do setor. Um destes problemas diz respeito às especificidades das embarcações, uma vez que é dado o mesmo tratamento para embarcações de navegação interior e para as de navegação de longo curso.

Outro problema é a dificuldade de se obter financiamento das embarcações, uma vez que o excesso de burocracia se configura como um entrave à expansão ou renovação das embarcações. Além disso, constatou-se que existe uma grande dificuldade em se obter licenças ambientais e que há também um excesso de tarifas e taxas, sendo que não existe uma padronização tarifária nos portos. Sendo assim, cada porto cobra uma tarifa específica.

3.2 Projetos de expansão

De uma forma geral, percebe-se que em cada um dos modais existem problemas estruturais que impactam na capacidade do país de realizar da forma mais eficiente o transporte de cargas. Uma vez que diversos órgãos do governo apontaram para tais limitações, começaram a ser desenvolvidos diversos projetos que buscam a melhor operacionalização da logística brasileira.

Com o lançamento do Programa de Aceleração do Crescimento (PAC I e PAC II), foram propostos vários projetos de expansão das ferrovias e hidrovias. Além do PAC, há ainda o Programa de Investimento em Logística (PIL) da Agência Nacional de Transportes Terrestres (2015a) que propõe a criação de novos trechos e novas interligações à malha já existente. Existe também o Plano CNT de Transporte e Logística, que contava com 5 versões

lançadas até o ano de 2014. Neste plano, além dos projetos contemplados no PAC e no PIL, existem ainda novas sugestões de ferrovias e hidrovias. Existem, também, planos específicos para hidrovias, como o Plano Hidroviário Estratégico (PHE) do Ministério dos Transportes (2013) e o plano para expansão de portos, como o Plano Nacional de Logística Portuária (PNLP) da Secretaria do Portos (2012).

É possível perceber que existe uma infinidade de planos, mas a questão que surge é a aplicabilidade destes planos. Pois, como a Confederação Nacional do Transporte (2015a) reconhece, falta no país uma política nacional de transportes, embora existam muitos órgãos planejadores e reguladores do transporte. Com isso, falta um direcionamento sobre quais projetos deveriam ser prioritários e a segurança – de fato – que os investimentos seriam direcionados para a realização dos mesmos.

Outro problema com relação a estes planos é que muitos deles foram desenvolvidos a partir da premissa de que haveria um grande crescimento da produção agrícola no país, ou que pelo menos se mantivesse um padrão de crescimento. É fato que a produção agrícola enfrenta momentos de crise, e nestes momentos, a produção se reduz. Diante disso, não existe qualquer garantia de que todos os projetos irão de fato sair do papel. Pois a continuidade dos mesmos pode estar associada à manutenção do crescimento da produção agrícola ou a um bom preço das *commodities* agrícolas no mercado internacional.

Apesar desta situação, serão apresentados os projetos para os quais já foram feitos estudos de viabilidade econômica e que apresentam traçado mais preciso que os projetos que são apontados como necessários, mas que ainda não têm qualquer estudo desenvolvido. É importante destacar que a existência de estudos de viabilidade não traz qualquer garantia de que o referido projeto se concretizará.

Dos projetos propostos, o da Ferrovia Norte-Sul (FNS) é o que está mais adiantado, cujos trechos são apresentados na Tabela 7. Em 2013, a FNS já operava entre os trechos entre Açailândia (PA) e Palmas (TO) e correspondia a aproximadamente 719 km. No ano de 2015, já havia sido construído o trecho que ligava Palmas (TO) a Ouro Verde (GO)³⁷ e estava em construção o trecho entre Ouro Verde de Goiás (GO) e Estrela D'Oeste (SP). O projeto compreende ligação de Barcarena (PA) e Rio Grande (RS), o que corresponderá a 4.787 km de extensão (VALEC, 2015).

³⁷ Cidade a 40 km de Anápolis (GO).

Tabela 7 – Ferrovia Norte-Sul: trechos em operação, construídos e projetados em 2015

Origem	Destino	km	Etapa da obra
Barcarena - PA	Açailândia - MA	477	EVTEA ¹ concluído
Açailândia - MA	Palmas - TO	719	Em operação
Palmas - TO	Ouro Verde de Goiás - GO	861	Construído
Ouro Verde de Goiás - GO	Estrela D'Oeste - SP	682	Em construção
Estrela D'Oeste - SP	Panorama - SP	264	EVTEA concluído
Panorama - SP	Chapecó - SC	952	Projeto Futuro
Chapecó - SC	Rio Grande	832	Projeto Futuro
Ramais			
Quirinópolis - GO	Itumbiara - GO	203	EVTEA aprovado
Goiânia - GO	Brasília – DF ²	211	EVTEA aprovado

Fonte: VALEC (2015).

1: Estudo de viabilidade técnica econômica e ambiental.

2: Em Brasília conecta-se com a Ferrovia Centro-Atlântica (FCA).

Além de ligação da região Norte com a região Sul, o projeto ainda contempla a ligação com outras ferrovias, como a Ferrovia de Integração Oeste-Leste (FIOL), a ferrovia de Integração Centro-Oeste (FICO) e a Nova Transnordestina. Cabe destacar que as ferrovias FIOL e Nova Transnordestina estavam ainda em construção no ano de 2015 e a FICO ainda não tinha saído do papel.

O projeto da Nova Transnordestina é de responsabilidade da Companhia Siderúrgica Nacional (CSN). Esta ferrovia irá ligar os Estados do Piauí, Ceará e Pernambuco aos portos de Pecém (CE) e de Suape (PE). Na cidade de Eliseu Martins (PI), seguirá um ramal da VALEC até a cidade de Porto Franco (MA), ligando-se, assim, com a FNS. Os 1.753 km de extensão da ferrovia podem ser vistos na Figura 3.



Figura 3 – Traçado da Nova Transnordestina
 Fonte: Companhia Siderúrgica Nacional (2015).

No estado da Bahia a VALEC está construindo a Ferrovia de Integração Oeste-Leste (FIOL), com uma extensão prevista de 1.527 km. Como pode ser visto na Tabela 8, a ferrovia ligará a cidade de Figueirópolis (TO) ao porto de Ilhéus (BA). Esta ligação permitirá que a carga proveniente da FNS possa ser direcionada ao Porto de Ilhéus (BA).

Tabela 8 – Projeto Ferrovia de Integração Oeste-Leste (FIOL)

Projeto	Trecho	km	Fase do Projeto
Ferrovia de	Ilhéus (BA) – Caetité (BA)	537	Em construção
Integração	Caetité (BA) – Barreiras (BA)	485	Em construção
Oeste-Leste	Barreiras (BA) – Figueirópolis (TO)	505	EVTEA concluído

Fonte: VALEC (2015).

Os demais projetos desenvolvidos pela VALEC ainda não estão em fase de construção, como a ligação da FNS com a Transnordestina. O projeto prevê a interligação de Porto Franco (MA) a Eliseu Martins (PI). O trecho terá aproximadamente 620 km de extensão. O estudo de viabilidade técnica, econômica e ambiental já foi concluído, porém ainda não existe previsão das próximas etapas do projeto.

A ferrovia do Pantanal é um projeto que interligaria a cidade de Panorama (SP) a Porto Murtinho (MS), com aproximadamente 734 km de extensão. O trecho de Panorama

(SP) a Dourados (MS) é de responsabilidade do Programa de Investimentos em Logística (PIL)³⁸.

Já o Corredor Ferroviário de Santa Catarina ligaria o município de Dionísio Cerqueira (SC) ao Porto de Itajaí (SC), ao longo de 862 km de extensão. Este corredor se conectaria com a ALLMS, o que permitiria a ligação com o Porto de Paranaguá (PR). Além disso, projeto prevê a ligação em Chapecó (SC) com a FNS. Na Tabela 9 são apresentados os trechos projetados para a Ferrovia do Pantanal e para o Corredor Ferroviário de Santa Catarina.

Tabela 9 – Projetos Ferrovia do Pantanal e corredor ferroviário de Santa Catarina

Projeto	Trecho	km	Fase do Projeto
Ferrovia do Pantanal	Panorama (SP) - Dourados (MS)	380	EVTEA concluído
	Dourados (MS) - Porto Murtinho (MS)	354	EVTEA concluído
Corredor Ferroviário de Santa Catarina	Itajaí (SC) - Santa Cecília (SC)	276	Projetos Futuros
	Santa Cecília (SC) - Herval D'Oeste (SC)	171	Projetos Futuros
	Herval D'Oeste (SC) - Chapecó (SC)	175	Projetos Futuros
	Chapecó (SC) - S. M. do Oeste (SC)	153	Projetos Futuros
	S. M. do Oeste (SC) - Dionísio Cerqueira (SC)	87	Projetos Futuros

Fonte: Elaborado a partir de VALEC (2015).

Existe ainda o projeto da ferrovia Transcontinental ou Bioceânica, que ligaria o Porto de Açú (RJ) à localidade de Boqueiral da Esperança (AC), com aproximadamente 4.400 quilômetros de extensão. Parte do trajeto engloba regiões produtoras de soja no estado do Mato Grosso, o que, como já mencionado, permitiria também a ligação com a FNS. Entre Campinorte (GO) e Vilhena (RO) recebe o nome de Ferrovia de Integração do Centro-Oeste (FICO). Segundo a Revista Ferroviária (2014), não há ainda previsão de início das obras, pois os estudos ainda estão em andamento. De acordo com a Tabela 10, é possível verificar os possíveis trechos desta ferrovia.

³⁸ Este é apenas um trecho do projeto proposto no PIL.

Tabela 10 – Projeto Ferrovia de Integração do Centro-Oeste

Trecho	Extensão (km)	Fase do Projeto
Campinorte (GO) – Água Boa (MT)	383	EVTEA Concluído
Água Boa (MT) – Ribeirão Bonito (MT)	129	EVTEA Concluído
Ribeirão Bonito (MT) – Lucas do Rio Verde (MT)	389	EVTEA Concluído
Lucas do Rio Verde (MT) – Vilhena (RO)	740	Em estudo
Vilhena (RO) – Porto Velho (RO)	770	Projeto futuro

Fonte: Adaptado a partir de VALEC (2015).

No futuro, se todas as obras que a VALEC projeta forem de fato executadas, percebe-se pela Figura 4 que as novas ferrovias ligariam o Brasil de Norte a Sul e de Leste a Oeste.



Figura 4 – Configuração futura da malha ferroviária brasileira

Fonte: VALEC (2015).

Com relação ao Programa de Investimento em Logística (PIL), em agosto de 2012 o Governo Federal lançou a sua primeira fase, que contemplava uma série de projetos de expansão e melhorias na infraestrutura logística do país. Dentre os projetos apresentados, muitos estão sob a responsabilidade da VALEC, já tendo sido mencionados anteriormente. Entre eles destacam-se novos trechos, como a ligação ferroviária entre Maracaju (MS) a Lapa (PR) e também uma ligação entre Lapa (PR) e porto de Paranaguá (PR).

A segunda etapa do PIL foi lançada pelo Governo Federal no ano de 2015 e consistia no desenvolvimento de certos projetos já apresentados na primeira fase, e de novos projetos que ainda não tinham sido contemplados. Cabe destacar o projeto de criação de uma nova ferrovia que ligaria a cidade de Lucas do Rio Verde (MT) a Itaituba (PA), o que facilitaria a ligação com o porto de Miritituba (PA), na hidrovia do Tapajós. A Tabela 11 apresenta a síntese dos projetos ferroviários propostos pelo PIL, tanto na primeira etapa, quanto na segunda etapa. Todos os projetos apresentados na Tabela 11 ainda estavam em fase de estudos no ano de 2015.

Tabela 11 – Programa de Investimento em Logística (1ª e 2ª etapas) – ferrovias

	Trecho	(km)^a
1ª Etapa do PIL	Açailândia (MA) – Barcarena (PA)	477
	Estrela D'Oeste (SP) – Dourados (MS)	660
	Lucas do Rio Verde (MT) – Campinorte (GO) ^b	1.065
	Maracaju (MS) – Lapa (PR)	978
	Rio de Janeiro (RJ) – Vila Velha (ES)	572
	Feira de Santana (BA) – Ipojuca (CE)	893
	Uruaçú (GO) – Campos dos Goytacazes (RJ)	1.706
	Mairinque (SP) – Rio Grande do Sul (RS)	1.677
	Belo Horizonte (MG) – Candeias (BA)	1.711
	Lapa (PR) – Paranaguá (PR)	150
Porto Nacional (TO) – Estrela D'Oeste (TO)	1.537	
2ª Etapa do PIL	Rio de Janeiro (RJ) – Vitória (ES)	572
	Lucas do Rio Verde (MT) – Itaituba (PA)	1.140
	Anápolis (GO) – Estrela D'Oeste (SP) – Três lagoas (MS)	895
	Açailândia (MA) – Barcarena (PA) e Palmas (TO) – Anápolis (GO)	1.430
	Lucas do Rio Verde (MT) – Rio Branco (AC) ^b	3.500

Fonte: Agência Nacional de Transportes Terrestres (2015a).

a: valores aproximados.

b: correspondem a trechos da ferrovia Bioceânica.

Por fim, há ainda o Plano CNT de Transporte e Logística – 2014, desenvolvido pela Confederação Nacional do Transporte (2014b). O plano aponta os principais projetos de

integração nacional e de mobilidade urbana. No que se refere ao transporte de cargas, parte dos projetos elencados envolvia os propostos no PAC e no PIL. Os demais projetos eram ainda sugestões que necessitavam de um detalhamento maior, que não eram fornecidos pelo referido plano. Portanto, optou-se por não reportar tais sugestões, a fim de trabalhar apenas com os projetos para os quais já haviam sido realizados os estudos de viabilidade econômica.

Segundo a Revista Ferroviária (2014), existem também os projetos de expansão de alguns trechos que já fazem parte do sistema ferroviário Brasileiro. Um destes projetos é a duplicação da EFC, cujo prazo de conclusão é estimado para ano de 2018. Outros projetos são: duplicação do trecho Campinas (SP) – Santos (SP), ligação da Mina Serra Sul em Canaã dos Carajás (PA) à EFC.

Tendo em vista a gama de planos de expansão, com relação ao modal hidroviário, o projeto a ser considerado neste trabalho será o Plano Hidroviário Estratégico (PHE), desenvolvido pelo Ministério dos Transportes (2013). Na Tabela 12 estão contempladas as hidrovias e respectivos trechos considerados pelo PHE.

Tabela 12 – Projetos propostos pelo Plano Hidroviário Estratégico (2013)

Hidrovia	Trecho	km	Situação
Amazonas	Coari (AM) – Manaus (AM)	420	Existente
Solimões	Almeirim (TO) – Foz do Rio Tocantins (PA)	600	Existente
Madeira	Itacoatiara (AM) – Porto Velho (RO)	1.060	Existente
Tapajós	Santarém (PA) – Itaituba (PA)	280	Existente
Teles-Pires	Itaituba (PA) – Cachoeira Rasteira (MT)	680	Nova
Tocantins	Foz do Rio Tocantins (PA) – Marabá (PA)	450	Nova
	Marabá (PA) – Miracema do Tocantins (TO)	780	Nova
São Francisco	Petrolina (PE) – Ibotirama (BA)	560	Existente
	Ibotirama (BA) – Pirapora (MG)	740	Nova
Paraguai	Foz do Rio APA – Corumbá (MS)/Ladário(MS)	570	Existente
	Corumbá (MS)/Ladário (MS) – Cáceres (MT)	640	Nova
Paraná-Tietê	Três Lagoas (MS) – Pereira Barreto (SP)	70	Existente
	São Simão (GO) – Pereira Barreto (SP)	270	Existente
	Pereira Barreto (SP) – Anhembi (SP)	470	Existente
Hidrovias do Sul	Porto Alegre (RS) – Triunfo (RS)	55	Existente
	Triunfo (RS) – Cachoeira do Sul (RS)	170	Existente
	Triunfo (RS) – Estrela (RS)	850	Existente

Fonte: Ministério dos Transportes (2013).

Assim sendo, do exposto até aqui, pode-se perceber que os projetos de expansão da rede ferroviária podem se dividir em duas categorias. Na primeira categoria estão os projetos que já estão sendo implementados, como a FNS, a FIOLE e a Nova Transnordestina. Existe outra categoria de projetos, para os quais já foram feitos alguns estudos, mas sem garantia de implementação. Portanto, neste trabalho serão considerados dois cenários de expansão das ferrovias: (1) aquelas ferrovias que já estão sendo construídas e que serão uma realidade no médio prazo; (2) aquelas ferrovias que ainda não se sabe quando serão construídas, ou mesmo se serão construídas.

No caso das hidrovias, os novos projetos serão incluídos apenas no segundo cenário mencionado no parágrafo anterior: aquele cujo futuro das obras é incerto. Tomou-se tal decisão em função da pouca disponibilidade de informações disponíveis quanto à execução das obras de expansão.

Conforme verificado no capítulo de revisão bibliográfica, a rede de transportes pode desempenhar um papel fundamental na busca por menores níveis de emissões de CO₂, uma vez que modais menos poluentes podem ser alternativas para se obter um meio-ambiente menos poluído. Porém, como visto até esta seção, no Brasil foi dada prioridade para as rodovias, um modal mais poluidor que as ferrovias e hidrovias.

Em função da ligação entre a rede de transportes e as emissões de CO₂, será apresentado na próxima seção o panorama das emissões de gases de efeito estufa no Brasil. Assim, será possível verificar como as emissões estão distribuídas entre as atividades econômicas no Brasil.

3.3 Emissões de Gases de Efeito Estufa no Brasil

No Protocolo de Quioto ficou determinado que os países desenvolvidos deveriam reduzir as suas emissões de gases de efeito estufa em 5,2% em relação às emissões observadas em 1990. Países como o Brasil não estavam sujeitos a metas obrigatórias de redução das emissões. No entanto, as economias em desenvolvimento poderiam assumir compromissos voluntários de mitigação das emissões geradas.

De acordo com o Plano Setorial de Transporte³⁹ desenvolvido em conjunto pelos Ministérios dos Transportes e das Cidades (2013), o Brasil assumiu um compromisso voluntário de redução das emissões em aproximadamente 38% em relação ao projetado para 2020. Estima-se que em 2020 as emissões seriam de 3,2 bilhões de toneladas medidas em

³⁹ Plano Setorial de Transporte e de Mobilidade Urbana para Mitigação e Adaptação à Mudança do Clima.

carbono equivalente. Se houver a redução proposta, as emissões em 2020 seriam reduzidas em pelo menos 1,168 bi t/CO₂e.

Para atingir esta meta, segundo a organização *Climate Action Tracker* – CAT (2015), uma das medidas é atingir, em 2030, uma participação de 45% de energias renováveis no total de energia produzido no país. No entanto, a organização salienta que a política apresentada pelo Brasil pode levar a um aumento das emissões em 2025, tendo como base o ano de 2005. Neste caso, a CAT (2015) sugere que embora o país esteja próximo de atingir a meta de 45% de energias renováveis, este fato pode ter um pequeno impacto sobre as emissões totais do país, o que torna o plano brasileiro menos ambicioso para de fato evitar a elevação da temperatura da terra.

Segundo o Observatório do Clima (2015a) entre 1990 e 2013 houve uma queda de 15% nas emissões CO₂e, em virtude principalmente da queda no desmatamento. Apesar desta queda, entre 2012 e 2013, houve um crescimento de 8% nestas emissões, alcançando o valor de 1,59 Gt CO₂e. No entanto, as emissões brasileiras correspondem a uma parcela pequena das emissões mundiais. Em 2013, as emissões globais foram de 52 Gt CO₂e. Esta diferença, pode ser explicada pela matriz energética brasileira. Dados do Balanço Energético Anual 2013 elaborado pela Empresa de Pesquisa Energética (2013) mostram que a participação de fontes renováveis na matriz energética brasileira é uma das mais altas do mundo (aproximadamente 42,4%). Comparando-se com média mundial de 13,2%, as causas deste diferencial se devem ao uso do etanol enquanto fonte alternativa ao petróleo, além da geração de eletricidade por meio da energia hidráulica.

Sendo assim, tradicionalmente no país, o principal agente emissor de GEE vem da agricultura, mudanças de uso da terra, atividades florestais, principalmente por meio da expansão das fronteiras agrícolas na região amazônica. Porém, na Figura 5 é possível notar uma reversão desta tendência.

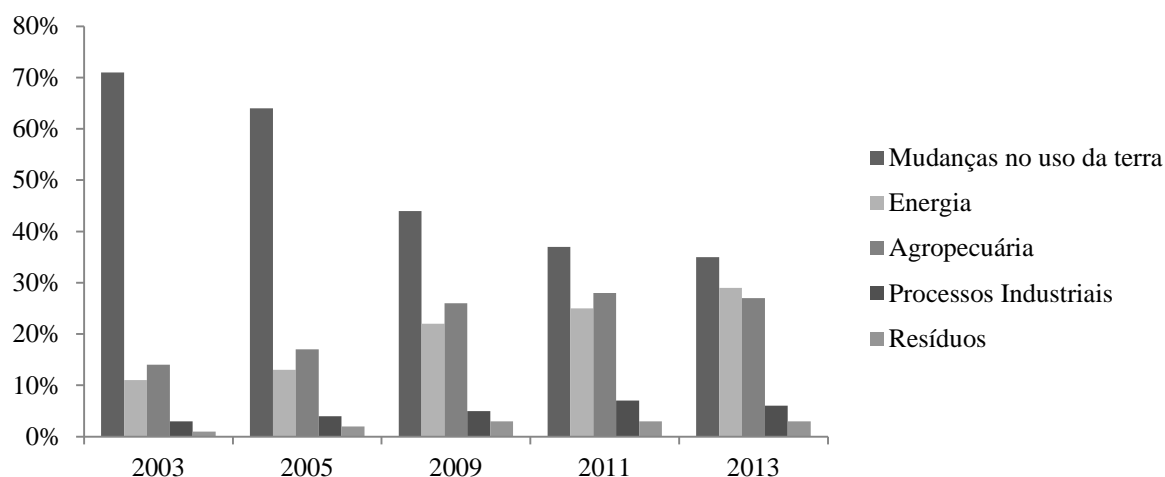


Figura 5 – Participação dos setores nas emissões de CO₂e

Fonte: Instituto de Energia e Meio Ambiente (2015).

Conforme já mencionado, o principal responsável pelas emissões de GEE é o setor de Mudança de Uso da Terra, que com a redução mais intensiva das queimadas, a partir de 2009, passou a apresentar uma tendência de queda. Dados do Sistema de Estimativa dos Gases de Efeito Estufa (2015) mostram que a diferença absoluta entre o setor de Mudança de Uso da Terra e o setor de Energia era aproximadamente 80% em 2005, caindo para pouco mais de 17% em 2013. No setor de Energia, houve um crescimento de aproximadamente 44% das emissões absolutas entre 2005 e 2013. Cabe destacar que no setor de Energia estão incluídas as emissões provenientes da queima de combustíveis fósseis.

Com relação às emissões de CO₂ provenientes da queima de combustíveis fósseis, o setor de transporte é o principal emissor, respondendo por 45% do total emitido. É seguido pelo setor industrial, responsável por 31% das emissões de CO₂ no ano de 2011 (IEA, 2013). Na Tabela 13 é apresentada a evolução das emissões de CO₂ do setor de transportes.

Tabela 13 – Evolução das emissões de CO₂ provenientes da queima de combustíveis, por modal de transporte no Brasil (mil t)

Modal de transporte	2006	2007	2008	2009	2010	2011	2012
Aéreo	7.217	7.924	8.468	8.518	9.605	10.736	11.321
Ferroviário	1.701	1.766	1.879	1.879	2.727	2.932	3.006
Hidroviário	3.440	4.236	4.600	4.306	4.362	4.195	5.025
Rodoviário	126.492	130.442	135.636	133.297	149.195	168.543	179.333
Total	142.924	148.725	155.223	152.591	170.925	191.813	204.331

Fonte: Elaborado a partir do Sistema de Estimativa de Emissão de Gases de Efeito Estufa (2015).

De acordo com a Tabela 13, o modal rodoviário é o mais poluente, respondendo por aproximadamente 88% das emissões em 2012. É seguido pelo modal aéreo, que apresenta uma participação muito menor no total emitido (aproximadamente 5,5%). Já o modal ferroviário foi o menos poluidor, respondendo por apenas 1,47% das emissões totais.

Embora o Brasil seja um grande produtor e consumidor de etanol, as emissões do modal rodoviário apresentaram um crescimento de 42% nas emissões de CO₂. Parte deste aumento pode estar associado à política de redução do IPI dos automóveis, que associado à expansão de crédito verificada no período, propiciaram um aumento na compra de automóveis. Segundo dados da Associação Nacional de Fabricantes de Veículos Automotores - ANFAVEA (2013), entre 2003 a 2012, o crescimento na produção de veículos foi de aproximadamente 85%. Diante deste crescimento, a frota nacional, que era de aproximadamente 21 milhões de veículos em 2003, passou para pouco mais de 34 milhões de veículos em 2011.

De acordo com o Instituto de Energia e Meio Ambiente (2015), o setor de transportes apresentou uma taxa de crescimento do consumo de energia em 5,6% a.a., entre 2003 e 2013. Apenas entre 2012 e 2013, o aumento o consumo de energia foi 5,1% maior. A Tabela 14 apresenta a evolução do consumo de combustíveis no Brasil em cada uma das modalidades de transporte.

Tabela 14 – Consumo de óleo diesel no Brasil (milhões de m³)

Modal	2009	2010	2011	2012	2013
Rodoviário	31,6	34,46	36,38	38,60	40,60
Ferrovário	0,96	1,08	1,18	1,4	1,20
Hidroviário	0,12	0,13	0,14	0,16	0,18
Total	32,76	35,68	37,71	39,97	41,99

Fonte: Confederação Nacional do Transporte (2015b).

No entanto, segundo a IEA (2013), o setor de transportes brasileiro, quando comparado com a média mundial, apresenta intensidade de carbono baixa (em média, 20% menor que a média mundial).

Boa parte das emissões do setor de transporte se deve ao fato de que os combustíveis derivados do petróleo são mais poluentes. A Tabela 15 mostra as emissões gerais de gases de efeito estufa medidas em CO₂e, de acordo com as fontes de energia, modal utilizado e função do transporte.

Tabela 15 – Emissões de CO₂e no setor de transporte brasileiro em 2013 (Total: 212,2 MtCO₂e)

Energia Primária	Energia Secundária	Modal	Função
Petróleo (95,3%)	Óleo Combustível (1,5%)	Hidroviário (2,0%)	Carga (45,7%)
Gás Natural (1,9%)	Óleo Diesel (55,6%)	Ferroviário (1,6%)	Passageiro (54,3%)
Gasolina C e óleo Diesel (2,5%)	Gasolina Automotiva (33%)	Rodoviário (91,2%)	
	Querosene Aviação (5,1%)	Aéreo (5,1%)	

Fonte: Elaborado a partir do Sistema de Estimativa de Emissão de Gases de Efeito Estufa (2015).

De acordo com a Tabela 15, pode-se verificar que o petróleo representa a fonte primária mais poluente. Em virtude do grande potencial poluidor do petróleo, o setor rodoviário foi responsável por 91,2% das emissões de CO₂e. Quanto à finalidade do transporte, percebe-se que as emissões entre transporte de carga e transporte de passageiros se apresentam equilibradas. No entanto, para o transporte de cargas existem mais alternativas de meios de transporte menos poluentes. Porém, no que diz respeito ao transporte de passageiros, as opções são mais restritas. Por exemplo, considerando o transporte entre cidades, a opção mais recorrente é o uso de ônibus ou automóveis, no modal rodoviário.

Dados do Plano Setorial de Transporte e Mobilidade Urbana para Mitigação e Adaptação à Mudança do Clima (PSTM), elaborado pelo Ministério dos Transportes e Ministério das Cidades (2013), mostram que os caminhões são responsáveis por 66% do consumo de combustíveis derivados do petróleo, com os ônibus sendo responsáveis por 28% do consumo. Quando se considera apenas o transporte de cargas, o PSTM aponta para um aumento contínuo das emissões de CO₂ provenientes da queima de combustíveis fósseis, tendo atingido 63 Mt em 2010⁴⁰ (MINISTÉRIO DOS TRANSPORTES e MINISTÉRIO DAS CIDADES, 2013). Desagregando os dados pelo tipo de caminhão utilizado, obtêm-se as seguintes participações mostradas na Figura 6.

⁴⁰ É importante ressaltar que essa informação se refere às emissões do transporte rodoviário de cargas, enquanto as informações da Tabela 15 se referem às emissões do setor rodoviário, onde inclui-se, além do transporte de cargas, o transporte de passageiros e pessoas.

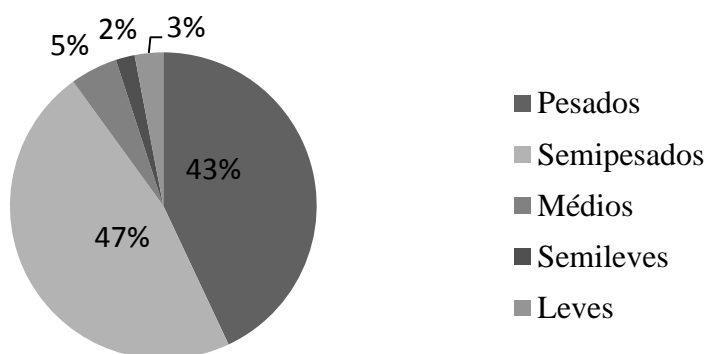


Figura 6 – Emissões de CO₂ provenientes da queima de combustíveis fósseis no transporte rodoviário de cargas

Fonte: Ministério dos Transportes e Ministério das Cidades (2013).

Caminhões semileves (PBT > 3,5 t < 6 t), caminhões leves (PBT ≥ 6t < 10 t), caminhões médios (PBT ≥ 10 t < 15 t), caminhões semipesados (PBT ≥ 15 t; PBTC < 40 t), caminhões pesados (PBT ≥ 15 t; PBTC ≥ 40 t)

PBT: peso bruto total, PBTC: peso bruto total combinado.

Pode-se notar pela Figura 6 que os caminhões das categorias pesados e semipesados são responsáveis por aproximadamente 90% do total emitido. Isto ocorre em virtude do consumo maior de combustíveis, uma vez que estas duas categorias consumiram 60% do total de combustível consumido em 2010.

Com relação às emissões do setor ferroviário, percebe-se pela Tabela 16 que as emissões de dióxido de carbono, entre 2006 e 2013, apresentaram uma tendência de elevação, em virtude do aumento do uso das ferrovias como forma de escoamento. Durante este período, houve um crescimento de pouco mais de 11% na carga transportada por este modal: enquanto em 2006 foram transportadas 404,2 milhões toneladas úteis, em 2013 foram transportadas 452 milhões toneladas úteis (ASSOCIAÇÃO NACIONAL DOS TRANSPORTADORES FERROVIÁRIOS, 2014).

Tabela 16 – Emissões totais do transporte ferroviário de cargas entre 2006 e 2013

	2006	2007	2008	2009	2010	2011	2012	2013
CO ₂ (mil t)	1.716	1.763	1.851	1.830	2.654	2.808	2.877	3.015
CO (t)	5.868	6.087	6.472	6.467	9.387	10.083	10.335	10.797
CH ₄ (t)	96	100	106	106	154	165	170	177
NO _x (t)	28.739	29.810	31.695	31.668	45.971	49.377	50.615	52.877
N ₂ O (t)	663	688	732	731	1.061	1.140	1.168	1.221
NMVOG (t)	2.551	2.647	2.814	2.812	4.081	4.384	4.494	4.694

Fonte: Elaborado a partir do Sistema de Estimativa de Gases de Efeito Estufa (2015).

NMVOG é a sigla para o termo inglês *Non-methane volatile organic compounds*.

Os dados da Figura 7 apontam que a concessionária MRS foi maior emissora de CO₂ no ano de 2010. As emissões desta concessionária totalizaram, aproximadamente, 746 mil toneladas, representado 24% do total emitido pelo modal ferroviário. Nota-se na Figura 7 que a concessionária EFVM, que pertence à VALE, foi a segunda maior emissora, sendo responsável por 19% das emissões de CO₂. Já a ALLMS, que respondeu por 13% das emissões, dedica-se ao transporte de: soja e farelo, açúcar, derivados de petróleo e álcool, milho e cimento.

De uma forma geral, como já mencionado, pelo fato de o modal ferroviário escoar principalmente minério de ferro, as concessionárias que se dedicam ao transporte deste tipo de bem são as maiores emissoras – MRS, EFVM e EFC. Apesar disto, no agregado, estas emissões representam muito pouco do total de CO₂ emitido no Brasil.

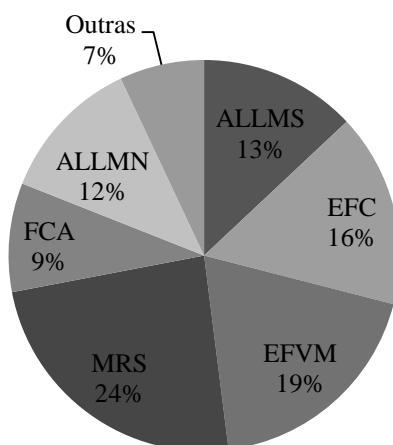


Figura 7 – Emissões de CO₂ das principais concessionárias ferroviárias

Fonte: Agência Nacional de Transportes Terrestres (2012).

Já com relação às emissões geradas pelo modal hidroviário, os valores estimados apontam para uma quantidade de 1,9 Mt CO₂ em 2010. Dos dois tipos de navegação – interior e cabotagem – a navegação interior foi responsável por 58% das emissões. Os 42% emitidos pela cabotagem podem ser desagregados em: cabotagem (diversas cargas), 31,5% e cabotagem (petróleo e gás), 10,5%.

Pelas informações apresentadas, pode-se constatar que existe uma diferença na intensidade das emissões de acordo com o modal de transporte utilizado. O Instituto de Energia e Meio Ambiente (2015) mostra que, em virtude do consumo maior de energia pelo modal rodoviário, a emissão específica deste modal é mais elevada, como mostra a Figura 8.

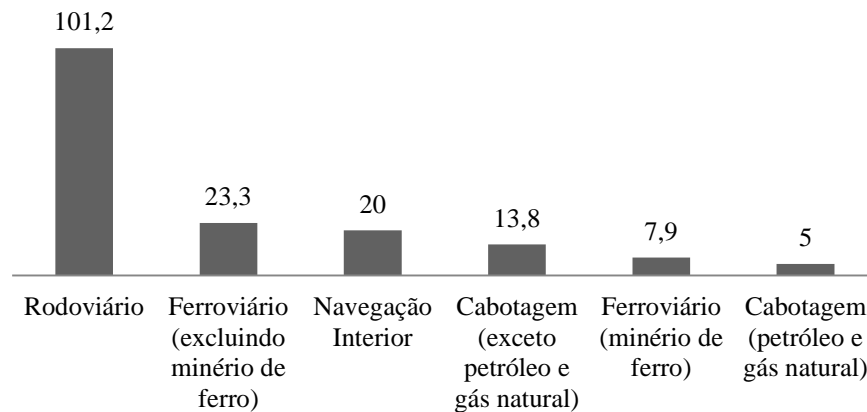


Figura 8 – Emissão específica por modal de transporte (gCO₂/TKU)

Fonte: Instituto de Energia e Meio Ambiente (2015)

Em virtude da diferença das emissões específicas de cada modal, a intermodalidade de fato pode ser uma alternativa para a redução das emissões, já que o consumo de energia e conseqüentemente, as emissões das ferrovias e hidrovias, tende a ser menor que o verificado nas rodovias.

A respeito da contribuição da intermodalidade na redução das emissões de CO₂, dois pontos importantes podem ser levantados. O primeiro é como incentivar o uso de modais menos poluentes. O segundo se refere à capacidade destes modais menos poluentes. Uma vez que, se não houver capacidade de embarque suficiente nestes modais, uma política de incentivos ao uso de ferrovias e hidrovias pode não surtir o efeito desejado. Desta forma, políticas de mitigação das emissões podem funcionar como o incentivo necessário para que o transportador opte pelos modais menos poluentes, desde que exista capacidade suficiente nestes modais.

Para verificar esta situação, segundo os objetivos desta pesquisa, é necessário utilizar um modelo matemático capaz de fornecer as respostas de como o uso do transporte intermodal pode responder às medidas de mitigação que serão apresentadas no próximo capítulo. Além destas medidas, será apresentado no próximo capítulo o modelo matemático a ser utilizado neste trabalho.

4 MATERIAL E MÉTODO

Este capítulo está dividido em 4 seções. A primeira seção aborda o problema da poluição sobre o bem-estar da sociedade. Já na segunda seção são apresentados os instrumentos de política ambiental que têm como objetivo controlar a poluição, tendo em vista a teoria econômica. Na terceira seção será apresentado o modelo genérico de Fluxo de Custo Mínimo e como este modelo pode ser adaptado com a inclusão de equações e variáveis referentes à emissão de CO₂. A quarta seção apresenta o modelo desenvolvido para a análise do transporte de soja, com todas as restrições assim como a definição da estratégia da pesquisa.

4.1 Economia da Poluição

Cánepa (2010) mostra que foi Arthur Cecil Pigou quem pela primeira vez incorporou na teoria econômica o problema da poluição. Ao considerar que os prejuízos causados pela poluição representavam um custo social, desenvolveu-se o conceito de externalidade negativa. A externalidade negativa resultaria do fato de que a ação de um indivíduo acarretaria um custo que um outro indivíduo deveria pagar.

A teoria Pigouviana prevê, segundo Faucheux e Noël (1995), que os custos não compensados podem ser avaliados em termos monetários. Então, se tais custos fossem incluídos no custo social, este custo se tornaria mais elevado que o custo privado do emissor de poluentes.

Sendo assim, se em uma atividade poluidora num mercado de competição perfeita não recaem regulações ambientais, o preço e quantidade de equilíbrio estão ilustrados na Figura 9 como sendo P e Q , respectivamente. Porém, se a externalidade causada pela poluição for internalizada, os valores P e Q não refletem mais o custo total da atividade, pois o custo privado é acrescido do custo de se internalizar a externalidade, fazendo com que o custo marginal social se torne mais elevado que o custo marginal privado.

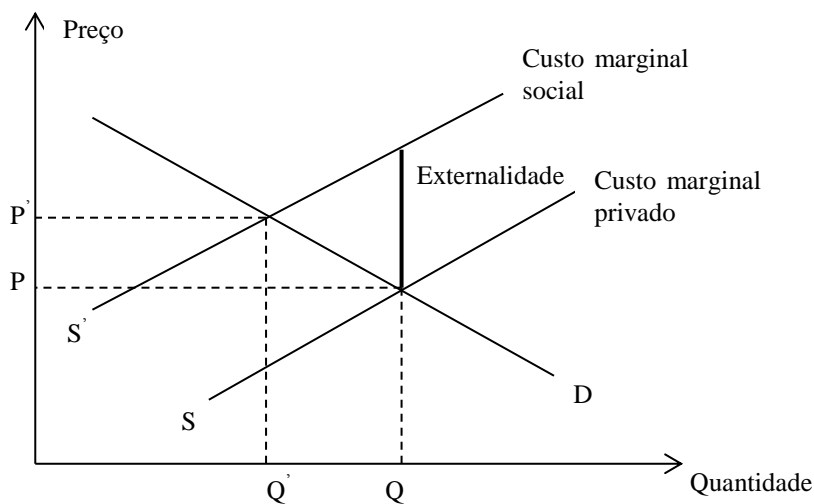


Figura 9 – Custo marginal privado da poluição x custo marginal social da poluição
 Fonte: Faucheux e Noël (1995).

É possível perceber que com a inclusão da externalidade negativa da poluição, o custo para a empresa se torna mais elevado e com isso, o preço também se torna maior ($P' > P$), e quantidade diminui ($Q' < Q$). Sendo assim, esta não é uma situação de ótimo de Pareto, uma vez que tanto o preço como a quantidade não equivalem aos valores de uma situação de equilíbrio.

Um meio de se voltar ao equilíbrio pode ser por meio da internalização fiscal proposta por Pigou. Sendo assim, é imposta uma taxa ao emissor da poluição, sendo que seu valor deve ser a diferença entre o custo social e o custo privado. Tem-se então uma situação em que a externalidade é internalizada.

No entanto, a solução pigouviana tem sido criticada pelo fato de que atribuir a responsabilidade para uma externalidade não é algo tão simples. Além do que, o custo da imposição de uma taxa pode ser maior que os benefícios de tal imposição.

Diante desta possibilidade, o Teorema de Coase (1960) surge como uma alternativa a internalização da externalidade. Neste caso ocorreria uma negociação bilateral entre as partes: emissor e vítima. Esta negociação seria capaz de apresentar bons resultados desde que o ganho social seja maior que o custo de transação.

É válido ressaltar que para o sucesso de tal negociação os direitos de propriedade devem estar bem definidos. Se o agente que possui os direitos de propriedade é o emissor de poluição, então este deve receber uma indenização por deixar de poluir. Isso, supondo que ocorra a determinação de se reduzir as emissões. Mas, se o agente poluidor não tem os direitos de propriedade, este deve indenizar aos demais agentes.

Fica claro que o problema está em definir que tem tais direitos. Quem tem o direito sobre o ar? Ou sobre um rio que é de uso comum? Essa resposta é tão difícil quanto escolher entre a imposição de uma taxa e a negociação entre as partes.

4.1.1 Poluição ótima

As análises vistas anteriormente geram no equilíbrio uma situação de ótimo de Pareto, o qual é decorrente de um nível ótimo de poluição. Tal nível se localiza entre o máximo emitido de poluição e o mínimo emitido. Se o nível ótimo é o máximo que se emite, então não há internalização da externalidade. Numa situação em que o nível de poluição emitido é zero, isto implicaria produção zero. Fica claro que, sob o ponto de vista econômico, esta não é uma situação desejável.

O exemplo de Faucheux e Noël (1995) mostra duas empresas, A e B, em que a empresa A emite poluição, recaindo os efeitos da sua atividade poluidora sobre a empresa B. O lucro marginal da empresa A é representado pela reta *PM* da Figura 10. Por se tratar de um mercado competitivo, a receita marginal da empresa é igual ao preço de mercado. A produção é feita com rendimentos decrescentes e a custos de produção crescentes. Numa situação de lucro máximo, a produção é determinada pela área *OPM*.

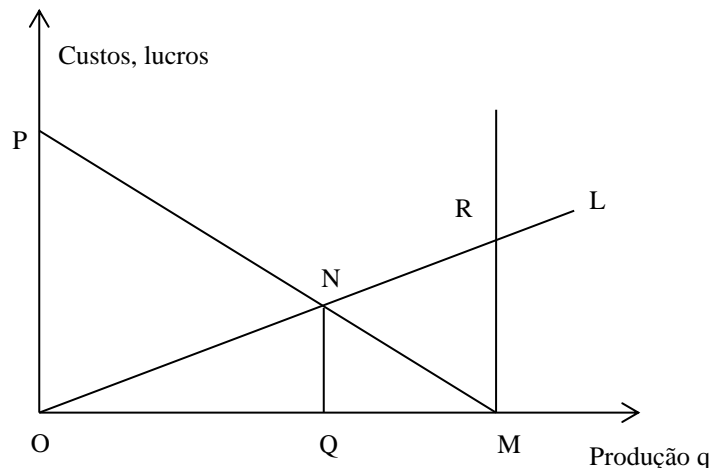


Figura 10 – Ganhos e perdas das empresas quando se considera a poluição
Fonte: Faucheux e Noël (1995).

