

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

**Efeitos das mudanças tecnológicas e infraestruturais do transporte para o
fomento da logística verde da soja brasileira: abordagens multiobjetivos**

Thiago Guilherme Péra

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

**Piracicaba
2022**

Thiago Guilherme Péra
Engenheiro Agrônomo

**Efeitos das mudanças tecnológicas e infraestruturais do transporte para o
fomento da logística verde da soja brasileira: abordagens multiobjetivos**

versão revisada de acordo com a resolução CoPGr 6018 de 2011

Orientador:

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

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

**Piracicaba
2022**

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

Péra, Thiago Guilherme

Efeitos das mudanças tecnológicas e infraestruturais no transporte para a promoção da logística verde da soja brasileira: abordagens multiobjetivos / Thiago Guilherme Péra. -- versão revisada de acordo com a resolução CoPGr 6018 de 2011. -- Piracicaba, 2022.

171 p.

Tese (Doutorado) -- USP / Escola Superior de Agricultura “Luiz de Queiroz”.

1. Logística Verde 2. Descarbonização 3. Eficiência de Pareto 4. Soja. I. Título

DEDICATÓRIA

À minha família.

AGRADECIMENTOS

Primeiramente, gostaria de agradecer a Deus.

Ao meu orientador, Professor José Vicente Caixeta-Filho pela amizade e por todos os conselhos e orientações desde a minha graduação e no desenvolvimento desta pesquisa. Mais ainda, pelas inúmeras oportunidades que me foram concedidas e pelo estímulo contínuo ao crescimento e ao comportamento otimizador. Minha gratidão e admiração.

Ao Professor Augusto Hauber Gameiro, à Dra. Daniela Bacchi Bartholomeu e ao Dr. José Eduardo Holler Branco pelas contribuições e conselhos valiosos que não somente se restringiram à elaboração e aprimoramento desta pesquisa, mas também para os meus diversos passos na trajetória pessoal e profissional.

À Universidade de São Paulo (USP), que me trouxe muito aprendizado e crescimento, desde a época da graduação, permeado de forma prática pelo seu lema *Scientia vincet*. Em particular, agradecimentos à Escola Superior de Agricultura “Luiz de Queiroz” (ESALQ) e ao Programa de Pós-Graduação em Economia Aplicada, estendendo os agradecimentos também aos docentes e funcionários do Departamento de Economia, Administração e Sociologia (LES). Também destaco o agradecimento à Escola Politécnica da USP durante o meu período de mestrado em Engenharia de Sistemas Logísticos.

Ao Grupo de Pesquisa e Extensão em Logística Agroindustrial (ESALQ-LOG), meu agradecimento especial, pelo ambiente de excelência nas atividades de ensino, pesquisa e extensão na área de logística.

À minha família e amigos pelo apoio, motivação e compreensão. Especial agradecimento para a minha companheira, Eveline.

Por fim, meus agradecimentos a todas as pessoas que direta ou indiretamente contribuíram com o desenvolvimento desta pesquisa.

SUMÁRIO

RESUMO	7
ABSTRACT	8
LISTA DE FIGURAS	9
LISTA DE TABELAS	11
1. INTRODUÇÃO	13
2. REVISÃO DE LITERATURA	17
2.1. A evolução do conceito da logística com a incorporação de novas abordagens além da econômica	17
2.2. Estratégias de mitigação das externalidades do transporte.....	23
2.3.1. Melhorias no rendimento do consumo de combustível, <i>eco-driving</i> e tecnologias dos veículos	27
2.3.2. Combustíveis alternativos	30
2.3.3. Mudança de modo de transporte (<i>modal-shift</i>).....	33
2.3.4. Mudanças na produtividade operacional do transporte: capacidade de carga, tamanho da frota e frete de retorno.....	36
2.3.5. Sobre a renovação de frota de caminhões	40
2.3.6. Alternativas diversas envolvendo outros modos de transporte: o transporte marítimo.....	44
2.4. Métricas de <i>green logistics</i> no transporte.....	50
2.5. O sistema de transporte no Brasil.....	52
2.5.1. Aspectos da logística de transporte de grãos.....	55
2.6. Considerações finais.....	62
3. MATERIAL E MÉTODOS	65
3.1. Referencial teórico do problema de otimização multiobjetivo.....	65
3.2. Proposta do modelo de <i>green logistics</i> da soja no Brasil	69
3.2.1. Formulação matemática do modelo de <i>green logistics</i> para soja	71
3.2.2. Estimativa das elasticidades do modelo	79
3.2.3. Algoritmo de geração do conjunto de soluções eficientes e da Fronteira de Pareto para a otimização multiobjetivo do modelo.....	81
3.3. Especificação dos dados do modelo de <i>green logistics</i>	84
3.3.1. Custo e produtividade operacional do transporte rodoviário	84
3.3.2. Custo e produtividade operacional do transporte ferroviário	85
3.3.3. Custo e produtividade operacional dos transportes marítimo e hidroviário	88
3.3.4. Oferta e demanda de soja	90
3.3.5. Demais parâmetros do modelo	91
3.4. Especificação dos cenários de mudanças tecnológicas e infraestruturais e das análises de elasticidades do modelo de <i>green logistics</i>	91
3.5. Especificação das funções objetivo e de avaliação dos resultados.....	93
4. RESULTADOS E DISCUSSÃO	97
4.1. Estimativa das elasticidades cruzadas do modelo de <i>green logistics</i>	97
4.2. Análise temporal das mudanças tecnológicas e infraestruturais no modelo de <i>green logistics</i>	106
4.2.1. Impactos nos custos de transporte	110
4.2.2. Impactos nas emissões de CO ₂	111
4.2.3. Impactos nas perdas das atividades logísticas.....	112