Já para a empresa B, a reta *OL* representa a perda marginal que é submetida pela atividade poluidora de A. Se os custos de tal perda são proporcionais ao aumento da produção de A, quando a produção atinge *OM* a perda total de B é representada pela área *ORM*.

O ganho social líquido da produção do bem q é dado pela diferença entre as áreas OPM e ORM . Tal diferença, por sua vez, corresponde à diferença entre as áreas OPN e NRM . O ganho social máximo ocorre quando o lucro marginal de A é igual à perda marginal de B. Neste caso, tem-se a quantidade ótima Q , onde o ganho social é máximo (a diferença entre as áreas OPM e ORM é máxima). Como em Q a área NRM é igual zero, o ganho social líquido máximo é dado pela área OPN . A perda sofrida por B, quando se produzem Q unidades do bem, é representada pela área ONQ , que representa o nível ótimo da externalidade.

Nesse caso, não é necessário internalizar a externalidade, pois Q representa um nível ótimo. Entretanto, os níveis de externalidade representados pela área $QNRM$ são relevantes, uma vez que quando não existem tais externalidades, ocorre um aumento de bem-estar social ao se alcançar o nível ótimo Q .

Por outro lado, numa situação de ótimo, o nível de ganho privado é maior que o nível de ganho social, representado pelas áreas $OPNQ$ e OPN , respectivamente. A diferença entre estas duas áreas representa o nível de externalidade. Se houver a internalização da externalidade, obtém-se a igualdade dos ganhos social e privado.

Com respeito à quantidade de poluição, um ponto a ser destacado é a capacidade de o meio ambiente absorver a poluição. De forma ilustrativa, pode se supor que o nível de capacidade seja dado por A e que Q_A e W_A sejam, respectivamente, a produção e a quantidade de poluição associada à capacidade A, conforme mostrado na Figura 11.

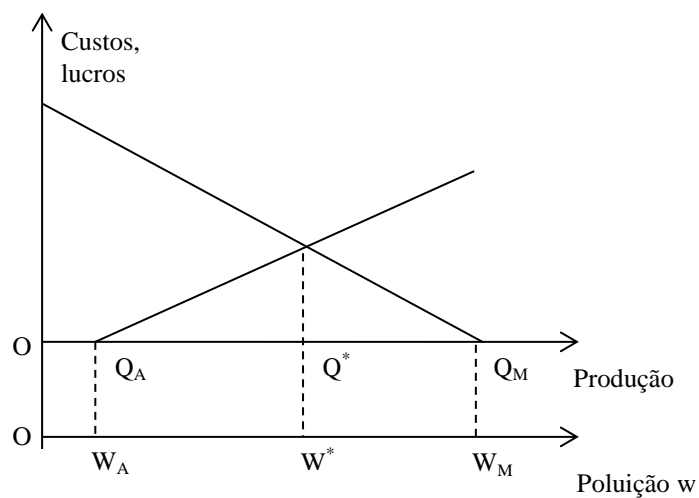


Figura 11 – Gráfico de Turvey com capacidade de absorção da poluição
Fonte: Faucheux e Noël (1995).

Enquanto o nível de poluição W emitido for inferior à capacidade de absorção W_A , embora ocorra a degradação ambiental, não ocorrerá a acumulação líquida de poluentes no meio ambiente. Porém, assim que a quantidade de poluição ultrapassa o limite W_A , ocorre uma acumulação líquida de poluentes no meio ambiente.

É importante ressaltar que, para níveis de poluição abaixo da capacidade de absorção ($W < W_A$), a produção não é nula, embora não seja a quantidade ótima. No equilíbrio, a quantidade ótima produzida corresponde a Q^* enquanto a poluição ótima é W^* . Percebe-se que o nível ótimo de poluição é superior à capacidade de absorção do meio ambiente, o que implica que o ótimo econômico é diferente do ótimo ecológico (FAUCHEUX; NOËL, 1995).

4.2 Instrumentos de políticas ambientais

Como foi mostrado nas seções anteriores, uma forma de se reverter os efeitos da poluição é por meio da internalização da externalidade. Tal internalização ocorre quando se adota algum tipo de política ambiental. Quando o instrumento utilizado é um instrumento não econômico, tem-se uma política chamada de Política de Comando e Controle, cujo instrumento mais conhecido é a imposição de um limite sobre as emissões. Mas, se o instrumento utilizado for um instrumento econômico, tem-se a imposição de uma taxa ou a criação de um mercado de direitos de poluir.

4.2.1 Política de comando e controle

Instrumentos não econômicos são de ordem jurídica ou administrativa, como regulação, obrigação, proibição e normas. Este tipo de política também é conhecido como sendo de comando e controle. Tais políticas são implementadas para a manutenção de um nível de qualidade no meio ambiente, por meio de limites à emissão de poluentes ou para a escolha de um processo produtivo menos poluente.

De acordo com Lustosa, Cánepa e Young (2010), embora este tipo de política seja eficaz no controle dos impactos negativos que a poluição causa ao meio ambiente, ele é injusto ao tratar os poluidores da mesma maneira sem levar em consideração o tamanho da empresa e a quantidade de poluentes que lança no meio ambiente.

O controle direto assume normalmente a forma de normas. Um exemplo de uma norma é a imposição de um limite sobre as emissões de CO_2 . Considerando a Figura 12, supondo que o nível ótimo das emissões seja N^* , se existe incerteza quantos aos prejuízos, o limite pode tanto ser fixado em N_2 quanto em N_1 .

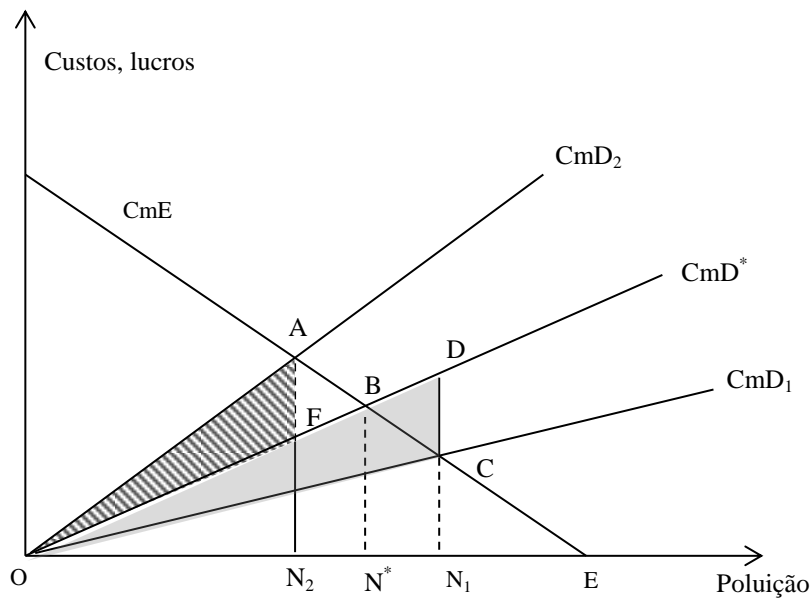


Figura 12 – Estabelecimento de um limite sobre as emissões de poluentes
 Fonte: Faucheux e Noël (1995).

Supondo que o custo marginal do prejuízo efetivo da poluição seja representado pela curva CmD , para cada nível de poluição N existe um custo marginal da poluição. Então, se o limite for fixado em N_1 , isto implica que a quantidade de poluição permitida é superior ao nível ótimo N^* . Como consequência, o custo marginal da poluição associado ao nível N_1 é menor que o observado na condição de equilíbrio. Isto implica subestimar o prejuízo causado pela poluição. A diferença entre o custo ótimo da poluição dado pela curva CmD^* e o custo atribuído à poluição⁴¹ dado por CmD_1 , é igual à área ODC .

Se o limite máximo permitido for N_2 , pode-se perceber que este limite é inferior a quantidade ótima N^* . Neste caso, o custo atribuído à poluição é maior que o custo ótimo. Graficamente, é possível perceber que a curva CmD_2 , associada ao nível de poluição N_2 , está localizada acima da curva CmD^* , que está associada ao nível ótimo de poluição. Nesta situação, pode-se afirmar que o custo da poluição foi superestimado. A sobreavaliação do custo, neste caso, é representada pela área OAF .

Logo, como ressalta Faucheux e Noël (1995) uma norma, não tem grandes possibilidades de corresponder a uma situação de ótimo econômico da poluição, devido à incerteza acerca do nível das funções de prejuízo causado pela poluição. Isto porque é difícil se chegar a um consenso a respeito de qual deve ser o nível ótimo de poluição.

Pode existir uma tendência a se priorizar um nível mais baixo de custo, ao se fixar o limite das emissões. Na prática, ao se fixar um limite para a poluição, as firmas

⁴¹E um custo atribuído que está associado ao nível de poluição escolhido N_1 .

necessitam se ajustar ao novo limite estabelecido, o que pode implicar uma elevação dos custos ao se buscar meios alternativos de produção que sejam menos poluentes.

4.2.2 Adoção de uma taxa

Como já foi mostrado, a taxação é uma forma de internalizar a externalidade, de forma a fazer com que o agente poluidor pague uma taxa equivalente ao poluído. Supondo que a reta PQM da Figura 13 seja a curva de lucro marginal do agente poluidor e que a reta OL seja a curva de custo marginal dos prejuízos da poluição. Quando a externalidade causada pela poluição é negligenciada, o nível de produção socialmente ótimo se localiza em Q^* .

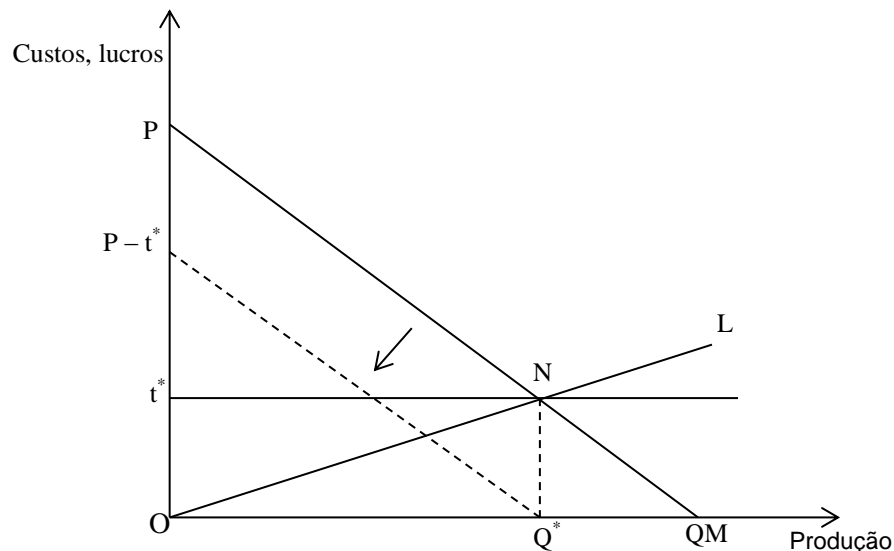


Figura 13 – Internalização através de uma tarifa

Fonte: Faucheux e Noël (1995).

Porém, numa situação em que é aplicada uma taxa t^* sobre a firma poluidora, igual ao custo marginal da poluição no ponto de equilíbrio (N), o lucro marginal do poluidor se reduz. Este novo valor é representado pela reta $(P - t^*)Q^*$. A redução do lucro é proporcional à taxa t^* aplicada (FAUCHEUX; NOËL, 1995).

4.2.3 Mercado dos direitos de poluir

Faucheux e Noël (1995, p. 240) mostram que o mercado dos direitos de poluir consiste num “conjunto de direitos de propriedade exclusivos e transferíveis, logo trocáveis num mercado, sobre os bens até então livres (água, ar etc.)”.

O funcionamento deste mercado é regulado pelo Estado ou organismo de tutela que determina qual é o nível desejável de poluição e põe a venda no mercado de títulos os direitos de poluição, aqui chamados de créditos de carbono. Então, a poluição é limitada pela posse destes títulos. Se a empresa polui mais que a quantidade permitida pelos títulos que possui, então ela deve providenciar a aquisição de novos títulos ou reduzir a poluição excedente.

A demanda por títulos se justifica até o ponto que o preço do título seja igual ao custo marginal da despoluição, pois se o preço do título é mais elevado que o custo marginal de despoluição comprar os títulos torna-se mais caro que despoluir. Se todos os agentes pensam desta forma, o preço dos títulos vai ser fixado em um nível que iguala os custos marginais da despoluição.

Este modelo de mercado é capaz de internalizar a externalidade uma vez que a poluição passa a ter um preço, que é convertido em custo para os agentes. Este custo, porém, é mínimo para os agentes, uma vez que o preço do título é igual ao custo marginal de despoluição. De acordo com a Figura 14 é possível perceber o preço do título é o mesmo para todas as empresas, já que o preço do mesmo é determinado no mercado de títulos.

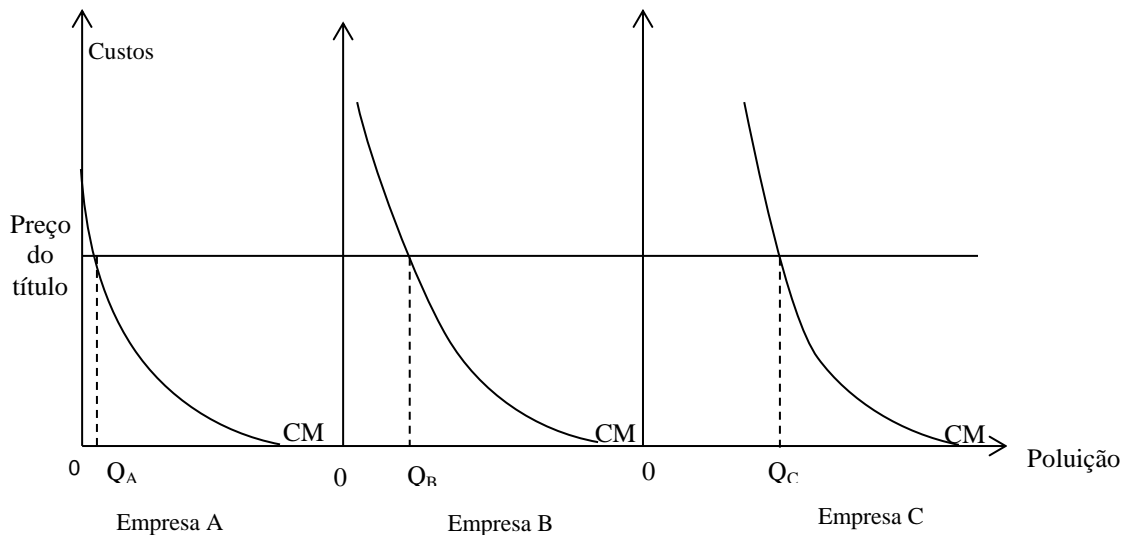


Figura 14 – Internalização através de um mercado de direitos de poluir - várias empresas
Fonte: Adaptado de Faucheux e Noël (1995).

A Figura 14 mostra que, embora o preço de um título seja o mesmo para as três empresas, conforme já mencionado, o custo marginal de despoluição, representado pela curva *CM*, difere entre as mesmas. Tal fato ocorre porque cada empresa emite uma quantidade diferente de poluição; portanto, necessita de diferentes quantidades de títulos para

compensar suas emissões. Sendo assim, a empresa A, por poluir menos, precisa comprar Q_A unidades destes títulos. Visualmente é possível perceber que a distância entre a origem (0) e Q_A é menor que as distâncias entre a origem (0) e Q_B , ou entre a origem (0) e Q_C . Assim, é possível perceber que $Q_A < Q_B < Q_C$. Desta forma, como a empresa A necessita comprar uma quantidade menor de títulos de despoluição, tem um custo marginal de despoluição menor, o que equivale afirmar que a quantidade de poluição emitida é menor.

Em virtude de diferentes quantidades emitidas de poluição, a redução da poluição também será diferenciada entre as empresas. Como a empresa A precisa comprar uma menor quantidade de títulos, o custo da despoluição é menor. Assim, esta empresa teria uma capacidade de maior redução das emissões, em virtude do custo menor de despoluir. Analisando a empresa C, como a quantidade de títulos que necessita é mais elevada, esta empresa irá comprar apenas aqueles títulos necessários à obtenção da meta estabelecida. Já a empresa A pode conseguir uma redução superior ao limite determinado, já que necessita de uma quantidade menor de títulos.

Analisando as empresas de uma forma global, o custo marginal de despoluição de todas as empresas é representado pela curva $CmDep$ na Figura 15. Esta seria a curva global do custo marginal de despoluição de todas as empresas poluidoras. A reta AQ_1 é a quantidade aceitável de poluição fixada pela agência reguladora ou pelo Estado. Já o preço do título será igual ao custo marginal de despoluição OQ_1 .

Se o nível de poluição aceitável fosse mais restritivo, como o nível Q_2 , o custo para despoluir seria mais elevado, em C_2 . Neste caso, haveria um aumento da demanda por estes títulos, em função do novo limite estabelecido. Em função disto, o preço do título se elevaria para C_2 . Desta forma, para as empresas, uma meta de redução mais rigorosa implica uma elevação do custo de despoluição das empresas.

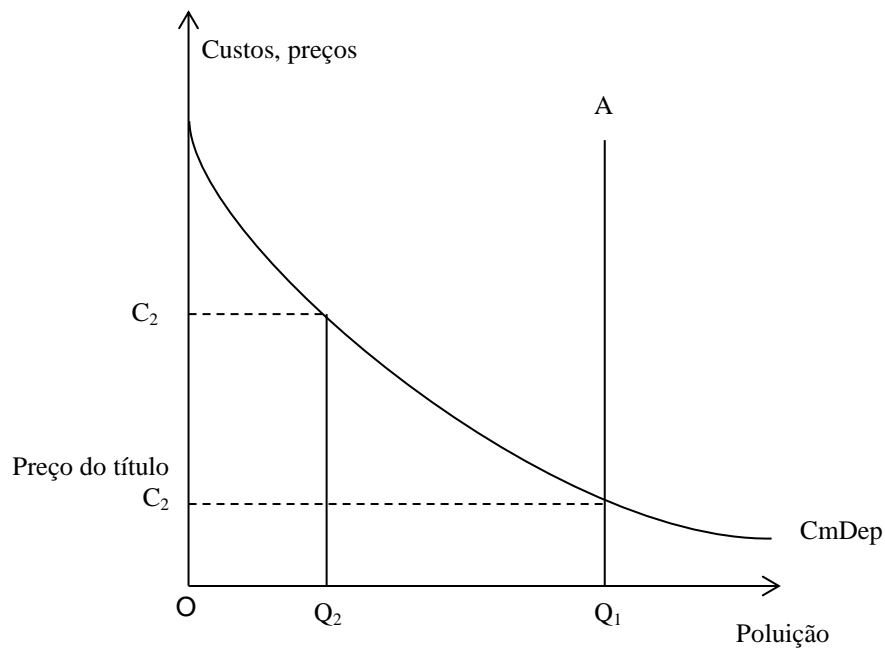


Figura 15 – Internalização por meio do mercado de direitos de poluir
 Fonte: Faucheux e Noël (1995).

Outro tipo de análise pode ser feita a partir da Figura 15. Se for considerada que a quantidade de poluição estabelecida (AQI) é a oferta de poluição e que o custo marginal da despoluição ($CmDep$) é a demanda por poluição, o preço da poluição é determinado pelo encontro das curvas de demanda e de oferta. Com a poluição sendo precificada, não há mais externalidades (FAUCHEUX; NOËL, 1995) e a quantidade ótima de poluição OQI representa o ponto de equilíbrio do sistema.

4.3 Modelo de Fluxo de Custo Mínimo Ambiental

O modelo de Fluxo de Custo Mínimo consiste em encontrar quais dos fluxos representados pelas setas da Figura 16 são os que fornecem o menor custo. Assim, a carga pode sair da origem O rumo ao destino D pelas rodovias, ou então partir da origem O , rumo ao terminal de embarque T_1 e de lá seguir por ferrovia ou hidrovía até o terminal de desembarque T_2 . Neste terminal de desembarque a carga segue até o destino D . O que vai determinar quais destes fluxos serão utilizados é o custo de transporte resultante da utilização dos mesmos.

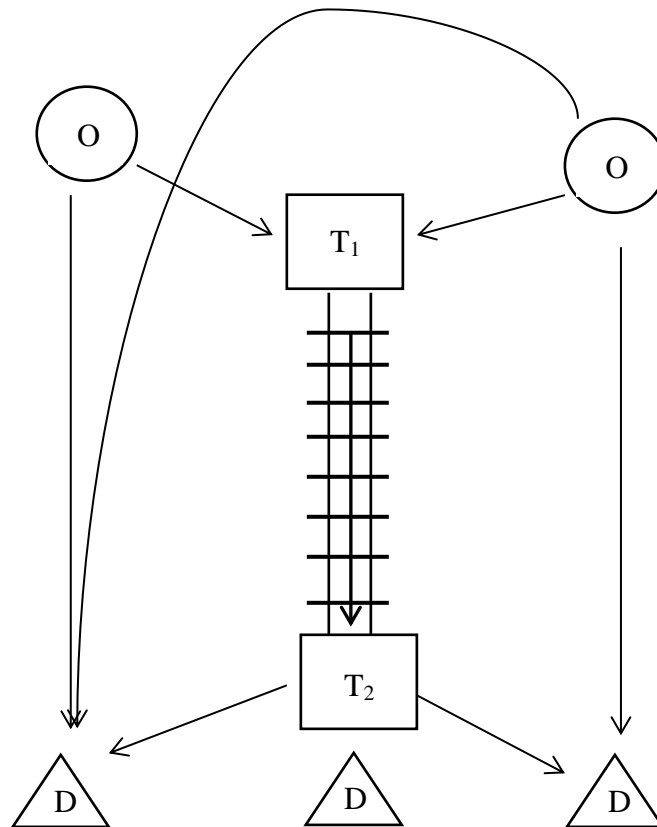


Figura 16 – Representação do Modelo de Fluxo de Custo mínimo
 Fonte: elaborado a partir de Pinheiro (2012).

Matematicamente, a construção do modelo básico considera uma rede com n nós, sendo que para cada nó i existe um número b_i que representa a oferta disponível no nó. Segundo Luenberger e Ye (2008), se $b_i > 0$, o nó em questão representa um fluxo de origem do produto. Mas se $b_i < 0$, tem-se uma situação em que o fluxo da mercadoria foi consumido no nó. Nesse caso, a demanda foi atendida, tratando-se de um nó de destino. A situação representada pela equação (1) implica que o nó em questão é um ponto de transbordo. Uma rede de transporte é balanceada quando a quantidade de produto que entra no nó é a mesma que sai do nó.

$$\sum_{i=1}^n b_i = 0 \quad (1)$$

Associado a cada arco (i,j) está um custo c_{ij} referente ao transporte do produto p ao longo do arco, além da capacidade de fluxo de mercadoria u_{ij} no referido arco. O custo

mínimo para o fluxo da carga é o que determina a quantidade $x_{ij} \geq 0$ em cada arco da rede, de forma que o fluxo em cada nó i é b_i , e que minimiza o custo total. A representação matemática é dada por:

$$\min Z(1) = \sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^n c_{ij} \cdot x_{ij} \quad (2)$$

sujeito a

$$\sum_{j=1}^n x_{ij} - \sum_{j=1}^n x_{ji} = b_i; i = 1, 2, \dots, n \quad (3)$$

$$0 \leq x_{ij} \leq u_{ij}; i, j = 1, 2, \dots, n \quad (4)$$

No modelo anterior a variável $Z(1)$ se refere ao custo total do transporte, a ser minimizado. O primeiro somatório da restrição (3) representa o fluxo total que parte do nó i e o segundo somatório da restrição em questão representa o fluxo que chega ao nó i . Assim, o fluxo total que parte de um nó precisa ser igual ao fluxo que chega ao nó. Por isso a restrição (3) é chamada de restrição de conservação de fluxo. Neste caso, respeitada esta condição, garante-se que não há ganho ou perda de fluxo de mercadoria nos nós intermediários. Já a restrição (4) garante que a quantidade x_{ij} seja não-negativa, porém menor ou igual à capacidade de cada arco.

O modelo considera que na rede em questão os arcos vão dos ofertantes para os demandantes, o que reflete o fato de que a mercadoria parte da origem e vai até o destino diretamente. É possível generalizar o problema, permitindo que o fluxo passe por vários nós intermediários até chegar ao seu destino.

Até aqui foi considerado o caso que contempla apenas um modal de transporte. No entanto é possível considerar o transporte intermodal, ou seja, a combinação de diversos modais, como por exemplo o modal rodoviário e ferroviário. Neste caso existe, além do custo de transporte, um custo associado à mudança da carga de um modal para o outro. Para fins de apresentação do modelo, este custo estará incluído no custo c_{ij}^m na equação 5.

No caso de um transporte intermodal, a carga ao sair da origem pode seguir direto ao destino, ou então, ir até um terminal intermodal e de lá seguir até outro terminal ou

até o destino. Seja x_{ij}^m o fluxo transportado pelo modal m , e o custo associado a tal fluxo representado por c_{ij}^m . Então, o problema de minimização do custo de transporte torna-se:

$$\min Z(2) = \sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^n \sum_{m=1}^k c_{ij}^m \cdot x_{ij}^m \quad (5)$$

sujeito a

$$\sum_{j=1}^n \sum_{m=1}^k x_{ij}^m - \sum_{j=1}^n \sum_{m=1}^k x_{ji}^m = b_i; i = 1, 2, \dots, n \quad (6)$$

$$0 \leq x_{ij}^m \leq u_{i,j}^m; i, j = 1, 2, \dots, n \quad (7)$$

Em nenhum dos modelos apresentados considerou-se que o transporte de carga emite poluentes, o que tem impacto na qualidade do meio ambiente. Como mostram Zhang et al. (2011), quando se leva em conta as emissões de GEE em modelos de transporte, a configuração de custos se altera.

Existem diversas maneiras de se incorporar a questão ambiental em modelos de transporte. Uma forma é considerar que a emissão de GEE tem um custo e que tal custo deve ser incluído na função custo total a ser minimizada. McKinnon e Piecyk (2010) mostram que as emissões de CO₂ podem ser expressas como:

$$E = l \cdot d \cdot e \quad (8)$$

A equação (8) descreve que as emissões são determinadas em função da carga l medida em toneladas, da distância percorrida d medida em quilômetros e do fator de emissões médias e medido em g/t-km. Para que a equação (8) se torne o custo das emissões, Qu, Bektaş e Bennel (2014) converteram a variável e para p , de forma que a mesma fosse expressada em unidades monetárias. Sendo assim, a equação (8) torna-se:

$$CE = l \cdot d \cdot p \quad (9)$$

Nesse caso, CE se refere ao custo das emissões de carbono e p é o valor monetário dessas emissões. No caso da aplicação das equações (8) e (9) numa análise intermodal, basta se ter em mente que as variáveis e e p assumem diferentes valores de acordo com o modal utilizado.

Outra abordagem diz respeito à utilização do consumo de combustíveis no cálculo das emissões. Esse método tem como vantagem a desagregação da parcela dos combustíveis fósseis dos biocombustíveis. Seguindo o modelo e parte da nomenclatura apresentados por Messer (2015), as emissões de GEE podem ser determinadas como:

$$E = \sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^n \sum_{m=1}^k CC_{ij}^m \cdot [(1 - \%bio) \cdot FE_{fossil}^m + \%bio \cdot FE_{bio}^m] \quad (10)$$

Na equação (10), a variável CC_{ij}^m representa o consumo de combustível do modal m , quando parte da origem i até o destino j . Para encontrar o valor das emissões, sobre o consumo de combustível deve ser multiplicar o fator das emissões provenientes da queima de combustíveis fósseis do modal m (FE_{fossil}^m) e o fator para a emissão de biocombustível, também de acordo com o modal transportado (FE_{bio}^m). Essa desagregação ocorre porque há uma mistura de biocombustível no combustível utilizado. Portanto, $\%bio$ se refere à quantidade de biocombustível adicionada ao combustível. No Brasil, em 2015, a $\%bio$ equivalia a 7%. Porém, no ano de 2013, que é o ano base da pesquisa, a $\%bio$ equivalia a 5%. De acordo com Messer (2015), no transporte hidroviário o combustível utilizado⁴² não tem mistura como o biocombustível. Portanto, $\%bio$ para o modal hidroviário será igual a zero.

Com esta formulação, pode-se considerar um cenário em que a eficiência energética dos combustíveis se altere. Ou ainda, qual seria o impacto se o governo decidisse aumentar a mistura de biocombustíveis nos combustíveis. Também seria possível simular um desenvolvimento tecnológico que permitisse o uso integral de biocombustíveis nos diversos modais de transportes.

No entanto, para aplicar a equação (10) no modelo é preciso calcular qual é o consumo de combustível em cada modal em função da quantidade de carga transportada e da

⁴² A autora menciona que são utilizados dois tipos de combustíveis no modal hidroviário: óleo diesel e óleo combustível.

distância percorrida. Assim, de acordo com Messer (2015), o consumo de combustível em cada modal⁴³ pode ser obtido como:

$$CC_{ij}^m = \sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^n \sum_{m=1}^k d_{ij}^m \cdot x_{ij}^m \cdot cons_e^m \quad (11)$$

A equação (11) mostra que o consumo de combustíveis no modal m , partindo da origem i até o destino j , é dado pela distância percorrida d_{ij}^m e pela quantidade de carga transportada x_{ij}^m e pelo consumo específico de combustível em cada modal, representado por $cons_e^m$.

Considerando as equações (10) e (11), as emissões provenientes do transporte de determinado produto podem ser descritas como:

$$E = \sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^n \sum_{m=1}^k d_{ij}^m \cdot x_{ij}^m \cdot cfe^m \quad (12)$$

onde $cfe^m = cons_e^m \cdot [(1 - \%bio) \cdot FE_{fóssil}^m + \%bio \cdot FE_{bio}^m]$.

Para a inclusão do custo ambiental das emissões decorrentes do uso de combustíveis, basta multiplicar a cfe^m por p^m , que se refere ao valor monetário das emissões. Assim, o modelo Z(2) poderia ser reescrito da seguinte forma:

$$\min Z(3) = \sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^n \sum_{m=1}^k c_{ij}^m \cdot x_{ij}^m + \sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^n \sum_{m=1}^k d_{ij}^m \cdot x_{ij}^m \cdot p^m \cdot (cfe^m) \quad (13)$$

sujeito a

$$\sum_{j=1}^n \sum_{m=1}^m x_{ij}^m - \sum_{j=1}^n \sum_{m=1}^m x_{ji}^m = b_i; i = 1, 2, \dots, n \quad (14)$$

$$0 \leq x_{ij}^m \leq u_{ij}^m; i, j = 1, 2, \dots, n \quad (15)$$

⁴³ No trabalho de Messer (2015), a equação do consumo de combustível para as rodovias difere da equação (11). A autora considerou a frota de caminhões e a curva de sucateamento. Porém, nesta pesquisa, optou-se por se manter um mesmo padrão de equação para todos os modais.

A variável $Z(3)$ possui dois tipos de custos: os custos logísticos que correspondem ao primeiro somatório e os custos ambientais que correspondem ao segundo somatório. As restrições (14) e (15) são as mesmas dos demais modelos. Comparando as variáveis $Z(2)$ e $Z(3)$, percebe-se que a inclusão do custo ambiental torna o custo total mais elevado. Assim, sem perda de generalidade, pode-se dizer que:

$$Z(3) > Z(2) \quad (16)$$

Fica evidente que quando os custos ambientais são incluídos, os custos totais se tornam mais elevados, conforme já verificado por vários autores como Zhang et al. (2011), Harris et al. (2011) e Fahimnia et al. (2013).

Outra abordagem recorrente neste tipo de modelagem é minimizar as emissões de GEE ao invés de minimizar o custo total. Utilizando-se a equação (12), chega-se ao seguinte modelo:

$$\min E(1) = \sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^n \sum_{m=1}^k d_{ij}^m \cdot x_{ij}^m \cdot c f e^m \quad (17)$$

sujeito a

$$\sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^n \sum_{m=1}^k c_{ij}^m \cdot x_{ij}^m \geq 0 \quad (18)$$

$$\sum_{j=1}^n \sum_{m=1}^m x_{ij}^m - \sum_{j=1}^n \sum_{m=1}^m x_{ji}^m = b_i; i = 1, 2, \dots, n \quad (19)$$

$$0 \leq x_{ij}^m \leq u_{i,j}^m; i, j = 1, 2, \dots, n \quad (20)$$

Nesse tipo de abordagem, a equação $E(1)$ se refere à quantidade de CO_2 emitida. Cabe destacar que, neste caso, as emissões estão sendo consideradas como quantidade emitida e não como valores monetários. Sendo assim, a resolução do problema de minimização das emissões fornece como resultado qual a quantidade mínima das emissões e também qual o custo logístico associado a este cenário de minimização das emissões.

Conforme mostra Pinheiro (2012), existe um *trade-off* entre emissões e custo, no sentido de que a minimização das emissões leva a uma elevação no custo logístico.

Sendo assim, é pouco provável que os transportadores queiram minimizar as emissões, sendo que isto teria um impacto positivo nos custos logísticos, principalmente quando se considera o transporte de produtos agrícolas. Esses tipos de produtos têm um baixo valor agregado e a elevação dos custos de transporte certamente impactará nos preços dos mesmos.

Então, seria racional supor que os agentes não busquem emissões mínimas, mas sim custo mínimo. Neste caso, se o interesse da sociedade for minimizar as emissões, algumas medidas precisam ser tomadas para garantir a redução das emissões. Para isso, podem ser aplicadas as políticas ambientais citadas na seção 2 deste capítulo. Assim, os agentes teriam um incentivo para reduzir as emissões. Benjaafar, Li e Daskin (2013) e Palak, Ekşioğlu e Geunes (2014) utilizaram quatro tipos de políticas ambientais em seus estudos: (1) imposição de limite sobre a quantidade emitida; (2) imposição de uma taxa sobre as emissões de CO₂; (3) compra e venda de créditos de carbono e (4) mecanismo de compensação de carbono.

4.3.1 Limite sobre as emissões de CO₂

A primeira regulação a ser analisada será a imposição de um limite sobre as emissões de dióxido de carbono. Neste caso, tal limite não pode ser ultrapassado. Isto é feito a partir da utilização da equação (12) como uma restrição adicional ao modelo Z(2). Sendo assim, o modelo se torna:

$$\min Z(4) = \sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^n \sum_{m=1}^m c_{ij}^m \cdot x_{ij}^m \quad (21)$$

sujeito a

$$\sum_{j=1}^n \sum_{m=1}^m x_{ij}^m - \sum_{j=1}^n \sum_{m=1}^m x_{ji}^m = b_i; i = 1, 2, \dots, n \quad (22)$$

$$\sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^n \sum_{m=1}^k d_{ij}^m \cdot x_{ij}^m \cdot cfe^m \leq L \quad (23)$$

$$0 \leq x_{ij}^m \leq u_{ij}^m; i, j = 1, 2, \dots, n \quad (24)$$

Na restrição (23) é possível se impor diversos valores para L , o limite máximo que se pode emitir. Uma prática comum é utilizar a redução proposta no Protocolo de Quioto, quando foi estabelecida uma redução de 5,2% dos limites observados em 1990. Ou então, alguma meta que tenha sido adotada pelo país. O Governo brasileiro, por exemplo, adotou uma meta de redução de 43% das emissões de gases de efeito estufa até 2030.

Neste trabalho, optou-se por não se considerar os efeitos da imposição de um limite das emissões como medida de mitigação, já que será considerado o mecanismo de compra e venda de créditos de carbono, que como será apresentado, também consiste na imposição de um limite ou meta de redução. Porém, caso não seja possível atingir tal limite, é possível comprar créditos de carbono para atingir a meta estabelecida.

4.3.2 Taxa de carbono

Num sistema regulatório em que uma taxa de carbono Ω é aplicada, o produtor é taxado sobre a quantidade de CO₂ emitido. Cabe ressaltar que uma taxa de carbono pode ter um impacto sobre a quantidade produzida. No problema analisado neste trabalho, supõe-se que essa taxa seja aplicada apenas às emissões provenientes da queima de combustíveis fósseis, pois se a taxa fosse aplicada à economia como um todo, não poderiam ser negligenciados os efeitos que tal imposição teria sobre a quantidade produzida. Sendo assim, de agora em diante, as regulamentações serão aplicadas sobre o sistema de transporte. Assume-se que o produtor é o responsável pelo transporte da carga, recaindo sobre ele os efeitos da política. O problema, com a imposição da taxa, torna-se:

$$\min Z(5) = \sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^n \sum_{m=1}^k c_{ij}^m \cdot x_{ij}^m + \Omega \cdot \left(\sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^n \sum_{m=1}^k d_{ij}^m \cdot x_{ij}^m \cdot cfe^m \right) \quad (25)$$

sujeito a

$$\sum_{j=1}^n \sum_{m=1}^m x_{ij}^m - \sum_{j=1}^n \sum_{m=1}^m x_{ji}^m = b_i; i = 1, 2, \dots, n \quad (26)$$

$$\sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^n \sum_{m=1}^k d_{ij}^m \cdot x_{ij}^m \cdot cfe^m \geq 0 \quad (27)$$

$$0 \leq x_{ij}^m \leq u_{i,j}^m; i, j = 1, 2, \dots, n \quad (28)$$

A justificativa para a adoção de uma taxa seria o possível incentivo para escolha de modais menos poluentes, já que neste caso o custo do transporte nos modais mais poluentes ficaria mais elevado. No entanto, é possível perceber que a adoção de uma taxa elevará o custo de transporte em todos os modais, já que se aplica uma punição sobre as emissões geradas pelo transporte como um todo, inclusive para aquelas geradas pelos modais menos poluentes. No entanto, a elevação do custo nestes modais seria mais baixa, já que poluem menos.

4.3.3 Mecanismo de compra e venda de créditos

Nesta situação, um limite sobre as emissões é imposto. Se as emissões são inferiores ao limite imposto, então existe a possibilidade de se vender créditos de carbono. Mas, se as emissões superarem o limite estabelecido, então é preciso comprar créditos de carbono (permissões). Supõe-se que exista um mercado onde tais créditos podem ser comercializados.

Seja e^+ e e^- as quantidades de crédito comprado e vendido e seja p o preço de mercado de uma unidade de carbono, o modelo que minimiza o custo total sobre um esquema de compra e venda de créditos de carbono é dado por:

$$\min Z(6) = \sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^n \sum_{m=1}^m c_{ij}^m \cdot x_{ij}^m + p \cdot (e^+ - e^-) \quad (29)$$

Sujeito a

$$\sum_{j=1}^n \sum_{m=1}^m x_{ij}^m - \sum_{j=1}^n \sum_{m=1}^m x_{ji}^m = b_i; i = 1, 2, \dots, n \quad (30)$$

$$\sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^n \sum_{m=1}^k d_{ij}^m \cdot x_{ij}^m \cdot cfe^m + e^- < L + e^+ \quad (31)$$

$$0 \leq x_{ij}^m \leq u_{ij}^m; i, j = 1, 2, \dots, n \quad (32)$$

$$e^-, e^+ \geq 0 \quad (33)$$

Neste mecanismo, se as emissões geradas pelo transporte estiverem abaixo da meta estabelecida pelo governo, haverá uma redução no custo total, já que seria possível a venda de créditos de carbono (e^-). Porém, se as emissões resultantes estiverem acima do limite determinado, haveria a necessidade de se comprar os créditos para realizar a atividade de transporte e, com isso, o custo de transporte se elevaria.

4.3.4 Mecanismo de compensação de carbono

Neste tipo de regulação, um limite sobre as emissões de carbono é imposto sobre o sistema de transporte, supondo que exista um mercado que permite a compra de créditos (permissões)⁴⁴ para compensar as emissões que superarem o limite estabelecido. Neste tipo de regulação não é permitida a venda de créditos de carbono, caso as emissões estejam abaixo do limite estabelecido.

$$\min Z(7) = \sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^n \sum_{m=1}^m c_{ij}^m \cdot x_{ij}^m + p \cdot (e^+) \quad (34)$$

sujeito a

$$\sum_{j=1}^n \sum_{m=1}^m x_{ij}^m - \sum_{j=1}^n \sum_{m=1}^m x_{ji}^m = b_i; i = 1, 2, \dots, n \quad (35)$$

$$\sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^n \sum_{m=1}^k d_{ij}^m \cdot x_{ij}^m \cdot cfe^m \leq L + e^+ \quad (36)$$

$$0 \leq x_{ij}^m \leq u_{ij}^m; i, j = 1, 2, \dots, n \quad (37)$$

$$e^+ \geq 0 \quad (38)$$

Nesse mecanismo, se as emissões correspondentes estiverem acima da meta estabelecida, o efeito é o mesmo do sistema de compra e venda de créditos de carbono. Neste

⁴⁴ Em termos matemáticos, nestes modelos, não há diferença entre créditos de carbono e permissão. Uma permissão para poluir é um crédito de carbono comprado de alguma atividade que, possivelmente, reduziu as emissões de CO₂ ou de GEE. Com o intuito de padronizar a leitura, neste trabalho será utilizado apenas o termo crédito de carbono.

caso, seria necessária a compra créditos de carbono, o que levaria a uma elevação do custo de transporte. No entanto, se as emissões forem menores que o limite escolhido, não há a possibilidade de venda de créditos de carbono, o que não permitiria a redução do custo de transporte decorrente da receita adicional que poderia ser obtida via mercado de carbono.

4.4 Modelo de otimização proposto

Conforme apresentado até aqui, neste trabalho serão considerados os impactos das principais políticas ambientais sobre as escolhas de transporte. Nesta seção, será apresentado o modelo de otimização que será utilizado neste trabalho. O modelo de Fluxo de Custo Mínimo (MFCM) já foi utilizado por Pinheiro (2012) e por Branco et al. (2012). Enquanto no trabalho de Pinheiro (2012) foram analisados o açúcar e o etanol, no trabalho de Branco et al (2012) foram utilizados 7 produtos distintos, o que transformou o modelo em questão na versão multiproduto. Nesta pesquisa, a soja será o produto a ser analisado.

O modelo MFCM consiste em um problema de otimização dos fluxos de rede de transporte. Nessa rede, os nós podem ser de origem de carga (o), de destino da carga (d) ou terminais de transferência da carga (t) entre os modais de transporte. Se o terminal de transbordo for relacionado à origem do fluxo de carga em um modal que não seja o rodoviário, será denominado terminal de carregamento (t_1). Mas se o terminal de transbordo for relacionado com o destino da carga vindo de um modal que não seja o rodoviário, será denominado terminal de descarregamento (t_2).