4.2.4.	Impactos na demanda de caminhões	113
4.2.5.	Impactos na demanda de combustível	114
4.2.6.	Impactos na intensidade (demanda) de transporte	115
4.3.	Soluções eficientes e Fronteiras de Pareto das mudanças tecnológicas e infraestruturais ..	120
4.3.1.	Multiobjetivo: minimização dos custos logísticos e minimização das emissões de CO ₂	120
4.3.2.	Multiobjetivo: minimização dos custos logísticos e minimização das perdas nas atividades logísticas	126
4.4.	Recomendações de políticas que promovam a logística verde	128
5.	CONCLUSÕES.....	131
	REFERÊNCIAS	135
	APÊNDICES.....	149
	APÊNDICE A: Modelo econométrico dos custos ferroviários: elasticidades de produtividade.....	149
	APÊNDICE B: Padrões de produtividade do transporte rodoviário de grãos agrícolas	152
	APÊNDICE C: Fronteiras de Pareto: minimização dos custos logísticos e minimização das perdas nas atividades logísticas	154
	APÊNDICE D: Resultados das variáveis do transporte dos cenários simulados em diferentes cortes temporais	156
	APÊNDICE E: Terminais hidroviários e ferroviários utilizados	161
	APÊNDICE F: Centroides considerados no conjunto de origem no modelo	162
	APÊNDICE G: Consumidores domésticos e internacionais considerados	163
	APÊNDICE F: Código da programação matemática na linguagem GAMS do modelo de <i>green logistics</i> da soja.....	164

RESUMO

Efeitos das mudanças tecnológicas e infraestruturais do transporte para o fomento da logística verde da soja brasileira: abordagens multiobjetivos

A preocupação da sociedade de incorporar práticas mais sustentáveis nas cadeias de suprimentos pressiona a logística a adotar novas abordagens. A logística verde preenche esta lacuna ao estudar e propor mecanismos de redução dos efeitos ambientais das diversas atividades logísticas, de forma que o desempenho econômico não seja o principal desejo. O objetivo desta pesquisa é avaliar os efeitos das mudanças tecnológicas e de infraestrutura do transporte para fomentar uma logística verde para a soja brasileira no longo prazo (2020-2050), de forma a recomendar políticas públicas e privadas para que o país possa contribuir com a descarbonização do setor, redução de custos logísticos e consequentemente aumento da competitividade do agronegócio. O método proposto consistiu em formular um modelo matemático de otimização multiobjetivo de fluxos em rede multimodal e multiperíodo para avaliar diferentes impactos de mudanças tecnológicas e infraestruturais nas variáveis de custos, emissões de dióxido de carbono (CO₂), perdas nas atividades logísticas, demanda de combustíveis (óleo diesel e combustível), demanda de caminhões e intensidade dos diferentes modos de transporte (rodoviário, ferroviário, hidroviário e marítimo). O primeiro conjunto de resultados apresenta as estimativas das elasticidades dos parâmetros do modelo nas variáveis de interesse, identificando que a demanda de soja da Ásia, por exemplo, gera efeitos elásticos nos custos, emissões de CO₂, demanda de caminhões e demanda de combustíveis. Outro conjunto de resultados gerou as soluções eficientes da minimização do biobjetivo de emissões de CO₂ e de custos logísticos (custos das perdas internalizados ao custo de transporte) para gerar a Fronteira de Pareto em diferentes cenários de mudanças tecnológicas e infraestruturais no horizonte temporal 2030-2050, de forma a identificar os efeitos dos choques nas variáveis de interesse, em relação ao cenário sem progresso tecnológico. Para um mesmo nível de tecnologia e infraestrutura, observa-se o *trade-off* entre os custos logísticos e as emissões de CO₂, entretanto as mudanças no transporte provocam deslocamento das Fronteiras de Pareto para soluções que permitem reduzir simultaneamente os custos e as emissões. O melhor cenário tecnológico e infraestrutural, que deslocou a Fronteira de Pareto com soluções dominantes, aponta os caminhos para o país promover a logística verde, envolvendo melhorias nos tempos de carregamento e descarregamento dos caminhões, aumento da eficiência energética dos caminhões e trens, expansão da infraestrutura ferroviária e hidroviária existente, inclusão de novas ferrovias e substituição dos navios típicos, *Panamax*, para navios maiores do tipo *Capesize*. Tais mudanças reduzem os custos em 28%, as emissões de CO₂ em 32%, a demanda de caminhões em 43%, a demanda de óleo diesel em 43%, a demanda de óleo combustível em 28%, a intensidade do transporte rodoviário em 37,4% e a demanda hidroviária em 5,2%, enquanto as perdas aumentam em 7,6% e a intensidade do transporte ferroviário em 90,9%, em relação ao cenário sem progresso tecnológico. As conclusões indicam que há oportunidades para o Brasil promover a logística verde no longo prazo, em função das diversas soluções do tipo ganha-ganha.

Palavras-chave: Logística Verde, Otimização Multiobjetivo, Descarbonização e Soja

ABSTRACT

Effects of technological and infrastructural changes in transport to promote a Brazilian soybean green logistics: multi-objectives approaches