Neste modelo a variável de decisão x_{ij}^m , é desagregada em 4 níveis:

- 1- R_{od}^{pc} : se refere ao fluxo rodoviário do produto (p) que sai da origem (o) e segue diretamente até o destino (d) e vinculado ao canal de comercialização (c) que pode ser tanto o mercado doméstico como o mercado exterior;
- 2- PR_{ot}^{pc} : se refere ao fluxo rodoviário do produto (p) que parte da origem (o) e segue até o terminal de transbordo (t), vinculado ao canal de comercialização (c);
- 3- $IM_{t_1 t_2}^{pc}$: se refere ao fluxo multimodal do produto (p), originado no terminal de carregamento (t_1) e segue com destino ao terminal de descarregamento (t_2) vinculado ao canal de comercialização (c);
- 4- PRD_{td}^{pc} : se refere ao fluxo rodoviário do produto (p), originado no terminal de transbordo de descarregamento (t_2) e segue em direção ao destino (d) e vinculado ao canal de comercialização (c).

A cada nível apresentado nos itens 1 a 4, está associado um respectivo valor de frete F . No caso do fluxo intermodal expresso no item 3, além do respectivo frete F , está associado um custo de transbordo TT . O objetivo do modelo MFCM é minimizar o custo logístico total, que pode ser expresso pela equação (39).

$$\begin{aligned} \min MFCM = & \sum_p \sum_o \sum_d \sum_c R_{od}^{pc} \cdot F_{od}^p + \sum_p \sum_o \sum_{t_1} \sum_c PR_{ot}^{pc} \cdot F_{ot}^p + \\ & \sum_p \sum_{t_1} \sum_{t_2} \sum_c (IM_{t_1 t_2}^{pc} \cdot F_{t_1 t_2}^{pc} + TT_t) + \\ & \sum_p \sum_{t_2} \sum_d \sum_c (PR_{td}^{pc} \cdot F_{td}^p) \end{aligned} \quad (39)$$

O custo total a ser minimizado está sujeito às restrições elencadas a seguir.

A restrição (40) mostra que a somatória do fluxo rodoviário do produto (p) que parte da origem (o) e segue diretamente ao destino (d), acrescido do somatório do fluxo rodoviário do produto (p) que parte da origem o e segue em direção ao terminal de transbordo, deve ser igual à oferta (OF_o^{pc}) do produto (p) associado à origem (o). Sendo assim, trata-se da oferta global de cargas da localidade em questão.

$$\sum_d \sum_c R_{od}^{pc} + \sum_t \sum_c PR_{ot}^{pc} = OF_o^{pc} \begin{cases} \forall o \\ \forall p \end{cases} \quad (40)$$

A restrição (41) garante que a somatória do fluxo rodoviário de carga do produto (p), que parte da origem (o) em direção ao destino (d), acrescida da somatória do fluxo rodoviário de carga do produto (p) que tem origem no terminal de transbordo (t), deve ser igual à demanda do produto (p) no destino (d) acrescida da exportação do produto (p) no destino (d). Tal restrição é utilizada para garantir que a quantidade de produto (p) que chega a um nó de destino não seja maior que a demanda acrescida da exportação naquele destino.

$$\sum_o \sum_c R_{od}^{pc} + \sum_t \sum_c PRD_{td}^{pc} = DEM_d^p + EXP_d^p \begin{cases} \forall d \\ \forall p \end{cases} \quad (41)$$

A restrição (42) garante que a somatória do fluxo rodoviário que segue com destino ao mercado exportador e que se origina em determinado estado seja menor que a

quantidade exportada pelo estado. A primeira somatória se refere ao fluxo do produto (p) que parte da origem (o) associado ao estado (uf) e segue com destino ao porto (d). A segunda somatória representa o fluxo do produto (p) que está associada ao estado (uf), que segue da origem (o) em direção ao terminal de transbordo (t). Em ambos os casos, o canal de comercialização é a exportação.

$$\sum_{o \in o_{uf}} \sum_{d \in d_{portos}} R_{od}^{pc} + \sum_{o \in o_{uf}} \sum_t PR_{ot}^{pc} \leq EXP_{uf}^p \left\{ \begin{array}{l} \forall p \\ \forall uf \\ c = c_{exp} \end{array} \right. \quad (42)$$

A restrição (43) garante que para o canal de comercialização correspondente ao mercado exportador, a quantidade do produto (p) transportada na rodovia e que parte da origem (o) com destino ao porto (d), somada com a quantidade da mercadoria que parte do terminal de transbordo com destino ao porto (d), pela rodovia, deve ser maior ou igual à exportação de tal produto no referido porto.

$$\sum_o R_{od}^{pc} + \sum_t PRD_{td}^{pc} = EXP_d^p \left\{ \begin{array}{l} \forall p \\ \forall d \in d_{portos} \\ c = c_{exp} \end{array} \right. \quad (43)$$

Branco et al. (2012) sugerem que para as restrições de exportação pode ser conveniente utilizar valores projetados de oferta e demanda da carga para um cenário futuro. Neste caso, basta transformar a equação em uma inequação. Numa situação em que a exportação resultante da oferta e da demanda projetadas seja maior que a atual, usa-se uma restrição do tipo maior ou igual. Se a quantidade projetada for menor que a verificada, usa-se a restrição do tipo menor ou igual.

A restrição (44) está associada à quantidade de carga transportada pelo transporte multimodal.

$$\sum_o R_{ot_1}^{pc} + \sum_{t_2} IM_{t_2 t_1}^{pc} = \sum_{t_2} IM_{t_2 t_1}^{pc} + \sum_d PRD_{t_2 d}^{pc} \left\{ \begin{array}{l} \forall p \\ \forall c \\ \forall t \end{array} \right. \quad (44)$$

Esta restrição assegura que o fluxo rodoviário do produto (p), associado ao canal de comercialização (c) originado em (o) com destino ao terminal de transferência de carregamento (t₁) acrescido da quantidade do produto (p), transportado por meio da

multimodalidade, que tem como origem o terminal de transferência de descarregamento (t_2) com destino ao terminal de transferência (t_1) deve ser igual à soma do fluxo do produto (p) que partiu do terminal de carregamento (t_1) em direção ao terminal de descarregamento (t_2), acrescido do fluxo rodoviário do produto (p) com origem em (t_2) e direcionados ao destino d .

A restrição (45) trata das emissões decorrentes do consumo de combustível. Este é determinado em função da distância δ de cada trecho, da quantidade transportada em cada trecho, do consumo específico associado ao modal rodoviário (ce^r) e do consumo específico associado aos demais modais (ce^m).

$$\begin{aligned}
 & ce^r \cdot \left(\begin{array}{l} \sum_p \sum_o \sum_d \sum_c R_{od}^{pc} \cdot \delta_{od}^{pc} + \\ \sum_p \sum_o \sum_{t_1} \sum_c PR_{ot}^{pc} \cdot \delta_{ot}^{pc} + \\ \sum_p \sum_o \sum_{t_2} \sum_c PRD_{t_2d}^{pc} \cdot \delta_{t_2d}^{pc} \end{array} \right) \cdot [(1 - \%bio) \cdot FE_{Fóssil}^r + \%bio \cdot FE_{Bio}^r] + \\
 & ce^m \cdot \left(\sum_p \sum_{t_1} \sum_{t_2} \sum_c IM_{t_1t_2}^{pc} \cdot \delta_{t_1t_2}^{pc} \right) \cdot [(1 - \%bio^m) \cdot FE_{Fóssil}^m + \%bio^m \cdot FE_{Bio}^m] \\
 & > 0
 \end{aligned} \tag{45}$$

A restrição (45) divide os fluxos de mercadorias em fluxo rodoviário e fluxo multimodal. No fluxo rodoviário existem três trechos possíveis para o produto (p) associado ao canal de comercialização (c): quantidade que parte da origem (o) que segue com direção ao destino (d); quantidade que parte da origem (o) com destino ao terminal de embarque (t_1); quantidade que parte do terminal de desembarque (t_2) e segue em direção ao destino (d). A estes fluxos estão multiplicadas as respectivas distâncias medidas em quilômetros e o consumo específico de combustível (ce^r) associado ao modal rodoviário. O fluxo multimodal corresponde à quantidade do produto (p), associado ao canal de comercialização (c), que tem como origem o terminal de carregamento (t_1) e segue com destino ao terminal de descarregamento (t_2). A este fluxo está multiplicada a distância medida em quilômetros e o fator de consumo específico de combustível (ce^m) associado ao modal (m). Os dois termos, quando multiplicados pelo fator específico das emissões em cada modal ($FE_{Fóssil}^m$ e FE_{Bio}^m), geram as emissões totais da carga transportada.

A estratégia utilizada neste trabalho para analisar o problema em questão é proceder ao cálculo de diversas versões deste modelo de otimização. A primeira versão do modelo MFCM(1) a ser calculado será o modelo apresentado nesta seção, com a restrição referente às emissões. Uma vez que a restrição (45) apenas impõe que as emissões devem ser não-negativas, o resultado acerca da quantidade transportada não deve ser influenciado por tal restrição. A justificativa para tal imposição decorre da necessidade das informações referentes à quantidade de poluente gerada pelo transporte de carga, na ausência de políticas de restrição das emissões.

A segunda versão do modelo MFCM(2) consiste na inclusão do custo ambiental aos custos totais logísticos. Espera-se que, com tal inclusão, a configuração de custos do modelo MFCM(2) seja maior que a do modelo MFCM(1), confirmando que quando se considera os impactos da poluição sobre o meio ambiente o custo total tende a ser mais elevado.

O próximo passo será a comparação entre as políticas ambientais. A imposição de uma taxa sobre a quantidade emitida de carbono será considerada no modelo MFCM(3). O valor da taxa será baseado na literatura e principalmente nos países que já fazem uso de tal artifício. O mecanismo de compra e venda de permissões será apresentado no modelo MFCM(4) e o mecanismo de compensação das emissões será apresentado no modelo MFCM(5).

Os efeitos de mudança na capacidade de embarque dos terminais de transbordo e dos portos são feitos apenas alterando o valores das respectivas variáveis do modelo MFCM(1). O mesmo procedimento será adotado para analisar os efeitos de mudanças no padrão de combustível utilizado e variações na eficiência energética. Neste caso, as variáveis afetadas serão o consumo específico de combustível dos modais e as porcentagens de uso de biodiesel e diesel na composição do combustível.

Adicionalmente, será feita a simulação de minimização das emissões para que seja possível comparar se as emissões geradas pelo modelo são as menores possíveis, ou se existe uma alocação mais eficiente que torne possível uma redução maior, indicando os custos associados.

O Quadro 1 apresenta a síntese dos modelos que serão utilizados neste trabalho.

Modelo	Aspecto Ambiental	Variáveis adicionais
MFCM(1)	Restrição de que as emissões sejam não negativas	
MFCM(2)	Considerar o custo das emissões no custo total	p^m : valor monetário das emissões
MFCM(3)	Imposição de uma taxa sobre as emissões	Ω : taxa sobre as emissões
MFCM(4)	Compra e venda de créditos de carbono	p : preço do crédito; e^+ : quantidade de crédito comprado; e^- : quantidade de crédito vendido.
MFCM(5)	Mecanismo de compensação das emissões	p : preço do crédito; e^+ : quantidade de crédito comprado.
E(1)	Modelo de Minimização das emissões	

Quadro 1 – Síntese dos modelos propostos

Fonte: elaboração própria.

Em suma, a justificativa de se utilizar os mecanismos de controle da emissão de poluentes parte da questão levantada em Pinheiro (2012, p. 148): “Entretanto, deve ser evidenciado que não basta, apenas, as obras ficarem prontas, é necessário que haja incentivos ao embarcador para o uso de modais alternativos ao rodoviário.” As obras, às quais se refere a autora, são aquelas previstas no PAC I e PAC II. Sendo assim, talvez o incentivo a que se refere a autora pode ser obtido por meio dos mecanismos citados. Mesmo porque, por exemplo, no caso de ser aplicada uma taxa sobre as emissões de dióxido de carbono, os custos serão mais altos quanto mais intensas forem as emissões geradas.

Conforme já mencionado, existem vários projetos logísticos no país, sendo que vários deles não começaram a ser executados, o que gera a dúvida se de fato sairão do papel. Em virtude deste fato, os cenários futuros considerados neste trabalho foram divididos entre os projetos que já estão sendo executados e aqueles cuja execução é incerta. Além destes cenários, será considerado o cenário em que há expansão da capacidade atual das ferrovias, hidrovias e portos. Desta forma, os modelos apresentados no Quadro 1 estarão sujeitos aos cenários apresentados no Quadro 2.

Cenários	Descrição
Base	Configuração atual do sistema de transportes no Brasil. Restrição da quantidade embarcada em cada um dos terminais ferroviários, hidroviários e portos.
Geral	Serão considerados, além dos terminais de embarque do cenário base, os terminais aptos para receber a soja e que receberam outros produtos. A capacidade destes terminais e dos terminais do cenário base será igual à quantidade total de carga em cada um destes terminais.
Expansão	Neste cenário serão considerados trechos das Obras do PAC que já estão sendo executadas: FNS, FIOL e Nova Transnordestina. Atribuiu-se uma capacidade inicial de 5 milhões de toneladas a esses empreendimentos.
Futuro	Serão considerados, adicionalmente, os projetos que ainda não saíram do papel, entre eles a FICO, Transcontinental e Ferrovia do Pantanal.
Crescimento da produção	Este cenário contempla o crescimento da produção e de exportação da soja. A projeção foi feita pelo Ministério da Agricultura, Pecuária e Abastecimento (2015) e prevê um crescimento de 33,9% na produção e 42,1% na exportação, na safra 2024/2025.

Quadro 2 – Cenários propostos

Fonte: Elaboração própria

4.5 Dados

A matriz origem-destino utilizada neste trabalho seguiu os mesmos procedimentos utilizados por diversos autores, como Pinheiro (2012) e Branco (2007). Assim, a origem da oferta de soja foi determinada de acordo como o município representativo de cada uma das microrregiões selecionadas neste trabalho. A determinação destas microrregiões foi feita de acordo com os dados obtidos pelo Sistema IBGE de Recuperação Automática – SIDRA. Uma vez verificadas quais microrregiões produziram soja no ano de 2013, escolheu-se o município que foi o maior produtor de soja como o representativo de cada microrregião. Esta definição em termos de microrregiões torna a operacionalização do modelo mais rápida do que seria caso fossem considerados todos os municípios produtores de soja.

Com relação à demanda interna de soja, utilizou-se os dados da Associação Brasileira das Indústrias de Óleos Vegetais (ABIOVE). Nos relatórios da ABIOVE (2015) é possível obter informações a respeito da capacidade instalada de processamento de oleaginosas nos municípios em que estão localizadas tais indústrias. A partir desta capacidade, estima-se qual a demanda interna de soja no ano de 2013. Assume-se, portanto, que a soja que não segue em direção ao mercado externo, sendo direcionada para atender à demanda das indústrias processadoras de soja.

Os dados da exportação de soja, que correspondem à demanda externa, foram obtidas no site da Secretaria de Comércio Exterior por meio do Sistema de Análise das Informações de Comércio Exterior via Web (ALICEweb). Neste sistema é possível obter os dados das exportações de acordo com a origem da soja, as exportações por portos e as exportações dos estados. Cabe ressaltar que nem toda a origem da soja apontada pelo ALICEweb correspondeu à origem da soja de acordo com o SIDRA. Uma justificativa para esse fato decorre da possibilidade de que esta soja tenha vindo de um armazém localizado no município apontado como origem, o que não implica que tenha sido produzida neste município. Como neste trabalho a questão do armazenamento não está sendo considerada, optou-se por retirar os municípios exportadores apontados pelo ALICEweb que não correspondiam aos municípios de origem do SIDRA.

As informações referentes às ferrovias foram obtidas junto à Agência Nacional de Transportes Terrestres (2015b), via Lei de Acesso à Informação. Com os dados da Gerência de Controle e Fiscalização de Serviços de Infraestrutura de Transporte Ferroviário de Cargas – GECOF, foi possível determinar quais trechos das ferrovias transportaram a soja e demais mercadorias no ano de 2013, bem como qual a quantidade de embarque e desembarque de cada mercadoria, o que permitiu a determinação da capacidade destes terminais.

Os dados relativos às cargas transportadas pelas hidrovias foram obtidos por meio da Agência Nacional de Transportes Aquaviários – ANTAQ (2014). Com os dados contidos no relatório foi possível determinar qual a quantidade de soja que foi transportada e em quais hidrovias houve o transporte de soja. Cabe destacar que foi considerada apenas a navegação interior como forma de escoamento da produção no modal hidroviário.

As distâncias correspondentes a cada combinação origem-destino, origem-transbordo e transbordo-destino foram obtidas por meio do software Transcad, disponibilizado pelo Grupo de Pesquisa e Extensão em Logística Agroindustrial da Escola Superior de Agricultura Luiz de Queiroz – ESALQ-LOG. Já as distâncias referentes ao

transporte intermodal foram obtidas juntos às fontes já mencionadas: para as ferrovias, os dados da ANTT; para as hidrovias, os dados da ANTAQ (2014).

As informações referentes aos fretes são difíceis de obter, uma vez que não existem dados para todas as combinações origem-destino ou origem-transbordo utilizadas em trabalhos como esse. Normalmente, os valores dos fretes são estimados por meio da seguinte equação:

$$Frete_i = \alpha + \beta Distancia_i + \varepsilon_i \quad (46)$$

Na equação (46), a variável $Frete_i$ se refere ao valor do frete da origem i , medido em R\$/t, e a variável $Distancia_i$ se refere à distância da origem i medida em km. A estimação da equação (46), via Mínimos Quadrados Ordinários⁴⁵, fornece as estimativas dos parâmetros α e β . Os dados necessários para a obtenção destas estimativas foram obtidas através do Sistema de Informações de Fretes – SIFRECA disponibilizado pelo ESALQ-LOG (2013). Seguindo o mesmo procedimento de Pinheiro (2012), dividiram-se as distâncias em dois intervalos: um intervalo contendo as distâncias inferiores a 300 km e outro intervalo com distâncias superiores a 300 km, a fim de se gerar estimativas que se ajustem melhor aos dados originais. A estimação da equação (46) foi feita no Software Stata 13, tendo sido gerado os resultados apresentados na Tabela 17.

Tabela 17 – Estimação das equações de frete

Intervalo	Equação	
Menor que 300 km	$Frete_i = 3,40 + 0,1512 \cdot Distancia_i$ (2,26) (16,56)	$R^2=0,6903$ p-valor $\alpha = 0,025$ p-valor $\beta = 0,000$
Maior que 300 km	$Frete_i = 17,8 + 0,1082 \cdot Distancia_i$ (13,48) (70,50)	$R^2 = 0,9155$ p-valor $\alpha = 0,000$ p-valor $\beta = 0,000$

Fonte: elaboração própria.

Estatística t entre parênteses. Erros padrões robustos à heterocedasticidade e correlação serial.

Para as ferrovias e hidrovias, utilizou-se as equações apresentadas na Tabela 17, aplicando-se um desconto de 20% para a obtenção do frete ferroviário e de 35% para a

⁴⁵ Foram testadas outras formas funcionais, além da linear. Porém, foi o modelo linear que gerou os resultados mais robustos.

obtenção do frete hidroviário. Desconsideraram-se eventuais custos de transbordo no cálculo dos fretes.

Conforme já mencionado, neste trabalho será estimado o consumo de combustível em cada um dos modais. Para isso é necessária a informação a respeito do consumo específico de combustível em cada um dos modais.

Normalmente, trabalhos como o de Messer (2015) ou Ministério do Meio Ambiente (2014) consideram que o consumo de combustíveis do modal rodoviário depende da frota de veículos, da capacidade de carga, de quantidade de carga que os caminhões transportam, entre outros. Neste trabalho, não se pretende estimar qual a quantidade de caminhões seria necessária para transportar a soja produzida, a fim de se evitar uma série de complicações adicionais. Seria possível obter uma aproximação da frota necessária para transportar a carga produzida apenas dividindo-se a quantidade de carga transportada pelas rodovias pela capacidade média dos caminhões. Essa divisão daria o número necessário de caminhões para transportar a carga. No entanto, este número não poderia ser considerado uma aproximação da frota de caminhões, pois certamente a quantidade de caminhões obtida seria uma sobrestimação da frota, já que um caminhão pode fazer o transporte de soja de várias vezes. Ou seja, o caminhão que transporta a soja de Lucas do Rio Verde (MT) para Santos (SP), pode ser o mesmo que transporta a soja de Sorriso (MT) para a estação ferroviária a ALLMN em Alto Araguaia (MT). Sendo assim, a quantidade de caminhões estimada não levaria em conta este fato.

O problema maior é que quando se considera a frota, tem que se levar em conta que o caminhão que vai ao destino pode voltar à origem vazio. Neste caso, o consumo de combustíveis seria alterado, pois o consumo específico depende da quantidade transportada. Além disso, a idade do caminhão também influi no consumo específico de combustível.

Em função destes fatores, considerou-se que o consumo específico de combustível das rodovias seria o consumo total de combustível do transporte rodoviário de cargas em 2013, dividido pela produção de transporte rodoviário de cargas em TKU. Assim, o consumo de combustível das rodovias foi obtido de uma forma agregada. Note-se que o valor obtido é apenas uma estimativa e pode não ser efetivamente o valor verificado para o transporte rodoviário de soja no ano de 2013.

De acordo com Messer (2015) o consumo de combustível do transporte de cargas para o ano de 2013 foi de 36.866 mil m³. De acordo com a Confederação Nacional do Transporte (2014a), a produção do transporte de carga das rodovias medida em TKU foi de

485.625 milhões. Assim, o consumo específico do modal rodoviário foi de 0,07591 litros/TKU.

Com relação ao consumo de combustível das ferrovias, o consumo específico foi obtido para cada concessionária, seguindo procedimento semelhante ao desenvolvido por Messer (2015), que utilizou o consumo médio específico de cada concessionária. Os dados apresentados na Tabela 18 foram obtidos na Agência Nacional de transportes Terrestres (2013).

Tabela 18 – Consumo específico médio das concessionárias ferroviárias

Concessionária	CE L/1000tku	Concessionária	CE L/1000tku	Concessionária	CE L/1000tku
ALLMN	2,375	EFC	2,095	FNS	4,103
ALLMO	15,935	EFVM	2,781	MRS	4,405
ALLMP	14,035	FCA	11,166	TLSA	15,572
ALLMS	9,288	EFPO	13,818	FTC	6,721

Fonte: Elaborado a partir de Agência Nacional de Transportes Terrestres (2013).

O consumo específico das hidrovias foi obtido em Messer (2015) e está dividido no consumo de óleo diesel (25%) e óleo combustível (75%) para o transporte via navegação interior. O consumo específico de óleo diesel em 2013 foi de 0,00413 litros/t.km e o consumo específico de óleo combustível 0,00255 litros/t.km.

A conversão do consumo de combustível em emissões de CO₂ é feita por meio do fator de emissão por tipo de combustível para o ano de 2013, disponibilizado pelo Ministério do Meio Ambiente (2014). O fator da emissão de CO₂ para diesel mineral é 2,603 kg CO₂/l. Como já ressaltado, o diesel brasileiro possuía, em 2013, uma mistura de 5% biodiesel. Por isso é necessário obter o valor do fator de emissão de CO₂ para o biodiesel, que segundo o Ministério do Meio Ambiente (2014) foi 2,431 kg CO₂/l. Já o fator das emissões de óleo combustível disse respeito a 3,116 kg CO₂/l, tendo sido calculado a partir de Messer (2015).

Quanto às políticas ambientais adotadas neste trabalho, é necessária a escolha dos preços da taxa de carbono, assim como o preço dos créditos e das permissões. Na Tabela 19, são apresentados os valores das taxas atualmente praticadas no mundo. Existe uma ampla dispersão de preços, variando de US\$ 1.00 até US\$ 83.00. Note-se que quando se considera os países em desenvolvimento, apenas o México aplica algum tipo de taxa. Neste caso, as

alíquotas variam de US\$ 1.00 a US\$ 4.00. Nos demais países, estão previstas a imposição destas taxas nos futuro, sendo que no Chile esse valor deve ser US\$5.00 e na África do Sul, este valor deve ser US\$ 12.00.

Tabela 19 – Taxas adotadas sobre as emissões de CO₂e

País	Ano	Preço t CO₂e	Uso da receita
Finlândia	1990	US\$ 48.00 ¹ e US\$83.00 ²	Redução de taxas sobre a renda Aumento receita do governo
Noruega	1991	US\$ 4.00 - US\$ 69.00 ³	Aumento da receita do governo
Suécia	1991	US\$ 168.00	Aumento da receita do Governo Compensação dos encargos trabalhistas
Dinamarca	1992	US\$ 31.00	40% subsídios ambientais 60% retorna para indústria
Colúmbia Britânica	2008	US\$ 28.00	Redução de taxas sobre a renda e sobre o crédito
Suécia	2008	US\$ 68.00	Redistribuída proporcionalmente entre indústria e consumidores
Islândia	2010	US\$ 10.00	Aumento da receita do governo
Irlanda	2010	US\$ 28.00	Aumento da receita do governo Redução do déficit do governo
Japão	2012	US\$ 2.00 até US\$ 3.00	Investimento em energia limpa e eficiência energética
Reino Unido	2013	US\$ 15.75	Redução de outras taxas
México	2014	US\$ 1.00 a US\$ 4.00 ³	Aumento da Receita do governo
França	2014	US\$ 10.00, US\$ 20.00 ⁴ US\$ 30.00 ⁵	Fundo para o plano de transição de energia.
África do Sul	2016 ^a	US\$ 12.00	Redução de taxas sobre a renda
Chile	2018 ^a	US\$ 5.00	Sistema Educacional
Austrália	2012 ^b	US\$ 21.54	Redução de taxas sobre a renda

Fonte: Kennedy, Obeiter e Kaufman (2015).

1: combustível de aquecimento, 2: combustíveis usados no trânsito, 3: dependendo do combustível, 4: em 2015, 5: em 2016. a: planejado, b: revogado em 2014.

Neste trabalho, será seguida a estratégia de diversos autores, que consiste em simular os efeitos da adoção de diversos níveis de taxa. Sendo assim, os valores considerados serão os praticados pelo Chile, Austrália e Finlândia (US\$ 83.00), convertidos para Reais.

Com relação ao preço do crédito/permissão, no Brasil, a BM&FBovespa realizava leilões de créditos, cujo valor mínimo era de € 2,70/t. De acordo com os dados da Tabela 20, o preço do crédito/permissão variou de US\$ 1.00 até US\$ 24.00. Portanto, serão considerados o preço mínimo cobrado pela BM&FBOVESPA e o valor cobrado pela União Europeia (US\$ 9.00), um dos mercados mais organizados da comercialização de créditos de carbono, tanto para o mecanismo de compra e venda de créditos de carbono, quanto para o mecanismo de compensação das emissões.

Tabela 20 – Preço do crédito/permissão de carbono

Local	Ano	Preços (2013)	Setores
União Europeia	2005	US\$ 9.00	Indústria, eletricidade, aviação.
Nova Zelândia	2008	US\$ 1.00	Indústria, floresta, transporte, lixo.
Suíça	2008	-	Eletricidade, construção.
Iniciativa regional de GEE Nordeste EUA ^a	2009	US\$ 3.00	Eletricidade
Califórnia ^a	2013	US\$ 11.00	2013: Indústria, eletricidade 2015: transporte, distribuição de combustíveis.
Austrália ^b	2012	US\$ 21.54	Todas as grandes fontes de emissão
Quebec ^c	2013	US\$ 10.00	2013: Indústria, eletricidade 2015: transporte, distribuição de combustíveis.
Pilotos subnacionais chineses	2013 2014	US\$ 4.00 a US\$ 11.00 ^d	Indústria, eletricidade, construção, transporte.
Cazaquistão	2013	-	Indústria, transporte, eletricidade, agricultura.
Coreia do Sul ^e	2015	-	Indústria, eletricidade.

Fonte: Kennedy, Obeiter e Kaufman (2015).

a: Programa Subnacional Americano, b: revogado em 2014, c: Programa Subnacional canadense, d: varia de acordo com a província, e: planejado.

5 RESULTADOS

Conforme mencionado no capítulo anterior, neste capítulo serão analisados os efeitos de possíveis políticas ambientais sobre as escolhas de transporte de carga. Para tanto, a soja foi a mercadoria considerada, uma vez que, como já mencionado, foi a principal *commodity* agrícola transportada nas ferrovias.

Este capítulo foi dividido em 5 seções. Na primeira seção serão apresentados os resultados referentes ao cenário base, ou seja, o cenário que tenta reproduzir o que de fato ocorreu no transporte da soja para o ano de 2013. Sendo assim, existia uma restrição acerca da identificação dos terminais de transbordo em que a soja foi embarcada. Dados obtidos pela lei de acesso à informação, por meio da ANTT, apontaram quais foram os terminais de embarque e qual a quantidade embarcada de soja nestes terminais.

A segunda seção também aborda a configuração ferroviária e hidroviária do ano de 2013, porém permitindo que a soja embarque em qualquer terminal de transbordo. Neste caso será apresentado o cenário geral, que consiste na utilização de terminais que não embarcaram a soja no ano de 2013, além dos terminais utilizados no cenário base. O objetivo deste cenário é mostrar, caso houvesse capacidade suficiente, se outros terminais seriam utilizados em decorrência de uma política ambiental.

Na terceira seção será considerado o cenário de expansão da malha ferroviária e hidroviária de acordo com os projetos propostos no PAC (I e II), no PIL e no PHE. Estes projetos foram divididos em duas categorias: (1) projetos que já estão em fase de implementação – cenário expansão e (2) projetos que ainda não saíram do papel – cenário futuro.

A quarta seção trará a comparação dos cenários até então analisados, a fim de se verificar como os impactos das medidas adotadas podem variar de acordo com a distribuição dos terminais de embarque ferroviário e hidroviário. Por isso, até esta parte do trabalho, será mantida a quantidade de produção da soja do ano de 2013, já que assim será possível verificar como variam os efeitos das medidas de mitigação analisadas, a partir de quantidades produzida e exportada constantes.

Já na quinta seção será utilizada a projeção para a safra 2024/2025 de aumento de 33,9% na produção de soja e um aumento de 42,1% das exportações, de acordo com o estudo feito pelo Ministério da Agricultura, Pecuária e Abastecimento (2015). Neste caso, se fará a suposição de que todos os projetos de expansão considerados neste trabalho estarão

prontos. Não haverá restrições ao embarque mínimo de soja nos portos. Este cenário será chamado de cenário crescimento da produção.

Em todos os cenários serão simulados os efeitos das políticas ambientais propostas: imposição de uma taxa sobre as emissões de CO₂, possibilidade de compra e venda de créditos de carbono e mecanismo de compensação das emissões. O mecanismo de compensação tem o mesmo efeito que o mecanismo de compra e venda de créditos de carbono, quando a meta de redução está abaixo da possibilidade de cada modal. Neste caso, seria necessária a compra de créditos de carbono, independentemente de qual mecanismo for adotado. Diferentes efeitos, neste caso, ocorreriam apenas se o preço do crédito de carbono fosse diferente entre tais mecanismos.

Mas, quando for possível obter emissões abaixo do limite estabelecido, os dois mecanismos possuem efeitos distintos. Isso porque, no caso do mecanismo de compra e venda de créditos de carbono, é possível a venda destes créditos quando as emissões estão abaixo da meta. No caso da compensação, não é possível vender créditos, apenas comprá-los. Sendo assim, nesta situação, no mecanismo de compra e venda de créditos de carbono, o custo de transporte será mais baixo que no mecanismo de compensação das emissões.

Desta forma, os resultados do mecanismo de compensação só serão reportados quando houver a possibilidade de venda de créditos de carbono. Do contrário, os efeitos destes mecanismos serão os mesmos, partindo-se da premissa que o preço do crédito é o mesmo em ambos os mecanismos.

Outro grupo de medidas será chamado de medidas estruturais, no sentido de que tratam de variações na capacidade de embarque nos terminais de transbordo e nos portos. Mesmo em cenários cuja configuração logística implica a possível construção de novas ferrovias e hidrovias, serão atribuídos limites hipotéticos ao embarque da soja, sendo que posteriormente estes limites serão suspensos. Espera-se, com isso, verificar como o aumento da capacidade de modais menos poluentes pode atuar como uma medida de mitigação, sem, contudo ser designado para isso.

Serão consideradas também medidas de desenvolvimento tecnológico, como a mudança do padrão de combustível: adoção de 50% de biodiesel sobre o combustível utilizado em todos os modais. Será considerado também o cenário em que todo combustível consumido é do tipo biodiesel. Estes tipos de medidas, apesar de não envolverem desenvolvimento tecnológico diretamente, supõem que o motor dos caminhões não seja afetado pelo uso de biodiesel.

Além disso, será considerado um desenvolvimento tecnológico que torne os motores dos caminhões mais eficientes, de forma que ocorra um aumento de 10% na eficiência energética no modal rodoviário (esta eficiência energética pode se estender aos demais modais).

Espera-se que com estas divisões, a análise dos resultados possa ser apresentada de uma forma que facilite tanto a leitura quanto a análise dos resultados encontrados nesta pesquisa.

5.1 Análise da simulação no cenário base

Como já destacado, o cenário base é aquele em que se busca obter resultados com um grau de aderência maior à realidade. Para que o modelo gerasse resultados próximos ao que se verificou no ano base, houve a necessidade de se calibrar o preço do frete⁴⁶, para que a quantidade de soja transportada nos modais ferroviário e hidroviário gerada no modelo de otimização fosse semelhante à quantidade apontada pelos dados da Agência Nacional de Transportes Terrestres (2015b) e Agência Nacional de Transportes Aquaviários (2014). Neste caso, o frete obtido é apenas um parâmetro, que busca refletir o preço do transporte de carga em cada um dos modais analisados.

Cabe destacar ainda que o comportamento relativo dos valores de fretes tem uma importância maior que o valor absoluto dos mesmos. Assim, para esta pesquisa é mais relevante verificar como o valor monetário total varia em função das medidas adotadas, que o valor monetário absoluto por si só. Mesmo porque, além do frete, existem outros componentes na função objetivo que foram desconsiderados desta análise. O mesmo pode ser dito com relação às emissões e ao consumo de combustível, que foram estimados de forma agregada, sem levar em consideração certos fatores que, possivelmente, inviabilizariam a simulação pretendida.

A Tabela 21 apresenta os resultados para a simulação do cenário base, com a minimização do custo de transporte, minimização do custo ambiental e minimização das emissões de CO₂. Para o cálculo do custo ambiental, considerou-se que a tonelada emitida de CO₂ equivalia a R\$ 100,00. É importante ressaltar que não se pretende afirmar que o dano ambiental seja equivalente a R\$ 100,00, uma vez que tal valor pode ser considerado relativamente baixo frente aos possíveis danos causados pelo aquecimento global. Como não

⁴⁶ Foi necessário elevar o valor do frete da origem até o destino em 50% e reduzir o valor do frete da origem até o transbordo em 50%. Note que isso só foi possível porque se conhecia quais terminais embarcaram a soja no ano de 2013, bem como suas respectivas capacidades. Assim, o modelo foi calibrado em função da quantidade que deveria ser embarcada nos terminais ferroviários e hidroviários e não em função do valor do frete.

é objetivo deste trabalho, mensurar, em termos monetários, o valor do dano ambiental, optou-se por considerar este valor arbitrário, apenas para mostrar como o custo de transporte poderia variar se as emissões de CO₂ fossem incluídas no custo total.

Tabela 21 – Minimização do custo de transporte, do custo ambiental e das emissões no cenário base

	Minimização do custo de transporte	Minimização do custo ambiental	Minimização das emissões
Custo total	R\$ 73,06/t	R\$ 79,17/t	R\$ 74,05/t
Emissões CO ₂	62,15 kgCO ₂ /t	61,92 kgCO ₂ /t	61,14 kgCO ₂ /t
Consumo de combustível	2.812,91 mil m ³	2.806,07 mil m ³	2.771,18 mil m ³

Fonte: Elaboração própria.

Os dados da Tabela 21 permitem inferir que, quando se considera o impacto ambiental da atividade de transporte da soja, o custo total se tornaria mais elevado. Com isso, haveria uma redução das emissões em função deste custo mais elevado. No entanto, a redução seria pequena, uma vez que a capacidade dos modais menos poluentes é limitada. Quando se considera a minimização das emissões, percebe-se que as emissões correspondentes são menores que as obtidas no modelo de minimização do custo de transporte.

Um ponto a ser destacado se refere à capacidade dos modais ferroviário e hidroviário, que não foi esgotada em sua totalidade quando foram minimizados os custos de transporte. Os resultados do modelo de minimização do custo de transporte indicaram que a carga embarcada nas ferrovias foi equivalente a 94,54% do que realmente se verificou no ano de 2013. Já para as hidrovias, a quantidade embarcada foi equivalente a 97,34% ao que de fato ocorreu no ano de 2013.

No entanto, este fato não parecer ter influenciado o resultado da minimização das emissões. Isto porque, quando se compara a tonelagem transportada em cada modal, percebe-se pela Tabela 22 que se manteve quantidade de carga embarcada nas hidrovias. Por outro lado, o aumento de carga embarcada nas ferrovias aumentou apenas 0,57%. De forma que, ainda assim, a capacidade⁴⁷ das ferrovias e das hidrovias não se esgota quando o objetivo é minimizar as emissões.

⁴⁷ Isto não implica que a capacidade das ferrovias e hidrovias é a ideal. Muito pelo contrário. Como será visto nas próximas seções, a capacidade dos terminais ferroviários e hidroviários desempenha um papel fundamental na redução das emissões.

Tabela 22 – Tonelada transportada no modelo de minimização do custo e no modelo de minimização das emissões

	Minimização do custo	Minimização das emissões
Ferrovias	14.502 mil t	14.585 mil t
Hidrovias	4.360,1 mil t	4.360,1 mil t
Rodovias	98.470 mil t	98.553 mil t

Fonte: elaboração própria.

Desta forma, ainda que a capacidade dos modais menos poluentes não tenha se esgotado, pode-se dizer que a queda nas emissões é relativamente pequena quando o objetivo é minimizar as emissões. Como o objetivo desta simulação é o oposto do objetivo de minimizar o custo de transporte, as combinações de origem e destino e de origem e terminais de embarque podem ter sido influenciadas pelo objetivo de emissões mínimas. Na prática, é pouco provável que o objetivo do transportador ou do produtor seja minimizar as emissões, já que esta decisão pode levar a uma elevação do custo de transporte.

Assim, percebe-se que de fato pode existir um *trade-off* entre minimização do custo de transporte e minimização das emissões, já que o custo do transporte, quando se minimiza as emissões, é maior que quando o próprio custo é minimizado. No entanto, este *trade-off* talvez não existiria se a capacidade das ferrovias e hidrovias fosse suficiente para atender a demanda.

Na simulação de minimização do custo de transporte, houve a preocupação de se comparar as emissões obtidas com as emissões totais verificadas no ano de 2013, no setor de transporte de cargas. Dados do Sistema de Estimativa de Emissão de Gases de Efeito Estufa (2015), apresentados na Figura 17, mostram que as emissões totais de CO₂ do transporte de cargas no ano de 2013 ocorreram principalmente devido ao uso das rodovias, de forma que 93% das emissões se originaram deste modal. Em segundo lugar, o modal hidroviário⁴⁸ foi responsável por 4% das emissões, enquanto as ferrovias foram responsáveis por 3% das emissões.

⁴⁸ Foi considerado apenas o valor medido em emissões e não em *bunker*.

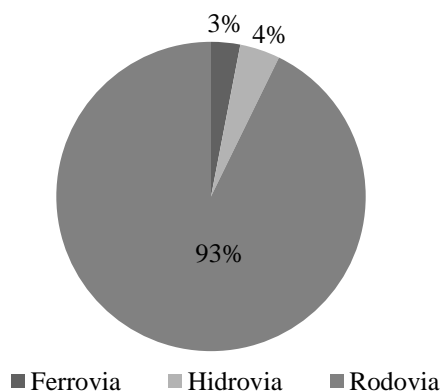


Figura 17 – Participação das emissões de CO₂ no transporte de cargas no ano 2013 por modal de transporte

Fonte: elaboração própria a partir de Sistema de Estimativa de Gases de Efeito Estufa (2015).

Os resultados obtidos no modelo de minimização do custo também mostram que as emissões do transporte de soja decorrem principalmente das rodovias. Quando se compara com as emissões gerais do transporte de carga em 2013, a participação das rodovias no total emitido é mais elevada. Assim, como se verifica na Figura 18, as emissões das rodovias seriam equivalentes a 96% do total emitido.

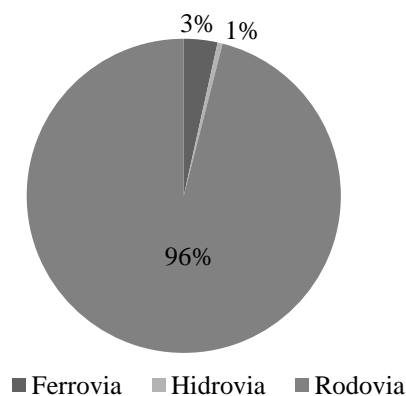


Figura 18 – Participação das emissões estimadas de CO₂ por modal de transporte

Fonte: elaboração própria.

Ainda de acordo com a Figura 18, as ferrovias responderam por 3% das emissões de CO₂ e as hidrovias foram responsáveis por 1% dessas emissões. Comparando estes resultados com os da Figura 17, é possível verificar que a participação das ferrovias nas emissões de CO₂ foi a mesma tanto no modelo estimado quanto no verificado no ano de 2013 para o transporte de cargas. Já nas hidrovias, houve uma diferença na participação das

emissões de CO₂, já que no modelo estimado tal participação foi de 1% e no verificado em 2013 foi de 4%. Tal fato indica, possivelmente, que o transporte de soja não utiliza tão intensivamente o modal hidroviário quanto os outros produtos. Quando se considera o transporte geral de cargas, a participação das emissões de CO₂ pelas hidrovias é mais elevada, o que indica uma utilização maior do modal.

Ainda comparando as emissões de CO₂ estimadas pelo modelo com as emissões verificadas no transporte de cargas no ano de 2013, é possível perceber, pela Tabela 23, que as emissões de CO₂ oriundas das rodovias equivaleram a 7,61% do total emitido pelo transporte de cargas em 2013. As emissões estimadas das ferrovias equivaleram a 8,37% e as emissões estimadas das hidrovias equivaleram a 0,91%.