Society's concern to incorporate more sustainable practices in supply chains pressures logistics to adopt new approaches. Green logistics fills this gap by studying and proposing mechanisms to reduce the environmental effects of different logistics activities; thus, economic performance is not the main objective. Therefore, the aim of this research is to evaluate the effects of technological and transport infrastructure changes to promote green logistics for Brazilian soybean in the long term (2020-2050), to recommend public and private policies so that the country can contribute to the decarbonization of the sector, reduction of logistical costs and, consequently, increase in the competitiveness of the soybean agribusiness. The proposed method consisted in formulating an optimization model for multi-objective network transportation, multi-period, to evaluate different impacts of technological and infrastructural changes on the variables of costs, carbon dioxide (CO₂) emissions, losses in logistics activities, demand for fuels (diesel oil and maritime heavy fuel oil), truck demand and intensity of different modes of transport (road, rail, waterway and maritime). The first set of results presents the estimates on the elasticities of the model parameters (transport productivity, energy efficiency, infrastructure capacity, ship capacity etc.) on the variables of interest to the model, identifying that the demand for soybean in Asia, for example, generates elastic effects on costs, CO₂ emissions, truck demand, and fuel demand. Another set of results generated efficient solutions for minimizing the bi-objectives, CO₂ emissions and logistical costs (costs of losses internalized to the cost of transport), to generate the Pareto Frontier in different scenarios of technological changes in the time horizon 2030-2050 to identify the effects of technological and infrastructural shocks on the variables of interest to the model, concerning the scenario without technological progress. For the same level of technology and infrastructure, there is a trade-off between logistical costs and CO₂ emissions; nevertheless, technological and infrastructural changes cause the Pareto Frontiers to shift towards solutions that allow reducing costs and emissions. The best technological and infrastructural package, which displaced the Pareto Frontier with dominant solutions, indicates the ways for the country to promote green logistics, involving improvements in truck loading and unloading times, increased energy efficiency of trucks and trains, expansion of existing rail and barge infrastructure, the inclusion of new railroads and replacement of typical Panamax ships by larger Capesize ships. Such changes reduce costs in 28%, CO₂ emissions in 32%, truck demand in 43%, diesel demand in 43%, maritime fuel oil demand in 28%, road transport intensity in 37.4%, and waterway demand in 5.2%, while soybean losses increased in 7.6% and the intensity of rail transport in 90.9%. The conclusions indicate that there are opportunities for Brazil to promote green logistics in the long term, given the numerous win-win solutions.

Keywords: Green Logistics, Multi-objective Optimization, Decarbonization and Soybean

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 – Dimensões e atividades da <i>green logistics</i>	20
Figura 2 – Dinâmica de quantificação de externalidades do transporte	24
Figura 3 – Custos externos no transporte rodoviário	27
Figura 4 – Evolução na velocidade média e consumo de combustível no transporte rodoviário de cargas.....	28
Figura 5 – Características dos modos de transporte (relação custo, volume e tempo).....	33
Figura 6 – Relações de custos entre transporte unimodal e multimodal	34
Figura 7 – Cenários de melhorias no sistema de transporte envolvendo o frete de retorno	39
Figura 8 – Migração de veículos para diferentes perfis de uso	42
Figura 9 – Potencial de redução das emissões de CO ₂ no transporte marítimo	46
Figura 10 – Emissões dos navios graneleiros.....	48
Figura 11 – Evolução da oferta de navio graneleiro por tamanho (em milhões de DWT)	49
Figura 12 – Evolução da produção, exportação e movimentações de grãos nas ferrovias e hidrovias (2010-2020).....	56
Figura 13 – Fluxos de exportação da soja brasileira (origem-porto-país) em 2020	57
Figura 14 – Preços médios de fretes rodoviários de grãos agrícolas para uma faixa de distância de mil quilômetros	58
Figura 15 – Participação dos custos de combustível e lubrificantes no custo total das empresas transportadoras	60
Figura 16 – Correspondência hipotética entre o espaço das variáveis e dos objetivos para um modelo biobjetivo de minimização (min-min).....	67
Figura 17 – Estrutura da rede (grafo) de transporte multimodal utilizado no modelo de <i>green logistics</i>	70
Figura 18 – Implementação do algoritmo utilizado para geração das soluções eficientes que compõe a Fronteira de Pareto	83
Figura 19 – Análise das elasticidades dos parâmetros dos custos unitários de transporte nas variáveis de interesse do modelo de <i>green logistics</i>	102
Figura 20 – Análise das elasticidades dos parâmetros das capacidades de transporte dos terminais ferroviários e hidrovias nas variáveis de interesse do modelo de <i>green logistics</i>	102
Figura 21 – Análise das elasticidades dos parâmetros das demandas de soja na Ásia, Europa e Mercado Doméstico nas variáveis de interesse do modelo de <i>green logistics</i>	103
Figura 22 – Análise das elasticidades dos parâmetros da produtividade operacional do transporte rodoviário nas variáveis de interesse do modelo de <i>green logistics</i>	103
Figura 23 – Análise das elasticidades dos parâmetros da produtividade operacional dos transportes ferroviário e marítimo nas variáveis de interesse do modelo de <i>green logistics</i>	104
Figura 24 – Box-plot das variações observadas nos indicadores de interesse dos cenários avaliados em relação ao cenário contrafactual nos períodos 2030, 2040 e 2050	108
Figura 25 – Comportamento das variáveis de interesse nos diferentes cenários simulados para o horizonte temporal de 2020, 2030, 2040 e 2050	110
Figura 26 – Distribuição entre a quantidade transportada acumulada e a distância percorrida nos diferentes modos de transporte em cenários selecionados (t = 2050)	119

Figura 27 – Soluções eficientes e Fronteiras de Pareto para os cenários de mudanças tecnológicas e infraestruturais: min-min custo logístico e emissões de CO ₂	122
Figura 28 – Fronteiras de Pareto das diferentes mudanças tecnológicas e infraestruturas no transporte entre custos logísticos e emissões de dióxido de carbono	123
Figura 29 – Fronteiras de Pareto das diferentes mudanças tecnológicas e infraestruturas no transporte entre custos logísticos e perdas no transporte.....	126