Tabela 23 – Emissões de CO₂ estimadas x Emissões de CO₂ no transporte de cargas medidas em toneladas

	Emissões estimadas	Emissões verificadas
Ferrovias	252.470	3.014.925
Hidrovias	37.662	4.158.846
Rodovias	7.001.900	91.950.478

Fonte: elaboração própria a partir de Sistema de Estimativa de Gases de Efeito Estufa(2015).

Estes resultados foram apresentados apenas para mostrar que as emissões calculadas pelo modelo foram inferiores às emissões totais originadas pelo transporte de cargas em 2013. Uma vez que não estão disponíveis informações à respeito das emissões no transporte de cargas por produto, é válido comparar as estimativas produzidas com algum valor disponível nas bases de dados. Portanto, era esperado que as estimativas das emissões decorrentes do transporte de soja fossem inferiores às emissões totais do transporte de cargas no ano de 2013. Contudo, não se pretende afirmar que tais emissões foram as que realmente se verificaram para o transporte da soja no ano de 2013. Estas estimativas serão apenas utilizadas para verificar como as emissões podem variar em função de medidas de mitigação, mudanças na infraestrutura logística ou variações nos padrões de combustíveis.

O próximo passo na análise é verificar quais poderiam ser os eventuais efeitos da adoção de determinadas políticas ambientais. Na Tabela 24 são apresentados os resultados da adoção de taxas sobre as emissões de CO₂. As alíquotas praticadas foram obtidas por meio

da conversão das taxas cobradas no Chile (US\$ 5.00), na Austrália (US\$ 21.54) e na Finlândia (US\$ 83.00). O câmbio adotado foi o de dezembro de 2013, cujo valor era R\$ 2,3426/US\$⁴⁹.

Tabela 24 – Efeitos da adoção de uma taxa no cenário base

	Taxa de R\$ 12,00/ tCO₂	Taxa de R\$ 50,00/ tCO₂	Taxa R\$ 200/ tCO₂
Custo total	R\$ 73,80/t	R\$ 76,10/t	R\$ 85,38 /t
Emissões CO ₂	62,15 kgCO ₂ /t	62,06 kgCO ₂ /t	61,82 kgCO ₂ /t
Consumo de combustível	2.812,91 mil m ³	2.811,17 mil m ³	2.801,35 mil m ³
Receita do Governo	R\$ 87,5 milhões	R\$ 364,4 milhões	R\$ 1,45 bilhões

Fonte: elaboração própria.

A adoção de uma taxa representa uma pequena redução das emissões e eleva o custo do transporte. Como a capacidade dos modais alternativos ao rodoviário é restrita, independentemente do valor da taxa sobre as emissões, a redução é pequena. Por exemplo, quando a taxa aumenta de R\$ 12/tCO₂ para R\$ 50/tCO₂, a redução das emissões de CO₂ por tonelada transportada é de 0,15%.

Por outro lado, o custo total varia em uma proporção maior que a redução das emissões: aumento de 3,11%. Cabe destacar, então, que o efeito da adoção de uma taxa, no cenário base, seria o de aumentar a receita do Governo. Em que pese o fato que em termos orçamentários a adoção de uma taxa favoreceria o governo, em termos ambientais não se teria um grande efeito. Para o transportador, a adoção de uma taxa significaria um aumento dos custos de operação, valor este que seria igual à receita arrecadada pelo governo, podendo chegar a R\$ 1,45 bilhões se a alíquota fosse de R\$ 200,00/tCO₂.

Sendo assim, dada a atual configuração do transporte, o único beneficiado pela adoção de uma taxa seria o governo, em virtude do controle do orçamento. Porém, o sentido ambiental da adoção de uma taxa não seria alcançado, já que a redução das emissões seria muito baixa.

Uma possibilidade mais flexível que a adoção de uma taxa seria o funcionamento do mercado de carbono, com a possibilidade de venda e compra de créditos. Nesta análise, há a imposição de um limite sobre as emissões totais do setor de transporte. Se as emissões forem menores que o limite estabelecido, seria possível obter créditos e vendê-

⁴⁹ Os valores praticados foram arredondados. Por exemplo, a taxa cobrada na Finlândia, quando convertida, seria US\$ 194.44.

los. Isso implicaria uma receita adicional, que no modelo acarretaria uma redução dos custos de transporte.

Por outro lado, se as emissões não fossem menores que o limite estabelecido, seria necessário comprar créditos. Este fato representaria um aumento no custo total do transporte, uma vez que para realizar a atividade de transporte, as emissões que ultrapassassem o limite estabelecido deveriam ser compensadas pela compra de créditos⁵⁰.

Na Tabela 25 é possível verificar que, em virtude da baixa capacidade dos modais menos poluentes, seria necessária a compra de créditos para que o transporte pudesse ser feito em sua totalidade. Neste caso, o gasto com a compra de créditos variaria conforme o preço do crédito e conforme a meta de redução estabelecida.

Tabela 25 – Efeitos da adoção do mecanismo de compra e venda de créditos de carbono no cenário base

	Limite 20% Crédito: R\$ 8,25	Limite 20% Crédito: R\$ 21,00	Limite 43% Crédito: R\$ 8,25	Limite 43% Crédito: R\$ 21,00
Custo total	R\$ 73,16/t	R\$ 73,32/t	R\$ 73,28/t	R\$ 73,62/t
Emissões CO ₂	62,15 kgCO ₂ /t	62,15 kgCO ₂ /t	62,15 kgCO ₂ /t	62,15 kgCO ₂ /t
Consumo de Combustível	2.812,91mil m ³	2.812,91mil m ³	2.812,91mil m ³	2.812,91mil m ³
Crédito comprado	R\$ 12,03 milhões	R\$ 30,63 milhões	R\$ 25,87 milhões	R\$ 65,85 milhões

Fonte: elaboração própria.

Para que seja possível a atingir a meta de redução de 20% das emissões, seria necessária a compra de aproximadamente 1,495 milhões de créditos de carbono. Em termos relativos, o aumento do custo total é pequeno quando se compara com o valor obtido na simulação de minimização do custo de transporte. Nota-se, entretanto, que o aumento do custo total, em termos absolutos, foi o equivalente ao valor gasto na compra de créditos de carbono. Quando o preço do crédito é de R\$ 8,25, o gasto para se obter a redução proposta é de R\$ 12,03 milhões. Se há um aumento do preço do crédito para R\$ 21,00, as emissões resultantes são as mesmas; porém, o gasto com a compra dos créditos seria de R\$ 30,63

⁵⁰ Existe a possibilidade de se assumir que cada modal reduziria as emissões no valor estabelecido pela autoridade reguladora. Neste caso, se o limite estabelecido fosse de 20%, tanto as rodovias quanto as ferrovias deveriam reduzir as emissões em 20%. Quando se estabelece um limite sobre as emissões totais, permite-se uma alocação mais eficiente entre os modais, já que as emissões de cada modal podem variar para atingir o limite estabelecido, ou para obter a menor quantidade de créditos possível.

milhões. É importante destacar que as emissões continuariam as mesmas, mas com a compra de créditos equivalendo a uma redução de 20% ou 43% das emissões. Portanto, assume-se que sempre haverá oferta de créditos para atender a demanda. E ainda, como a capacidade dos modais menos poluentes é limitada, não foi possível a venda de créditos por estes modais.

Outra medida que poderia ser adotada seria a compensação das emissões. Neste caso, não seria permitido vender créditos se as emissões estivessem abaixo da meta estabelecida. Mas aqueles modais que não atingissem a meta estabelecida teriam que comprar créditos para continuar poluindo. Como os modais ferroviário e hidroviário operam com a capacidade próxima ao limite, os efeitos da política de compensação são os mesmos dos efeitos do mecanismo de compra e venda de créditos de carbono. Os efeitos só seriam diferentes caso houvesse a possibilidade de venda de créditos de carbono. Neste caso, o mecanismo de compensação apresentaria um custo mais elevado em relação ao mecanismo de compra e venda de créditos, pois não há a possibilidade de se obter receita com a venda de créditos⁵¹.

O que se percebe até o presente momento é que o sucesso, em termos ambientais, de uma política de mitigação, depende da capacidade de embarque dos modais menos poluentes ou do funcionamento de um mercado de carbono que ofertasse os créditos para o setor de transporte. Independente da política haveria a elevação do custo de transporte o que, do ponto de vista do transportador, seria prejudicial. Assim, a perda de bem-estar do transportador poderia não ser compensada por um aumento de bem-estar decorrente da redução das emissões, pois a redução seria mínima no caso da adoção de uma taxa.

Já no caso do mecanismo de compra e venda de créditos, o sucesso da política estaria sujeito à existência de um mercado regulado que fornecesse os créditos para o setor de transporte. Neste caso, o bem-estar poderia ser global se os créditos viessem de outro mercado que não o brasileiro. Para que o bem-estar fosse local, seria necessário que os créditos viessem do mercado brasileiro, como os gerados por atividades de reflorestamento.

Sendo assim, seria interessante analisar quais poderiam ser os impactos sobre as emissões caso houvesse um aumento de capacidade das ferrovias e hidrovias, já que, como verificado anteriormente, em virtude da capacidade limitada destes modais, as medidas de mitigação se mostraram pouco efetivas para reduzir as emissões.

⁵¹ Foi feita a simulação para comprovar que os resultados do mecanismo de compensação das emissões eram iguais aos do mecanismo de compra e venda de créditos de carbono. Estes resultados podem ser encontrados no Anexo C. Testou-se, inclusive, a situação em que a meta de redução estabelecida era 20% superior às emissões geradas, para verificar se a operacionalização do modelo captava tal possibilidade. Esta simulação também pode ser vista no Anexo C.

Considerando um aumento da capacidade atual das ferrovias e hidrovias, percebe-se uma situação diferente do observado até aqui. Como pode ser visto na Tabela 26 um aumento de 50% na capacidade das ferrovias e hidrovias leva a uma redução das emissões de CO₂. Neste caso, as emissões seriam 12,04% menores quando comparadas às emissões geradas no modelo de minimização do custo. Relembrando que no caso de minimização das emissões, a redução das mesmas era de 1,62%, observa-se que a capacidade dos terminais de embarque de modais menos poluentes é fundamental para a redução das emissões.

Tabela 26 – Efeitos de medidas estruturais no cenário base

	Aumento de 50% cap. embarque	Aumento de 100% cap. embarque	Ausência de limite de embarque	Aumento 100% capacidade portos
Custo total	R\$ 66,31/t	R\$ 62,13/t	R\$ 51,77/t	R\$ 68,69/t
Emissões CO ₂	54,67 kgCO ₂ /t	50,31 kgCO ₂ /t	46,05 kgCO ₂ /t	56,99 kgCO ₂ /t
Consumo de combustível	2,666,25 mil m ³	2.583,25 mil m ³	2.728,54 mil m ³	2.586,06 mil m ³

Fonte: elaboração própria.

Além da redução das emissões, uma elevação de 50% da capacidade levaria a uma redução no custo total de aproximadamente 9,23%. Assim, existem indícios de que a expansão dos modais menos poluentes pode ser positiva tanto para o transportador, que teria uma redução no custo de transporte, quanto para o meio ambiente, já que as emissões de CO₂ se reduziriam em quase 10%.

No entanto, quando não há limites ao embarque, o consumo de combustível se eleva. Assim, parece ser contraditório que neste caso tenha se obtido o menor nível das emissões de CO₂. Considerando-se as emissões de CO₂ divididas pela tonelada transportada, é possível verificar que a redução foi de 25,91% com relação ao o modelo em que não há qualquer mudança na infraestrutura. Porém, quando se considera as emissões absolutas, tal redução foi bem menor, de 2,96% apenas. Este fato ocorreu porque houve uma elevação na tonelagem transportada em todos os modais. Neste caso haveria uma elevação de 231,87 % no transporte hidroviário e 55,6% no ferroviário. Embora estes modais sejam menos poluentes que o rodoviário, o aumento das emissões ocorre porque a carga transportada nas rodovias também aumenta em 18,45%, já que é necessário o transporte rodoviário para se chegar aos terminais de embarque.

Em virtude deste resultado aparentemente inesperado, optou-se por simular a minimização das emissões considerando ilimitada a capacidade dos terminais ferroviários e hidroviários. Conforme pode ser visto na Tabela 27, quando o objetivo é minimizar o custo de transporte, as hidrovias são mais utilizadas, uma vez que se atribuiu um preço de frete mais baixo nas hidrovias que nas ferrovias.

Tabela 27 – Minimização do custo e minimização das emissões com capacidade irrestrita dos terminais de embarque no cenário base

		Minimização do custo de transporte	Minimização das emissões
Custo total		R\$ 51,77/t	R\$ 54,94/t
Emissões CO ₂		46,05 kgCO ₂ /t	40,56 kgCO ₂ /t
Consumo de combustível		2.728,54 mil m ³	2.411,93mil m ³
Tonelagem	Ferrovias	22.565 mil t	28.781 mil t
	Hidrovias	14.470 mil t	8.520,8 mil t
	Rodovias	116.640 mil t	116.910 mil t

Fonte: elaboração própria.

Percebe-se, neste caso, que quando o objetivo é a redução das emissões, o custo se eleva em 6,11%, sendo as emissões resultantes 11,92% menores em relação à simulação de minimização de custo de transporte. Analisando o consumo de combustível, nota-se que há uma redução no consumo do mesmo. Neste caso, há uma redução da quantidade transportada nas hidrovias de 41,1%, o que permitiu que a carga transportada pelas rodovias se mantivesse praticamente no mesmo patamar. Já nas ferrovias, houve um aumento da carga transportada de 27,55%.

É importante ressaltar que a redução do uso das hidrovias ocorreu, provavelmente, por causa da localização dos terminais de embarque hidroviários, uma vez que a distância que deve ser percorrida nas rodovias para se chegar aos terminais hidroviários pode ser maior que a distância para se chegar aos terminais ferroviários. Um indício deste fato é que a tonelada por quilômetro das rodovias se reduz em 15,36% quando o objetivo é minimizar as emissões.

Esta situação pode ser um indicativo de que, do ponto de vista ambiental, não basta apenas a existência de capacidade nos modais menos poluentes. Seria necessário que

houvesse uma distribuição mais adequada dos terminais de embarque, de forma que se reduzisse a intensidade do uso das rodovias.

Com relação à expansão dos portos⁵², os dados da Tabela 26 mostram que o aumento de 100% na capacidade dos mesmos reduz tanto as emissões de CO₂ quanto o custo de transporte. Porém, a magnitude de tais reduções é menor em relação às das reduções verificadas nas outras situações apresentadas na Tabela 26.

Uma das causas para a redução dos custos e das emissões, neste caso, é função da diminuição da quantidade embarcada em alguns portos do Sudeste, como o porto de Santos e o porto de Rio Grande. Por outro lado, como pode ser visto na Figura 19, aumenta o embarque nos portos de Santarém, Manaus, Ilhéus, Itajaí e Salvador. Assim, diminuem as distâncias percorridas pela soja, uma vez que há uma redução de 5,17% na tonelada transportada por quilômetro. No modal rodoviário, esta redução é de 8,43%, o que reforça o indício de redução da quantidade percorrida.

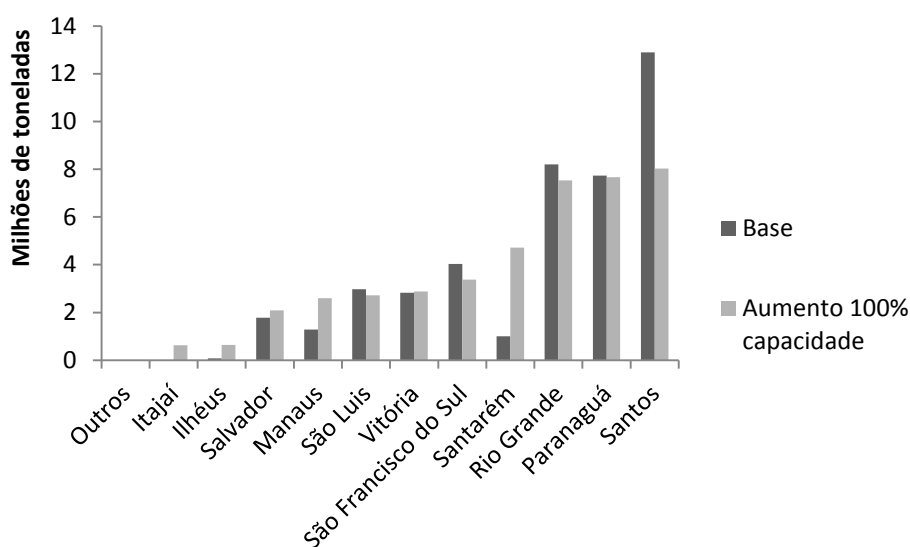


Figura 19 – Variação da quantidade embarcada nos portos em função da capacidade dos portos

Fonte: elaboração própria.

Percebe-se, pela Figura 19, que apesar da redução do embarque da soja no Porto de Santos, ainda assim este seria o principal porto para a exportação de soja no país, seguido de perto pelo Porto de Paranaguá e pelo porto de Rio Grande, o que implica manutenção da importância dos portos do Sudeste para a exportação da soja.

⁵² Neste caso foi relaxada a restrição de embarque mínimo nos portos, para que o modelo apontasse para a melhor situação.

Até este ponto da análise verificou-se que as rodovias poluem mais, como era esperado. Assim, pode ser argumentado que seria necessária a redução do uso das rodovias para que as emissões de CO₂ se reduzam. No entanto, se o combustível utilizado fosse menos poluente ou se o consumo de combustível fosse menor, talvez fosse possível reduzir as emissões sem penalizar o transporte rodoviário. Mesmo num cenário em que houvesse uma ampla oferta de terminais de embarque ferroviário e hidroviário, ainda assim seria necessário o uso das rodovias. Além disso, conforme Caixeta-Filho (1999), para curtas distâncias o modal mais competitivo seria o rodoviário.

Para não tratar o modal rodoviário como um ‘vilão’ para o meio ambiente, consideraram-se duas possibilidades: variação da mistura do biocombustível sobre os combustíveis utilizados e o aumento da eficiência energética nas rodovias e demais modais. Quanto ao aumento do uso de biocombustível, pode ocorrer a redução no custo do transporte, uma vez que o biodiesel é mais barato que o diesel convencional. Dados da União Brasileira de Biodiesel e Bioquerosene – Ubrabio (2015) mostram que, em média, em setembro de 2015 o preço do biodiesel era 19,19% menor que o preço do diesel. Adotou-se um desconto de 20% no preço dos fretes, como forma de se tentar captar uma possível redução no custo. Cabe destacar que este desconto seria proporcional à quantidade de biodiesel utilizado. Com relação ao aumento de eficiência dos transportes, aplicou-se um desconto de 10% no preço do frete, em virtude do menor consumo de combustível, isso porque, no cenário em questão, haveria uma redução de 10% no consumo do diesel.

É importante ressaltar que os efeitos destas medidas adotadas são simplistas ao extremo, ao passo que afirmam que o único componente que afetaria o custo médio do frete seria a quantidade consumida de combustível. Porém, é plausível supor que o preço do frete poderia ser reduzido em virtude da queda da quantidade de combustível utilizada ou pela utilização de um combustível que tenha um preço mais baixo.

Outros pontos importantes, que serão desconsiderados, são as possíveis variações nos preços dos combustíveis e dos biocombustíveis, decorrentes de variações na demanda. Por exemplo, o aumento do uso de biocombustível poderia pressionar o preço do mesmo, de forma que, no longo prazo, o preço do biodiesel poderia aumentar e do diesel diminuir frente a uma menor procura. Como esse fato foge do escopo desta pesquisa, considerou-se que esta diferença de preço se manteria no longo prazo.

Como era esperado, o uso maior de biocombustível levaria a uma redução do custo total e também a uma redução das emissões, como pode ser visto na Tabela 28.

Tabela 28 – Medidas de desenvolvimento tecnológico no cenário base

	50% biodiesel no combustível	Uso integral de biocombustível	Aumento da eficiência das rodovias (10%)	Aumento da eficiência todos os modais (10%)
Custo total	R\$ 65,75/t	R\$ 58,45/t	R\$ 68,03/t	R\$ 65,75/t
Emissões CO ₂	60,25 kgCO ₂ /t	58,22 kgCO ₂ /t	57,00 kgCO ₂ /t	55,93 kgCO ₂ /t
Δ% emissões CO ₂	- 3,05%	- 6,32%	- 8,28%	- 10%
Consumo de combustível	2.811,09 mil m ³	2.811,09 mil m ³	2.554,52 mil m ³	2.531,61 mil m ³

Fonte: elaboração própria.

Caso se altere o padrão de combustível de forma que sejam misturados 50% de biodiesel no óleo diesel, isto levaria a uma redução das emissões em 3,05%, uma vez que o fator de emissão dos biocombustíveis é menor que o fator de emissão do diesel. O consumo de combustíveis ficaria praticamente inalterado, tendo uma redução de apenas 0,06% com relação ao modelo de minimização de custo. Se todo o combustível utilizado fosse do tipo biodiesel, haveria uma redução de 6,32% das emissões de CO₂.

Nesta análise desconsiderou-se que o consumo maior de biocombustíveis poderia impactar na expansão das fronteiras agrícolas, o que levaria ao aumento das emissões em função de mudanças no uso da terra. Conforme mencionado por Lima e Gurgel (2012) e por Santos (2013), pode ocorrer um aumento das emissões de CO₂ em função de um aumento da produção, que podem ser ou não compensadas a partir do uso de um combustível menos poluente. Portanto, devido às limitações do método utilizado neste trabalho, este impacto será desconsiderado.

A redução das emissões poderia ser ainda maior se houvesse um aumento de eficiência de, por exemplo, 10% nas rodovias, de forma que o consumo específico por TKU se reduzisse em 10%. Neste caso, as emissões se reduziriam em 8,28%. Se o aumento de eficiência acontecesse em todos os modais, a redução das emissões seria de 10%. Comparando-se os dois cenários, nota-se que a eficiência no modal rodoviário é a principal responsável pela redução das emissões. Isso porque, como já mencionado, o modal rodoviário é o maior responsável pelas emissões de CO₂. É importante ressaltar que, nestes cenários de aumento do uso de biocombustível, considerou-se que o modal hidroviário deixaria de consumir óleo combustível, passando a consumir apenas óleo diesel misturado com o biodiesel, como nos demais modais. Por isso, houve uma pequena redução do consumo total

de combustível no cenário de aumento da participação do biodiesel, uma vez que o consumo específico do diesel é menor que o do óleo combustível.

Comparando todas as medidas com relação ao modelo de minimização de custo de transporte, percebe-se pela Tabela 29 que as medidas de mitigação convencionais, como a adoção de uma taxa, provocariam uma redução mínima nas emissões de CO₂.

Tabela 29 – Comparação das medidas analisadas no cenário base

	Minimização do Custo de transporte	Taxa de R\$ 50,00/tCO₂	Limite 20% Crédito: R\$ 21,00	Aumento de 100% da capacidade
Custo total	R\$ 73,06/t	R\$ 76,10/t	R\$ 73,32/t	R\$ 62,13/t
Emissões CO ₂	62,15 kgCO ₂ /t	62,05 kgCO ₂ /t	62,15 kgCO ₂ /t	50,31 kgCO ₂ /t
Δ% custo total	-	4,16%	0,36%	- 14,96%
Δ% emissões CO ₂	-	-0,16%	0%	- 19,05%

	Aumento de 100% cap. portos	Uso integral de biodiesel	Aumento eficiência modais (10%)
Custo total	R\$ 68,69	R\$ 58,45/t	R\$ 65,75/t
Emissões CO ₂	56,99 kgCO ₂ /t	58,22 kgCO ₂ /t	55,93 kgCO ₂ /t
Δ% custo total	- 5,98%	- 19,99%	- 10%
Δ% emissões CO ₂	- 8,30%	- 6,32%	- 10%

Fonte: elaboração própria.

A Tabela 29 mostra que, no caso da adoção do mecanismo de compra e venda de créditos de carbono, a redução se daria de forma indireta, uma vez que seria necessária a compra de crédito de carbono. Essa compra representaria um custo adicional para o transportador, que como já mencionado seria de aproximadamente R\$ 30,6 milhões caso o preço do crédito fosse de R\$ 21,00/tCO₂.

Seria possível obter a redução das emissões diretas do setor de transportes, se fosse, por exemplo, dobrada a capacidade de embarque das ferrovias e hidrovias. Neste cenário, seria obtida a segunda menor quantidade de emissões (- 19,05%), considerando-se que no mecanismo de compra e venda de créditos de carbono a redução seria de 20%. Note-se que o menor custo seria obtido no caso em que ocorresse o uso integral de biocombustível. Porém, a redução das emissões não seria tão baixa como no caso de aumento da capacidade de embarque das ferrovias e hidrovias.

É interessante notar que, pelo menos na atual configuração de transporte, seria possível se obter níveis menores de emissão sem, contudo, onerar o transportador. Os indícios mostram que a infraestrutura logística pode desempenhar um papel importante na redução das emissões. Mesmo porque, se houvesse um aumento da capacidade dos portos, seria possível se obter uma redução das emissões, já que as distâncias a serem percorridas seriam menores. Assim, alterações na configuração logística poderiam levar a um aumento do bem-estar por dois motivos: redução do custo de transporte e redução das emissões de CO₂.

Uma vez que a capacidade de embarque das ferrovias se mostrou um fator importante nesta análise, será considerado o cenário em que a configuração do transporte ferroviário e hidroviário compreenda a malha existente no ano de 2013, independentemente de ter transportado soja ou não.

5.2 Análise da simulação no cenário geral

Nesta seção serão apresentados os resultados referentes a uma situação em que não há restrição sobre em quais terminais ferroviários a soja deveria embarcar. Cabe destacar que não foram considerados todos os trechos disponíveis no ano de 2013. Trechos que correspondiam a fluxos de importação e que não eram factíveis não foram considerados. Por exemplo, o trecho com origem em Cubatão (SP) e destino Rondonópolis (MT), por exemplo, pode ser considerado como um trecho não factível.

Com relação à capacidade, optou-se por considerar a quantidade embarcada de certos produtos como a capacidade de embarque. Em ferrovias que transportaram tanto granéis agrícolas como minério de ferro, limitou-se a capacidade em função dos produtos agrícolas. Já em trechos que não transportaram granéis agrícolas, limitou-se a capacidade de embarque pela quantidade de carga transportada. Desconsiderou-se, também, a movimentação de granéis líquidos.

A Tabela 30 traz os resultados das simulações referentes à minimização de custo do transporte, custo ambiental e minimização das emissões. Mesmo com maior capacidade de embarque, quando se considera o custo ambiental, o custo é mais elevado que o custo obtido no modelo que desconsidera o componente ambiental. Neste caso, quando se considera tal componente, o custo se eleva em 7,41%. Porém, as emissões são 1,11% menores quando se considera o custo ambiental. O que era esperado, já que neste caso as emissões são um componente adicional no custo total de transporte. Como o objetivo é minimizar o custo, era esperado que ocorresse uma redução nas emissões de CO₂.

Tabela 30 – Minimização do custo de transporte, do custo ambiental e das emissões no cenário geral

	Minimização do custo de transporte	Minimização do custo ambiental	Minimização das emissões
Custo total	R\$ 59,81/t	R\$ 64,24/t	R\$ 60,18/t
Emissões de CO ₂	48,50 kgCO ₂ /t	47,96 kgCO ₂ /t	44,55 kgCO ₂ /t
Consumo de combustível	2.610,35 mil m ³	2.597,99 mil m ³	2.474,58 mil m ³

Fonte: Elaboração própria.

Quando se considera a minimização das emissões, o custo total se eleva em aproximadamente 0,62% em relação à minimização do custo de transporte. No entanto, ocorre uma redução significativa das emissões, de aproximadamente 8,14%. É válido destacar que, neste caso, existe uma maior capacidade das ferrovias e hidrovias, o que possibilita a redução das emissões, diferentemente do apresentado na seção anterior, em que a simulação de minimização das emissões tinha gerado uma redução de apenas 1,62%.

Com relação ao consumo de combustível, no cenário de minimização das emissões, como o transporte é direcionado para modais menos poluentes, há evidentemente uma redução do consumo energético.

Nesta seção, optou-se também por se simular os efeitos da adoção de uma taxa sobre as emissões de dióxido de carbono. Mantiveram-se os preços praticados, para que fosse possível comparar, em seções futuras, a variação dos efeitos das políticas de acordo com a configuração do transporte intermodal.

Na Tabela 31, é possível perceber que quanto maior a alíquota, maior a redução das emissões de CO₂. No entanto, comparando com a simulação de minimização de custo de transporte sem qualquer medida de mitigação, as reduções são pequenas. Por exemplo, quando se adota uma alíquota de R\$ 12,00/tCO₂, o custo aumenta 0,88% e as emissões se reduzem em 0,14%. Assim, a adoção deste valor de taxa provoca uma redução das emissões em menor magnitude que o aumento do custo, ou seja, o benefício decorrente da adoção desta taxa é menor que o custo aplicado ao transportador. Para o governo há um incremento de receita de mais de R\$ 81 milhões.

Tabela 31 – Efeitos da adoção de uma taxa no cenário geral

	Taxa de R\$ 12,00/ tCO₂	Taxa de R\$ 50,00/ tCO₂	Taxa de R\$ 200/ tCO₂
Custo total	R\$ 60,34/t	R\$ 62,13/t	R\$ 68,64 /t
Emissões de CO ₂	48,43 kgCO ₂ /t	48,33 kgCO ₂ /t	47,32 kgCO ₂ /t
Consumo de combustível	2.608,86 mil m ³	2.605,95 mil m ³	2.577,19 mil m ³
Receita Governo	R\$ 81,17 milhões	R\$ 337,82 milhões	R\$ 1,34 bilhões

Fonte: elaboração própria.

Independentemente do valor da taxa, o aumento do custo de transporte sempre será maior que a redução das emissões. Assim, a adoção de uma taxa de R\$ 50/tCO₂ causa um aumento de 3,87% no custo e uma redução de 0,34% nas emissões. Uma taxa de R\$ 200/tCO₂ é responsável por uma elevação de 14,76% no custo de transporte e por uma redução de 2,43% nas emissões de CO₂.

Sendo assim, os resultados apontam para uma situação que mostra que a taxa não seria o mecanismo mais eficiente em termos de redução das emissões, uma vez que o custo associado a tais reduções é extremamente alto (isso sem contar os possíveis efeitos da elevação do custo de transporte mais elevado sobre toda a cadeia produtiva da soja). Como foi mostrado no capítulo de revisão bibliográfica, a adoção de uma taxa pode ter impactos significativos no crescimento da economia. Assim, poderia ocorrer uma redução da produção de soja em função da elevação dos custos.

Já com a adoção do mecanismo de compra e venda de permissões, é possível maiores reduções (indiretas) a um custo mais baixo. Note-se que o limite estabelecido foi em relação aos valores do cenário base, ou seja, aquele em que a capacidade das ferrovias e hidrovias era limitada pela quantidade de soja embarcada em cada um dos modais no ano de 2013.

Considerando-se uma meta de redução de 20% das emissões de CO₂ em relação ao modelo geral, isto acarretaria uma elevação no custo total de aproximadamente 0,01%. No caso do preço do crédito de R\$ 21,00, a elevação no custo seria de, aproximadamente, 0,15%. Embora em termos percentuais a elevação do custo pareça ser pequena, o gasto adicional com a compra de créditos seria de quase R\$ 20 milhões se o preço do crédito fosse R\$ 21,00, como pode ser visto na Tabela 32.

Tabela 32 – Efeitos da adoção do mecanismo de compra e venda de créditos de carbono no cenário geral

	Limite 20% Crédito: R\$ 8,25	Limite 20% Crédito: R\$ 21,00	Limite 43% Crédito: R\$ 8,25	Limite 43% Crédito: R\$ 21,00
Custo total	R\$ 59,82/t	R\$ 59,90/t	R\$ 59,92/t	R\$ 60,15/t
Emissões CO ₂	48,43 kgCO ₂ /t	48,43 kgCO ₂ /t	48,43 kgCO ₂ /t	48,43 kgCO ₂ /t
Consumo de combustível	2.608,95 mil m ³	2.608,63 mil m ³	2.608,95 mil m ³	2.608,63 mil m ³
Crédito comprado	R\$ 7,68 milhões	R\$ 19,53 milhões	R\$ 21,52 milhões	R\$ 54,75 milhões

Fonte: elaboração própria.

Analisando-se as quatro situações, é possível se perceber que a redução das emissões, medidas pelo uso do combustível, independe do limite estabelecido. Neste caso, o que determina a redução do consumo de combustível é o preço do crédito. Note-se que quando o preço do crédito aumenta de R\$ 8,25 para R\$ 21,00, o consumo de combustível se reduz em aproximadamente 0,012%. Assim, o preço do crédito parece desempenhar um papel mais importante na redução das emissões que o limite estabelecido. Mesmo porque, o objetivo do modelo de otimização, neste caso, é minimizar o custo de transporte. O preço mais elevado do crédito leva a uma utilização diferente dos modais para que seja necessária uma quantidade menor de créditos. Como a variação de consumo de combustível foi muito pequena, as emissões mantiveram o mesmo patamar nas quatro situações apresentadas na Tabela 32.

Neste caso, a redução mais significativa das emissões ocorre apenas em termos globais, assim como na seção anterior. Já em termos locais, as reduções são mínimas, de aproximadamente 0,14% quando se compara com o resultado da minimização do custo de transporte que desconsidera tal mecanismo. E, mais uma vez, é importante ressaltar que tal benefício só seria alcançado se houvesse um mercado estabelecido de venda de créditos de carbono. Mesmo com uma capacidade maior das ferrovias, ainda assim seria necessária a compra de créditos para se conseguir atingir a meta proposta.

Optou-se por simular, também, os efeitos de uma expansão da capacidade das ferrovias e hidrovias. De acordo com os dados da Tabela 33, é possível verificar que à medida que se aumenta a capacidade de embarque das ferrovias e hidrovias, tanto o custo quanto as emissões de CO₂ se reduzem. Assim, um aumento da capacidade de 50% destes terminais leva uma redução de 5,38% no custo de transporte e a uma redução de 5,57% nas emissões de CO₂, quando se compara com os resultados de minimização do custo de transporte.

Tabela 33 – Efeitos de mudanças estruturais no cenário geral

	Aumento de 50% capacidade de embarque	Aumento de 100% da capacidade de embarque	Ausência de limite de embarque	Aumento de 100% capacidade portos
Custo total	R\$ 56,59/t	R\$ 55,69/t	R\$ 47,38/t	R\$ 55,42/t
Emissões CO ₂	45,80 kgCO ₂ /t	45,21 kgCO ₂ /t	42,41 kgCO ₂ /t	44,76 kgCO ₂ /t
Consumo de combustível	2.595,72 mil m ³	2.620,18 mil m ³	2.967,18 mil m ³	2.421,27 mil m ³

Fonte: elaboração própria.

Cabe ressaltar que à medida que se aumenta em 100% a capacidade de embarque e quando não há limites ao embarque, ocorre uma situação já descrita no capítulo anterior: aumento do consumo de combustível. Tal fato pode ser explicado pelos mesmos motivos já expostos anteriormente, que podem ser resumidos pelo aumento da tonelagem transportada em todos os modais.

A situação descrita anteriormente reforça a suposição feita na última seção de que há um indicativo de que, além de uma capacidade maior dos terminais de embarque, é necessário que estes terminais estejam próximos das áreas produtoras, para que a utilização das rodovias seja reduzida. Assim, a contribuição do transporte intermodal pode ter maior impacto na redução das emissões.

Já com relação à elevação da capacidade dos portos, percebe-se que neste cenário ocorreu uma redução maior das emissões que no caso de um aumento de 50% na capacidade de embarque dos terminais ferroviários e hidroviários. Este é um indício de que, além de uma capacidade adequada de terminais de embarque, é necessário que exista uma capacidade adequada dos portos, de forma que seja possível reduzir tanto o custo de transporte quanto as emissões.

Como já mencionado, o uso de combustíveis menos poluentes pode ser uma saída para redução das emissões, sem, contudo elevar o custo do transporte. Uma vez que com a adoção de mecanismos tradicionais, como uma taxa ou o sistema de compra e venda de créditos, pode ocorrer um aumento do custo de transporte. Na Tabela 34 pode-se verificar que à medida que se aumenta o uso de biocombustíveis, ocorre uma redução do custo de transporte e das emissões de CO₂, como verificado na seção anterior.

Tabela 34 – Efeitos de mudanças tecnológicas no cenário geral

	50% biodiesel no combustível	Uso integral de biocombustível	Aumento da eficiência das rodovias (10%)	Aumento da eficiência todos os modais (10%)
Custo total	R\$ 53,83/t	R\$ 47,85/t	R\$ 57,43/t	R\$ 53,83/t
Emissões CO ₂	47,00 kgCO ₂ /t	45,41 kgCO ₂ /t	45,82 kgCO ₂ /t	43,65 kgCO ₂ /t
Δ% emissões CO ₂	- 3,09%	- 6,37%	- 5,53%	- 10,00%
Consumo de combustível	2.608,03 mil m ³	2.608,03 mil m ³	2.395,61 mil m ³	2.349,27 mil m ³

Fonte: elaboração própria.

A Tabela 34 mostra que o aumento da eficiência energética em todos os modais leva a uma redução maior das emissões de CO₂ que o uso integral de biocombustíveis. Porém, o custo associado a esta situação é maior que o obtido com o uso de biocombustíveis. Assim, novamente surge o *trade-off* entre emissões e custo; porém, neste caso, não há um peso sobre o transportador, já que independentemente da medida, há uma redução do custo de transporte em todas as situações apresentadas.

Comparando-se as principais medidas apresentada na Tabela 35, nota-se que o menor custo seria obtido com o uso integral de biocombustíveis. Já a maior redução das emissões seria obtida com a adoção do mecanismo de compra e venda de créditos. Porém, o custo associado a esta redução seria o segundo maior. Neste caso, para o transportador, tal medida não seria a desejável, já que se eleva o custo de transporte. Além do que, como já enfatizado, seria necessário o surgimento de um mercado de carbono para fornecer os créditos necessários.

Tabela 35 – Comparação das medidas analisadas no cenário geral

	Minimização do custo de transporte	Taxa de R\$ 50,00/ tCO₂	Limite 20% Crédito: R\$ 21,00	(continua) Aumento de 50% da capacidade
Custo total	R\$ 59,81/t	R\$ 62,13/t	R\$ 59,90/t	R\$ 56,59/t
Emissões CO ₂	48,50 kgCO ₂ /t	48,33 kgCO ₂ /t	48,43 kgCO ₂ /t	45,80 kgCO ₂ /t
Δ% custo total	-	3,88%	0,15%	- 5,38%
Δ% emissões CO ₂	-	- 0,35%	- 0,14%	- 5,57%

Tabela 35 – Comparação das medidas analisadas no cenário geral

	(conclusão)		
	Aumento de 100% cap. portos	Uso integral de biodiesel	Aumento eficiência modais (10%)
Custo total	R\$ 55,42/t	R\$ 47,85/t	R\$ 53,83/t
Emissões CO ₂	44,76 kgCO ₂ /t	45,41 kgCO ₂ /t	43,65 kgCO ₂ /t
Δ% custo total	-7,34%	- 20 %	- 9,99 %
Δ% emissões CO ₂	- 7,71%	- 6,37%	- 10 %

Fonte: elaboração própria.

Considerando-se tanto o benefício ambiental quanto o menor custo de transporte, a medida mais adequada seria um aumento de eficiência energética em todos os modais, que levaria a uma redução de 10% nas emissões e uma redução de 9,99% no custo de transporte.

Alternativa interessante, tanto do ponto de vista do transportador quanto em relação aos custos de transporte, seria o uso integral de biocombustíveis. Tal medida levaria a uma redução de 20% do custo de transporte e a uma redução de 6,37% das emissões. Como já mencionado, o aumento da demanda por biocombustíveis pode elevar o preço dos biocombustíveis, o que afetaria o custo total. Além disso, este aumento de demanda pode levar a um nível maior de emissões, em decorrência de uma possível expansão das fronteiras agrícolas. Outra medida interessante seria o aumento da capacidade dos portos em 100%, já que tal medida levaria a uma redução tanto do custo de transporte quanto das emissões de CO₂.

Nota-se, também, que a adoção de uma taxa foi a medida menos interessante, pois acarretaria uma elevação de 3,88% no custo de transporte e uma redução de apenas 0,35% das emissões. Embora se esperasse que a adoção de uma taxa pudesse favorecer o uso maior dos modais menos poluentes, tal fato não se verificou. Tais combinações possivelmente foram mais caras que a taxa, o que torna mais interessante, do ponto de vista logístico, pagar a taxa de carbono que procurar por combinações menos poluentes. É válido ressaltar neste caso que, mesmo que o transporte nas ferrovias e as hidrovias seja mais barato e menos poluente, em muitos casos é necessário utilizar as rodovias para se chegar até estes terminais. Assim, como a taxa se aplica às emissões totais, terminais que estivessem distantes das áreas produtoras, possivelmente, não seriam utilizados.

As simulações feitas até aqui se basearam na configuração atual das ferrovias e hidrovias no ano de 2013. As próximas seções consistem na utilização dos projetos de expansão das ferrovias e hidrovias.

5.3 Análise da simulação nos cenários de projetos de expansão das ferrovias e hidrovias

Esta seção será dividida em duas subseções. Na primeira subseção serão considerados os planos de expansão das ferrovias que já estão em fase de construção (cenário expansão). Na segunda subseção, serão incluídos os projetos que ainda estão no papel e cuja execução ainda não é certa (cenário futuro).

5.3.1 Análise da simulação no cenário expansão

Como já mencionado, nesta seção serão considerados os projetos de expansão que já estão em fase de construção e conclusão no ano de 2015. Serão assim considerados os trechos apresentados no Quadro 3.

Projeto	Trecho
Ferrovia de Integração Leste Oeste (FIOL)	Ilhéus (BA) – Caetité (BA) Caetité (BA) – Barreiras (BA)
Ferrovia Norte Sul (FNS)	Porto Nacional (TO) – Ouro Verde de Goiás (GO) Ouro Verde de Goiás (GO) – Estrela D'Oeste (SP) Estrela D'Oeste (SP) – Santos (SP)
Nova Transnordestina (FNTL)	Missão Velha (CE) – Salgueiro (PE) Missão Velha (CE) – Pecém (CE) Salgueiro (PE) – Suape (PE) Salgueiro (PE) – Trindade (PE) Trindade (PE) – Elizeu Martins (PI)

Quadro 3 – Projetos ferroviários em fase de construção no ano de 2015

Fonte: elaboração própria.

Optou-se por se considerar um limite máximo de embarque nos novos terminais ferroviários de 5 milhões de toneladas em cada terminal. A malha ferroviária consiste, então, dos terminais considerados no cenário base acrescidos dos trechos apresentados no Quadro 3.

Seguindo o padrão verificado até aqui, percebe-se pela Tabela 36 que existe uma diferença entre a simulação de minimização do custo de transporte e minimização do custo ambiental. Quando se considera o custo ambiental, ocorre uma elevação de 8,34% no

custo e uma redução de 0,49% nas emissões. Porém, quando o objetivo é minimizar as emissões, há uma elevação de 1,25% no custo de transporte e uma redução de 4,35% das emissões de CO₂.

Tabela 36 – Minimização do custo de transporte, do custo ambiental e das emissões no cenário expansão

	Minimização do custo de transporte	Minimização do custo ambiental	Minimização das emissões
Custo total	R\$ 67,76/t	R\$ 73,41/t	R\$ 68,61/t
Emissões CO ₂	57,67 kgCO ₂ /t	57,39 kgCO ₂ /t	55,16 kgCO ₂ /t
Consumo de combustível	2.793,27 mil m ³	2.784,13 mil m ³	2.704,39 mil m ³

Fonte: Elaboração própria.

Com relação ao comportamento dos novos trechos, na simulação do modelo expansão foram embarcadas 1,63 milhões de toneladas nos trechos da FIOLE, enquanto nos novos trechos da FNS foram embarcadas 2,82 milhões de toneladas. Quando se considera a minimização do custo ambiental, há uma redução de 2,07% na quantidade embarcada nestes trechos. Porém, quando se minimiza as emissões, há uma elevação de aproximadamente 8,14% na quantidade embarcada. Neste caso, como pode ser visto na Tabela 37, alguns trechos que até então não eram utilizados, passaram a fazer parte da rede de transporte, como o trecho de Barreiras-Ilhéus e Eliseu Martins-Pecém. No entanto, em nenhuma das simulações houve esgotamento da capacidade de embarque.

Tabela 37 – Variação da quantidade embarcada de acordo com o modelo de otimização

Trecho	Concessionária	Minimização do custo de transporte	Minimização do custo ambiental	Minimização das emissões
Barreiras-Caetité	FIOLE	69 mil t	69 mil t	69 mil t
Barreiras-Ilhéus	FIOLE	-	-	1.570 mil t
Caetité-Ilhéus	FIOLE	1.556 mil t	1.570 mil t	7 mil t
Eliseu Martins - Pecém	NTE	-	-	24.5 t
Estrela D'Oeste - Santos	FNS	914 mil t	892 mil t	1.780 mil t
Ouro V. Goiás - Estrela D'Oeste	FNS	985 mil t	985 mil t	985 mil t
Ouro V. Goiás - São Luís	FNS	915 mil t	831 mil t	389 mil t
Total	-	4.441 mil t	4.349 mil t	4.827 mil t

Fonte: elaboração própria.

A adoção de uma taxa sobre as emissões de CO₂ mostrou-se, novamente, pouco efetiva para promover a redução das emissões. Considerando as alíquotas adotadas neste trabalho, pode ser verificado na Tabela 38 que a maior redução das emissões seria obtida por meio de uma taxa de R\$ 200/tCO₂. Neste caso, a redução das emissões seria de apenas 0,99%. Porém, a elevação do custo de transporte seria de 16,72%. Mais uma vez, observa-se que o benefício da adoção de uma taxa, medido em redução das emissões, é menor que o custo da mesma.

Tabela 38 – Efeitos da adoção de uma taxa no cenário expansão

	Taxa: R\$ 12,00/tCO₂	Taxa: R\$ 50,00/tCO₂	Taxa: R\$ 200/tCO₂
Custo total	R\$ 68,46/t	R\$ 70,61/t	R\$ 79,09 /t
Emissões de CO ₂	57,67 kgCO ₂ /t	57,61 kgCO ₂ /t	57,10 kgCO ₂ /t
Consumo de combustível	2.793,27 mil m ³	2.791,53 mil m ³	2.771,23 mil m ³
Receita Governo	R\$ 86,89 milhões	R\$ 361,84 milhões	R\$ 1,44 bilhões

Fonte: elaboração própria.

A adoção de uma taxa de R\$ 12,00 não trouxe qualquer variação nas emissões. Portanto, o consumo de combustível manteve-se inalterado neste caso e a quantidade de carga embarcada nos novos terminais foi a mesma da simulação de minimização do custo de transporte sem a adoção de uma taxa. Para as demais alíquotas, foi possível obter uma redução das emissões, ainda que pouco expressiva. Os novos terminais, neste caso, passariam a receber menos carga, como pode ser visto na Figura 20.

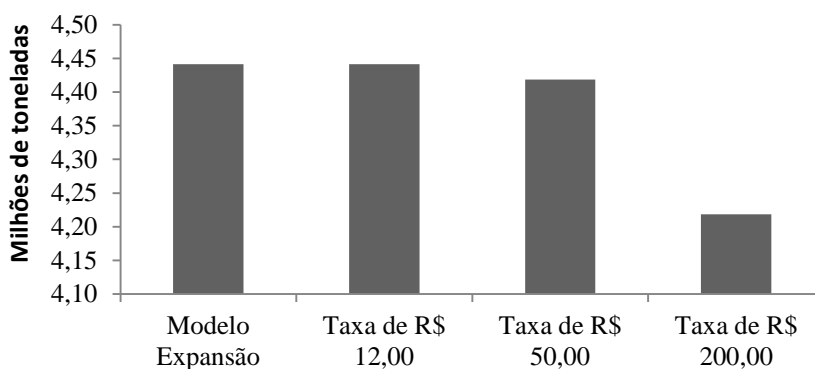


Figura 20 – Variação da quantidade embarcada nos terminais de acordo com a taxa adotada

Fonte: elaboração própria.

O fato evidenciado pela Figura 20 pode ser um indicativo de que, mesmo se existir uma maior capacidade nos modais menos poluentes, a adoção da taxa pode não favorecer o uso destes terminais. Pode ser um indício também, como já mencionado neste trabalho, que além de uma capacidade maior nos modais menos poluentes, seria necessária uma distribuição mais adequada destes terminais, de forma que estivessem próximos tanto da origem quanto do destino.

Já com a adoção do mecanismo de compra e venda de créditos de carbono, não há variação no consumo de combustíveis. Como pode ser visto na Tabela 39, as emissões de CO₂ se mantiveram as mesmas, independentemente do preço do crédito ou das metas estabelecidas.

Tabela 39 – Efeitos da adoção do mecanismo de compra e venda de créditos de carbono no cenário expansão

	Limite 20% Crédito: R\$ 8,25	Limite 20% Crédito: R\$ 21,00	Limite 43% Crédito: R\$ 8,25	Limite 43% Crédito: R\$ 21,00
Custo total	R\$ 67,86/t	R\$ 68,00/t	R\$ 67,97/t	R\$ 68,28/t
Emissões CO ₂	57,67 KgCO ₂ /t	57,67 KgCO ₂ /t	57,67 KgCO ₂ /t	57,67 KgCO ₂ /t
Consumo de combustível	2.793,27 mil m ³	2.793,27 mil m ³	2.793,27 mil m ³	2.793,27 mil m ³
Crédito comprado	R\$ 11,62 milhões	R\$ 29,56 milhões	R\$ 25,45 milhões	R\$ 64,78 milhões

Fonte: elaboração própria.

Estes resultados mostram que, em termos de custo de transporte, talvez seja mais interessante comprar créditos de carbono que procurar reduzir as emissões, por meio da intermodalidade. Isto porque, conforme mostrado no modelo de minimização das emissões, o custo para se obter emissões mínimas seria maior que qualquer um dos custos obtidos no sistema apresentado na Tabela 39. Por exemplo, o maior custo de transporte ocorreria se o limite estabelecido fosse de 43% e o preço do crédito de R\$ 21,00. Neste caso, o custo seria R\$ 68,28/t. No caso da minimização das emissões, o custo resultante seria de R\$ 68,61/t. Portanto, é menos oneroso comprar os créditos que procurar reduzir as emissões de CO₂ por meio de novas combinações de transporte.

Assim, mais uma vez, este mecanismo mostra-se como uma alternativa para se atingir uma possível meta estabelecida por meio de um órgão regulador, a um custo mais baixo que a adoção de uma taxa. Neste caso, o benefício ambiental de tal medida poderia não

ter efeitos locais, mas sim globais, já que o modelo não determina a origem dos créditos de carbono. Neste caso, poderiam vir do Brasil ou como poderiam eventualmente vir da Europa.

Com relação à capacidade de embarque atribuída aos novos terminais, como já mencionado, não foi esgotada. Isto implica que neste exercício de simulação a capacidade de embarque dos novos terminais seria suficiente para transportar a soja. Porém, optou-se por se manter a capacidade de embarque das ferrovias do cenário base. Ou seja, os terminais que de fato existem continuaram tendo a mesma capacidade adotada no cenário base. Assim, é possível verificar qual poderia ser o efeito do aumento da capacidade de embarque das ferrovias já existentes, associado aos novos trechos em construção.

De acordo com a Tabela 40, pode-se notar que o aumento da capacidade de embarque reduz tanto o custo de transporte quanto as emissões. Assim, como na maioria dos cenários anteriores, o aumento da capacidade dos modais menos poluentes provoca uma redução do consumo de combustíveis. Situação semelhante ocorre com o aumento da capacidade dos portos, que proporciona uma redução dos custos e redução das emissões, quando comparadas com as da simulação de minimização do custo de transporte.

Tabela 40 – Efeitos de mudanças estruturais no cenário expansão

	Aumento de 50% da cap. embarque	Aumento de 100% da cap. embarque	Ausência de limite de embarque	Aumento de 100% capacidade portos
Custo total	R\$ 62,54/t	R\$ 59,07/t	R\$ 48,72/t	R\$ 60,34/t
Emissões CO ₂	51,57 kgCO ₂ /t	47,73 kgCO ₂ /t	45,14 kgCO ₂ /t	51,91 kgCO ₂ /t
Consumo de combustível	2.659,49 mil m ³	2.579,98 mil m ³	2.752,43 mil m ³	2.528,74 mil m ³

Fonte: elaboração própria.

É importante destacar, como mostra a Figura 21, que a quantidade de carga embarcada nos novos terminais se reduziria à medida que se aumentasse a capacidade de embarque dos terminais existentes em 50% ou 100%. Assim, um aumento de 50% da capacidade dos terminais existentes levaria a uma redução de 3,95% na carga embarcada nos novos terminais. Se a capacidade dos terminais existentes aumentasse em 100%, a redução do embarque nos novos terminais seria ainda maior, algo em torno de 8,57%. Este fato evidencia que o aumento da capacidade dos terminais já existentes pode desempenhar um papel tão importante quanto a criação de novos terminais.

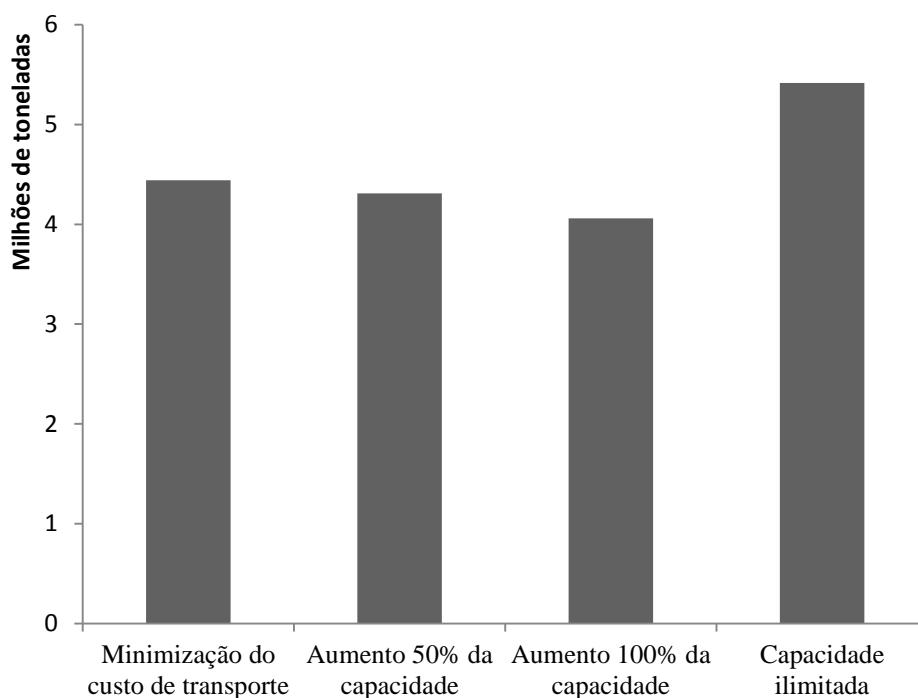


Figura 21 – Variação da quantidade embarcada nos novos terminais de acordo com a capacidade dos terminais existentes

Fonte: elaboração própria.

Quando se considera ausência de limites ao embarque, pode-se notar pela Figura 21 que há um aumento no embarque nas novas ferrovias, o que do ponto de vista logístico é interessante, já que ocorre uma redução no custo total. Além disso, indica que, conjuntamente, esta capacidade ilimitada das ferrovias e hidrovias beneficia os novos terminais. Porém, do ponto de vista ambiental, surge o mesmo problema verificado anteriormente: o aumento do consumo de combustíveis. Isto implica que, em termos absolutos, haveria uma elevação das emissões. Este aumento decorre do uso mais intensivo de todos os modais. Assim, há uma elevação de 21,9% da carga transportadas nos novos trechos.

Assim, do ponto de vista ambiental, as simulações mais interessantes são as que levam a uma redução do consumo de combustíveis. Neste caso, seria o aumento da capacidade de 100% em todos os terminais de embarque, ainda que com isso houvesse uma redução no embarque de carga nos novos terminais.

O aumento do uso de bicomcombustíveis, assim como nos demais cenários, é uma medida que promove a redução do custo de transporte e que também reduz as emissões de CO₂. Neste caso, a quantidade embarcada nos novos terminais não se altera em relação ao modelo expansão. Além disso, a variação no consumo de combustível é pequena, já que decorre da substituição do consumo de óleo combustível nas hidrovias, como já explicado na

seção 5.1. Assim, quanto maior o uso de biocombustíveis, menor o custo de transporte e menores as emissões resultantes do transporte da soja, como mostrado na Tabela 41.

Tabela 41 – Efeitos de mudanças tecnológicas no cenário expansão

	50% biodiesel no combustível	Uso integral de biocombustível	Aumento da eficiência das rodovias (10%)	Aumento da eficiência todos os modais (10%)
Custo total	R\$ 60,99/t	R\$ 54,21/t	R\$ 64,34/t	R\$ 60,99/t
Emissões CO ₂	55,92 kgCO ₂ /t	54,03 kgCO ₂ /t	54,36 kgCO ₂ /t	51,91 kgCO ₂ /t
Δ% emissões CO ₂	- 3,03%	- 6,31%	- 5,74%	- 9,99%
Consumo de combustível	2.791,45 mil m ³	2.791,45 mil m ³	2.563,06 mil m ³	2.513,95 mil m ³

Fonte: elaboração própria.

O aumento da eficiência energética também seguiu o padrão dos demais cenários, ou seja, o aumento da eficiência energética torna o custo de transporte mais baixo e as emissões também são menores.

A quantidade embarcada de carga nos novos terminais varia quando o aumento da eficiência se expande para todos os modais. No caso de uma melhoria restrita ao modal rodoviário, a carga embarcada nas ferrovias e hidrovias se reduz em 7,23%, passando de 22.975 mil toneladas para 21.313 mil toneladas. Isto ocorre porque, por definição, há uma redução no custo do transporte rodoviário decorrente do menor uso de combustíveis.

Porém, quando todos os modais se tornam mais eficientes, aumenta-se o uso do transporte ferroviário e hidroviário, uma vez que o custo de transporte se reduz em todos os modais. Neste caso, a quantidade embarcada nos novos terminais é a mesma verificada no modelo expansão.

Comparando-se todas as simulações, de acordo com a Tabela 42, o menor custo de transporte seria obtido quando ocorre o uso integral de biocombustíveis. As emissões resultantes são 6,31% menores em relação à minimização do custo de transporte. Apesar do mecanismo de compra e venda de créditos fornecer a maior redução das emissões, esta redução, como já mencionado, ocorre por meio da compra de créditos de carbono. Então é preciso que exista oferta destes créditos, para que ocorra tal redução. Isto implica elevação no custo de transporte, já que seria necessária a compra de créditos. Como já mencionado, haveria um custo adicional de R\$ 29,56 milhões com a compra destes créditos.

Tabela 42 – Comparação das medidas analisadas no cenário expansão

	Minimização do custo de transporte	Taxa de R\$ 50,00/tCO₂	Limite 20% Crédito: R\$ 21,00	Aumento de 100% da capacidade
Custo total	R\$ 67,76/t	R\$ 70,61/t	R\$ 68,00/t	R\$ 59,07/t
Emissões CO ₂	57,67 kgCO ₂ /t	57,61 kgCO ₂ /t	57,67 kgCO ₂ /t	47,73 kgCO ₂ /t
Δ % custo total	-	4,21%	0,35%	- 12,82%
Δ % emissões CO ₂	-	- 0,10%	0%	- 17,24%

	Aumento 100% cap. portos	Uso integral de biodiesel	Aumento eficiência modais (10%)
Custo total	R\$ 60,34/t	R\$ 54,21/t	R\$ 60,99/t
Emissões CO ₂	51,91 kgCO ₂ /t	54,03 kgCO ₂ /t	51,91 kgCO ₂ /t
Δ % custo total	-10,95%	- 19,99%	- 9,99%
Δ % emissões CO ₂	-9,99%	- 6,31%	- 9,99 %

Fonte: elaboração própria.

A melhor opção seria uma elevação da capacidade de embarque de todos os terminais, pois neste caso haveria uma redução de 12,82% no custo de transporte e uma redução de 17,24% das emissões de CO₂. Isto mostra, novamente, a importância de uma capacidade adequada nos terminais intermodais, tanto do ponto de vista logístico quanto do ponto de vista ambiental.

Na próxima seção serão apresentados os resultados referentes à expansão da malha ferroviária, determinada por alguns projetos que ainda estão em fase de aprovação e cujas obras ainda não foram iniciadas.

5.3.2 Análise da simulação no cenário futuro

Como já mencionado, nesta seção será considerada a expansão futura da rede ferroviária e hidroviária, incluindo os projetos que ainda não começaram a ser executados. No Quadro 4, estão listados os trechos considerados nesta análise.

Projeto	Trechos^a
Ferrovia Norte Sul - FNS	Açailândia (PA) - Barcarena (PA) Estrela D'Oeste (SP) – Panorama (SP) Panorama (SP) – Chapecó (SC) Chapecó (SC) – Rio Grande (RS)
Ferrovia de Integração Leste Oeste - FIOL	Barreiras (BA) – Figueirópolis (TO)
Ferrovia do Pantanal	Porto Murtinho (MS) – Dourados (MS) Dourados (MS) – Panorama (SP)
Corredor Ferroviário de Santa Catarina	Itajaí (SC) - Santa Cecília (SC) Santa Cecília (SC) - Herval D'Oeste (SC) Herval D'Oeste (SC) - Chapecó (SC) Chapecó (SC) - S. M. do Oeste (SC) S. M. do Oeste (SC) - Dionísio Cerqueira (SC)
Ferrovia de Integração Centro Oeste - FICO	Campinorte (GO) – Água Boa (MT) Água Boa (MT) – Ribeirão Bonito (MT) Ribeirão Bonito (MT) – Lucas do Rio Verde (MT) Lucas do Rio Verde (MT) – Vilhena (RO) Vilhena (RO) – Porto Velho (RO)
Programa de Investimento em Logística - PIL	Maracaju (MS) – Lapa (PR) Lucas do Rio Verde (MT) – Itaituba (PA) Uruaçu (GO) – Campos dos Goytacazes (RJ) Mairinque (SP) – Rio Grande do Sul (RS) Belo Horizonte (MG) – Candeias (BA)
Plano Hidroviário Estratégico - PHE	Santarém (PA) – Itaituba (PA) Itaituba (PA) – Cachoeira Rasteira (MT) Foz do Rio Tocantins (PA) – Marabá (PA) Marabá (PA) – Miracema do Tocantins (TO) Três Lagoas (MS) – Pereira Barreto (SP)

Quadro 4 – Projetos que ainda não começaram a ser executados em 2015

Fonte: elaboração própria.

a: foram consideradas as possibilidades de ligação entre os projetos, e entre os projetos futuros com a malha existente. O trecho Uruaçu (GO) – Campos dos Goytacazes (RJ), ao ligar-se com a FNS, que por sua vez liga-se com a FICO, constitui parte da ferrovia Transcontinental.

Para esta configuração de transporte, como existem novas ferrovias e hidrovias, o custo obtido é o menor de todos os cenários, como poderá ser visto na próxima seção. Com relação à Tabela 43, destaca-se o fato de que, neste caso, quando se minimiza as emissões, a elevação do custo não é tão alta. Neste caso, é possível obter emissões 15,12% menores, com uma elevação de apenas 0,99% no custo de transporte. Desta forma, como há uma capacidade

maior dos terminais menos poluentes, o *trade-off* entre minimização das emissões e minimização do custo é menor que nos cenários anteriores.

Tabela 43 – Minimização do custo de transporte, do custo ambiental e das emissões no cenário futuro

	Minimização do custo de transporte	Minimização do custo ambiental	Minimização das emissões
Custo total	R\$ 47,35/t	R\$ 49,87/t	R\$ 47,82/t
Emissões CO ₂	29,43 kgCO ₂ /t	28,77 kgCO ₂ /t	24,98 kgCO ₂ /t
Consumo de combustível	1.696,37 mil m ³	1.671,63 mil m ³	1.533,58 mil m ³

Fonte: elaboração própria.

Os novos terminais desempenharam um papel fundamental tanto para a redução dos custos quanto para a redução das emissões. Quando se compara com o cenário base, a existência dos novos terminais levaria a uma elevação de 85,24% do transporte da soja nas hidrovias e nas ferrovias. Como pode ser visto na Figura 22, a criação da Ferrovia de Integração do Centro-Oeste (FICO) pode desempenhar um papel fundamental no transporte da soja produzida na região do Mato Grosso, principal produtor do país no ano de 2013.

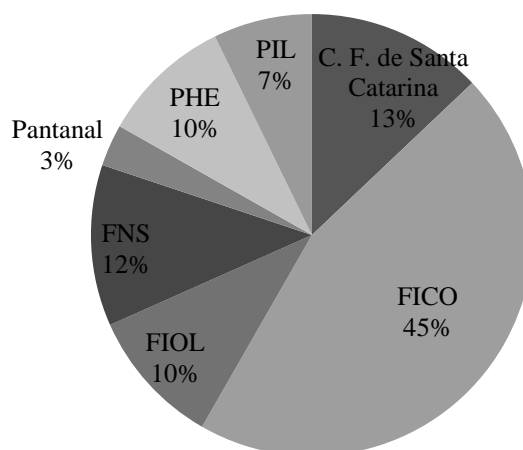


Figura 22 – Participação das novas ferrovias e hidrovias no transporte de soja

Fonte: elaboração própria.

Considerando a quantidade de soja transportada exclusivamente nos novos terminais, a maior parte da produção seria transportada pela Ferrovia de Integração do Centro-Oeste (FICO), seguida pelo Corredor Ferroviário de Santa Catarina e pela Ferrovia Norte-Sul. Se for considerado o total de carga transportada pelas ferrovias, a Ferrovia de Integração do Centro-Oeste (FICO) seria responsável por 34,33% deste transporte, o que indica que esta ferrovia tem grande potencial uma vez que seria possível a ligação entre regiões produtoras e os portos. Por exemplo, na simulação, o trecho Lucas do Rio Verde (MT) – Santos (SP), transportaria 5 milhões de toneladas, não tendo transportado uma quantidade maior porque se estabeleceu exatamente esta quantidade como limite sobre a capacidade de embarque.

Analisando as políticas de mitigação, percebe-se pela Tabela 44 que a adoção de uma taxa contínua não provocando grande redução das emissões. Se for aplicada uma taxa de R\$12,00/tCO₂, não há qualquer variação das emissões. Mesmo se a alíquota aplicada for de R\$ 50,00/tCO₂, a redução ainda é pequena, de aproximadamente 1,7%.

Tabela 44 – Efeitos da adoção de uma taxa no cenário futuro

	Taxa de R\$ 12,00/tCO₂	Taxa de R\$ 50,00/tCO₂	Taxa de R\$ 200/tCO₂
Custo total	R\$ 47,70/t	R\$ 48,44/t	R\$ 52,62 /t
Emissões de CO ₂	29,43 kgCO ₂ /t	28,93 kgCO ₂ /t	28,21 kgCO ₂ /t
Consumo de combustível	1.696,37 mil m ³	1.680,72 mil m ³	1.642,09 mil m ³
Receita Governo	R\$ 52,78 milhões	R\$ 217,92 milhões	R\$ 851,59 milhões

Fonte: elaboração própria.

Uma redução maior poderia ser obtida apenas quando se aplica uma taxa mais elevada. Neste caso, a adoção de uma tarifa de R\$ 200/tCO₂ provocaria uma redução de 4,14% nas emissões. Porém, a elevação no custo de transporte seria de aproximadamente 11,13%. Assim, novamente, o benefício com a adoção de uma taxa é menor que o custo decorrente de tal medida. Relembrando que o modelo de minimização das emissões permitiu uma redução de 15,12% das emissões e uma elevação de 0,99% do custo de transporte, parece que a adoção de uma taxa, de fato, não seria uma medida tão interessante, mesmo neste cenário em que existe maior capacidade dos modais menos poluentes.

No caso da adoção do sistema compra e venda de créditos de carbono, nesta configuração das ferrovias e hidrovias, surge um efeito diferente do visto até o presente momento. No caso de uma meta de redução de 20% com relação ao emitido no cenário base,

percebe-se que, pela primeira vez, é possível a venda de créditos de carbono, como evidenciado pela Tabela 45.

Tabela 45 – Efeitos da adoção do mecanismo de compra e venda de créditos de carbono no cenário futuro

	Limite 20% Crédito: R\$ 8,25	Limite 20% Crédito: R\$ 21,00	Limite 43% Crédito: R\$ 8,25	Limite 43% Crédito: R\$ 21,00
Custo total	R\$ 47,34/t	R\$ 47,15/t	R\$ 47,36/t	R\$ 47,38/t
Emissões CO ₂	29,43 kgCO ₂ /t	29,42 kgCO ₂ /t	29,43 kgCO ₂ /t	29,42 kgCO ₂ /t
Consumo de combustível	1.696,37 mil m ³	1.695,77 mil m ³	1.696,37 mil m ³	1.695,77 m ³
Crédito comprado	-	-	R\$ 1,99 milhões	R\$ 5,06 milhões
Crédito vendido	R\$ 11,84 milhões	R\$ 30,16 milhões	-	-

Fonte: elaboração própria.

A venda destes créditos permite a redução do custo de transporte. Se o preço do crédito de carbono fosse R\$ 21,00, seria possível uma redução um pouco maior do custo de transporte. Tal fato evidencia que tal mecanismo pode ser mais interessante, do ponto de vista do transportador, quando há capacidade dos modais menos poluentes e quando o limite não é tão restritivo.

Mas, quando a meta de redução se torna mais restritiva, há a necessidade da compra de créditos, o que eleva o custo de transporte, quando comparado a uma meta menos ambiciosa. Porém, quando se compara com o modelo em que não há qualquer medida de mitigação, o custo relativo é menor.

Como houve a possibilidade de venda de créditos de carbono, neste caso é possível analisar os efeitos de uma medida de compensação das emissões (a redução das emissões não gera créditos). Porém, se as emissões correntes forem maiores que a meta estabelecida, é necessária a compra de créditos para compensar as emissões que estiverem acima da meta.

Na Tabela 46 é possível perceber que num sistema de compensação, quando as emissões estão abaixo da meta, o preço do crédito não exerce qualquer influência sobre o custo. O custo decorrente é mais elevado que o custo referente ao mecanismo de compra e

venda de créditos de carbono, uma vez que como a atividade não gera crédito, não há desconto no custo total.

Tabela 46 – Efeitos da adoção do mecanismo de compensação das emissões no cenário futuro

	Limite 20% Crédito: R\$ 8,25	Limite 20% Crédito: R\$ 21,00	Limite 43% Crédito: R\$ 8,25
Custo total	R\$ 47,35/t	R\$ 47,35/t	R\$ 47,36/t
Emissões CO ₂	29,43 kgCO ₂ /t	29,42 kgCO ₂ /t	29,43 kgCO ₂ /t
Consumo de combustível	1.696,37 mil m ³	1.695,77 mil m ³	1.696,37 mil m ³
Crédito comprado (R\$)	-	-	R\$ 1,99 milhões

Fonte: elaboração própria.

Quando o limite estabelecido é menor que as emissões resultantes, o efeito do mecanismo de compensação é o mesmo do mecanismo compra e venda de créditos de carbono. O que já era esperado, pois a necessidade de créditos é a mesma. Poderia surgir alguma diferença se o preço do crédito fosse diferente entre os mecanismos. No entanto, optou-se por manter o mesmo preço para que fosse possível comparar os dois mecanismos.

Com relação à capacidade de embarque nas ferrovias e hidrovias, como já mencionado, houve uma limitação da capacidade de embarque nos novos terminais. Mantendo-se o padrão desenvolvido até aqui, serão simulados os efeitos de uma elevação da capacidade de embarque de todos os terminais de transbordo. A elevação da capacidade em 50% reduz as emissões em 8,4% e o custo total em 5,30%. O trecho Lucas do Rio Verde (MT) – Santos (SP), que antes se esgotava a capacidade, com esta elevação transporta 6,06 milhões de toneladas. Conforme mostra a Tabela 47, o aumento de 100% na capacidade de embarque permite reduções ainda maiores no custo de transporte e nas emissões de CO₂.

Tabela 47 – Efeitos de mudanças estruturais no cenário futuro

	Aumento de 50% da cap. embarque	Aumento de 100% da cap. embarque	Ausência de limite de embarque	Aumento 100% capacidade portos
Custo total	R\$ 44,84/t	R\$ 43,59/t	R\$ 37,65/t	R\$ 41,38/t
Emissões CO ₂	26,96 kgCO ₂ /t	25,80 kgCO ₂ /t	24,67 kgCO ₂ /t	29,05 kgCO ₂ /t
Consumo de combustível	1.622,32 mil m ³	1.589,14 mil m ³	1.777,88 mil m ³	1.724,20 mil m ³

Fonte: elaboração própria.

Os resultados apresentados na Tabela 47, referentes ao aumento da capacidade de embarque em 50% e 100%, são um indicativo da necessidade de se ampliar a capacidade das ferrovias e hidrovias já existentes. Em outras palavras, não basta apenas construir novas ferrovias, mas também investir na capacidade daquelas ferrovias que já operavam antes da expansão. Mesmo porque, neste cenário de configuração do transporte intermodal, muitos projetos não saíram ainda do papel.

No caso de ausência de limites ao embarque, mantém-se o padrão encontrado nas seções anteriores. Apesar de ocorrer uma redução das emissões em termos relativos, há uma elevação das emissões em termos absolutos, evidenciada pelo aumento do consumo de combustível. Em função disso, simulou-se um modelo de minimização das emissões onde a capacidade dos terminais fosse irrestrita. Na Tabela 48 é possível perceber que, quando se minimiza as emissões, obtém-se um nível menor de emissões. Porém, o custo nesta simulação é mais elevado.

Tabela 48 – Minimização do custo e minimização das emissões com capacidade irrestrita dos terminais de embarque no cenário futuro

	Minimização do Custo	Minimização das emissões
Custo total	R\$ 37,65/t	R\$ 41,60/t
Emissões CO ₂	24,67 kgCO ₂ /t	20,00 kgCO ₂ /t
Consumo de Combustível	1.777,88 mil m ³	1.358,10 mil m ³

Fonte: elaboração própria.

É interessante notar que de fato existe um *trade-off* entre emissões mínimas e custo mínimo no sentido de que quando se reduz as emissões, aumenta-se o custo de transporte. O que não é surpresa, já que as funções objetivo são de natureza distintas. Se as emissões decorrentes são maiores ou menores, isto não faz diferença para o modelo de minimização de custo. O inverso ocorre quando o objetivo é minimizar as emissões. Neste caso, o custo resultante não afeta o modelo de minimização.

Quando se considera a possibilidade de aumento do uso de biocombustíveis, percebe-se pela Tabela 49 que se manteve o padrão encontrado até aqui: uma utilização maior de biocombustíveis leva a uma redução tanto das emissões quanto do custo de transporte.

Tabela 49 – Efeitos de mudanças tecnológicas no cenário futuro

	50% biodiesel no combustível	Uso integral de biocombustível	Aumento da eficiência das rodovias (10%)	Aumento da eficiência todos os modais (10%)
Custo total	R\$ 42,62/t	R\$ 37,88/t	R\$ 45,96/t	R\$ 42,62/t
Emissões CO ₂	28,51 kgCO ₂ /t	27,44 kgCO ₂ /t	28,03 kgCO ₂ /t	26,48 kgCO ₂ /t
Δ% emissões CO ₂	- 3,13%	- 6,76%	- 4,76%	- 10,02%
Consumo de combustível	1.694,46 mil m ³	1.694,46 mil m ³	1.580,30 mil m ³	1.526,72 mil m ³

Fonte: elaboração própria.

O mesmo comportamento ocorre quando há uma elevação da eficiência energética dos modais de transporte. Comparando as medidas adotadas na Tabela 49, percebe-se que o aumento da eficiência energética leva ao menor nível de emissões se tal aumento se aplicar a todos os modais. Já o uso integral dos biocombustíveis leva a um custo de transporte menor.

Como pode ser visto na Tabela 50, o aumento da capacidade seria a medida que promoveria a maior redução das emissões, porém, não é a que traz o menor custo de transporte. O menor custo seria obtido com o uso integral de biocombustível.

Tabela 50 – Comparação das medidas analisadas no cenário futuro

	Minimização do custo de transporte	Taxa de R\$ 50,00/tCO₂	Limite:20% Crédito: R\$ 21,00 (A)	Limite 20% Crédito: R\$ 21,00 (B)
Custo total	R\$ 47,35/t	R\$ 48,44/t	R\$ 47,15/t	R\$ 47,35/t
Emissões CO ₂	29,43 kgCO ₂ /t	28,93 kgCO ₂ /t	29,42 kgCO ₂ /t	29,42 kgCO ₂ /t
Δ% custo total	-	2,30%	- 0,42%	0%
Δ% emissões CO ₂	-	-1,70%	- 0,04%	-0,04%

	Aumento de 100% capac.	Aumento 100% cap. portos	Uso integral de biodiesel	Aumento eficiência Modais (10%)
Custo	R\$ 43,59/t	R\$ 41,38/t	R\$ 37,88/t	R\$ 42,62/t
Emissões CO ₂	25,80 kgCO ₂ /t	29,05 kgCO ₂ /t	27,44 kgCO ₂ /t	26,48 kgCO ₂ /t
Δ% custo total	- 7,94%	-12,61%	- 20%	- 9,99%
Δ% emissões CO ₂	- 12,33%	-1,29%	- 6,76%	- 10,02%

Fonte: elaboração própria.

A: mecanismo de compra e venda de créditos de carbono. B: mecanismo de compensação das emissões.

É possível perceber que as medidas convencionais de mitigação não são as melhores alternativas para redução das emissões. Além de promoverem uma pequena redução das emissões, tais medidas podem elevar o custo de transporte, como através da adoção de uma taxa. Mesmo no caso do mecanismo de compra e venda de créditos de carbono, que permite a venda de créditos, isto provoca uma pequena redução no custo total. Embora em termos globais a redução seja de 20%, as emissões efetivas do setor de transporte se reduzem em apenas 0,04%.

Mesmo quando se considera que tal mecanismo permite a redução de 20% das emissões, o aumento da capacidade dos terminais de embarque seria a medida mais desejável, pois neste caso é possível se obter uma redução significativa tanto nos custos de transporte quanto nas emissões decorrentes.

Como foram abordadas diversas configurações de transporte, é interessante comparar quais são os efeitos das expansões consideradas, em cada uma das simulações feitas. Assim, na próxima seção, serão comparados quais os efeitos de variações na configuração de transporte.

5.4 Comparação dos efeitos das medidas analisadas nos cenários adotados

Nesta seção serão comparados os efeitos das medidas apresentadas, em função de variações na infraestrutura do transporte ferroviário e hidroviário. Como pode ser visto na Tabela 51, quanto maior a oferta de terminais de embarque, menor o custo de transporte correspondente. Este fato não surpreende uma vez que, como já mencionado, foi aplicado um desconto sobre o frete rodoviário e hidroviário, o que os torna mais baratos que o transporte rodoviário.

Tabela 51 – Modelo de minimização do custo

	Cenário Base	Cenário Geral	Cenário Expansão	Cenário Futuro
Custo total	R\$ 73,06/t	R\$ 59,81/t	R\$ 67,76/t	R\$ 47,35/t
Emissões CO ₂	62,15 kgCO ₂ /t	48,50 kgCO ₂ /t	57,67 kgCO ₂ /t	29,43 kgCO ₂ /t
Δ% custo total	-	- 18,14%	- 7,25%	- 35,19%
Δ% emissões	-	- 21,96%	- 7,21%	- 52,65%

Fonte: elaboração própria.

Quanto ao custo de transporte, cabe destacar que no cenário futuro, onde se considera que todas as obras de expansão das ferrovias e hidrovias serão de fato executadas, se obtém o menor custo possível, que corresponde a uma redução de 35,19% do custo no cenário base.

A redução das emissões de CO₂ segue padrão semelhante. Isto implica que quanto maior a oferta de terminais de embarque ferroviário e hidroviário, menores são as emissões resultantes, o que passa a ser um indício de que uma infraestrutura logística adequada pode funcionar como uma medida de mitigação sem, contudo, onerar o transportador.

Sendo assim, percebe-se que seria possível obter uma redução tanto das emissões como do custo de transporte. No caso do cenário futuro, como já mencionado, haveria uma redução de 35,19% no custo de transporte. Além disso, haveria também uma redução de 52,65% das emissões de CO₂. Nota-se que se estas obras de expansão estivessem incluídas em algum programa de mitigação, o efeito da medida seria o desejável, já que são possíveis reduções das emissões sem implicar uma elevação no custo de transporte.

As próximas análises serão feitas com relação ao modelo de minimização de custo de transporte, em cada cenário. Assim, por exemplo, quando se afirma que houve uma redução de 10% das emissões no cenário geral, a base de comparação é o modelo de minimização de custo do cenário geral. Esta decisão foi tomada para que seja possível analisar o efeito relativo de cada medida em seu respectivo cenário.

Esclarecido este ponto, é possível verificar na Tabela 52 que o cenário futuro se apresenta com grande potencial para reduzir as emissões, já que o modelo de minimização das emissões mostrou uma possível redução de 15,12%. Porém, neste caso, haveria uma elevação do custo total de aproximadamente 0,99%. Surgem indícios da existência do já mencionado *trade-off* entre emissões e custo de transporte. No entanto, este *trade-off* se torna menor à medida que se aumenta a oferta de modais menos poluentes, como no cenário geral e no cenário futuro. Nesses casos, embora ocorra uma elevação no custo de transporte decorrente da minimização das emissões, a magnitude desta elevação é menor que a magnitude da redução das emissões.

Tabela 52 – Minimização das emissões

	Cenário Base	Cenário Geral	Cenário Expansão	Cenário Futuro
$\Delta\%$ custo total	1,35 %	0,62%	1,25%	0,99%
$\Delta\%$ emissões CO ₂	- 1,62%	- 8,14%	- 4,35%	-15,12%

Fonte: elaboração própria.

Mesmo nos cenários em que a oferta e a capacidade dos terminais menos poluentes sejam menores, como no cenário base e no cenário expansão, a elevação do custo é menor que a redução das emissões. Cabe destacar que, no cenário base, a redução das emissões é pequena, pois como já mencionado a capacidade de embarque praticamente se esgota.

Existe, porém, um aspecto importante quanto aos bons resultados do cenário futuro. Muitas das ferrovias e hidrovias são apenas projetos. Não se sabe quando ou se algum dia se tornarão uma realidade. Assim, quando se considera o mínimo possível das emissões, numa possibilidade mais concreta de execução dos projetos propostos, percebe-se que o potencial de redução das emissões é menor (de 4,35%) quando se considera as obras que de fato estão em fase de execução.

No entanto, como já relatado neste trabalho, parece pouco provável que o transportador ou o produtor da soja busquem emissões mínimas. Mesmo porque, o objetivo sempre será obter uma redução de custos. Por isso, pode haver a defesa do uso de uma taxa como meio de se obter a redução das emissões.

Conforme verificado anteriormente, a adoção de uma taxa não exerce tanto efeito sobre as emissões de CO₂. Neste caso, pode ser visto na Tabela 53 que o benefício da adoção da taxa, medido em redução das emissões, é menor que o custo de tal medida, mesmo no cenário onde existe maior oferta de terminais de embarque. Nota-se, neste caso, que a redução de 1,70% das emissões implica uma elevação de 2,30% no custo total. Na análise anterior foi visto que a minimização das emissões para este cenário equivaleria a uma redução de 15,12% nas emissões e a uma elevação de 0,99% no custo de transporte. A diferença entre os modelos de otimização implica uma pouca eficácia da adoção de uma taxa, em termos ambientais, além de ser indesejável, sob a ótica logística, já que acarreta uma elevação do custo de transporte.

Tabela 53 – Adoção de uma taxa de R\$ 50,00/tCO₂

	Cenário Base	Cenário Geral	Cenário Expansão	Cenário Futuro
Δ% custo total	4,16 %	3,88 %	4,21 %	2,30 %
Δ% emissões CO ₂	-0,14 %	- 0,35 %	- 0,10 %	-1,70%
Receita do Governo	R\$ 364 milhões	R\$ 337 milhões	R\$ 361 milhões	R\$ 217 milhões

Fonte: elaboração própria.

Outro ponto importante relativo à adoção de uma taxa é que à medida em que se aumenta o número de terminais de embarque, a receita tributária do governo se reduz. Assim, numa situação onde a receita decorrente da taxa seja utilizada para financiar um eventual *déficit*, surge a dúvida se o governo se interessaria em obras de expansão destes terminais, já que esta construção implicaria, por um lado, uma elevação dos gastos do governo e, por outro lado, implicaria uma redução da arrecadação. Como este é um tema complexo e foge do escopo deste trabalho, essa discussão não será levada adiante.

O caso da adoção do mecanismo de compra e venda de créditos de carbono mostrou-se pouco eficaz na redução direta das emissões de CO₂, conforme mostrado pela Tabela 54, mesmo no caso em que há um número maior de terminais de embarque ferroviários e hidroviários, como no cenário futuro. No geral, tal mecanismo de mitigação eleva o custo total quando há necessidade da compra de créditos. No cenário futuro, houve a possibilidade da venda de créditos, o que reduziu o custo total em 0,42%.

Tabela 54 – Adoção do mecanismo de compra e venda de créditos de carbono com meta de redução de 20% nas emissões de CO₂ e preço do crédito de R\$ 21,00

	Cenário Base	Cenário Geral	Cenário Expansão	Cenário Futuro
Δ% custo total	0,36 %	0,15%	0,35%	-0,42%
Δ% emissões CO ₂	0 %	- 0,14%	0 %	-0,04%
Crédito comprado (+) ou vendido (-) (milhões de unidades)	(+) 1,46	(+) 0,93	(+) 1,40	(-) 1,44

Fonte: elaboração própria.