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 – Elasticidades do custo unitário de transporte em relação ao tamanho médio do navio.....	48
Tabela 2 – Métricas utilizadas envolvendo sustentabilidade no transporte e na logística verde.....	50
Tabela 3 – Indicadores gerais do transporte no Brasil em 2019.....	52
Tabela 4 – Parâmetros operacionais adotados para a estruturação dos custos de transporte rodoviário.....	85
Tabela 5 – Estimadores do modelo de custo de transporte ferroviário	88
Tabela 6 – Estimativa da eficiência energética do transporte marítimo por tipo de navio.....	89
Tabela 7 – Parâmetros do modelo (capacidades de transporte dos terminais, distâncias, fatores de emissões, perdas e preço do produto).....	91
Tabela 8 – Especificação dos cenários avaliados de mudanças tecnológicas	92
Tabela 9 – Sumário da delimitação dos cenários e modelos para avaliação dos resultados	95
Tabela 10 – Elasticidades dos parâmetros ($\xi w, k$) do modelo de <i>green logistics</i> sob as variáveis do modelo, para uma variação de $\alpha = \pm 10\%$ nos parâmetros.....	99
Tabela 11 – Potenciais estratégias e políticas para minimização de algumas variáveis de interesse a partir de ações nos parâmetros mais sensíveis	105
Tabela 12 – Indicadores do modelo de <i>green logistics</i> para o ano base (2020) e o cenário contrafactual para o período 2030-2050	107
Tabela 13 – Impactos no custo total de transporte de soja no período de 2030-2050 em relação ao cenário contrafactual das diferentes estratégias	111
Tabela 14 – Impactos nas emissões de dióxido de carbono na logística da soja no período de 2030-2050 em relação ao cenário contrafactual das diferentes estratégias	112
Tabela 15 – Impactos nas perdas nas atividades logísticas de soja no período de 2030-2050 em relação ao cenário contrafactual das diferentes estratégias.....	113
Tabela 16 – Impactos na demanda de caminhões para o transporte de soja no período de 2030-2050 em relação ao cenário contrafactual das diferentes estratégias	114
Tabela 17 – Impactos na demanda de combustível (óleo diesel) transporte de soja no período de 2030-2050 em relação ao cenário contrafactual das diferentes estratégias	115
Tabela 18 – Impactos na demanda de combustível (óleo combustível) transporte de soja no período de 2030-2050 em relação ao cenário contrafactual das diferentes estratégias.....	115
Tabela 19 – Impactos na intensidade de transporte dos diferentes modos para movimentação de soja no período de 2030-2050 em relação ao cenário contrafactual	117
Tabela 20 – Efeitos dos choques tecnológicos e infraestruturais nas variáveis de interesse no período 2030-2050 (min-min custos logísticos e emissões de dióxido de carbono)	123
Tabela 21 – Níveis de emissões médias de dióxido de carbono, custo logístico médio nominal e perdas para cada ponto escolhido nas diferentes Fronteiras de Pareto dos cenários	125
Tabela 22 – Variação (%) dos níveis de ótimo de perdas, custos logísticos e emissões na min. do biobjetivo perdas-custos logísticos em relação à min. biobjetivo emissões-custos logísticos	127

1. INTRODUÇÃO

A preocupação da logística nos últimos tempos não se restringe somente em movimentar insumos e produtos, espacialmente, temporalmente, em condições adequadas e no menor custo possível. A sociedade tem demandado novas abordagens e práticas mais sustentáveis, inclusive as exigências transbordam também para práticas sociais e de governança, a chamada agenda *Environmental, Social and Corporate Governance* (ESG). O transporte, a principal atividade da logística, é uma das maiores fontes de emissões de gases de efeito estufa (GEE), ainda mais para o setor de cargas, em decorrência da baixa eficiência energética.

O Brasil é um dos maiores fornecedores globais do agronegócio. A produção brasileira de grãos, por exemplo, ultrapassa os duzentos milhões de toneladas por ano, que é convertida em carga para ser movimentada em um país de dimensões continentais, com uma elevada heterogeneidade de infraestrutura entre as regiões, uma geografia de produção diversificada, uma matriz de transporte predominantemente de baixa eficiência energética pela elevada presença do transporte rodoviário. A demanda por infraestrutura de outros modos de transporte alternativos ao rodoviário é superior à capacidade existente. Esses fatores contribuem para a logística ser considerada um dos maiores gargalos do agronegócio de grãos, incorrendo em elevados custos. Pesa ainda nesta questão a idade avançada da frota de veículos pesados para a movimentação de cargas, com padrões de produtividade dos mais variados.

As pressões especificamente na redução das emissões de GEE em metas globais são elevadas e não se limitam somente ao transporte de carga de menor eficiência energética, o rodoviário. No transporte marítimo, por exemplo, a *International Maritime Organization* (IMO) estabeleceu metas de descarbonização ambiciosas para que os navios reduzam as emissões dos GEE pela metade até 2050 (IMO, 2021).

Como forma de estudar os efeitos das externalidades das diversas atividades logísticas, principalmente relacionadas à esfera ambiental, surgiu a designação da *green logistics*, ou logística verde, que se preocupa em encontrar soluções para reduzir principalmente as emissões de dióxido de carbono (CO₂) e o consumo energético na movimentação de insumos e produtos nas diversas atividades logísticas. Quando se insere novas abordagens para a logística, além da preocupação econômica, as soluções encontradas muitas vezes são conflitantes, gerando *trade-offs* nas decisões entre os múltiplos interesses. Por outro lado, as mudanças tecnológicas e de infraestrutura de transporte podem promover a *green logistics* no sentido de encontrar soluções

win-win (ganha-ganha) envolvendo os múltiplos objetivos, a partir do ganho de eficiência gerado.

No Brasil, as discussões na temática da logística da soja estão concentradas em ampliar a oferta de transporte dos modos mais eficientes energeticamente e que geram menores níveis de emissões de GEE e poluentes. Entretanto, as soluções não se delimitam somente nesta discussão de infraestrutura, há outros caminhos, tais como redução da intensidade do transporte, melhoria na eficiência energética dos modos de transportes, uso de combustíveis mais limpos, dentre outros aspectos.

O objetivo geral desta pesquisa é identificar soluções eficientes de mudanças tecnológicas e infraestruturais do transporte rodoviário, ferroviário, hidroviário e marítimo que promovam a *green logistics* da soja brasileira no longo prazo (2020-2050), envolvendo múltiplos destinos domésticos e internacionais, de forma a recomendar políticas públicas e privadas. Entende-se como solução eficiente aquela que, no mínimo, descarboniza o transporte com redução de custos para o setor do agronegócio de soja.

Os objetivos específicos da pesquisa são:

- (i) Identificar as elasticidades dos efeitos dos custos, infraestrutura e produtividade dos diferentes modos de transporte nas métricas de *green logistics* da soja, tais como emissões de CO₂, demanda de combustível (óleos diesel e combustível de navio), demanda de caminhões e intensidade de transporte dos diferentes modos;
- (ii) Compreender os efeitos dos choques de mudanças tecnológicas e infraestruturais em diferentes cortes temporais no período 2030, 2040 e 2050; e,
- (iii) Estimar as Fronteiras de Pareto das mudanças tecnológicas e infraestruturais incorporando múltiplos objetivos de modo a identificar soluções eficientes para recomendar estratégias que promovam a logística verde da soja brasileira.

Para a execução desta pesquisa foi estruturado um modelo matemático multiperíodo de equilíbrio de rede multimodal de transporte capacitada, envolvendo a movimentação de soja desde a região de produção, terminais ferroviários e hidroviários, centros consumidores, portos e países importadores, contemplando os transportes rodoviário, ferroviário, hidroviário e marítimo. Tal modelo é estruturado sob uma abordagem de otimização, incorporando funções mono e multiobjetivos nos diferentes resultados avaliados. Especificamente nas abordagens multiobjetivos, foi aplicado um método de resolução para gerar diferentes soluções eficientes e com isso projetar a Fronteira de Pareto e avaliar os efeitos das mudanças tecnológicas e

infraestruturais. Além disso, também foram geradas variações diversas nos parâmetros do modelo com a finalidade de estimar as elasticidades em arco para uma análise de sensibilidade envolvendo a identificação de variáveis de interesse que são mais sensíveis a tais parâmetros, como forma de identificar contribuições para o fortalecimento da logística verde.

O modelo matemático desenvolvido foi calibrado com parâmetros de custos dos diferentes modos de transporte, capacidades de infraestruturas (ferrovias, hidrovias e portos), oferta de soja, demanda doméstica e demanda internacional. As variáveis dos modelos desenvolvidos são: custos de transporte, emissões de CO₂, perdas de soja nas atividades do transporte, demanda de caminhões, demanda de óleo diesel, demanda de óleo combustível e intensidade de transporte dos diferentes modos (produto da quantidade transportada pela distância percorrida). As funções objetivo estruturadas e utilizadas nas diferentes análises, no sentido de minimização: custos totais de transporte, emissões de CO₂, perdas e custos logísticos, os quais internalizam os custos das perdas aos custos de transporte. Foram estruturados e avaliados dez cenários, sendo nove relacionados às mudanças tecnológicas e infraestruturais e um cenário sem progresso tecnológico (contrafactual), utilizado para fins de comparação.

Esta pesquisa é estruturada em cinco capítulos. O primeiro capítulo apresenta a introdução e os objetivos. O segundo capítulo relacionado à revisão de literatura foca na discussão sobre a evolução da incorporação das novas abordagens da logística, além dos custos, e como tais incorporações podem gerar soluções conflitantes (*trade-offs*) ou ganha-ganha (*win-win*). Além disso, foi introduzido o conceito de *green logistics* e mapeada uma série de estratégias utilizadas para mitigar os efeitos ambientais da logística. Foi também realizada uma revisão sobre os principais tópicos relacionados ao setor de transporte de cargas no Brasil e especificamente sobre a soja, produto objeto de análise da pesquisa.

O capítulo três apresenta o referencial teórico de otimização multiobjetivo, bem como a formulação matemática do modelo proposto de *green logistics*. O método utilizado para estimar as elasticidades é contextualizado e apresentado neste capítulo. Também são declarados os estimadores dos parâmetros do modelo, tais como custos de transporte (rodoviário, ferroviário, hidroviário e marítimo), fatores de emissões de dióxido de carbono, oferta de soja, demandas domésticas e internacionais etc. Adicionalmente, é apresentado o algoritmo do método de geração de soluções eficientes para geração da Fronteira de Pareto, bem como, a especificação dos cenários e especificação das funções objetivo para cada tipo de análise.

No capítulo quatro são apresentados os resultados, envolvendo três conjuntos de análise e um conjunto de recomendações: (i) análise das estimativas de elasticidades do modelo, as quais ilustram os efeitos de mudanças nos parâmetros do modelo nas variáveis de interesse; (ii) análise dos cenários de mudanças tecnológicas e infraestruturas nos diferentes períodos para cada uma das variáveis de interesse do modelo de *green logistics*; (iii) estimativa das soluções eficientes e Fronteiras de Pareto da minimização do biobjetivo de custos logísticos e emissões de CO₂ e da minimização de custos logísticos e perdas no transporte; e, (iv) recomendações de políticas públicas e empresariais para alcançar os melhores resultados obtidos na modelagem multiobjetivo.

Por fim, o capítulo cinco apresenta as conclusões obtidas da pesquisa, resumindo as principais contribuições identificadas, limitações e sugestões de pesquisas futuras na temática.

Adicionalmente, a seção de Apêndice apresenta os resultados das elasticidades do modelo econométrico do custo econômico ferroviário, os resultados da análise de *cluster* dos padrões de produtividade operacional do transporte rodoviário, bem como especificação de dados e programação do modelo utilizado.

2. REVISÃO DE LITERATURA

2.1. A evolução do conceito da logística com a incorporação de novas abordagens além da econômica

O entendimento e conceituação da logística passou por diferentes abordagens e integrações ao longo do tempo, principalmente envolvendo o século XX, com preocupações diferenciadas.

A preocupação das organizações até a década de 1950 era de fazer a gestão das atividades diversas de aquisição de material, estoque, armazenagem, transporte de matéria-prima, previsão de demanda, planejamento de produção e estoque, manuseio de materiais, embalagens, distribuição, dentre outras, de forma pulverizada sem que se tivesse a preocupação principal com o objetivo global da organização, que era o de atender às satisfações dos seus clientes ao menor custo possível (BALLOU, 2007). Mais especificamente ainda, as razões para a fragmentação das atividades logística e da subotimização do sistema foram: (i) a falta de compreensão dos *trade-offs* envolvidos nas decisões com o ótimo global da organização, pois não necessariamente a melhor decisão de uma atividade é a melhor decisão para a organização, bem como, (ii) a inércia histórica das convenções estabelecidas na gestão (BALLOU, 2007).