Este tipo de mecanismo parece ser útil quando a possibilidade de redução das emissões é baixa, uma vez que a oferta de créditos de carbono implica que, em algum lugar do

mundo, houve uma redução das emissões. No entanto, em termos locais, tal mecanismo não incentiva uma redução maior das emissões, o que indica que é mais vantajoso comprar créditos de carbono que encontrar combinações alternativas de modais de transporte que implicariam menores reduções das emissões de CO₂.

Por outro lado, nos casos em que houve elevação no custo total, tal elevação foi menor que no caso da adoção de uma taxa. Isto ocorre porque a taxa ‘pune’ as emissões totais do setor. Já o mecanismo de compra e venda de créditos de carbono ‘pune’ apenas as emissões que ultrapassam a meta de redução. Se houver a possibilidade de se obter emissões abaixo da meta, não há qualquer ‘punição’. Muito pelo contrário, com a possibilidade de venda de créditos, há uma redução no custo total.

Quanto à elevação da capacidade dos modais, percebe-se pela Tabela 55 a importância que uma infraestrutura logística adequada pode desempenhar, tanto sobre o custo de transporte, quanto sobre as emissões de CO₂. No cenário base, por exemplo, uma elevação em 100% da capacidade atual das ferrovias e hidrovias levaria a uma redução de 14,96% no custo total e uma redução de 19,05% nas emissões. Comparando estes resultados com o mecanismo de compra e venda de créditos de carbono, percebe-se que tal expansão da capacidade seria mais interessante, já que haveria uma redução considerável no custo total. Embora a redução das emissões seja virtualmente menor que no mecanismo de compra e venda de permissões, a redução alcançada não dependeria da existência de um mercado que fornecesse créditos de carbono.

Tabela 55 – Elevação de 100% na capacidade de embarque dos terminais de transbordo

	Cenário Base	Cenário Geral	Cenário Expansão	Cenário Futuro
Δ% custo total	- 14,96 %	- 6,89%	- 12,82%	- 7,94%
Δ% emissões CO ₂	- 19,05%	- 6,78%	- 17,24%	-12,33%

Fonte: elaboração própria.

Comparando a variação do custo em todos os cenários, percebe-se que quanto maior for a existência de terminais ferroviários e hidroviários, menor é a redução no custo total. Em cenários como o Geral ou o Futuro, o número de terminais de embarque é mais elevado que nos demais cenários; por isso, o custo resultante quando a capacidade é limitada já é mais baixo que nos demais cenários, uma vez que a capacidade de embarque em modais mais baratos era maior. Por isso, a redução do custo é menor nestes casos.

É importante ressaltar que a elevação da capacidade atual das ferrovias continua desempenhando um papel importante mesmo em cenários onde existe um número maior de terminais. No cenário base, quando a capacidade aumenta 100%, os modais ferroviário e hidroviário transportam conjuntamente 26,76 milhões de toneladas. No cenário Expansão, o aumento de 100% da capacidade permite o embarque de 30,27 milhões de toneladas nas ferrovias e hidrovias. Como neste cenário a quantidade embarcada nos novos terminais foi de 4,06 milhões de toneladas, conclui-se que nos terminais que já existiam (e que são os mesmos do cenário base) foram embarcadas aproximadamente 26,21 milhões de toneladas, o que implica que a quantidade de carga embarcada nos terminais já existentes é muito próxima em ambos cenários.

Mesmo num cenário em que é permitida a existência de mais terminais, como o cenário Futuro, percebe-se a importância da elevação da capacidade da configuração atual de transporte ferroviário e hidroviário. Neste caso, quando a capacidade era limitada, a quantidade de carga transportada pelas ferrovias e hidrovias foi equivalente 34,94 milhões de toneladas. Quando houve a elevação da capacidade, a quantidade transportada aumentou para 40,06 milhões de toneladas. Considerando apenas as ferrovias existentes, a quantidade de carga embarcada passou de 12,75 milhões de toneladas para 19,24 milhões de toneladas, no caso de uma elevação de 100% na capacidade de embarque.

Com relação ao aumento da capacidade dos portos, nota-se pela Tabela 56 que quando o número de ferrovias e hidrovias é maior, é possível se obter uma redução maior no custo de transporte, como no caso do cenário futuro. No entanto, a redução das emissões não seria a maior neste cenário.

Tabela 56 – Aumento de 100% na capacidade dos portos

	Cenário Base	Cenário Geral	Cenário Expansão	Cenário Futuro
$\Delta\%$ custo total	- 5,98%	-7,34%	- 10,95%	-12,61%
$\Delta\%$ emissões CO ₂	- 8,30%	-7,71%	-9,99%	-1,29%

Fonte: elaboração própria.

É interessante ressaltar que, no cenário base, esta elevação na capacidade dos portos seria responsável por uma redução de 8,30% das emissões e de 5,98% no custo total. Ou seja, seria um efeito desejável sem necessitar se impor uma oneração ainda maior sobre o produtor ou o transportador.

A Figura 23 mostra como seria a variação da quantidade embarcada nos portos entre os cenários quando ocorre uma elevação de 100% na capacidade dos portos. Nota-se que a quantidade embarcada no porto de Santos varia entre os cenários, mas o porto se mantém como o principal para as exportações de soja. Dependendo do cenário, é seguido pelo Porto de Paranaguá ou pelo Porto Rio de Grande.

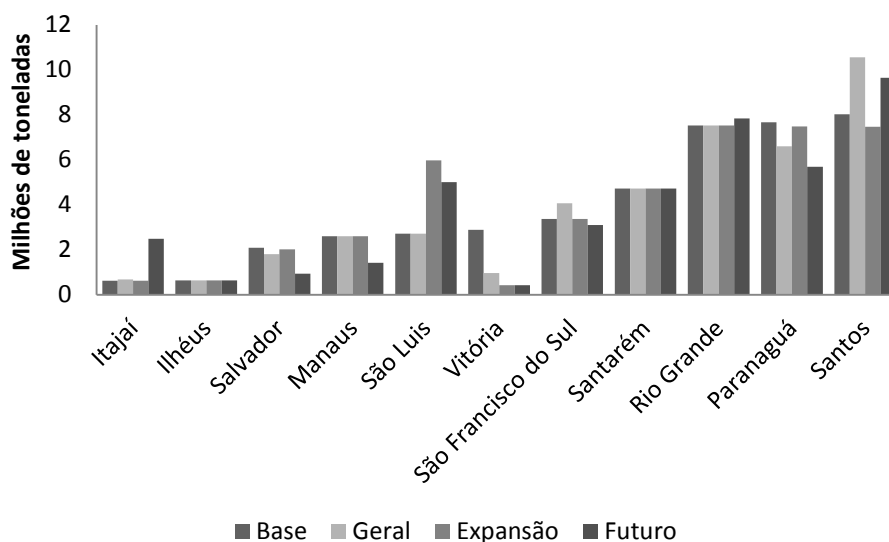


Figura 23 – Variação da carga embarcada nos portos de acordo com os cenários adotados
Fonte: elaboração própria.

Dependendo da configuração logística, alguns portos recebem menos carga, como o Porto de Vitória e o Porto de Manaus. Cabe destacar que, nos cenários expansão e futuro, o Porto de São Luís passa a receber uma quantidade maior de carga, uma vez que a FNS, quando completa, se liga com a EFC cujo destino é a cidade de São Luís (MA). Outro porto que seria mais utilizado seria o porto de Itajaí, graças ao Corredor Ferroviário de Santa Catarina que se liga com a FNS, projeto incluso apenas no cenário futuro. Cabe destacar ainda que o Porto de Belém, apenas no cenário futuro, receberia 967 mil toneladas de soja. Tal fato se deve à expansão da FNS, por meio da ligação entre Açailândia (MA) e Barcarena (PA).

Com relação à mudança no padrão de combustível, percebe-se que a medida teria efeitos próximos entre os cenários, independentemente da configuração das ferrovias e hidrovias, como mostrado pela Tabela 57. Como se considerou que o preço do biodiesel seria 20% menor que o preço do diesel, houve uma redução no custo total de 20% em todos os cenários.

Tabela 57 – Uso integral de biodiesel em todos os modais

	Cenário Base	Cenário Geral	Cenário Expansão	Cenário Futuro
$\Delta\%$ custo total	- 20 %	- 20 %	- 20 %	- 20 %
$\Delta\%$ emissões CO ₂	- 6,32%	- 6,37%	- 6,31 %	- 6,76 %

Fonte: elaboração própria.

Com relação às emissões de CO₂, a adoção integral de biocombustível leva a uma redução de aproximadamente mais de 6% em todos os cenários. Este padrão de redução surge porque o fator de emissão do biodiesel é o mesmo em todos os modais. Pelos dados da Tabela 57 é possível notar que a adoção deste padrão de biocombustível pode ser eficiente em termos de redução das emissões de CO₂ e em termos de custo de transporte.

No entanto, a adoção integral de biocombustíveis pode ter duas implicações importantes. A primeira é que se assume que é possível utilizar o biodiesel em todos os caminhões sem que seja necessária qualquer mudança nos motores dos mesmos. Outra implicação, conforme já mencionado, se refere aos possíveis efeitos de elevação da demanda por biocombustíveis. Isso porque alguns biocombustíveis derivam de produtos agrícolas e a maior demanda pode implicar uma expansão das fronteiras agrícolas, causando o desmatamento, e em consequência, aumento das emissões de CO₂.

Já o aumento da eficiência em todos os modais exerce um impacto maior sobre as emissões de CO₂, tornando-as menores que quando se utiliza apenas biodiesel. Um aumento de 10% na eficiência energética leva a uma redução de 10% das emissões de CO₂. Isso porque a eficiência foi medida como uma redução de 10% no consumo específico de combustível de cada modal. Como se assumiu que esta redução do consumo específico implicaria uma redução do consumo de combustível e em consequência o preço do frete se tornaria mais baixo, houve a redução do custo total em aproximadamente 10% em todos os cenários, como pode ser visto pela Tabela 58.

Tabela 58 – Aumento de 10% na eficiência energética em todos os modais

	Cenário Base	Cenário Geral	Cenário Expansão	Cenário Futuro
$\Delta\%$ custo total	-10%	-10%	- 9,99%	- 9,99%
$\Delta\%$ emissões CO ₂	-10%	-10%	-9,99%	-10,02%

Fonte: elaboração própria.

De uma forma geral, analisando-se as variações entre os cenários, percebe-se que medidas não convencionais de mitigação possuem um efeito maior na redução das emissões diretas de CO₂. Além desta maior redução, haveria também uma redução do custo de transporte. As reduções, tanto das emissões quanto do custo, dependem, nestes casos, da existência de medidas que melhorem a infraestrutura logística no país ou mudanças de cunho tecnológico.

Sendo assim, é possível verificar que medidas tradicionais de mitigação, em especial a taxa sobre as emissões de CO₂, não seriam desejáveis, *a priori*, já que neste caso não há uma redução significativa nas emissões, além de implicar uma elevação do custo de transporte.

No caso do mecanismo de compra e venda de créditos de carbono, existem indícios de que este mecanismo pode ser uma opção quando não há alternativas para se obter emissões de CO₂ menores, numa situação de uma política em que se estabeleça um limite para as emissões do país. Como foi verificado no cenário geral, assumindo-se a atual configuração das ferrovias e hidrovias para o transporte de soja, este mecanismo possibilita uma redução maior das emissões, quando comparadas com a adoção de uma taxa. No entanto, esta redução seria feita por meio da compra de créditos e não por meio da redução direta das emissões.

Na análise desenvolvida até aqui, manteve-se o nível de produção do ano de 2013 para que fosse possível se considerar como a mudança de infraestrutura logística pode afetar o desempenho de medidas de mitigação das emissões de CO₂. No entanto, uma elevação da produção poderia impactar os resultados obtidos, já que pode surgir alguma mudança nas escolhas de transporte em virtude de uma produção maior a ser transportada nos modais analisados. Portanto, na próxima seção serão apresentados os resultados das simulações, considerando a projeção de crescimento da produção da soja feita pelo Ministério da Agricultura, Pecuária e Abastecimento (2015).

5.5 Análise da simulação do cenário de crescimento da produção

Conforme mencionado anteriormente, nesta seção será considerada a projeção de crescimento de 33,9% da produção de soja e crescimento de 42,1% na exportação da soja para a safra 2024/2025, de acordo com o Ministério da Agricultura, Pecuária e Abastecimento (2015).

Nesse cenário futuro, será admitido que não haverá variações no preço dos fretes. Além dos fretes, serão mantidos constantes todos os preços abordados nas seções anteriores. Esta decisão foi tomada pois, para este horizonte de tempo tão distante, é

complexo tentar prever preços. Ainda mais quando se consideram preços hipotéticos, como os referentes às políticas de mitigação.

Outro ponto a ser mencionado é que, por se tratar de um cenário de longo prazo, optou-se por não limitar a quantidade de carga mínima a ser embarcada nos portos. Quanto aos terminais ferroviários e hidroviários, manteve-se a limitação da capacidade de embarque como sendo a verificada no ano de 2013 para os terminais existentes, enquanto para os novos atribuiu-se uma capacidade de 5 milhões de toneladas, como feito nas seções anteriores. Optou-se por manter tais limitações, já que uma das medidas analisadas é o aumento da capacidade de embarque dos terminais ferroviários e hidroviários.

Portanto, nesta seção, serão mostrados quais os possíveis efeitos das medidas de mitigação já apresentadas nas seções anteriores e também medidas relacionadas à expansão dos terminais de embarque ferroviários e hidroviários, assim como uma elevação na capacidade dos portos. Seguindo o padrão das demais seções, serão apresentados também os possíveis efeitos de mudanças no padrão de combustível e aumento da eficiência energética do setor de transporte.

Na Tabela 59 é possível verificar que o custo mínimo seria de R\$ 48,15/t quando nenhuma medida ambiental é tomada. Porém, quando se considera o custo ambiental, há uma elevação de 6,99% no custo total e as emissões se reduzem em aproximadamente 2,04%. Se o objetivo for minimizar as emissões, a elevação no custo seria de 9,06%, decorrente de uma redução de 16,43% nas emissões. Tal fato evidencia que, mesmo numa elevação da produção de soja no futuro, se as obras de expansão das ferrovias e hidrovias de fato se concretizarem, seria possível reduzir as emissões de CO₂. Porém, neste caso haveria uma elevação o custo de transporte.

Tabela 59 – Minimização do custo de transporte, do custo ambiental e das emissões no cenário crescimento da produção

	Minimização do custo de transporte	Minimização do custo ambiental	Minimização das emissões
Custo total	R\$ 48,23/t	R\$ 51,12/t	R\$ 52,60/t
Emissões de CO ₂	31,78 kgCO ₂ /t	31,13 kgCO ₂ /t	26,56 kgCO ₂ /t
Consumo de combustível	2.512,26 mil m ³	2.473,01 mil m ³	2.226,55 mil m ³

Fonte: Elaboração própria.

Quanto aos novos terminais ferroviários e hidroviários, é possível perceber pela Figura 24 que a Ferrovia de Integração do Centro-Oeste (FICO) manteria importância no transporte de soja, assim como no cenário futuro. Outra ferrovia que teria grande participação seria a Ferrovia Norte Sul (FNS), que seria responsável por 18% da soja embarcada nos novos terminais. Considerando o transporte total nas ferrovias e hidrovias, os novos trechos seriam responsáveis pelo transporte de 75% da soja comercializada.

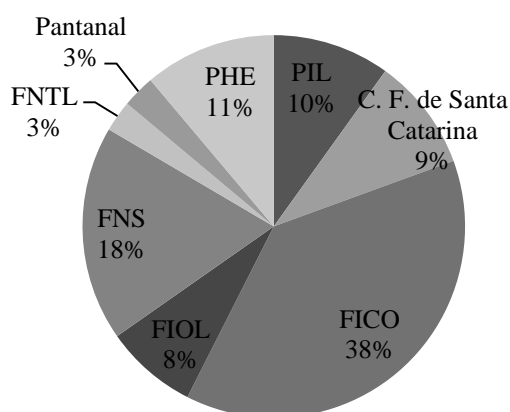


Figura 24 – Participação das novas ferrovias e hidrovias no transporte de soja no cenário crescimento da produção

Fonte: elaboração própria.

Quanto à capacidade de embarque, apenas na Ferrovia de Integração do Centro- Oeste (FICO), os terminais de Lucas do Rio Verde (MT) e Água Boa (MT) esgotariam a capacidade estabelecida de 5 milhões de toneladas. A explicação para este fato decorre da ligação destes terminais com o porto de Santos (SP), o que sugeriria a necessidade de que a capacidade destes terminais fosse maior que 5 milhões de toneladas⁵³.

Quanto à minimização das emissões, novamente, fica claro que existe um *trade-off* entre custo de transporte e meio ambiente, uma vez que a melhoria de um depende da deterioração do outro. Assim, a redução de aproximadamente 16,5% das emissões de CO₂ acarretaria uma elevação de 9,06% no custo de transporte. Isto surge porque combinações que poderiam ser pouco competitivas para o transporte de soja passariam a ser utilizadas quando o objetivo fosse reduzir as emissões.

No entanto, como já destacado, dificilmente o transportador ou o produtor terão como objetivo minimizar as emissões. Mesmo quando se consideram medidas de

⁵³ Na simulação de aumento da capacidade dos terminais será possível encontrar indícios a respeito de qual deveria ser a capacidade destes terminais.

mitigação, o objetivo sempre será reduzir o custo. A melhora ambiental seria uma consequência do objetivo minimizador dos agentes envolvidos nesta análise. Por isso, são adotadas medidas de mitigação para que se consiga obter um ambiente mais limpo.

A adoção de uma taxa manteria o padrão encontrado nesta pesquisa. Conforme a Tabela 60 pode-se perceber que a variação das emissões de CO₂ é pequena, quando se compara as emissões referentes a cada valor de tarifa. O menor valor das emissões de CO₂ corresponderia à alíquota de R\$ 200/tCO₂; porém, neste caso, o custo de transporte seria o mais elevado.

Tabela 60 – Efeitos da adoção de uma taxa no cenário crescimento da produção

	Taxa de R\$ 12,00/tCO₂	Taxa de R\$ 50,00/tCO₂	Taxa de R\$ 200/tCO₂
Custo total	R\$ 48,61/t	R\$ 49,59/t	R\$ 54,10 /t
Emissões de CO ₂	31,78 kgCO ₂ /t	31,40 kgCO ₂ /t	30,91kgCO ₂ /t
Consumo de combustível	2.512,26 mil m ³	2.492,93 mil m ³	2.461,03 mil m ³
Receita Governo	R\$ 78,17 milhões	R\$ 323,2 milhões	R\$ 1,28 bilhões

Fonte: elaboração própria.

Dividindo os efeitos da adoção da taxa sobre o custo de transporte e sobre as emissões, percebe-se que quanto maior o valor da taxa, maior seria a redução das emissões; porém, o custo também se elevaria (resta saber em quais proporções). Uma taxa de R\$ 12,00/tCO₂ não provocaria uma redução nas emissões de CO₂, quando comparadas à simulação de minimização de custo sem qualquer medida de mitigação. Porém, esta mesma taxa provocaria uma elevação de 0,79% no custo de transporte. Quando a taxa escolhida é de R\$ 50,00/tCO₂, ocorreria uma elevação no custo de 2,82% e uma redução das emissões em 1,2%. Já uma taxa de R\$ 200,00/tCO₂ elevaria o custo de transporte em 12,17% e reduziria as emissões em 2,74%.

É possível verificar que taxas mais elevadas induzem o transportador a escolher combinações de transporte menos poluentes, favorecendo modais de transportes cujo consumo de combustível é menor. Porém, o preço de tal medida é uma elevação maior no custo de transporte, quanto maior for a taxa adotada.

Conforme verificado nesta análise, a adoção de uma taxa teria menor influência nas reduções das emissões. O que, do ponto de vista ambiental, tornaria tal medida menos

desejável. Do ponto de vista do custo de transporte, também seria pouco desejável em função da elevação do custo.

Já o mecanismo de compra e venda de créditos de carbono aplicaria uma ‘punição’ apenas sobre quantidade de emissões que excede a meta estabelecida. A elevação do custo de transporte, neste caso, não seria tão elevada quanto a adoção de uma taxa. Conforme mostra a Tabela 61, é possível perceber que as emissões variam de acordo com o preço do crédito, de forma que quando o preço do crédito aumenta, as emissões de CO₂ diminuem, ainda que de forma pouco expressiva.

Tabela 61 – Efeitos da adoção do mecanismo de compra e venda de créditos de carbono no cenário expansão da produção

	Limite 20% Crédito: R\$ 8,25	Limite 20% Crédito: R\$ 21,00	Limite 43% Crédito: R\$ 8,25	Limite 43% Crédito: R\$ 21,00
Custo total	R\$ 48,26/t	R\$ 48,30/t	R\$ 48,32/t	R\$ 48,47/t
Emissões de CO ₂	31,78 kgCO ₂ /t	31,76 kgCO ₂ /t	31,78 kgCO ₂ /t	31,76 kgCO ₂ /t
Consumo de combustível	2.512,26 mil m ³	2.511,18 mil m ³	2.512,26 mil m ³	2.511,18 mil m ³
Crédito comprado	R\$ 5,61 milhões	R\$ 14,23 milhões	R\$ 19,45 milhões	R\$ 49,45 milhões

Fonte: elaboração própria.

Com relação ao custo de transporte, quando a meta estabelecida é de 20%, se o preço do crédito fosse R\$ 8,25, o custo total se elevaria em 0,06% quando comparado à simulação inicial de minimização do custo de transporte. Se o preço do crédito fosse R\$ 21,00, haveria uma elevação de 0,15% no custo total. Quando a meta de redução se torna mais restritiva, há uma elevação ainda maior no custo de transporte. Se o preço do crédito for R\$ 8,25, o custo se eleva em 0,19% e se o preço do crédito for R\$ 21,00 há uma elevação de 0,50% no custo total.

A seguir serão apresentados os efeitos de medidas que compreendem mudanças estruturais na capacidade logística, simplificadas na Tabela 62 por aumento da capacidade dos terminais de embarque e dos portos. Quando se compara o efeito de uma elevação de 100% na capacidade de embarque, com a mesma elevação sobre a capacidade dos portos, percebe-se que a elevação da capacidade dos terminais de embarque exerceria mais influência tanto sobre o custo como sobre as emissões.

Tabela 62 – Efeitos de mudanças estruturais no cenário de crescimento da produção

	Aumento de 50% na cap. embarque	Aumento de 100% na cap. embarque	Ausência de limite de embarque	Aumento de 100% cap. portos
Custo total	R\$ 45,75/t	R\$ 43,96/t	R\$ 36,70/t	R\$ 44,94/t
Emissões CO ₂	29,08 kgCO ₂ /t	27,11 kgCO ₂ /t	26,19 kgCO ₂ /t	30,95 kgCO ₂ /t
Consumo de combustível	2.367,06 mil m ³	2.268,87 mil m ³	2.444,77 mil m ³	2.485,82 mil m ³

Fonte: elaboração própria.

No caso em que a capacidade dos terminais ferroviários e hidroviários é ilimitada, manteve-se o padrão encontrado neste trabalho. Haveria, neste caso, uma elevação do consumo de combustível, uma vez que existiria uma tonelagem maior transportada entre os modais. Isto implicaria um uso mais intensivo das rodovias, já que existiria uma elevação da carga transportada nos ferrovias e hidrovias, em virtude de não existir limites ao embarque.

Quanto ao aumento da capacidade dos portos, como já mencionado, tal efeito seria menor que o aumento de 100% na capacidade de embarque. Porém, tal elevação na capacidade dos portos provocaria uma redução de 6,82% no custo de transporte. Considerando o ponto de vista ambiental, se a capacidade dos portos aumentasse, seria possível se reduzir as emissões em 2,61%. Porém, a redução das emissões seria a menor entre as opções apresentadas na Tabela 62. No entanto, tal redução não decorreria de elevação de custo, como acontece quando há a adoção de uma taxa, por exemplo.

A adoção de novos padrões de combustível, apresentada na Tabela 63, seguiu o mesmo padrão dos cenários anteriores: quanto maior a utilização de biocombustíveis, menores as emissões resultantes e menor também o custo de transporte.

Tabela 63 – Efeitos de mudanças tecnológicas no cenário de crescimento da produção

	50% biodiesel no combustível	Uso integral de biocombustível	Aumento da eficiência das rodovias (10%)	Aumento da eficiência todos modais (10%)
Custo total	R\$ 43,41/t	R\$ 38,58/t	R\$ 46,46/t	R\$ 43,41/t
Emissões CO ₂	30,79 kgCO ₂ /t	29,75 kgCO ₂ /t	29,86 kgCO ₂ /t	28,60 kgCO ₂ /t
Δ% emissões CO ₂	- 3,11%	- 6,39%	- 6,04%	- 10,00%
Consumo de combustível	2.509,67 mil m ³	2.509,67 mil m ³	2.316,72 mil m ³	2.261,04 mil m ³

Fonte: elaboração própria.

Uma elevação da eficiência energética nas rodovias provocaria uma redução das emissões menor que nos cenários anteriores. Nota-se que, quando a eficiência energética se estende a todos modais, a redução das emissões seria maior que quando ocorrida apenas nas rodovias. Esta situação segue uma tendência já verificada na seção anterior pois, uma vez que se aumentam as opções de embarque intermodais, o impacto da eficiência energética sobre as rodovias torna-se menor do que o impacto no cenário base. Isto porque, como o custo de transporte das ferrovias e hidrovias é menor, torna-se mais intensivo o uso destes modais.

Em termos ambientais, conforme verificado na Tabela 64, a melhor alternativa dentre todas analisadas seria o aumento de 100% da capacidade de embarque das ferrovias e hidrovias, já que tal medida levaria a uma redução das emissões e do custo de transporte.

Tabela 64 – Comparação das medidas analisadas no cenário de expansão da produção

	Minimização do custo de transporte	Taxa de R\$ 50,00/tCO₂	Limite 20% Crédito R\$ 21,00	Aumento de 100% capacidade
Custo Total	R\$ 48,23/t	R\$ 49,59/t	R\$ 48,30/t	R\$ 43,96/t
Emissões CO ₂	31,78 kgCO ₂ /t	31,40 kgCO ₂ /t	31,76 kgCO ₂ /t	27,11 kgCO ₂ /t
Δ% custo total	-	2,82%	0,15%	- 8,85%
Δ% emissões CO ₂	-	- 1,20%	-0,06%	-14,69%

	Aumento 100% portos	Uso integral biodiesel	Aumento eficiência Modais (10%)
Custo total	R\$ 44,94/t	R\$ 38,58/t	R\$ 43,41/t
Emissões CO ₂	30,95 kgCO ₂ /t	29,75 kgCO ₂ /t	28,60 kgCO ₂ /t
Δ% custo total	- 6,82%	- 20,00%	- 9,99%
Δ% emissões CO ₂	- 2,61%	- 6,39%	- 10,00%

Fonte: elaboração própria.

Sob a ótica do transportador, entre as medidas apresentadas, a que resultaria num custo mais interessante seria o uso integral de biocombustíveis, uma vez que tornaria o custo de transporte 20% menor. Quanto às emissões de CO₂, haveria uma redução de 6,39%, valor bem inferior se comparado ao correspondente a um aumento de 100% na capacidade de embarque nos novos terminais.

De uma forma geral, os resultados mostram que as medidas de mitigação tradicional não seriam as mais adequadas para promover a redução das emissões. Ainda que

pese o fato de que no mecanismo de compra e venda de créditos de carbono seja possível atingir a redução estabelecida via compra de créditos, este mecanismo depende do funcionamento do mercado que comercialize estes créditos, como já mencionado.

Comparando os resultados obtidos neste cenário com o cenário futuro, percebe-se que o custo total resultante no cenário de crescimento da produção, como esperado, é mais elevado que o custo no cenário futuro. Assim, de uma forma geral, os custos correspondentes em cada uma das medidas analisadas foram mais elevados no cenário de crescimento da produção, como pode ser visto na Figura 25.

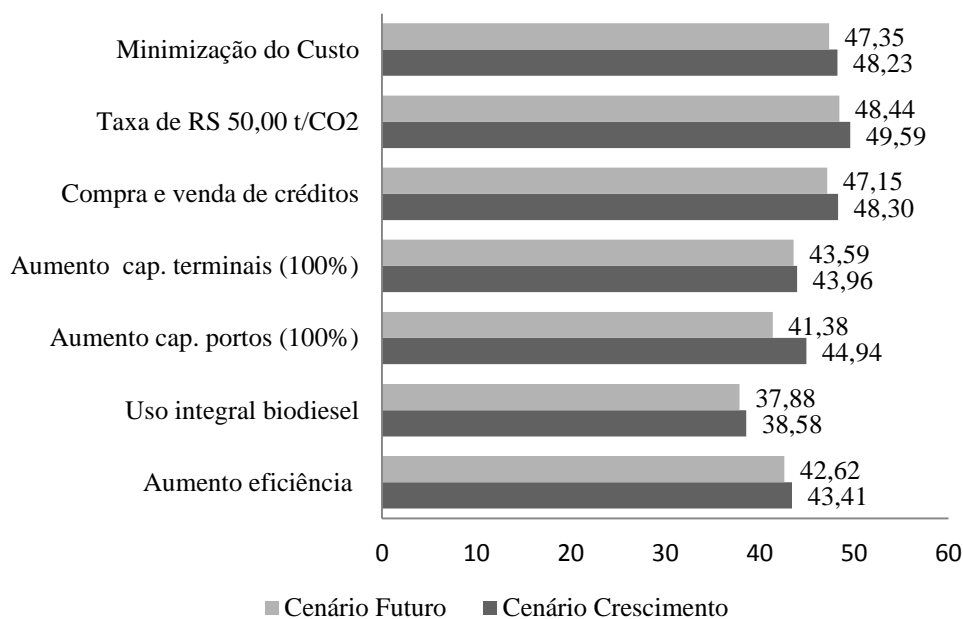


Figura 25 – Comparação do custo total nos cenários futuro e crescimento da produção
Fonte: elaboração própria.

A Figura 26 mostra como as emissões de CO₂ variaram entre o cenário futuro e o cenário crescimento. Como a configuração das ferrovias e hidrovias era a mesma do cenário futuro, houve uma elevação das emissões em função do crescimento da produção, já que as emissões dependem da quilometragem percorrida e da quantidade de carga transportada.

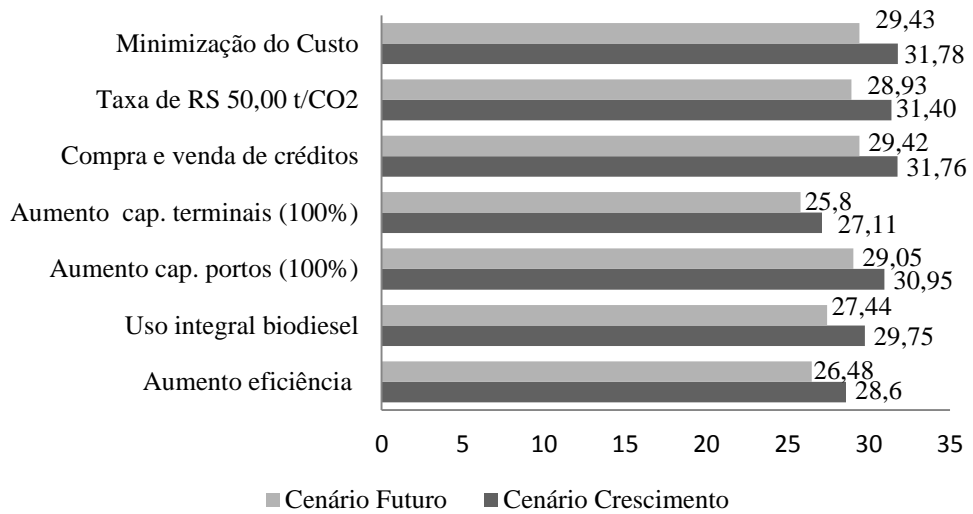


Figura 26 – Comparação das emissões de CO₂ entre os cenários futuro e crescimento da produção

Fonte: elaboração própria.

Quanto à quantidade embarcada nos novos terminais, como esperado, no cenário de crescimento da produção a utilização foi maior que no cenário futuro, como se verifica na Figura 27. Cabe destacar a grande participação que a Ferrovia de Integração do Centro-Oeste (FICO) teria no transporte de soja em ambos cenários. Com a projeção de crescimento da produção, haveria uma elevação de 35,37% na quantidade embarcada de soja nesta ferrovia.

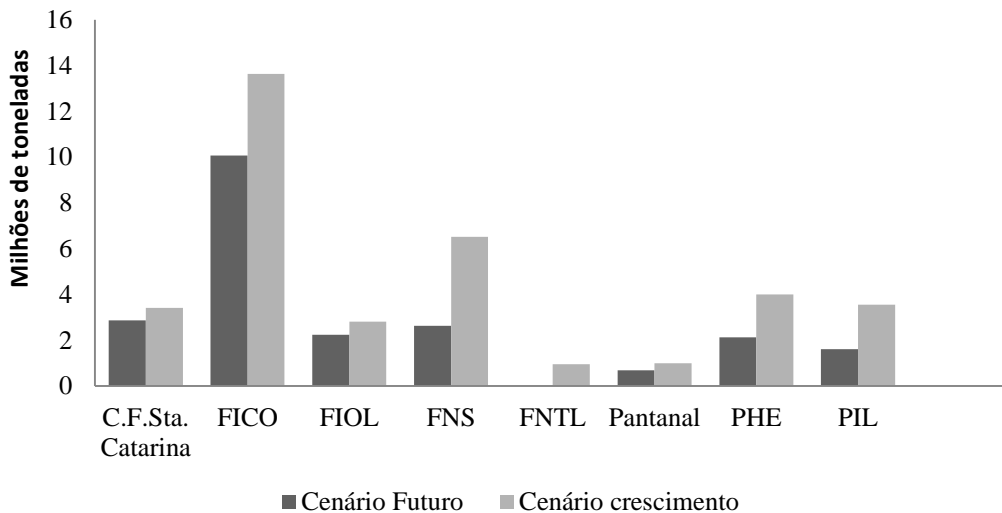


Figura 27 – Carga transportada nas novas ferrovias/hidroviás nos cenários futuro e crescimento da produção

Fonte: elaboração própria.

Outra ferrovia que apresentou um crescimento expressivo foi a ferrovia Norte Sul (FNS), cujo crescimento a partir de seus novos trechos seria de mais de 148%. No geral, houve uma elevação de 61,5% na carga transportada nos novos trechos em função do crescimento da produção e da exportação, o que mostra que além de novos terminais, é necessária também capacidade adequada para o embarque adicional de soja.

Assim, de acordo com os resultados obtidos, percebe-se que mudanças na infraestrutura logística ou desenvolvimento tecnológico são medidas mais desejáveis que as medidas de mitigação tradicional, já que estas medidas tradicionais não tiveram grande efeito na redução direta das emissões de CO₂. Isso, sem considerar que na maioria dos casos, medidas de mitigação tradicionais implicariam uma elevação dos custos de transporte, tornando o produto transportado menos competitivo.

6 CONCLUSÃO

Este trabalho teve como objetivo encontrar evidências a respeito de como poderia ser a relação entre o setor de transporte e o meio-ambiente, por meio da adoção de medidas regulatórias sobre as emissões de CO₂ no transporte da soja. A justificativa do uso destas medidas surge devido a um possível *trade-off* entre o objetivo ambiental e o objetivo logístico. Para o transportador, o objetivo é obter o menor custo possível. Só que este custo não necessariamente seria o associado ao menor nível de emissões. Este menor nível de emissões de CO₂ seria o objetivo ambiental.

Uma forma de se conciliar estes dois objetivos seria por meio do uso de modais menos poluentes, que no Brasil têm um valor de frete mais baixo. Assim, seria possível obter menores emissões a um custo menor. Surge, então, a questão da capacidade destes modais menos poluentes, que apesar de poluírem menos, seria necessário que houvesse disponibilidade dos mesmos para que tantos os objetivos logísticos quanto os ambientais pudessem ser satisfeitos.

Um ponto importante quanto à capacidade destes terminais centra-se no fato de que uma política de mitigação tradicional aplicada no setor de transportes poderia ter um efeito limitado, já que era esperado que tais medidas influenciassem as escolhas de transporte, de forma que os modais menos poluentes fossem priorizados. Entretanto, tal efeito seria anulado se o transportador não conseguir embarcar sua carga nestes terminais.

Além das medidas tradicionais de mitigação existem medidas não designadas diretamente para a redução das emissões, mas que podem exercer esse papel mitigador. Medidas associadas a certo nível de desenvolvimento tecnológico, que permitam o menor consumo de combustível ou um combustível menos poluente, podem levar a um nível menor de emissões.

Dentro deste contexto geral, observou-se neste trabalho que a medida mais eficaz para reduzir as emissões, dentro das medidas analisadas, seria a melhoria da infraestrutura logística. Essa melhoria seria representada pelos projetos previstos de ferrovias e hidrovias constantes dos programas PAC I, PAC II, PIL e PHE. Se estes projetos saírem do papel, poderia ser possível se obter uma redução de mais de 50% das emissões. Além da redução das emissões, seria possível se reduzir também os custos de transporte, já que caso os projetos de expansão das ferrovias e hidrovias saiam do papel, haverá uma disponibilidade maior de terminais de embarque, a partir dos quais o preço do frete é mais baixo.

No caso descrito anteriormente, no Brasil seria interligado por linhas ferroviárias de Norte a Sul e de Leste a Oeste. Entretanto, como já mencionado, existe certa dúvida quando à execução destes projetos, o que torna o bom desempenho ambiental distante da realidade. Obras que devem de fato ser concretizadas foram incluídas no cenário chamado Expansão, sendo que neste caso seria possível reduzir 7,21% das emissões de CO₂, considerando a quantidade comercializada no ano de 2013.

Este indício de que a capacidade dos terminais de embarque das ferrovias e hidrovias pode desempenhar um papel importante na redução das emissões de CO₂ foi reforçado a cada cenário e em cada simulação de aumento de capacidade realizado, indicando que, na maioria das simulações feitas, uma elevação da capacidade de embarque tornaria as emissões de CO₂ menores. Haveria também uma redução no custo do transporte.

Considerando as medidas de mitigação tradicionais, como a adoção de uma taxa sobre as emissões, verificou-se que, de forma geral, o custo econômico de tal medida era muito elevado, pois nos casos em que houve uma redução das emissões, a elevação do custo foi maior que a redução das emissões.

Na maioria dos casos, a redução proveniente de uma taxa foi muito baixa. Uma taxa de R\$ 50,00/tCO₂ levaria a uma redução de 0,10% nas emissões quando se considerou o cenário expansão, aquele em que foram consideradas apenas as obras de expansão das ferrovias e hidrovias que estão próximas de serem concretizadas. Mesmo no cenário logístico mais otimista, aquele em que todas as obras sairiam do papel, a redução das emissões via taxa seria de 1,7%.

Comparando esta situação com a medida de aumento de 100% da capacidade nos terminais ferroviários e hidroviários, para os mesmos cenários as reduções das emissões de CO₂ seriam de 17,24% e de 12,33%, respectivamente. Sendo assim, percebe-se que para esta pesquisa, a taxa foi a medida que trouxe os piores resultados, seja do ponto de vista ambiental, seja do ponto de vista logístico.

Outra medida de mitigação tradicional considerada neste trabalho foi o mecanismo de compra e venda de créditos de carbono. Este mecanismo consiste em estabelecer uma meta de redução das emissões. Se as emissões correntes estiverem acima da meta, seria necessário comprar créditos de carbono, caso contrário seria possível a venda de créditos de carbono. De uma forma geral, quando houve redução das emissões, esta redução foi pouco expressiva. Em quase todos os cenários, houve elevação do custo, ainda que em pequena magnitude. A exceção desta elevação ficou por conta do cenário futuro, onde foi permitida a venda de créditos.

Existe um aspecto importante neste mecanismo, que implica que em algum lugar do mundo houve uma redução correspondente das emissões, já que os créditos comprados devem vir de alguma atividade cujas emissões estiverem abaixo da meta estabelecida. Assim, quando se compara tal medida com a adoção de uma taxa, percebe-se que esta medida é preferível à tributação, já que a elevação dos custos de transporte quando se impõe uma tarifa foi maior que a elevação do custo quando se considerou a possibilidade de compra de créditos de carbono.

Por exemplo, no cenário Expansão, se o preço do crédito fosse R\$ 21,00/tCO₂, haveria uma elevação de 0,35% no custo de transporte. No mesmo cenário, uma taxa de R\$ 50,00/tCO₂ levaria a um aumento de 4,21% no custo. É possível perceber, neste caso, que do ponto de vista logístico, o mecanismo de compra e venda de créditos seria o desejável, quando comparado com a adoção de uma taxa. Mesmo quando se considera o aspecto ambiental, como já mencionado, a redução das emissões para o cenário em questão, decorrente da adoção da tarifa seria de 0,10%. No caso do mecanismo de créditos, a meta estabelecida seria uma redução de 20% das emissões de CO₂.

Ainda sobre o mecanismo de compra e venda de créditos de carbono, os indícios encontrados nesta pesquisa apontam que tal sistema seria uma saída quando a redução direta das emissões é algo caro ou difícil de ser obtido. No entanto, para que isto ocorra é necessário que exista um mercado global de créditos de carbono para fornecer os créditos. Sendo assim, resta dúvida quanto ao futuro de tal mecanismo; caso volte a funcionar como no passado, qual seria o preço deste crédito, já que o modelo se mostrou sensível ao preço do crédito?

Outro grupo de medidas que foi analisado neste trabalho está associado às mudanças no padrão de combustíveis e na eficiência energética dos mesmos. Como esperado, o uso mais elevado do biodiesel, por ser menos poluente, acarretaria um nível menor de emissões e também um custo mais baixo, já que se supôs que a diferença de preço do biodiesel para o diesel comum se manteria. O mesmo padrão pôde ser observado para a melhoria na eficiência energética, já que implicaria uma redução do consumo de combustível e, conseqüentemente, menores emissões.

Comparando o uso integral de biocombustíveis com a melhoria de eficiência energética, percebeu-se que as emissões decorrentes de uso de biodiesel seriam maiores que as emissões decorrentes de uma melhoria na eficiência energética. No cenário base, por exemplo, a redução das emissões seria de 6,32% se todo o combustível utilizado fosse biodiesel. Se houvesse uma melhoria de 10% na eficiência energética de todos os modais, a

redução das emissões seria de 10% neste cenário. Quanto aos custos, a situação se inverte: a redução do custo decorrente do uso de biocombustíveis seria maior que a obtida com a eficiência energética, de 20% e 10%, respectivamente.