Ao longo do século XX, as diversas atividades logísticas gerenciadas de forma fragmentada pelas organizações passaram a ser mais integradas, inclusive envolvendo outras áreas como financeira e *marketing*, surgindo o conceito de Gerenciamento de Cadeia de Suprimentos ou *Supply Chain Management* – SCM (COOPER *et al.* 1997; MENTZER *et al.* 2001; BALLOU, 2007). A definição de cadeia de suprimentos pode ser entendida como um conjunto de três ou mais organizações diretamente envolvidas em fluxos a montante e a jusante de produtos, serviços, recursos financeiros e informação desde os fornecedores até os clientes (MENTZER *et al.* 2001). O *Council of Supply Chain Management Professionals* – CSCMP (2021) define que a gestão da cadeia de suprimentos contempla o planejamento e gerenciamento das atividades de originação e compras, conversão e atividades de gerenciamento da logística, incluindo a coordenação e colaboração com diferentes parceiros existentes no canal (fornecedores, prestadores de serviços e clientes), de forma a integrar a gestão da oferta e da demanda dentro e entre as empresas. Os principais focos da gestão de cadeia de suprimentos envolvem: fluxo, coordenação, partes interessadas, relacionamento, valor, eficiência e desempenho (AHI & SEARCY, 2013).

A globalização e o maior grau de exigência e personalização dos clientes em relação aos produtos pressionaram os gestores das cadeias de suprimentos para atender os clientes cada vez melhor com vistas a criar valor e com o menor custo possível, buscando otimizar a relação nível de serviço e custo (BALLOU, 2007; MIN, ZACHARIA & SMITH 2019).

Tendo como foco principal o atendimento das preferências dos consumidores, a cadeia de suprimentos passou por uma série de modificações, em função das novas exigências da sociedade, surgindo outras preocupações para além da maximização do lucro, envolvendo principalmente práticas mais sustentáveis nas diferentes esferas que a organização está inserida: econômica, ambiental e social. Alguns fatores contribuíram para a intensificação da integração da sustentabilidade na cadeia de suprimento: crescimento da consciência ambiental, programas de Responsabilidade Social Corporativa (RSC), preocupação maior com mitigação das externalidades, maior pressão em termos de regulações, mudanças climáticas e Governança Ambiental, Social e Corporativa.

As cadeias de suprimentos passaram a ter uma preocupação maior com práticas de sustentabilidade nas suas operações, integrando preocupações econômicas, ambientais, sociais, relações com os *stakeholders*, voluntariado, resiliência e visão de longo prazo (AHI & SEARCY, 2013).

Neste contexto, surge a incorporação do termo *Green* ao *Supply Chain Management*, surgindo então o *Green Supply Chain Management (GSCM)*, o qual tem como objetivo a criação de cadeias de suprimentos coordenadas, incorporando a integração de aspectos econômicos, ambientais e sociais com os principais sistemas de negócios interorganizacionais projetados para gerenciar de forma eficiente e eficaz o material, a informação e os fluxos de capital associados à aquisição, produção e distribuição de produtos ou serviços para atender aos requisitos dos *stakeholders* e melhorar a lucratividade, a competitividade e a resiliência da organização no curto e longo prazos (AHI & SEARCY, 2013). Mais especificamente ainda, a GSCM se baseia no reconhecimento do fato dos impactos ambientais de uma organização se estenderem para além dos seus limites corporativos (MCKINNON, 2015). Parmigiani *et al.* (2011) comentam que a GSCM é uma via para as organizações atingirem os objetivos de lucro e *market-share* e reduzindo os impactos ambientais e aumentando a eficiência ecológica. Wu & Pagell (2011) ainda analisam que a GSCM apresenta uma abordagem integrativa de questões ambientais no gerenciamento da cadeia de suprimento desde o *design* do produto, seleção de fornecedores, fabricação, entrega do produto ao cliente e gerenciamento do fim da vida útil.

As atividades da GSCM contemplam: transporte (escolha do modo de transporte, transporte multimodal, escolha de equipamento e eficiência, escolha de combustível e intensidade de carbono), produtos e estoques (ciclo de vida), instalações físicas tais como armazéns, portos e terminais; *design* da cadeia e do transporte (originação, produção, rotas, velocidade etc.), recuperação do produto e o *closed loop supply chain* (logística reversa); controle e planejamento da cadeia de suprimentos (precificação e comercialização de emissões, contratos e suprimentos) e controle operacional da oferta e da cadeia de transporte (DEKKER, BLOEMHOF & MALLIDIS, 2012).

Outros aspectos importantes da GSCM consolidados por Tseng *et al.* (2019) são: gerenciamento do carbono na cadeia, colaboração ambiental com os fornecedores e clientes, certificações *International Organization for Standardization* - ISO, preocupação com a minimização de desperdícios diversos (energia, produto, embalagem) ao longo da cadeia, embalagem (escolha de materiais retornáveis, redução de embalagens desnecessárias), ampliar a responsabilidade ambiental na terceirização e preocupação com a armazenagem (redução dos níveis de estoque e desperdícios), além da preocupação do uso de energia em toda as atividades da cadeia.

Da mesma forma que a logística é uma parte importante da gestão da cadeia de suprimentos tradicional, existe também a designação da *green logistics* como parte importante deste novo espectro da *Green Supply Chain Management*.

A *green logistics* pode ser entendida como o estudo dos efeitos ambientais de todas as atividades envolvidas no transporte, na armazenagem e manuseio de produtos físicos que se movimentam ao longo da cadeia de suprimentos em todos os sentidos (MCKINNON, 2015). Rodrigue, Slack & Comtois (2017) conceituam *green logistics* como sendo práticas e estratégias de gestão da cadeia de suprimentos que visam reduzir a pegada ambiental e energética da distribuição de cargas, envolvendo diversas atividades, tais como manuseio de materiais, gerenciamento de resíduos, embalagem e transporte. Mais ainda, Zhang *et al.* (2015) avaliam que *green logistics* preocupa-se em distribuir bens de forma sustentável levando em consideração fatores ambientais (poluição, poluentes, pegada do carbono, consumo de energia, resíduos, deterioração e perdas) e sociais (consumo verde, satisfação do consumidor e obrigações da firma) e que o desempenho econômico (por exemplo, minimização dos custos, maximização do lucro etc.) não é mais o único objetivo na logística. A Figura 1 apresenta as dimensões e atividades da *green logistics*.