O padrão apresentado até aqui se manteve quando se considerou o cenário crescimento, aquele em que se projetou o crescimento da produção em 33,9% na safra 2024/2025. Em função de uma quantidade maior a ser transportada, seria possível obter um nível menor de emissões que o verificado no ano de 2013. Para isso, seria necessário que todas as obras previstas de expansão da rede ferroviária e hidroviária saiam do papel.

Sendo assim, pode-se dizer que os objetivos deste trabalho foram atingidos. Isto não implica que a discussão se encerra com esta pesquisa, mesmo porque existem algumas limitações que podem ser tratadas por outros autores. Uma destas limitações é o uso de apenas um produto. O modelo pode ser expandido para atender a todos os produtos embarcados nas ferrovias e hidrovias e, com isso, obter um panorama mais geral das questões levantadas por este trabalho. Quanto às emissões analisadas neste trabalho, existe a possibilidade de se expandir a análise para todos os gases de efeito estufa e não apenas as emissões de CO₂.

Uma possibilidade de trabalho futuro seria interligar o modelo de transportes aqui apresentado em um modelo de Equilíbrio Geral Computável, para que os efeitos das medidas regulatórias possam ser aplicados em toda a economia e, com isso, se obter um resultado mais fiel quanto aos impactos negativos que tais medidas podem causar.

Em suma, neste trabalho foram encontrados indícios de que existe de fato um potencial de redução das emissões de CO₂ nesta rede futura de transporte. E que estas obras podem funcionar como medidas de mitigação, mesmo que não seja este o objetivo principal desses projetos. No entanto, caso os projetos fiquem apenas no papel, a redução das emissões seria menor, pois neste caso, seriam consideradas apenas as ferrovias em fase de execução e finalização. Aí, seria primordial o aumento da capacidade dos terminais de embarque ferroviários e hidroviários que já existem no país, caso seja do interesse das autoridades reguladoras obter um nível menor de emissões de CO₂.

REFERÊNCIAS

ABDALLAH, T.; FARHAT, A.; DIABAT, A.; KENNEDY, S. Green supply chains with carbon trading and environmental sourcing: Formulation and life cycle assessment. **Applied Mathematical Modelling**, Guildford, v. 36, n. 9, p. 4271-4285, Sept. 2012.

ABRELL, J. Regulating CO₂ emissions of transportation in Europe: A CGE analysis using market-based instruments. **Transportation Research Part D: Transport and Environment**, Oxford, v. 15, n. 4, p. 235-239, June 2010.

AGÊNCIA NACIONAL DE TRANSPORTES AQUAVIÁRIOS. **Anuário Estatístico de 2013 - Navegação Interior - cargas, empresas e frota**. Brasília, 2014. 116p.

AGÊNCIA NACIONAL DE TRANSPORTES TERRESTRES. **1º Inventário Nacional de Emissões Atmosféricas do Transporte Ferroviário de Cargas**. Brasília, 2012. 44p.

_____. **Acompanhamento das Concessões Ferroviárias - Relatório Anual GEROF/SUFER**. Brasília, 2013. 219p.

_____. **Programa de Investimentos em Logística: PIL Ferrovias**. Disponível em: <<http://pilferrovias.antt.gov.br/index.php>>. Acesso em: 01 ago. 2015a.

_____. **Serviço de Informação ao Cidadão - SIC**. Disponível em: <http://www.antt.gov.br/index.php/content/view/14090/Servico_de_Informacao_ao_Cidadao__SIC.html>. Acesso em: 01 ago. 2015b.

ANDERSEN, J.; CHRISTIANSEN, M. Designing new European rail freight services. **Journal of the Operational Research Society**, Basingstoke, v. 60, n. 3, p. 348-360, Mar. 2009.

ANGELO, L. B. **Custos logísticos de transferência de produtos: estudos realizados**. Florianópolis: GELOG, 2005, 19p.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DAS INDÚSTRIAS DE ÓLEOS VEGETAIS. Estatística. **ABIOVE**. Disponível em: <<http://www.abiove.org.br/site/index.php?page=estatistica&area=NC0yLTE=>>>. Acesso em: 02 jun. 2015.

ASSOCIAÇÃO NACIONAL DE FABRICANTES DE VEÍCULOS AUTOMOTORES. **Anuário da Indústria Automotiva Brasileira**. São Paulo, 2013. 160p.

ASSOCIAÇÃO NACIONAL DOS TRANSPORTADORES FERROVIÁRIOS. **Balanco do Transporte Ferroviário de cargas no Brasil de 2013**. Brasília, 2014. 32p.

BARBIERI, A. F.; DOMINGUES, E.; QUEIROZ, B. L.; RUIZ, R. M.; RIGOTTI, J. I.; CARVALHO, J. A. M.; RESENDE, M. F. Climate change and population mitigation in Brazil's Northeast: scenarios for 2025-2050. **Population and Environment**, New York, v. 31, n. 5, p. 334-370, May 2010.

BARTHOLOMEU, D. B.; CAIXETA-FILHO, J. V. Quantification of the environmental impacts of road conditions in Brazil. **Ecological Economics**, Amsterdam, v. 68, n. 6, p. 1778-1786, Apr. 2009.

BAUER, J.; BEKTAŞ, T.; GRAINIC, T. G. Minimizing GHG emissions in intermodal freight transport: An application to rail service design. **Journal of the Operational Research Society**, Oxford, n. 61, p. 530-542, Mar. 2010.

BENJAAFAR, S.; LI, Y.; DASKIN, M. Carbon footprint and the management of supply chains: insights from simple models. **IEEE Transactions on Automation Science and Engineering**, New York, v. 10, n. 1, p. 99-116, Jan. 2013.

BETSILL, M.; HOFFMAN, M. J. The contours of "cap and trade": the evolution systems of Greenhouse gases. **The Review of Policy Research**, Knoxville, v. 28, n. 1, p. 83-105, Jan. 2011.

BOUCHERY, Y.; FRANSOO, J. Cost, carbon emissions and modal shift in intermodal network design decisions. **International Journal of Production Economics**, Amsterdam, v. 164, p. 388-399, June 2015.

BRANCO, J. E. H. **Estimativa da demanda de carga captável pela Estrada de Ferro Norte-Sul**. 2007. 156p. Dissertação (mestrado em economia aplicada) - Escola Superior de Agricultura "Luiz de Queiroz", Universidade de São Paulo, Piracicaba, 2007.

BRANCO, J. E. H.; CAIXETA-FILHO, J. V.; XAVIER, C. E. O.; GAMEIRO, A. H.; PAES, W. H. H.; LA-CRUZ, B. C. B. Otimização logística para o transporte multimodal de safras agrícolas pelo corredor norte: desenvolvimento e aplicação de modelo matemático. **Amazônia: Ciência & Desenvolvimento**, Belém, v. 7, n. 4, p. 157-175, 2012.

CAIXETA FILHO, J. V. Sobre a competitividade do transporte no agribusiness brasileiro. In: CONGRESSO DA SOCIEDADE BRASILEIRA DE ECONOMIA, ADMINISTRAÇÃO E SOCIOLOGIA RURAL, 37., 1999, Foz do Iguaçu. **Anais...** Foz do Iguaçu: SOBER, 1999. p. 8-11.

CÁNEPA, E. M. Economia da poluição. In: MAY, P. H. **Economia do meio ambiente: teoria e prática**. Rio de Janeiro: Elsevier, 2010. cap. 4, p. 79-98.

CARVALHO, T. S.; PEROBELLI, F. S. Avaliação da intensidade de emissões de CO₂ setoriais e na estrutura das exportações: um modelo inter-regional de insumo-produto São Paulo/restante do Brasil. **Economia Aplicada**, Ribeirão Preto, v. 13, n. 1, p. 99-124, jan./mar. 2009.

CHAABANE, A.; RAMUDHIN, A.; PAQUET, M. Design of sustainable supply chains under the emission trading scheme. **International Journal of Production Economics**, Amsterdam, v. 135, n. 1, p. 34-49, Jan. 2012.

CLIMATE ACTION TRACKER. Countries. **Climate Action Tracker**. Disponível em: <<http://climateactiontracker.org/countries/brazil.html>>. Acesso em: 13 nov. 2015.

COMPANHIA SIDERÚRGICA NACIONAL. Transnordestina Logística S. A. **CSN**, 2015. Disponível em: <<http://www.csn.com.br/irj/portal/anonymous>>. Acesso em: 08 jun. 2015.

CONFEDERAÇÃO NACIONAL DO TRANSPORTE. **Plano CNT de logística e transporte 2011**. Brasília, 2011. 370p.

_____. **O sistema ferroviário brasileiro**. Brasília, 2013a. 58p.

_____. **Pesquisa CNT de navegação Interior 2013**. Brasília, 2013b. 299p.

_____. **Pesquisa CNT de rodovias 2014: relatório gerencial**. Brasília, 2014a. 388p.

_____. **Plano CNT de logística e transporte 2014**. Brasília, 2014b. 752p.

_____. Boletim Ambiental. **CNT despoluir**. Disponível em: <http://www.cntdespoluir.org.br/Documents/PDFs/Boletim_Ambiental_11set2015.pdf>. Acesso em: 10 out. 2015a.

_____. Boletim Estatístico. **Confederação Nacional do Transporte**. Disponível em: <http://www.cnt.org.br/Paginas/Boletins_Detalhes.aspx?b=3>. Acesso em: 01 jul. 2015b.

_____. **Entraves logísticos ao escoamento de soja e milho**. Brasília, 2015c. 155p.

CONSTRUÇÃO de vias sobre trilhos aumenta em relação a 2013. **Revista Ferroviária**, São Paulo, n. 74, p. 40-46, jun-jul 2014.

CREUTZIG, F.; McGLYNN, E.; MINZ, J. EDENHOFER, O. Climate policies for road transport revisited (I): Evaluation of the current framework. **Energy Policy**, Surrey, v. 39, n. 5, p. 2.396-2.406, May 2011.

DE BRUYN, S. M. **Economic Growth and the Environment**. Dordrecht: Kluwer Academic Publishers, 2000. 264p.

EDENHOFER, O.; BAUER, N.; KRIEGLER, E. The impact of technological change on climate protection and welfare: insights from the model MIND. **Ecological Economics**, Amsterdam, v. 54, n. 2-3, p. 277-292, Aug. 2005.

ELIASSON, J.; PROOST, S. Is sustainable transport policy sustainable? **Transport Policy**, The Hague, v. 37, p. 92-100, Jan. 2015.

EMPRESA DE PESQUISA ENERGÉTICA. **Balanco Energético Nacional 2013**: Ano base 2012. Rio de Janeiro, 2013. 288p.

ENG-LARSSON, F.; LUNDQUIST, K. J.; OLANDA, L. O., WANDEL, S. Explaining the cyclic behavior of freight transport CO₂ emissions in Sweden over time. **Transport Policy**, The Hague, v. 23, p. 79-87, Sept. 2012.

FAHIMNIA, B.; REISI, M.; PAKSOY, T.; ÖZCEYLAN, E. The implications of carbon pricing in Australia: An industrial logistics planning case study. **Transportation Research Part D: Transport and Environment**, Oxford, v. 18, p. 78-85, Jan. 2013.

FARIA, W. R.; HADDAD, E. A. **Modelagem do uso da terra e mensuração dos efeitos de mudanças climáticas no Brasil**. São Paulo: NEREUS, 2013. 30p. (Texto para Discussão, Nereus 02-2103).

FAUCHEUX, S.; NOËL, J. F. **Economia dos recursos naturais e do meio ambiente**. Lisboa: Instituto Piaget, 1995. p.213-282.

FEIJÓ, F. T.; PORTO JÚNIOR, S. O Protocolo de Quioto e o bem-estar econômico no Brasil- uma análise utilizando EGC. **Revista Análise Econômica**, Porto Alegre, v. 27, n. 51, p. 127-154, Mar. 2009.

FERREIRA FILHO, J. B. S.; HORRIDGE, M. Climate change impacts on agriculture and internal migration in Brazil. In: CONGRESSO DA SOCIEDADE BRASILEIRA DE ECONOMIA, ADMINISTRAÇÃO E SOCIOLOGIA RURAL, 48., 2010, Campo Grande. **Anais...** Campo Grande: SOBER, 2010. 21p. Disponível em: <<http://www.sober.org.br/palestra/15/280.pdf>>. Acesso em: 10 jun. 2015.

FERREIRA FILHO, J. B. S.; ROCHA, M. T. **Avaliação econômica de políticas públicas visando a redução das emissões de gases de efeito estufa no Brasil**, 2007. Disponível em: <http://www.mct.gov.br/upd_blob/0210/210605.pdf>. Acesso em: 02 abr. 2015.

FISHER, C.; NEWELL, R. G. Environmental and technology policies for climate mitigation. **Journal of Environmental Economics and Management**, New York, v. 55, n. 2, p. 142-162, Mar. 2008.

FRANÇA, F.; GURGEL, A. C. Impactos econômicos de políticas climáticas europeias e americanas sobre a economia brasileira. In: ENCONTRO NACIONAL DE ECONOMIA, 39., Londrina, 2011. **Anais...** Londrina: ANPEC, 2011. 18p. Disponível em: <<http://anpec.org.br/encontro/2011/inscricao/arquivos/194-a740441eede46a575e319b7e356703da.pdf>>. Acesso em: 18 ago. 2015.

GOETTLE, R. J.; FAWCETT, A. A. The structural effects of cap and trade climate policy. **Energy Economics**, Guildford, v. 31, supplement 2, p. 5.244-5.243, Dec. 2009.

GRAHN, M.; AZAR, C.; LINDGREN, K. The role of biofuels for transportation in CO₂ emission reduction scenarios with global versus regional caps. **Biomass and Bioenergy**, Oxford, v. 33, n. 3, p. 360-371, Mar. 2009.

GROSSMAN, G. M.; KRUEGER, A. B. Economic growth and environment. **The Quarterly Journal of Economics**, Cambridge, v. 110, n. 2, p. 353-377, May 1995.

GROTTERA, C. **Impactos de políticas de redução de gases de efeito estufa sobre a desigualdade de renda no Brasil**. 2013. 135p. Dissertação (Mestrado em Planejamento Energético) - Instituto Alberto Luiz de Coimbra, Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 2013.

GRUPO DE PESQUISA E EXTENSÃO EM LOGÍSTICA AGROINDUSTRIAL - ESALQLOG. **Anuário 2013**. Piracicaba, 2013. 101p.

HARRIS, I. NAIM, M.; PALMER, A.; MUMFORD, C. Assessing the impact of cost optimization based on infrastructure modeling in CO₂ emissions. **International Journal of Production Economics**, Amsterdam, v. 131, n. 1, p. 313-321, May 2011.

HILGEMBERG, E. M. **Quantificação e efeitos econômicos do controle de emissões de CO₂ decorrentes do uso de gás natural, álcool e derivados de petróleo no Brasil: um modelo inter-regional de insumo-produto**. 2004. 151p. Tese (doutorado em economia aplicada) - Escola Superior de Agricultura "Luiz de Queiroz", Universidade de São Paulo, Piracicaba, 2004.

HOEN, K. M. R. TAN, T.; FRANSOO, J. C.; VAN HOUTUM, G. J. Effect of carbon emission regulation on transport model selection under stochastic demand. **Flexible Services and Manufacturing Journal**, Philadelphia, v. 26, n. 1, p. 170-195, June 2014.

INSTITUTO BRASILEIRO DE GEOGRAFIA E ESTATÍSTICA. **Sistema IBGE de Recuperação Automática**. Disponível em: <<http://www.sidra.ibge.gov.br/>>. Acesso em: 08 fev. 2015.

INSTITUTO DE ENERGIA E MEIO AMBIENTE. **Evolução das emissões de gases de efeito estufa no Brasil (1970-2013)** : setor de energia e processos industriais. São Paulo, 2015. 64p.

INTERGOVERNMENTAL PANEL ON CLIMATE CHANGE. **Climate Change 2014: Synthesis Report**. Geneva: IPCC, 2014. 151p.

INTERNATIONAL ENERGY AGENCY. **CO₂ emissions from fuel combustion - highlights 2013**. Paris, 2013. 143p.

_____. **CO₂ emissions from fuel combustion - highlights 2015**. Paris, 2015. 136p.

KENNEDY, K.; OBEITER, M.; KAUFMAN, N. **Putting a price on carbon: a handbook for U.S. policymakers**. Washington: World Resources Institute, 2015. 55p.

LA ROVERE, E. L.; DUBEUX, C. B.; PEREIRA JÚNIOR, A. O.; WILLS, W. Brazil beyond 2020: from deforestation to the energy challenge. **Climate Policy**, London, v. 13, s. 01, p. 70-86, Jan. 2013.

LIIMATAINEN, H.; PÖLLÄNEN, M. The impact of sectorial economic development on the energy efficiency and CO₂ emissions of road freight transport. **Transport Policy**, The Hague, v. 27, p. 150-157, May 2013.

LIMA, E. M. C.; GURGEL, A. C. Impactos de políticas climáticas em países desenvolvidos sobre a economia brasileira. **Revista Economia**, Brasília, v. 13, n. 3b, p. 785-813, set/dez 2012.

LIPPKE, B.; PÉREZ-GARCIA, J. Will either cap and trade or carbon emission tax be effective in monetizing an ecosystem service? **Forest Ecology and Management**, Amsterdam, v. 256, n. 12, p. 2.160-2.165, Dec. 2008.

LUENBERGER, D. G.; YE, Y. **Linear and Nonlinear Programming**. 3. ed. Stanford: Springer, 2008. 541p.

LUSTOSA, M. C. J.; CÁNEPA, E. M.; YOUNG, C. E. F. Política Ambiental. In: MAY, P. H. **Economia do Meio Ambiente: Teoria e Prática**. Rio de Janeiro: Elsevier, 2010. cap. 7, p. 163-179.

MAGALHÃES, A. S.; DOMINGUES, E. P. **Economia de baixo carbono no Brasil: alternativas de políticas e custos de redução de emissões de gases de efeito estufa**. Belo Horizonte: UFMG/CEDEPLAR, 2013. 34p. (Texto para discussão, 491).

MARRON, D. B.; TODER, E. J. Tax policy issues in designing a carbon tax. **American Economic Review: Papers & Proceedings**, Nashville, v. 104, n. 5, p. 563-568, May 2014.

McKINNON, A.; PIECYK, M. **Measuring and managing CO₂ emissions in European chemical transport**. Edinburgh: Logistics Research Centre Heriot-Watt University, 2010. 36p.

MESSER, P. **Impacto do Plano Nacional de Logística e Transporte no Consumo Energético e nas Emissões de Gases de Efeito Estufa do Setor de Transporte de Cargas no Brasil**, 2015. 158p. Dissertação (Mestrado em Planejamento Energético) - Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 2015.

MINISTÉRIO DA AGRICULTURA, PECUÁRIA E ABASTECIMENTO. **Projeções do Agronegócio Brasil 2014-15 a 2024-25 - Projeções de Longo Prazo**. Brasília, 2015. 109p.

MINISTÉRIO DA CIÊNCIA E TECNOLOGIA E INOVAÇÃO. **Segundo inventário brasileiro de emissões antrópicas de gases de efeito estufa**. Brasília, 2011. 85p.

MINISTÉRIO DO MEIO AMBIENTE. **Inventário Nacional de Emissões Atmosféricas por Veículos Automotores Rodoviários 2013: Ano-base 2012**. Brasília, 2014. 114p.

MINISTÉRIO DOS TRANSPORTES. **PHE Plano Hidroviário Estratégico**. Brasília, 2013. 179p.

MINISTÉRIO DOS TRANSPORTES; MINISTÉRIO DAS CIDADES. **Plano Setorial de Transporte e de Mobilidade Urbana para Mitigação e Adaptação à Mudança do Clima (PSTM)**. Brasília, 2013. 115p.

MORAES, G. I. A economia da mudança climática e seus impactos na agropecuária e agroindústria brasileira. In: CONGRESSO DA SOCIEDADE BRASILEIRA DE ECONOMIA, ADMINISTRAÇÃO E SOCIOLOGIA RURAL, 45., 2007, Londrina. **Anais...** Londrina: SOBER, 2007. 21 p. Disponível em: <<http://www.sober.org.br/palestra/6/421.pdf>>. Acesso em: 22 ago. 2015.

NARDY, V.; GURGEL, A. C. Impactos da liberalização do comércio de etanol entre Brasil e Estados Unidos sobre o uso da terra e emissão de CO₂. **Revista Nova Economia**, Belo Horizonte, v. 23, n. 3, p. 693-726, set./dez. 2013.

NIEUWENHUIS, P.; BERESFORD, A.; CHOI, A. K.-Y. Shipping or local production? CO₂ impact of a strategic decision: An automotive industry case study. **International Journal of Production Economics**, Amsterdam, v. 140, n. 1, p. 138-148, Nov. 2012.

NOCERA, S.; TONIN, S.; CAVALLARO, F. The economic impact of greenhouse abatement through a meta-analysis: valuation, consequences and implications in terms of transport policy. **Transport Policy**, The Hague, v. 37, p. 31-43, Jan. 2015.

OBSERVATÓRIO DO CLIMA. **Análise das emissões de GEE no Brasil (1970-2013) e suas implicações para políticas públicas**. São Paulo: Observatório do Clima, 2015a. 52p.

_____. Nota à imprensa: Acordo de Paris. **Observatorio do clima**. Disponível em: <<http://www.observatoriodoclima.eco.br/nota-a-imprensa-acordo-de-paris/>>. Acesso em: 20 dezembro 2015b.

OLIVEIRA, A. M. K.; CAIXETA FILHO, J. V. Potencial da logística ferroviária para exportação de açúcar em São Paulo: recomendação de localização para armazéns intermodais. **Revista de Economia e Sociologia Rural**, Rio de Janeiro, v. 45, n. 4, p. 823-853, out./dez. 2007.

PALAK, G.; EKŞIOĞLU, S. D.; GEUNES, J. Analyzing the impacts of carbon regulatory mechanisms on supplier and mode selection: an application to a biofuel supply chain. **International Journal of Production Economics**, Amsterdam, v. 154, p. 198-216, Aug. 2014.

PAN, S.; BALLOT, E.; FONTANE, F. The reduction of Greenhouse gas emissions from freight transport by pooling supply chains. **International Journal of Production Economics**, Amsterdam, v. 143, n. 1, p. 86-94, May 2013.

PÉREZ-MARTÍNEZ, J. P. The vehicle approach for freight road transport energy and environmental analysis in Spain. **European Transport Research Review**, Berlin, v. 1, n. 2, p. 75-85, July 2009.

PINHEIRO, M. A. **Estimativa da redução das emissões de gases de efeito estufa através da intermodalidade no setor sucroenergético: uma aplicação de programação linear**. 2012. 200p. Tese (doutorado em economia aplicada) - Escola Superior de Agricultura "Luiz de Queiroz", Universidade de São Paulo, Piracicaba, 2012.

PROOST, S. DELHAYE, E.; NIGS, W.; VAN REGEMORTER, D. Will a radical transport pricing reform jeopardize the ambitious EU climate change objectives? **Energy Policy**, Surrey, v. 37, n. 10, p. 3.863-3.871, Oct. 2009.

PROOST, S.; VAN DENDER, K. Energy and environment challenges in the transport sector. **Economics of Transportation**, Amsterdam, v. 1, n. 1-2, p. 77-87, Dec. 2012.

QU, Y.; BEKTAŞ, T.; BENNEL, J. Sustainability SI: multimode multicommodity network design model for intermodal freight transportation with transfer and emission costs. **Networks and Spatial Economics**, New York, p. 1-27, 2014.

REVISTA FERROVIÁRIA. Estatísticas. **Revista Ferroviária**. Disponível em: <http://www.revistaferroviaria.com.br/estatisticas/pdf/2013/transporte_carga_por_ferrovia_2013.pdf>. Acesso em: 15 ago. 2015.

SANTOS, J. A. **Impactos na economia brasileira pela substituição de combustíveis fósseis por etanol e biodiesel no período de 2010 a 2030**. 2013. 110p. Tese (doutorado em economia aplicada) - Escola Superior de Agricultura "Luiz de Queiroz", Universidade de São Paulo, Piracicaba, 2013.

SECRETARIA DE COMÉRCIO EXTERIOR. **Dados Estatísticos**. Disponível em: <<http://alicesweb.desenvolvimento.gov.br/>>. Acesso em: 08 fev. 2015.

SECRETARIA DOS PORTOS DA PRESIDÊNCIA DA REPÚBLICA. **Plano Nacional de Logística Portuária - Planos Mestres Sumário Executivo**. Brasília, 2012. 111p.

SILVA, J. S.; GURGEL, A. C. Impactos econômicos de cenários de políticas climáticas para o Brasil. **Pesquisa e Planejamento Econômico**, Rio de Janeiro, v. 42, n. 1, p. 93-135, abr. 2012.

SISTEMA DE ESTIMATIVA DE GASES DE EFEITO ESTUFA. **Emissões Totais**. Disponível em: <<http://seeg.observatoriodoclima.eco.br/>>. Acesso em: 13 maio 2015.

STANLEY, J. K.; HENSHER, D. A.; LOADER, C. Road transport and climate change: Stepping off the greenhouse gas. **Transportation Research Part A: Policy and Practice**, Oxford, v. 45, n. 10, p. 1.020 - 1.030, Dec. 2011.

STELLING, P. Policy instruments for reducing CO₂ emissions from the Swedish freight transport sector. **Research in Transportation Business & Management**, London, v. 12, p. 47-54, Oct. 2014.

STRAM, B. N. A news strategic plan for carbon tax. **Energy Policy**, Surrey, v. 73, p. 519-523, Oct. 2014.

SZKLO, A. S.; CHAEFFER, R.; SCHULLER, M. E.; CHANDLER, W. Brazilian energy policies side-effects on CO₂ emission reduction. **Energy Policy**, Surrey, v. 33, n. 3, p. 349-364, Feb. 2005.

TOURINHO, O. A. F.; MOTTA, R. S.; ALVES, Y. L. B. **Uma aplicação ambiental de um modelo de equilíbrio geral**. Rio de Janeiro: Instituto de Pesquisa Econômica Aplicada, 2003. 50p. (Texto para Discussão, 976).

UNIÃO BRASILEIRA DE BIODIESEL E BIOQUEROSENE. Ubrabio apresenta novos argumentos para aumento da mistura de biodiesel no Brasil. **UBRABIO**. Disponível em: <http://www.ubrablo.com.br/1891/Noticias/UbrabioApresentaNovosArgumentosParaAumentodaMisturaDe_254535/>. Acesso em: 15 nov. 2015.

VALEC. **Ações e Programas - Ferrovias VALEC**. Disponível em: <http://www.valec.gov.br/acoes_programas/>. Acesso em: 02 maio 2015.

VAN DER PLOEG, F.; WITHAGEN, C. Growth, renewables and the optimal carbon tax. **International Economic Review**, Philadelphia, v. 55, n. 1, p. 283-311, Feb. 2014.

WILLS, W.; LEFEVRE, J. The impact of a carbon tax over the Brazilian economy in 2030 - IMACLIM: The hybrid CGE model approach. In: THE INTERNATIONAL SOCIETY FOR ECOLOGICAL ECONOMICS, 12., 2012, Rio de Janeiro. **Anais...** Rio de Janeiro: ISEE, 2012. 24 p. Disponível em: <<http://www.isecoeco.org/conferences/isee2012-versao3/pdf/p157.pdf>>. Acesso em: 08 ago. 2015.

WINEBRAKE, J. J.; CORBETT, J. J.; FALZARANO, A.; HAWKER, J. C.; KORFMACHER, K.; KETHA, S.; ZILORA, S. Assessing energy, environmental, and economic tradeoffs in intermodal freight transportation. **Journal of Air and Waste Management Association**, London, v. 8, n. 58, p. 1004-1013, Aug. 2008.

ZHANG, J.; DING, H. W.; WANG, X. Q.; YIN, W. J.; ZHAO, T. Z.; DONG, J. Mode choice for the intermodal transportation considering of carbon emissions. In IEEE INTERNATIONAL CONFERENCE ON SERVICE OPERATIONS, LOGISTICS AND INFORMATICS, 6., 2011, Beijing. **Proceedings...** Beijing: SOLI, 2011. p. 297-301.

ZUCCHI, J. D.; ZENG, A. Z.; CAIXETA-FILHO, J. V. Optimum location for export-oriented slaughterhouses in Mato Grosso, Brazil: a dynamic mathematical model. **International Journal of Logistics Research and Applications: A Leading Journal of Supply Chain Management**, London, v. 14, n. 3, p. 135-148, Sept. 2011.

ANEXOS

ANEXO A – Resumo dos trabalhos apresentados no capítulo de Revisão Bibliográfica

(continua)

Autor (es)	Tema analisado	Principais conclusões
Moraes (2007)	Efeitos do aquecimento Global	O aumento da temperatura pode levar a uma redução 0,18% do PIB, e queda de 6% na demanda mundial por exportações.
Barbieri et al. (2010)	Efeitos do aquecimento Global	Uma elevação da temperatura pode prejudicar a agricultura e provocar o aumento do fluxo migratório das regiões mais afetadas por esta elevação de temperatura.
Ferreira Filho e Horridge (2010)	Efeitos do aquecimento Global	A temperatura mais elevada pode ocasionar uma queda de 44% na produção de soja do Brasil e uma queda de 0,82% do PIB real.
Faria e Haddad (2013)	Efeitos do aquecimento Global	O aquecimento global poderia tornar o fator terra escasso, levando a uma redução da produção agrícola.
Kennedy, Obeiter e Kaufman (2015)	Precificação do carbono	A adoção de uma taxa direciona o ônus da poluição para os responsáveis pela mesma.
Marron e Toder (2014)	Taxa sobre as emissões	Uma taxa pode ser um incentivo para o desenvolvimento de novas tecnologias
Stram (2014)	Taxa sobre as emissões	Uma taxa só se justifica se os benefícios da adoção forem maiores do que o custo decorrente.
Van der Ploeg e Withagen (2014)	Taxa sobre as emissões	Pode ser necessária a adoção de um taxa crescente para promover o surgimento de uma economia verde.
Goettle e Fawcett (2009)	Mecanismo de compra e venda de créditos de carbono	Quanto maior a meta de redução das emissões, maior seria o preço dos créditos de carbono. Com isso, poderia ocorrer uma queda do PIB americano.
Fisher e Newell (2008)	Comparação de medidas de mitigação	A adoção de uma taxa pode reduzir a atividade que usa a energia de forma mais intensiva. A melhor saída seria um sistema de preço das emissões.
Edenhofer, Bauer e Kriegler (2005)	Desenvolvimento tecnológico	A substituição de combustíveis fósseis por renováveis seria a melhor forma de reduzir as emissões.
Eliasson e Proost (2015)	Desenvolvimento tecnológico	A melhor medida seria o desenvolvimento de combustíveis menos poluentes.

(conclusão)

Autor (es)	Tema analisado	Principais conclusões
Creutzinger et al. (2011)	Medidas de mitigação sobre o setor de transportes	A adoção de medidas de mitigação tradicionais pode provocar uma redução maior nas emissões do que a adoção de novos padrões de combustíveis.
Proost e van Dender (2012)	Medidas de mitigação sobre o setor de transportes	Taxas sobre os combustíveis funcionam como taxas sobre as emissões já que incentivam o uso menor do veículo.
Proost et al. (2009)	Medidas de mitigação sobre o setor de transportes	O desenvolvimento tecnológico pode reduzir as emissões mais intensamente do que a adoção de uma taxa.
Stelling (2014)	Medidas de mitigação sobre o setor de transportes	Medidas de mitigação tradicionais podem reduzir as emissões apenas no curto prazo. No longo prazo seria necessário um aumento na eficiência energética.
Liimatainen e Pöllänen (2013)	Medidas de mitigação sobre o setor de transportes	Medidas que incentivem o uso de modais menos poluentes ou medidas que levam a uma eficiência energética maior, são as mais desejáveis para a redução das emissões.
Stanley, Hensher e Loader (2011)	Medidas de mitigação sobre o setor de transportes	Um aumento na eficiência energética pode levar a uma redução de 1/3 das emissões australianas,
Nocera, Tonin e Cavallaro (2015)	Medidas de mitigação sobre o setor de transportes	A combinação de medidas como a imposição de um limite sobre as emissões, combinadas com a adoção de uma taxa e transporte intermodal pode levar a uma redução mais elevada das emissões.
Abrell (2010)	Medidas de mitigação sobre o setor de transportes	As elevadas taxas sobre os combustíveis na Europa já funcionariam como medida de mitigação. Assim, a adoção de uma taxa específica poderia levar a uma redução do bem-estar.
Eng-Larsson et al. (2012)	Medidas de mitigação sobre o setor de transportes	Uma mudança estrutural seria responsável pela redução de aproximadamente 50% das emissões de CO ₂ .
Grahn, Azar e Lindgren (2009)	Medidas de mitigação sobre o setor de transportes	Se houvesse um acordo mundial de redução das emissões, o uso de biocombustíveis só aumentaria se a meta de redução fosse muito elevada.

Quadro I.A – Síntese dos estudos relacionados ao aquecimento global e mitigação das emissões

Fonte: elaboração própria.

Autor (es)	Tema analisado	Principais conclusões
Zhang et al. (2011)	Custo ambiental das atividades de transporte	Quando se considera as emissões como componente adicional do custo de transporte há uma utilização maior das ferrovias e hidrovias.
Qu, Bektas e Bennel (2014)	Custo das emissões de gases de efeito estufa	O custo da emissão nas rodovias é 3 vezes maior que nas ferrovias.
Winebrake et al. (2008)	Comparação dos objetivos ambientais com os objetivos de custo mínimo	Minimizar as emissões: uso maior das ferrovias. Minimizar tempo: uso maior das rodovias.
Pan, Ballot e Fontane (2013)	Minimização das emissões considerando rodovias e ferrovias	O uso das ferrovias levaria à redução das emissões entre 15% a 62%. Porém, a elevação do custo poderia chegar a 85%.
Palak, Eksioglu e Geunes (2014)	Mecanismos de regulação das emissões	O melhor efeito seria a adoção de uma meta de redução das emissões.
Hoen et al. (2014)	Mecanismos de regulação das emissões	A troca de modais favorece a redução das emissões. Dependendo do produto, seria necessária uma taxa elevada para que ocorra a troca de modal de transporte.
Chaabane, Ramudhin e Paquet (2012)	Mecanismos de regulação das emissões	O aumento do preço do crédito de carbono influi apenas no custo. Não há alteração na configuração da rede de distribuição.
Fahimnia et al. (2013)	Adoção de uma taxa sobre o carbono	Quanto maior o preço do carbono maior a redução das emissões. Porém, maior o custo resultante.
Abdallah et al. (2012)	Mercado de créditos de carbono	Pode ocorrer uma redução do custo total se houver a possibilidade da venda de créditos de carbono.
Bartholomeu e Caixeta-Filho (2009)	Impacto da qualidade das rodovias sobre o consumo de combustíveis	Em rodovias com melhor qualidade haveria uma redução de 5,07% no consumo dos combustíveis.
Pinheiro (2012)	Minimização dos custos de transporte intermodal e minimização das emissões	Redução de 3,34% nas emissões levaria a um aumento de 3% no custo de transporte do açúcar. Se as obras de expansão previstas no PAC I e PACII forem executadas, a redução das emissões seria de 47,69%.

Quadro II.A – Síntese dos estudos relacionados ao potencial da logística na redução das emissões de CO₂

Fonte: elaboração própria.

(continua)

Autor (es)	Tema analisado	Principais conclusões
Szklo et al. (2005)	Efeito do Programa Proálcool nas emissões de CO ₂	As emissões de CO ₂ no Brasil seriam 20% maiores caso o programa não tivesse sido adotado
Carvalho e Perobelli (2009)	Quantificação das emissões de CO ₂	No curto prazo as emissões só reduziriam se houvesse redução da atividade econômica.
Ferreira Filho e Rocha (2005)	Efeitos das políticas de mitigação sobre a economia brasileira	Um imposto de R\$ 10,00/tCO ₂ pode levar queda de 0,32% no PIB real, e elevar o preços agrícolas
Tourinho, Motta e Alves (2003)	Efeitos das políticas de mitigação sobre a economia brasileira	A adoção de uma taxa de US\$ 3.00 levaria a uma redução de 0,198% nas emissões. Já uma taxa de US\$ 20.00 provocaria uma redução de 1,36% nas emissões
Wills e Lefevre (2012)	Efeitos das políticas de mitigação sobre a economia brasileira	Uma taxa de R\$ 200,00/tCO ₂ leva a uma queda de 1% a 4% do PIB brasileiro. A magnitude da queda do PIB depende do destino dado a taxa.
Grottera (2013)	Direcionamento da taxa sobre as emissões	Se a receita for direcionada para as famílias, a queda no PIB seria menor. Porém, a queda das emissões também seria menor.
Magalhães e Domingues (2013)	Direcionamento da taxa sobre as emissões	Se a taxa de carbono fosse utilizada para promover o desenvolvimento tecnológico, seria necessária uma taxa menor do que na ausência de tal desenvolvimento.
Silva e Gurgel (2012)	Impactos dos limites sobre as emissões.	Para o setor de transportes, seria necessária uma taxa de US\$ 151.00 /tCO ₂ para obter uma redução de 52% na emissões em 2050.
Hilgemberg (2004)	Impactos da redução das emissões de CO ₂ .	Uma redução de 1% sobre as emissões do setor de combustíveis levaria a uma redução do PIB de todos setores considerados, mesmo aqueles que não fazem parte do setor de combustíveis.
Feijó e Porto Júnior (2009)	Comparação de medidas de mitigação das emissões de CO ₂	O sistema de créditos de carbono seria preferível à imposição de uma taxa. Porém, se as medidas forem rigorosas a redução do PIB pode ser elevada.
França e Gurgel (2011)	Impactos no Brasil de medidas de mitigação adotadas em outros países	Políticas isoladas dos países têm pouco impacto na concentração de gases de efeito estufa.

(conclusão)

Autor (es)	Tema analisado	Principais conclusões
Lima e Gurgel (2012)	Impactos no Brasil de medidas de mitigação adotadas em outros países	O uso intensivo de biocombustíveis no mundo, poderia levar a uma expansão das fronteiras agrícolas brasileiras, causando assim aumento das emissões de CO ₂ .
Santos (2013)	Efeitos de política de uso de biocombustíveis no Brasil	Um choque sobre a produção de biodiesel levaria a uma redução das emissões do setor de transporte em 10,32%. Porém, haveria um aumento nas emissões do setor do açúcar e da soja.
Nardy e Gurgel (2013)	Efeito da redução das tarifas norte-americanas sobre o etanol brasileiro	Redução das tarifas norte-americanas sobre o etanol brasileiro poderia levar a uma pequena elevação das emissões brasileiras. Porém, poderiam ser compensadas pela substituição dos combustíveis fósseis, a nível global.
La Rovere et al. (2013)	Impactos de mudanças no uso da terra	Para atingir a meta proposta pelo governo, mesmo com a queda do desmatamento na Amazônia e Cerrado, seria necessário conter o consumo de combustíveis fósseis e incentivar a intermodalidade.

Quadro III.A – Síntese dos estudos relacionados aos impactos de políticas ambientais sobre a economia brasileira

Fonte: elaboração própria.

ANEXO B – Quantidade de carga embarcada nos terminais ferroviários e hidroviários, de acordo com os cenários adotados

Tabela I.B – Quantidade transportada pelas ferrovias e hidrovias no modelo de minimização de custo do cenário base

			(continua)
Terminal de Origem	Terminal de destino	Concessionária	Carga embarcada (t)
Alegrete (RS)	Rio Grande (RS)	ALLMS	3.977
Alto Araguaia (MT)	Guarujá (SP)	ALLMN	2.508.863
Alto Araguaia (MT)	Santos (SP)	ALLMN	1.089.443
Araguari (MG)	Guarujá (SP)	FCA	11.662
Araguari (MG)	Santos (SP)	FCA	154.717
Araguari (MG)	Serra (ES)	FCA	2.309.790
Cacequi (RS)	Rio Grande (RS)	ALLMS	134.797
Canoas (RS)	Rio Grande (RS)	Hidrovias do Sul	648.900
Cascavel (PR)	Guarapuava (PR)	FERROESTE	122.470
Cascavel (PR)	Paranaguá (PR)	FERROESTE	5.529
Cascavel (PR)	S. Fco. do Sul (SC)	FERROESTE	38.333
Chapadão do Sul (MS)	Santos (SP)	ALLMN	15.358
Costa Rica (MS)	Guarujá (SP)	ALLMN	12.084
Costa Rica (MS)	Santos (SP)	ALLMN	52.633
Cruz Alta (RS)	Rio Grande (RS)	ALLMS	1.041.793
Estrela (RS)	Rio Grande (RS)	Hidrovias do Sul	40.308
Girujá (RS)	Rio Grande (RS)	ALLMS	12.417
Ijuí (RS)	Rio Grande (RS)	ALLMS	154.316
Itiquira (MT)	Guarujá (SP)	ALLMN	665.764
Itiquira (MT)	Santos (SP)	ALLMN	136.492
Julio de Castilhos (RS)	Rio Grande (RS)	ALLMS	176.576
Londrina (PR)	Paranaguá (PR)	ALLMS	344.567
Londrina (PR)	S. Fco. do Sul (SC)	ALLMS	501.311
Maringá (PR)	Paranaguá (PR)	ALLMS	735.448
Maringá (PR)	S. Fco. do Sul (SC)	ALLMS	1.116.200
Palmeirante (TO)	São Luís (MA)	FNS	293.646

Tabela I.B – Quantidade transportada pelas ferrovias e hidrovias no modelo de minimização de custo no cenário base

(conclusão)			
Terminal de Origem	Terminal de destino	Concessionária	Carga embarcada (t)
Pirapora (MG)	Serra (ES)	FCA	189.032
Ponta Grossa (PR)	Paranaguá (PR)	ALLMS	77.277
Porto Franco (MA)	São Luís (MA)	FNS	1.586.547
Porto Velho (RO)	Itacoatira (MA)	Hid. Amazonas	1.765.834
Porto Velho (RO)	Santarém (PA)	Hid. Amazonas	740.155
Rolândia (PR)	Paranaguá (PR)	ALLMS	211.702
Rolândia (PR)	S. Fco. do Sul (SC)	ALLMS	118.443
Santa Luzia (MG)	Serra (ES)	FCA	237.700
Santa Maria (RS)	Rio Grande (RS)	ALLMS	51.00
Santa Rosa (RS)	Rio Grande (RS)	ALLMS	12.208
Santo Ângelo(RS)	Rio Grande (RS)	ALLMS	16.085
São Simão(GO)	Anhembi (SP)	Hid. Tietê-Paraná	95.962
São Simão(GO)	Guarujá (SP)	Hid. Tietê-Paraná	501.550
São Simão(GO)	Pederneiras (SP)	Hid. Tietê-Paraná	40.187
São Simão(GO)	Sta. M ^a da Serra (SP)	Hid. Tietê-Paraná	247.727
São Simão(GO)	Santos (SP)	Hid. Tietê-Paraná	279.436
Sarandi (PR)	S. Fco. do Sul (SC)	ALLMS	98.392
Tupanciretã(RS)	Rio Grande (RS)	ALLMS	46.291
Uberlândia(MG)	Guarujá (SP)	FCA	251.726
Uberlândia(MG)	Santos (SP)	FCA	18.413
TOTAL			18.862.113,08

Fonte: elaboração própria.