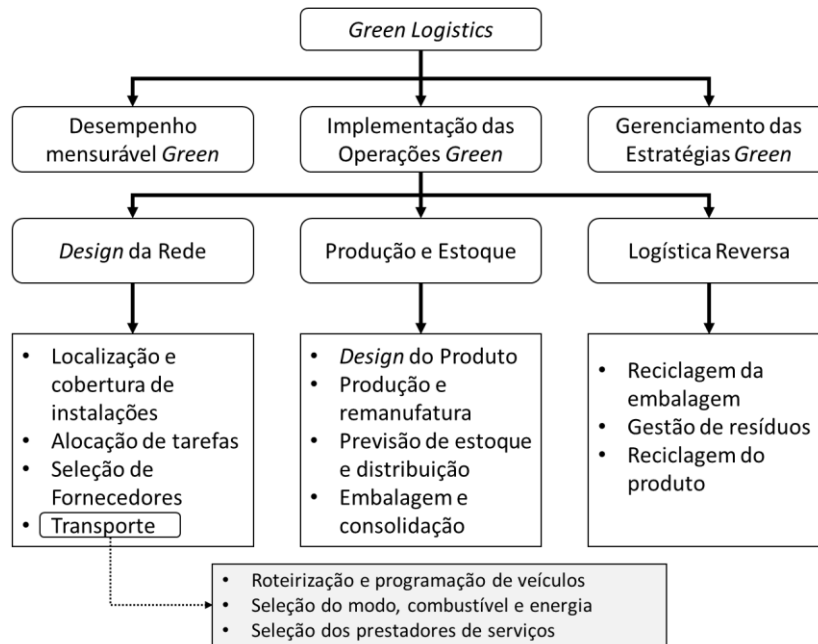


Figura 1 – Dimensões e atividades da *green logistics*

Fonte: adaptado de Zhang *et al.* (2015)

Especificamente, a *green logistics* busca trazer discussões para mitigar as externalidades ocorridas na logística. São exemplos de externalidades negativas observadas, principalmente nas atividades relacionadas ao transporte, apresentadas abaixo (DEMIR *et al.*, 2015; PIECYK, CULLINANE & EDWARDS, 2015):

- Emissões de gases: emissões na atmosfera de diversos gases que trazem impactos na saúde humana e nas mudanças climáticas (que podem afetar a mudança no uso da terra, produção agrícola, efeitos climáticos adversos etc.). Tais emissões podem ser segmentadas em: (i) de efeito estufa: emissões relacionadas aos gases que contribuem para o aquecimento global (CO₂, CH₄, N₂O, O₃, CFC) – efeitos regionais; (ii) de poluição do ar: emissões que são prejudiciais à saúde humana (CO, NO_x, SO_x...) – efeitos globais;
- Poluição de água: hidrocarbonetos do petróleo, metais pesados dos motores dos veículos;
- Poluição sonora: emissão de frequências de ondas acima do tolerável por longo período na audição humana a partir dos sons emitidos dos equipamentos de transporte;
- Congestionamento: impedância dos veículos no sistema de transporte ocasionado, com redução da velocidade média, implicando desperdício de tempo, atrasos, desperdício de combustível, desgaste do caminhão, riscos de acidentes, incertezas de tempo de viagem e emissões de gases de efeito estufa;
- Acidentes: injúrias ocorridas decorrentes do transporte de cargas, que afetam o custo dos serviços de emergência e atrasos no trânsito, além de penalizações na saúde humana; e,

- Uso do solo: mudanças no uso e ocupação do solo, envolvendo mudanças no visual da paisagem etc.

Recentemente abordadas na literatura, as perdas nas diversas atividades logísticas de pós-colheita (transporte e armazenagem, principalmente) têm sido tratadas também como uma externalidade, que apresenta um custo social com maiores níveis de emissões de gases de efeito estufa e redução da disponibilidade de alimentos para a sociedade – podendo ampliar a escassez de alimentos (SHAFIEE-JOOD & CAI, 2016; CHEGERE, 2018). A temática da gestão das perdas na logística verde pode contribuir com a segurança alimentar, melhorando os indicadores financeiros das organizações e fomentando também a redução das emissões de GEE (ZHANG, LI & PENG, 2020), além da redução de energia, por exemplo, nas cadeias a frio (HELO & ALA-HARJA, 2018).

Rodrige, Slack & Comtois (2017) comentam que a *green logistics* pode ser avaliada por uma série de métricas, tais como: (i) redução dos custos através de melhorias de embalagens e redução dos desperdícios; (ii) melhoria na eficiência de distribuição através de mudanças na rede logística; e, (iii) redução das necessidades das instalações de armazenagem, dentre outras. Além disso, a *green logistics* é uma importante ferramenta para o desenvolvimento da economia circular, envolvendo o fechamento do ciclo (SEROKA-STOLKA & OCIEPA-KUBICKA, 2019).