Tabela II.B – Quantidade transportada pelas ferrovias e hidrovias no modelo de minimização de custo do cenário Expansão

(continua)

Terminal de Origem	Terminal de destino	Concessionária	Carga embarcada (t)
Alegrete (RS)	Rio Grande (RS)	ALLMS	3.977
Alto Araguaia (MT)	Guarujá (SP)	ALLMN	2.508.863
Alto Araguaia (MT)	Santos (SP)	ALLMN	1.089.443
Araguari (MG)	Serra (ES)	FCA	2.081.928,10
Araguari (MG)	Guarujá (SP)	FCA	11.662
Araguari (MG)	Santos (SP)	FCA	154.717
Barreiras (BA)	Caetité (BA)	FIOL	69.366,60
Cacequi (RS)	Rio Grande (RS)	ALLMS	134.797
Caetité (BA)	Ilhéus (BA)	FIOL	1.570.867
Canoas (RS)	Rio Grande (RS)	Hid. Sul	648.900
Cascavel (PR)	S. Fco. do Sul (SC)	FERROESTE	38.333
Cascavel (PR)	Guarapuava (PR)	FERROESTE	122.470
Cascavel (PR)	Paranaguá (PR)	FERROESTE	5.529
Chapadão do Sul (MS)	Santos (SP)	ALLMN	15.358
Costa Rica (MS)	Santos (SP)	ALLMN	52.633
Costa Rica (MS)	Guarujá (SP)	ALLMN	12.084
Cruz Alta (RS)	Rio Grande (RS)	ALLMS	1.041.793
Estrela (SP)	Rio Grande (RS)	Hid. Sul	40.308
Estrela D'Oeste (SP)	Santos (SP)	FNS	914.521
Giruá (RS)	Rio Grande (RS)	ALLMS	12.417
Ijuí (RS)	Rio Grande (RS)	ALLMS	154.316
Itiquira (MT)	Guarujá (SP)	ALLMN	665.764
Itiquira (MT)	Santos (SP)	ALLMN	136.492
Júlio de Castilhos	Rio Grande (RS)	ALLMS	176.576
Londrina (PR)	Paranaguá (PR)	ALLMS	344.567
Londrina (PR)	S. Fco. do Sul (SC)	ALLMS	501.311
Maringá (PR)	Paranaguá (PR)	ALLMS	735.448
Maringá (PR)	S. Fco. do Sul (SC)	ALLMS	1.116.200

Tabela II.B – Quantidade transportada pelas ferrovias e hidrovias no modelo de minimização de custo do cenário Expansão

Terminal de Origem	Terminal de destino	Concessionária	Carga embarcada (t) (conclusão)
Ouro V. de Goiás (GO)	Estrela D'Oeste (SP)	FNS	985.428
Ouro V. de Goiás (GO)	São Luis (MA)	FNS	900.987
Palmeirante (TO)	São Luis (MA)	FNS	293.646
Pirapora (MG)	Serra (ES)	FCA	189.032
Ponta Grossa (RS)	Paranaguá (PR)	ALLMS	77.277
Porto Franco (MA)	São Luis (MA)	FNS	1.515.107,14
Porto Velho (RO)	Itacoatira (AM)	Hid. Amazonas	1.765.834,86
Porto Velho (RO)	Santarém	Hid. Amazonas	740.155
Rolândia (RS)	Paranaguá (PR)	ALLMS	211.702
Rolândia (RS)	S. Fco. do Sul (SC)	ALLMS	118.443
Santa Luzia (MG)	Serra (ES)	FCA	237.700
Santa Maria (RS)	Rio Grande (RS)	ALLMS	51
Santa Rosa (RS)	Rio Grande (RS)	ALLMS	12.208
Santo Ângelo (RS)	Rio Grande (RS)	ALLMS	16.085
São Simão (GO)	Pederneiras (SP)	Hid. Tietê-Paraná	40.187
São Simão (GO)	Sta. M ^a da Serra (SP)	Hid. Tietê-Paraná	247.727
São Simão (GO)	Anhembi (SP)	Hid. Tietê-Paraná	95.962
São Simão (GO)	Santos (SP)	Hid. Tietê-Paraná	279.436
São Simão (GO)	Guarujá (SP)	Hid. Tietê-Paraná	501.550
Sarandi (PR)	S. Fco. do Sul (SC)	ALLMS	98.392
Tupanciretã (RS)	Rio Grande (RS)	ALLMS	46.291
Uberlândia (MG)	Guarujá (SP)	FCA	251.726
Uberlândia (MG)	Santos (SP)	FCA	18.413
TOTAL			23.003.981,32

Fonte: elaboração própria.

Tabela III.B – Quantidade transportada pelas ferrovias e hidrovias no modelo de minimização de custo do cenário Futuro

(continua)

Terminal de Origem	Terminal de destino	Concessionária	Carga embarcada (t)
Açailândia (MA)	Barcarena (PA)	FNS	12.000
Água Boa (MT)	Santos (SP)	FICO	2.391.843
Alegrete (RS)	Rio Grande (RS)	ALLMS	3.977
Apiacás (MT)	Santarém (PA)	PHE	901.412,88
Araguari (MG)	Serra (ES)	FCA	1.716.279,50
Araguari (MG)	Guarujá (SP)	FCA	11.662
Araguari (MG)	Santos (SP)	FCA	154.717
Barreiras (BA)	Caetité (BA)	FIOL	69.366
Cacequi (RS)	Rio Grande (RS)	ALLMS	134.797
Caetité (BA)	Ilhéus (BA)	FIOL	1.295.996,60
Canoas (RS)	Rio Grande (RS)	Hid. Sul	648.900
Cascavel (PR)	S. Fco. do Sul (SC)	FERROESTE	38.333
Cascavel (PR)	Guarapuava (PR)	FERROESTE	122.470
Cascavel (PR)	Paranaguá (PR)	FERROESTE	5.529
Chapadão do Sul (MS)	Santos (SP)	ALLMN	15.358
Chapecó (SC)	Itajaí (RS)	C. F. Catarinense	1.204.701,45
Cruz Alta (RS)	Rio Grande (RS)	ALLMS	1.041.793
Dionísio Cerqueira (SC)	Chapecó (SC)	C. F. Catarinense	312.863,62
Dionísio Cerqueira (SC)	Rio Grande (RS)	C. F. Catarinense	1.176.784,14
Dourados (MS)	Panorama (SP)	PIL	529.715,52
Dourados (MS)	Santos (SP)	F. Pantanal	678.191,46
Estrela (RS)	Rio Grande (RS)	Hid. Sul	40.308
Estrela D'Oeste (SP)	Santos (SP)	FNS	380.000,79
Estrela D'Oeste (SP)	Itajaí (RS)	FNS	159.988,22
Figueirópolis (TO)	Barreiras (BA)	FIOL	476.403,80
Figueirópolis (TO)	Ilhéus (BA)	FIOL	387.811,27
Herval D'Oeste (SC)	Chapecó (SC)	C. F. Catarinense	22.978,99
Ijuí (RS)	Rio Grande (RS)	ALLMS	154.316,00
Itaituba (PA)	Santarém (PA)	PHE	6.095,00

Tabela III.B – Quantidade transportada pelas ferrovias e hidrovias no modelo de minimização de custo do cenário Futuro

(continuação)			
Terminal de Origem	Terminal de destino	Concessionária	Carga embarcada (t)
Júlio de Castilhos (RS)	Rio Grande (RS)	ALLMS	176.576
Londrina (PR)	Paranaguá (PR)	ALLMS	344.567
Londrina (PR)	S. Fco. do Sul (SC)	ALLMS	501.311
Lucas do Rio Verde (MT)	Santos (SP)	FICO	5.000.000
Lucas do Rio Verde (MT)	Vilhena (RO)	FICO	77.649,14
Marabá (PA)	Barcarena (PA)	PHE	94.715,41
Maracajú (MS)	Paranaguá (PR)	PIL	1.074.291,99
Maringá (PR)	Paranaguá (PR)	ALLMS	735.448
Maringá (PR)	S. Fco. do Sul (SC)	ALLMS	1.116.200
Miracema Tocantins (TO)	Marabá (PA)	PHE	205.987,20
Ouro V. de Goiás (GO)	Estrela D'Oeste (SP)	FNS	985.428,07
Ouro V. de Goiás (GO)	São Luís (MA)	FNS	1.080.251,50
Palmeirante (TO)	São Luís (MA)	FNS	293.646
Pirapora (MG)	Serra (ES)	FCA	189.032
Ponta Grossa (PR)	Paranaguá (PR)	ALLMS	77.277
Porto Franco (MA)	São Luís (MA)	FNS	1.418.627
Porto Murtinho (MS)	Panorama (SP)	F. Pantanal	1.728
Porto Velho (RO)	Itacoatira (AM)	Hid. Amazonas	1.742.854,39
Ribeirão Bonito (MT)	Santos (SP)	FICO	2.595.477,14
Rolândia (PR)	Paranaguá (PR)	ALLMS	211.702
Rolândia (PR)	S. Fco. do Sul (SC)	ALLMS	118.443
Santa Luzia (MG)	Serra (ES)	FCA	237.700
Santa Maria (RS)	Rio Grande (RS)	ALLMS	51
Santo Ângelo (RS)	Rio Grande (RS)	ALLMS	16.085
São Miguel do Oeste	Chapecó (SC)	C. F. Catarinense	149.858,40
São Simão	Pederneiras (SP)	Hid. Paraná-Tietê	40.187
São Simão	Sta. M ^a da Serra (SP)	Hid. Paraná-Tietê	247.727
São Simão	Santos (SP)	Hid. Paraná-Tietê	279.436
São Simão	Guarujá (SP)	Hid. Paraná-Tietê	501.550

Tabela III.B – Quantidade transportada pelas ferrovias e hidrovias no modelo de minimização de custo do cenário Futuro

Terminal de Origem	Terminal de destino	Concessionária	Carga embarcada (t)
Sarandi (PR)	S. Fco. do Sul (SC)	ALLMS	98.392
Três Lagoas (MS)	Anhembi (SP)	PHE	916.263,30
Tupanciretã (RS)	Rio Grande (RS)	ALLMS	46.291
Uberlândia (MG)	Guarujá (SP)	FCA	251.726
Uberlândia (MG)	Santos (SP)	FCA	18.413
TOTAL			34.939.484,6

Fonte: elaborado pelo autor

PHE: Plano Hidroviário Estratégico

PIL: Plano de Investimentos em Logística

ANEXO C – Simulações adicionais para o cenário base

Tabela I.C – Efeitos da adoção do mecanismo de compensação das emissões no cenário base

	Redução 20% Crédito: R\$ 8,25	Redução 20% Crédito: R\$ 21,00	Redução 43% Crédito: R\$ 8,25	Redução 43% Crédito: R\$ 21,00
Custo Total	R\$ 73,16/t	R\$ 73,32/t	R\$ 73,28/t	R\$ 73,62/t
Emissões CO ₂	62,15 kgCO ₂ /t	62,15 kgCO ₂ /t	62,15 kgCO ₂ /t	62,15 kgCO ₂ /t
Consumo Combustível	2.812,91 mil m ³	2.812,91 mil m ³	2.812,91 mil m ³	2.812,91 mil m ³
Crédito comprado	R\$ 12,03 milhões	R\$ 30,63 milhões	R\$ 25,87 milhões	R\$ 65,85 milhões

Fonte: elaboração própria.

Tabela II.C – Efeitos da adoção do mecanismo de compra e venda de créditos de carbono no cenário base, quando a meta de redução está 50% acima das emissões correntes

	Meta 50% Crédito: R\$ 21,00
Custo Total	R\$ 72,40/t
Emissões CO ₂	62,15 kgCO ₂ /t
Consumo Combustível	2.812,91 mil m ³
Crédito vendido	R\$ 76,57 milhões

Fonte: elaboração própria

ANEXO D – Arquivo de entrada do Software GAMS para o modelo de minimização do custo de transporte⁵⁴

\$INLINECOM /* */

\$OFFLISTING

\$OFFSYMXREF OFFSYMLIST

\$ONEMPTY

SETS

O origens

D destinos

UFO estados das origens

UFD estados dos destinos

T transbordo

M modalidade de transporte /ferro, hidro, rodo/

CA canal de comercialização (internacional ou domestico)

F Concessionarias

MF(M,F) combinações rodovia - tipo de caminhão

PD(D) portos de destino

OUF(O,UFO) combinações possíveis origem-UF

DUF(D,UFD) combinações possíveis destino-UF

TP(T,M,F) combinações possíveis entre o terminal de embarque e a modalidade de transporte

TE(T) Terminais de embarque

TT1(T,T,M,F) combinações factíveis entre o terminal de embarque e desembarque

OT(O,T) combinações factíveis entre origem e transbordo de embarque

TD(T,D) combinações factíveis entre transbordo de desembarque e destino

OD(O,D) combinações factíveis entre origem e destino

ALIAS (T,T1);

PARAMETERS

EXPORTUF(UFO) exportação estadual

⁵⁴ Com este comando foram simulados o aumento da capacidade dos terminais de embarque, aumento da capacidade dos portos, uso integral de biocombustíveis e aumento da eficiência energética. As respectivas alterações foram feitas diretamente nos parâmetros CAPT(MF), EXPORTPB(D) e nas equações CONSUMOTOTAL(M) e EMISTOT(M).

EXPORTP(D) exportação por porto
 EXPORTPB(D) exportação máxima por porto capacidade
 PRO(O) produção associada ao centroide de carga O
 DEM(D) demanda associada ao centroide de demanda D
 CAPT(M,F) capacidade de transbordo
 desc(M,F) desconto aplicado no frete
 EM(O) exportação mínima MUNICIPAL
 ET exportação total /42899905/
 CEF(F) Consumo específico de acordo com o modal;

```

$CALL GDXXRW.EXE dados_entrada_teste.xlsx Index=PLAN1!a1
$GDXIN dados_entrada_teste.gdx
$LOAD O UFO D UFD T F CA PD OUF DUF TP EXPORTUF EXPORTP EM PRO
CAPT DEM exportpb DESC CEF MF
$GDXIN
  
```

```

$CALL GDXXRW.EXE combinacoes_teste.xlsx Index=plan1!a1
$GDXIN combinacoes_teste.gdx
$LOAD OT TT1 TD OD
$GDXIN
  
```

PARAMETER FTTF(T,T1,M,F) Frete entre transbordos para cada modalidade;
 PARAMETER FOT(O,T) Frete rodoviário entre centroides de origens e transbordos;
 PARAMETER FTD(T1,D) Frete rodoviário entre transbordos e centroides de destinos;
 PARAMETER FOD(O,D) Frete rodoviário entre centroides de origens e destinos;

```

$CALL GDXXRW.EXE fretes_teste.xlsx Index=plan1!a1
$GDXIN fretes_teste.gdx
$LOAD FTTF FTD FOT FOD
$GDXIN
  
```

PARAMETER DTT1(T,T1,M,F) distancia entre transbordos para cada modalidade;
 PARAMETER DOD(O,D) distancia entre a origem e o destino;
 PARAMETER DOT(O,T) distancia entre a origem e o transbordo;

PARAMETER DTD(T1,D) distancia entre o transbordo e o destino;

\$CALL GDXRW.EXE distancia_teste.xlsx Index=plan1!a1

\$GDXIN distancia_teste.gdx

\$LOAD DTT1 DOT DTD DOD

\$GDXIN

VARIABLES

R(O,UFO,D,UFD,M,F,CA) fluxo rodoviário direto entre origem e destino em cada canal de comercialização

PR(O,UFO,T,M,F,CA) fluxo rodoviário entre origem e transbordo em cada canal de comercializacao

IM(T,T1,M,F,CA) fluxo intermodal de transporte em cada modal e cada canal de comercializacao

PRD(T1,D,UFD,M,F,CA) fluxo rodoviário entre transbordo e destino em cada canal de comercializacao

OBJ objetivo custo

OBJR objetivo custo real

E(UFO) variavelcompensatoria exportacao por estado

EP(D) variavel compensatoria por porto de destino

POP(O) variavelcompensatoria producao

CAPCOMP(M,F) Variável compensatoria para capacidade

FLO(O,UFO) fluxo por origem

FLUF (UFO) fluxo por estado

POPEMIN(O) variável compensatória;

POSITIVE VARIABLE R,PR,IM,PRD,E,POP,EP,FLO, FLU, POPEMIN, CAPCOMP;

EQUATIONS

OBJETA função objetivo artificial

OBJETR função objetivo real custo

PRODUCAO(O) restrição de produção por centroide de oferta de carga

DEMANDA(D) restrição de demanda por centroide de atração de carga

CONT1(T,CA) continuidade dos fluxos em cada transbordo em cada canal de comercialização

CONT2(T1,CA) continuidade dos fluxos em cada transbordo em cada canal de comercialização

EXPORTACAOUF(UFO) restrição de exportação estadual

EXPORTACAOP restrição de exportação mínima por porto

EXPORTACAOPB restrição de exportação máxima por porto

CAPACIDADE(M,F) capacidade do terminal de embarque

EXPORTACAOT exportação total

FLUXO fluxo de exportação que sai de determinada origem

FLUXOUF fluxo de exportação que sai de determinada UF

EXPORTACAOMINO Exportação mínima

EXPORTACAOMAXO Exportação máxima

ENTR(M) embarque mínimo nos modais ferroviário e hidroviário

TONTOTAL(M) Tonelada total transportadas nos modais

TKMTOTAL(M) Tonelada transportada por quilômetro

CONSUMOTOTAL(M) Consumo total de combustível por modal

EMISTOT(M) Emissões totais por modal

;

OBJETA..OBJ=e=SUM((O,UFO,D,UFD,M,F,CA),R(O,UFO,D,UFD,'rodo',F,CA)\$OUF(O,UFO)\$DUF(D,UFD)\$OD(O,D)\$MF(M,F)*FOD(O,D)*1.5)+SUM((O,UFO,T,M,F,CA),PR(O,UFO,T,'rodo',F,CA)\$OUF(O,UFO)\$OT(O,T)\$MF(M,F)*FOT(O,T)*0.5)+SUM((T,T1,M,CA,F),IM(T,T1,M,F,CA)\$TT1(T,T1,M,F)\$FTTF(T,T1,M,F)\$DESC(M,F))+SUM((T1,D,UFD,M,F,CA),PRD(T1,D,UFD,'rodo',F,CA)\$DUF(D,UFD)\$TD(T1,D)\$MF(M,F)*FTD(T1,D))+SUM((UFO), E(UFO)*1000000) + SUM((O), POP(O)*1000000) + SUM((D),EP(D)*1000000) + SUM((O), POPEMIN(O)*1000000) + SUM((M,F),CAPCOMP(M,F)*1000000);

OBJETR..OBJR=E= OBJ - SUM((UFO), E(UFO)*1000000) - SUM((O), POP(O)*1000000) -SUM((D),EP(D)*1000000) - SUM((O),POPEMIN(O)*1000000) -SUM((M,F), CAPCOMP(M,F) *1000000);

PRODUCAO(O)..SUM((UFO,D,UFD,M,F,CA),R(O,UFO,D,UFD,'rodo',F,CA)\$OUF(O,UFO)\$DUF(D,UFD)\$OD(O,D)\$MF(M,F)) + SUM((UFO,T,M,F,CA),PR(O,UFO,T,'rodo',F,CA)\$OUF(O,UFO)\$OT(O,T)\$MF(M,F)) =I= PRO(O) + POP(O);

CAPACIDADE(M,F)..SUM((T,T1,CA),IM(T,T1,M,F,CA)\$TT1(T,T1,M,F)) =I= CAPT(M,F) + CAPCOMP(M,F) ;

ENTR(M)..SUM((T,T1,CA,F), IM(T,T1,M,F,CA)\$TT1(T,T1,M,F))=G= 0;

DEMANDA(D)..SUM((O,UFO,UFD,M,F),R(O,UFO,D,UFD,'rodo',F,'domestico')\$OUF(O,UFO)\$DUF(D,UFD)\$OD(O,D)\$MF(M,F)) + SUM((T1,UFD,M,F),PRD(T1,D,UFD,'rodo',F,'domestico') \$DUF(D,UFD)\$TD(T1,D)\$MF(M,F)) =E= DEM(D) - EP(D);

CONT1(T,CA)..SUM((O,UFO,M,F),PR(O,UFO,T,'rodo',F,CA)\$OUF(O,UFO)\$OT(O,T)\$MF(M,F)) =E= SUM((T1,M,F), IM(T,T1,M,F,CA)\$TT1(T,T1,M,F));

CONT2(T1,CA)..SUM((T,M,F),IM(T,T1,M,F,CA)\$TT1(T,T1,M,F))=E=SUM((D,UFD,M,F), PRD(T1,D,UFD,'rodo',F,CA)\$DUF(D,UFD)\$TD(T1,D)\$MF(M,F));

EXPORTACAOUF(UFO)..SUM((O,D,UFD,M,F),R(O,UFO,D,UFD,'rodo',F,'internacional')\$PD(D)\$OUF(O,UFO)\$DUF(D,UFD)\$OD(O,D)\$MF(M,F)) + SUM((O,T,M,F),PR(O,UFO,T,'rodo',F,'internacional')\$OUF(O,UFO)\$OT(O,T)\$MF(M,F))=G= EXPORTUF(UFO) - E(UFO);

EXPORTACAOP(D)..SUM((O,UFO,UFD,M,F),R(O,UFO,D,UFD,'rodo',F,'internacional')\$PD(D)\$OUF(O,UFO)\$DUF(D,UFD)\$OD(O,D)\$MF(M,F)) + SUM((T1,UFD,M,F),PRD(T1,D,UFD,'rodo',F,'internacional')\$PD(D)\$DUF(D,UFD)\$TD(T1,D)\$MF(M,F))=G=EXPORTP(D) - EP(D);

EXPORTACAOPB(D)..SUM((O,UFO,UFD,M,F),R(O,UFO,D,UFD,'rodo',F,'internacional')\$OUF(O,UFO)\$DUF(D,UFD)\$OD(O,D)\$MF(M,F)) + SUM((T1,UFD,M,F),PRD (T1,D,UFD,'rodo',F,'internacional')\$DUF(D,UFD)\$TD(T1,D)\$MF(M,F)) =L= EXPORTPB(D) + EP(D);

FLUXO(O,UFO)..SUM((D,UFD,M,F,CA),R(O,UFO,D,UFD,'rodo',F,CA)\$PD(D)\$OUF(O,UFO)\$DUF(D,UFD)\$OD(O,D)\$MF(M,F)) + SUM((T,CA,M,F), PR(O,UFO,T, 'rodo', F, CA) \$OUF(O,UFO)\$OT(O,T)\$MF(M,F)) =E= FLO(O,UFO);

FLUXOUF(UFO)..SUM((O,D,UFD,M,F,CA),R(O,UFO,D,UFD,'rodo',F,CA)\$PD(D)\$OUF(O,UFO)\$DUF(D,UFD)\$OD(O,D)\$MF(M,F)) + SUM((O,T,M,F,CA), PR(O,UFO,T,'rodo',F,CA)\$OUF(O,UFO)\$OT(O,T)\$MF(M,F)) =E= FLUF(UFO);

EXPORTACAOMINO(O,UFO)..SUM((D,UFD,M,F),R(O,UFO,D,UFD,'rodo',F,'INTERNACIONAL')\$PD(D)\$OUF(O,UFO)\$DUF(D,UFD)\$OD(O,D)\$MF(M,F)) + SUM((T,M,F), PR(O,UFO,T,'rodo',F,'INTERNACIONAL')\$OUF(O,UFO)\$OT(O,T)\$MF(M,F))=G=FLO(O,UFO)*EM(O) - POP(O);

EXPORTACAOMAXO(O,UFO)..SUM((D,UFD,M,F),R(O,UFO,D,UFD,'rodo',F,'INTERNACIONAL')\$PD(D)\$OUF(O,UFO)\$DUF(D,UFD)\$OD(O,D)\$MF(M,F)) + SUM((T,M,F), PR(O,UFO,T,'rodo',F,'INTERNACIONAL')\$OUF(O,UFO)\$OT(O,T)\$MF(M,F))=L=FLO(O,UFO)*0.52 + POPEMIN(O);

EXPORTACAOT..SUM((O,UFO,D,UFD,M,F),R(O,UFO,D,UFD,'rodo',F,'internacional')\$PD(D)\$OUF(O,UFO)\$DUF(D,UFD)\$OD(O,D)\$MF(M,F)) + SUM((O,UFO,T,M,F), PR(O,UFO,T,'rodo',F,'internacional')\$OUF(O,UFO)\$OT(O,T)\$MF(M,F)) = e = ET;

TONTOTAL(M)..SUM((O,UFO,D,UFD,F,CA),R(O,UFO,D,UFD,'rodo',F,CA)\$OUF(O,UFO)\$DUF(D,UFD)\$OD(O,D)\$MF(M,F)) + SUM((O,UFO,T,F,CA), PR(O,UFO,T,'rodo',F,CA)\$OUF(O,UFO)\$OT(O,T)\$MF(M,F)) + SUM((T,T1,CA,F), IM(T,T1,M,F,CA) \$TT1 (T,T1,M,F)) + SUM((T1,D,UFD,F,CA),PRD(T1,D,UFD,'rodo',F,CA)\$DUF(D,UFD) \$TD(T1,D)\$MF(M,F))=g=0;

TKMTOTAL(M)..SUM((O,UFO,D,UFD,F,CA),R(O,UFO,D,UFD,'rodo',F,CA)\$OUF(O,UFO)\$DUF(D,UFD)\$OD(O,D)\$MF(M,F)*DOD(O,D)) + SUM((O,UFO,T,F,CA), PR(O,UFO,T,'rodo',F,CA)\$OUF(O,UFO)\$OT(O,T)\$MF(M,F)*DOT(O,T)) + SUM((T,T1,CA,F), IM(T,T1,M,F,CA)\$TT1(T,T1,M,F)*DTT1(T,T1,M,F)) + SUM((T1,D,UFD,F,CA), PRD(T1,D,UFD,'rodo',F,CA)\$DUF(D,UFD)\$TD(T1,D)\$MF(M,F)*DTD(T1,D))=g=0;

CONSUMOTOTAL(M)..SUM((O,UFO,D,UFD,F,CA),R(O,UFO,D,UFD,'rodo',F,CA)\$OUF(O,UFO)\$DUF(D,UFD)\$OD(O,D)\$MF(M,F)*DOD(O,D)*0.07211) + SUM((O,UFO,T,F,CA), PR(O,UFO,T,'rodo',F,CA) \$OUF(O,UFO)\$OT(O,T)\$MF(M,F)*DOT(O,T)*0.07211) + SUM((T1,D,UFD,F,CA),PRD(T1,D,UFD,'rodo',F,CA)\$DUF(D,UFD)\$TD(T1,D)\$MF(M,F)*DTD(T1,D)*0.07211) + SUM((T,T1,CA,F),IM(T,T1,'ferro',F,CA)\$ TT1(T,T1,M,F) *DTT1(T,T1,M,F)*CEF(F))+SUM((T,T1,CA,F),IM(T,T1,'hidro',F,CA)\$TT1(T,T1,M,F)*DTT1(T,T1,M,F)*((0.75*0.00255)+(0.25*0.00413))) =G= 0;

$$\begin{aligned}
 &EMISTOT(M)..(SUM((O,UFO,D,UFD,F,CA),R(O,UFO,D,UFD,'rodo',F,CA)\$OUF(O,UFO) \\
 &\$DUF(D,UFD)\$OD(O,D)\$MF(M,F)*DOD(O,D)*0.07211) + SUM((O,UFO,T,F,CA), \\
 &PR(O,UFO,T,M,F,CA)\$OUF(O,UFO)\$OT(O,T)\$MF(M,F)*DOT(O,T)*0.07211) + \\
 &SUM((T1,D,UFD,F,CA),PRD(T1,D,UFD,M,F,CA)\$DUF(D,UFD)\$TD(T1,D)\$MF(M,F)*DT \\
 &D(T1,D)*0.07211))*((1-0.95)*2.43+0.95*2.6) + SUM((T,T1,CA,F), IM(T,T1, 'ferro', \\
 &F,CA)\$TT1(T,T1,M,F)*DTT1(T,T1,M,F)*CEF(F))*((1- 0.95)*2.43+0.95*2.6) + SUM ((T, \\
 &T1,CA,F),IM(T,T1,'hidro',F,CA)\$TT1(T,T1,M,F) *DTT1(T,T1,M,F) *((0.75*0.00255) + \\
 &(0.25*0.00413)))*((0.68)*2.6 + 0.32*3.139) =g=0;
 \end{aligned}$$

MODEL TESE /ALL/;

OPTION RESLIM = 10000000;

OPTION ITERLIM = 10000000;

OPTION LIMROW=0;

OPTION LIMCOL=0;

\$OFFLISTING;

TESE.workspace = 100000;

SOLVE TESE USING LP MINIMIZING OBJ;

execute_unload "resultados.gdx", R PR IM PRD OBJR OBJ E POP EP POPEMIN
CAPCOMP;

execute'gdxrw.exerresultados.gdxO=C:\Users\Ednilson\Documents\gamsdir\projdir\resultado
s_teste.xls var=R rng=r!A1:ZZ640000 rdim=6 cdim=1';

execute'gdxrw.exerresultados.gdxO=C:\Users\Ednilson\Documents\gamsdir\projdir\resultado
s_teste.xls var=PR rng=pr!A1:ZZ640000 rdim=4 cdim=2';

execute'gdxrw.exerresultados.gdxO=C:\Users\Ednilson\Documents\gamsdir\projdir\resultado
s_teste.xlsvar=IM rng=im!A1:ZZ640000 rdim=4 cdim=1';

execute 'gdxrw.exe resultados.gdx O=C:\Users\Ednilson\Documents\ gamsdir\projdir\
resultados_teste.xls var=PRD rng=prd!A1:ZZ640000 rdim=4 cdim=2';

execute 'gdxrw.exe resultados.gdx O=C:\Users\Ednilson\Documents\gamsdir\projdir\
resultados_teste.xls var=E rng=e!A1:ZZ640000 rdim=1';

execute 'gdxrw.exe resultados.gdx O=C:\Users\Ednilson\Documents\gamsdir\projdir\
resultados_teste.xls var=POP rng=POP!A1:ZZ640000 rdim=1';

```
execute 'gdxxrw.exe resultados.gdx O=C:\Users\Ednilson\Documents\gammdir\projdir\  
resultados_teste.xls var=OBJ rng=obja!A3';  
execute 'gdxxrw.exe resultados.gdx O=C:\Users\Ednilson\Documents\gammdir\projdir\  
resultados_teste.xls var=OBJR rng=objr!A1';  
execute 'gdxxrw.exe resultados.gdx O=C:\Users\Ednilson\Documents\gammdir\projdir\  
resultados_teste.xls var=EP rng=ep!A1:ZZ64000 rdim=1';  
execute 'gdxxrw.exe resultados.gdx O=C:\Users\Ednilson\Documents\gammdir\projdir\  
resultados_teste.xls var=POPEMIN rng=POPEMIN!A1:ZZ64000 rdim=1';  
execute 'gdxxrw.exe resultados.gdx O=C:\Users\Ednilson\Documents\gammdir\projdir\  
resultados_teste.xls VAR=CAPCOMP RNG=CAPCOMP!A1:ZZ64000 RDIM=1';
```

ANEXO E – Arquivo de entrada do Software GAMS para o modelo de minimização do custo ambiental (valor atribuído de R\$ 100,00) e aplicação de uma taxa sobre as emissões

\$INLINECOM /* */

\$OFFLISTING

\$OFFSYMXREF OFFSYMLIST

\$ONEMPTY

SETS

O origens

D destinos

(...)⁵⁵

EMISTOT(M) Emissões totais por modal

;

OBJETA..OBJ =e= SUM((O,UFO,D,UFD,M,F,CA), R(O,UFO,D,UFD,'rodo',F,CA) \$OUF(O,UFO)\$DUF(D,UFD)\$OD(O,D)\$MF(M,F)*FOD(O,D)*1.5) + SUM ((O,UFO, T,M, F,CA),PR(O,UFO,T,'rodo',F,CA) \$OUF(O,UFO) \$OT(O,T) \$MF(M,F)*FOT(O,T)*0.5) + SUM((T,T1,M,CA,F), IM(T,T1,M,F,CA)\$TT1(T,T1,M,F) *FTTF(T,T1,M,F)*DESC(M,F)) + SUM((T1,D,UFD,M,F,CA),PRD(T1,D,UFD,'rodo',F,CA) \$DUF (D,UFD) \$TD(T1,D) \$MF(M,F)*FTD(T1,D)) + 0.1*((SUM((O,UFO,D,UFD,M,F,CA), R(O,UFO,D,UFD , 'rodo',F,CA)\$OUF(O,UFO)\$DUF(D,UFD)\$OD(O,D)\$MF(M,F)*DOD(O,D)*0.07211) + SUM((O,UFO,T,M,F,CA),PR(O,UFO,T,M,F,CA) \$OUF(O,UFO) \$OT(O,T) \$MF(M,F) *DOT(O,T)*0.07211) + SUM((T1,D,UFD,M,F,CA),PRD(T1,D,UFD,M,F,CA) \$DUF (D,UFD)\$TD(T1,D)\$MF(M,F)*DTD(T1,D)*0.07211))*((1-0.95)*2.43+0.95*2.6) + SUM ((T,T1,M,CA,F), IM(T,T1,'ferro',F,CA) \$TT1(T,T1,M,F)*DTT1(T,T1,M,F) *CEF(F)) *((1 - 0.95)*2.43 + 0.95*2.6) + SUM((T,T1,CA,M,F), IM(T,T1,'hidro',F,CA) \$TT1(T,T1,M,F) *DTT1(T,T1,M,F)*((0.75*0.00255)+(0.25*0.00413))*((0.68)*2.6 + 0.32*3.139)) + SUM((UFO), E(UFO)*1000000) + SUM((O), POP(O)*1000000) + SUM((D), EP(D) *1000000) + SUM((O), POPEMIN(O)*1000000) + SUM((M,F), CAPCOMP(M,F) *1000000);

(...)⁵⁶

⁵⁵ Mesmos comandos do modelo de minimização de custo no anexo D.

⁵⁶ As próximas linhas dos comandos são as mesmas dos comandos de minimização do custo, no anexo D.

ANEXO F – Arquivo de entrada do Software GAMS para o modelo de minimização das emissões

\$INLINECOM /* */

\$OFFLISTING

\$OFFSYMREF OFFSYMLIST

\$ONEMPTY

SETS

O origens

D destinos

(...)⁵⁷

CUSTO;

OBJETA..OBJ =e= (SUM((O,UFO,D,UFD,M,F,CA), R(O,UFO,D,UFD,'rodo',F,CA)
 \$OUF(O,UFO)\$DUF(D,UFD)\$OD(O,D)\$MF(M,F)*DOD(O,D)*0.07211) + SUM((O,UFO,
 T,M,F,CA), PR(O,UFO,T,M,F,CA)\$OUF(O,UFO)\$OT(O,T)\$MF(M,F)*DOT(O,T)*0.07211)
 + SUM((T1,D,UFD,M,F,CA), PRD(T1,D,UFD,M,F,CA) \$DUF(D,UFD)\$TD(T1,D)
 \$MF(M,F)*DTD(T1,D)*0.07211))*((1 - 0.95)*2.43 + 0.95*2.6) + SUM((T,T1,M,CA,F),
 IM(T,T1,'ferro',F,CA)\$TT1(T,T1,M,F)*DTT1(T,T1,M,F)*CEF(F))*((1 - 0.95)*2.43 +
 0.95*2.6) + SUM((T,T1,CA,M,F), IM(T,T1,'hidro',F,CA)\$TT1(T,T1,M,F) *DTT1(T,T1,
 M,F)*((0.75*0.00255)+(0.25*0.00413)))*((0.68)*2.6 + 0.32*3.139)+ SUM((UFO),
 E(UFO)*1000000) + SUM((O), POP(O)*1000000) + SUM((D),EP(D)*1000000) +
 SUM((O), POPEMIN(O)*1000000) + SUM((M,F),CAPCOMP(M,F)*1000000);

OBJETR..OBJR =E= OBJ - SUM((UFO), E(UFO)*1000000) - SUM((O), POP(O)
 *1000000) - SUM((D),EP(D)*1000000) - SUM((O), POPEMIN(O)*1000000) - SUM((M,F),
 CAPCOMP(M,F)*1000000);

CUSTO .. SUM((O,UFO,D,UFD,M,F,CA),R(O,UFO, D,UFD,'rodo',F,CA) \$OUF(O,UFO)\$
 DUF(D,UFD)\$OD(O,D)\$MF(M,F)*FOD(O,D)*1.5) + SUM ((O,UFO,T, M,F,CA),
 PR(O,UFO,T,'rodo',F,CA)\$OUF(O,UFO)\$OT(O,T)\$MF(M,F)*FOT(O,T)*0.5)+SUM((T,T1,

⁵⁷ Mesmos comandos do modelo de minimização de custo no anexo D.

$M,CA,F), \text{IM}(T,T1,M,F,CA) \$TT1(T,T1,M,F) * FTTF(T,T1,M,F) * \text{desc}(M,F) + \text{SUM}((T1,D,$
 $UFD,M,F,CA), \text{PRD}(T1,D,UFD,'rodo',F,CA) \$DUF (D,UFD) \$TD(T1,D) \$MF(M,F) * \text{FTD}$
 $(T1,D)) = g = 0;$
 $(...)^{58}$

⁵⁸ As próximas linhas são as mesmas dos comandos de minimização do custo, no anexo D

ANEXO G – Arquivo de entrada do Software GAMS para o modelo de minimização do custo de transporte considerando o mecanismo de compra e venda de créditos de carbono para uma meta de 20% de redução das emissões e preço da tonelada de carbono a R\$ 8,25

\$INLINECOM /* */

\$OFFLISTING

\$OFFSYMREF OFFSYMLIST

\$ONEMPTY

SETS

O origens

D destinos

(...)⁵⁹

EMISTOT(M) Emissões totais por modal

EMISRODO Emissões geradas pelo transporte rodoviário

EMISFERRO Emissões geradas pelo transporte ferroviário

EMISHIDRO Emissões geradas pelo transporte hidroviário

;

OBJETA .. OBJ =e= SUM((O,UFO,D,UFD,M,F,CA), R(O,UFO,D,UFD,'rodo',F,CA)
 \$OUF(O,UFO)\$DUF(D,UFD)\$OD(O,D)\$MF(M,F)*FOD(O,D)*1.5) +
 SUM((O,UFO,T,M,F,CA), PR(O,UFO,T,'rodo',F,CA)\$OUF(O,UFO) \$OT(O,T)\$MF(M,F)
 *FOT(O,T)*0.5) + SUM((T,T1,M,CA,F), IM(T,T1,M,F,CA) \$TT1(T,T1,M,F) *FTTF(T,T1,
 M,F)*desc(M,F)) + SUM((T1,D,UFD,M,F,CA), PRD(T1,D,UFD,'rodo',F,CA) \$DUF
 (D,UFD)\$TD(T1,D)\$MF(M,F)*FTD(T1,D)) + SUM((M), EPL(M)*0.00825) - SUM((M),
 EMN(M)*0.00825)+ SUM((UFO), E(UFO)*1000000) + SUM((O), POP(O)*1000000) +
 SUM((D),EP(D)*1000000) + SUM((O), POPEMIN(O)*1000000);

OBJETR..OBJR=E= OBJ - SUM((UFO), E(UFO)*1000000) - SUM((O), POP(O)*1000000)
 -SUM((D),EP(D)*1000000) - SUM((O),POPEMIN(O)*1000000) -SUM((M,F), CAPCOMP
 (M,F) *1000000);

⁵⁹ Mesmos comandos do modelo de minimização de custo no anexo D.

EMISFERRO.. SUM((T,T1,CA,M,F), IM(T,T1,'ferro',F,CA) \$TT1(T,T1,M,F) *DTT1 (T,T1, M,F)*CEF(F))*((1 - 0.95)*2.43 + 0.95*2.6)=g=0;

EMISHIDRO.. SUM((T,T1,CA,M,F), IM(T,T1,'hidro',F,CA)\$TT1(T,T1,M,F)*DTT1 (T,T1, M,F))*((0.75*0.00255)+(0.25*0.00413))*((0.68)*2.6 + 0.32*3.139)=g=0;

EMISRODO.. (SUM((O,UFO,D,UFD,F,M,CA),R(O,UFO,D,UFD, 'rodo',F,CA) \$OUF (O,UFO)\$DUF(D,UFD)\$OD(O,D)\$MF(M,F)*DOD(O,D)*0.07211) + SUM((O,UFO, T,F,M,CA), PR(O,UFO,T,'rodo',F,CA)\$OUF(O,UFO) \$OT(O,T)\$MF(M,F) *DOT (O,T) *0.07211) + SUM((T1,D,UFD,F,M,CA), PRD(T1,D,UFD,'rodo',F,CA) \$DUF(D,UFD) \$TD(T1,D)\$MF(M,F)*DTD(T1,D)*0.07211))*((1 - 0.95)*2.43 + 0.95*2.6) =g=0;

EMISTOT..(SUM((O,UFO,D,UFD,M,F,CA),R(O,UFO,D,UFD,'rodo',F,CA)\$OUF(O,UFO)\$ DUF(D,UFD)\$OD(O,D)\$MF(M,F)*DOD(O,D)*0.07211) +SUM((O,UFO,T,M,F,CA), PR(O,UFO,T,M,F,CA)\$OUF(O,UFO)\$OT(O,T)\$MF(M,F)*DOT(O,T)*0.07211) + SUM((T1,D,UFD,M,F,CA), PRD(T1,D,UFD,M,F,CA)\$DUF(D,UFD) \$TD(T1,D)\$MF(M,F) *DTD(T1,D)*0.07211))*((1 - 0.95)*2.43 + 0.95*2.6)+ SUM((T,T1,CA,M,F), IM(T,T1, 'ferro',F,CA)\$TT1(T,T1,M,F)*DTT1(T,T1,M,F)*CEF(F))*((1 - 0.95)*2.43 + 0.95*2.6)+ SUM((T,T1,CA,M,F), IM(T,T1,'hidro',F,CA)\$TT1(T,T1,M,F) *DTT1(T,T1,M,F) *((0.75*0.00255)+(0.25*0.00413))*((0.68)*2.6 + 0.32*3.139) + SUM((M),EMN(M)) =l=7292032000.00*0.80 + SUM((M),EPL(M));
(...)⁶⁰

⁶⁰ As linhas seguintes são as mesmas dos comandos de minimização do custo, no anexo D.