Há relações importantes entre a logística verde e outros importantes componentes da economia, como demanda de energia, crescimento econômico e sustentabilidade ambiental. Khan *et al.* (2018), por exemplo, estimaram um modelo econométrico em painel e obtiveram alguns resultados interessantes: (i) as atividades logística demandam energia e combustível fósseis, os quais geram efeitos nocivos na sustentabilidade ambiental e efeito negativo no crescimento econômico; (ii) a deficiência da infraestrutura de transporte e de serviços logísticos são os principais contribuições das emissões de GEE; (iii) o uso de fontes de energia renováveis e práticas verdes podem mitigar os efeitos das atividades logísticas na sustentabilidade ambiental e também estimar a economia, a partir do aumento das exportações. Inclusive, Zaman & Shamsuddin (2017) identificam que índices logísticos, relacionados à infraestrutura, processos alfandegários, rastreamento, competência, dentre outros, são significativos na associação com indicadores econômicos nacionais e provocam a gestão da cadeia de suprimento verde em um modelo de dados em painel de 27 países europeus no período de 2007-2014,

ênfatizando que a demanda de energia, a proteção ambiental e a saúde econômica são componentes indispensáveis da logística verde.

O desenvolvimento de políticas de logística verde são fundamentais para o cumprimento do desenvolvimento sustentável, promoção do crescimento verde e aprimoramento da logística verde, sendo que tal desenvolvimento é influenciado por fatores como a capacidade de governanç a verde das instituições governamentais, o nível de percepção das empresas de logística sobre o assunto, a fiscalização social, o grau de desenvolvimento da indústria de logística, dentre outros fatores (ZHANG *et al.*, 2020).

A busca do equilíbrio de distintos objetivos na sustentabilidade das organizações – econômicos, ambientais e sociais – criam tensões, as quais podem ser decompostas em quatro tipos: (i) *win-win* (ganha-ganha): encontra soluções que equacionam diferentes objetivos (sociais, ambientais e econômicos) e assim evita-se a tensão a partir da escolha onde existe convergência dos objetivos, ou seja, as soluções encontradas são melhoradas para os diferentes objetivos; (ii) *trade-off*: escolhe-se um elemento de sustentabilidade em detrimento de outros; (iii) integrativa: mudanç a do foco econômico para o foco social e/ou ambiental, a partir do reequilíbrio de pesos dos elementos; e, (iv) paradoxal: aceitação e exploração das tensões ao invés de resolvê-las (VAN DER BYL & SLAWINSKI, 2015). Matos *et al.* (2020) enfatizam que imprevistos, tensões e *trade-offs* são inevitáveis e devem ser incorporados na gestão da cadeia de suprimentos; além disso, identificaram que os *trade-offs* e tensões se concentram em critérios econômicos, e não empreocupaç es com a sustentabilidade.

Ao inserir novas abordagens para a logística – como preocupações ambientais e sociais – aumenta o desafio de se equacionar os novos *trade-offs* e transformá-los em desejáveis soluções *win-win*. Por exemplo, Seuring (2013), em uma revisão de publicações sobre questões verdes e sustentáveis nas cadeias de suprimentos que utilizaram métodos quantitativos, constatou alguns aspectos importantes: (i) a dimensão social foi tratada de forma simplificada, identificando uma lacuna importante na literatura; (ii) a dimensão econômica foi tratada no conceito de custo total, não captando os esforç os das empresas na implementação de *green supply chain*; e, (iii) a integração das três dimensões (ambiental, social e econômica) normalmente foi avaliada como *trade-offs*, mas poderia ser avaliada como soluções *win-win*, quando se estabelecem padrões ambientais e sociais mínimos. Gru auskas, Baskutis & Navickas (2018) contribuem com a discussão ao enfatizar que custos e sustentabilidade são fatores importantes para a competitividade no mercado na gestão da cadeia de suprimentos e avalia que para mitigar o *trade-off* entre desempenho econômico e sustentabilidade é preciso

de novos conceitos de gestão e tecnologia. Davis-Sramek, Thomas & Fugate (2018) acrescentam que o pensamento dominante na gestão de cadeias de suprimentos envolvendo seleção de transportadoras, por exemplo, é a perspectiva *win-win*, mas que os gestores não devem analisar a gestão da cadeia de suprimento sob dimensões ambientais e sociais com um resultado financeiro melhorado.

Ainda dentro da abordagem de *green logistics*, há outro conceito denominado *green corridors*, ou corredores verdes, os quais podem ser definidos como corredores de transporte com atributos econômicos e logísticos viáveis juntamente com características ambientais aceitáveis, abrangendo todos os modos de transporte (PANAGAKOS, 2016; BEKTAS et al. 2019).

Por fim, de acordo com a Organização Nações Unidas – ONU (2016), a melhoria do sistema de transporte de forma a promover meios mais sustentáveis contribui para uma série dos Objetivos de Desenvolvimento Sustentável – ODS, propostos pela própria instituição, envolvendo: (i) Segurança: contribuições especificamente na redução do número global de mortes, acidentes nas estradas e acidentes de trânsito, bem como, na redução de mortes e doenças de poluição; (ii) Acessibilidade: melhorias no sistema de transporte promovem contribuições na redução da fome a partir da melhoria dos acessos aos mercados; (iii) Energia acessível e limpa: melhoria da eficiência energética utilizada no sistema de transporte de forma a contribuir para redução das emissões; (iv) Indústria, inovação e infraestrutura: desenvolvimento de infraestrutura sustentável e resiliente; (v) Cidades e comunidades sustentáveis: contribuições com a facilidade de acesso ao sistema de transporte mais sustentável e redução dos impactos ambientais adversos das cidades; e, (vi) Ação climática: fortalece a resiliência e integra medidas de mudança climáticas nos planos nacionais relacionados à infraestrutura.

2.2. Estratégias de mitigação das externalidades do transporte

Há uma série de estratégias direcionadas para mitigar as externalidades negativas das atividades logísticas, particularmente discutidas sob uma ótica de *green logistics*. Tais estratégias envolvem: gestão de tráfego, *eco-driving*, *modal-shift*, novas tecnologias de eficiência, renovação da frota, substituição de combustível, dentre outras. Nesta subseção são apresentadas algumas destas estratégias de mitigação.

A Figura 2 apresenta a dinâmica da formação das externalidades do sistema de transporte, principalmente envolvendo o transporte rodoviário. Há uma série de fatores que alteram a dinâmica das externalidades, envolvendo, por exemplo, emissões de GEE, acidentes, vibração, barulhos, intrusão visual etc.

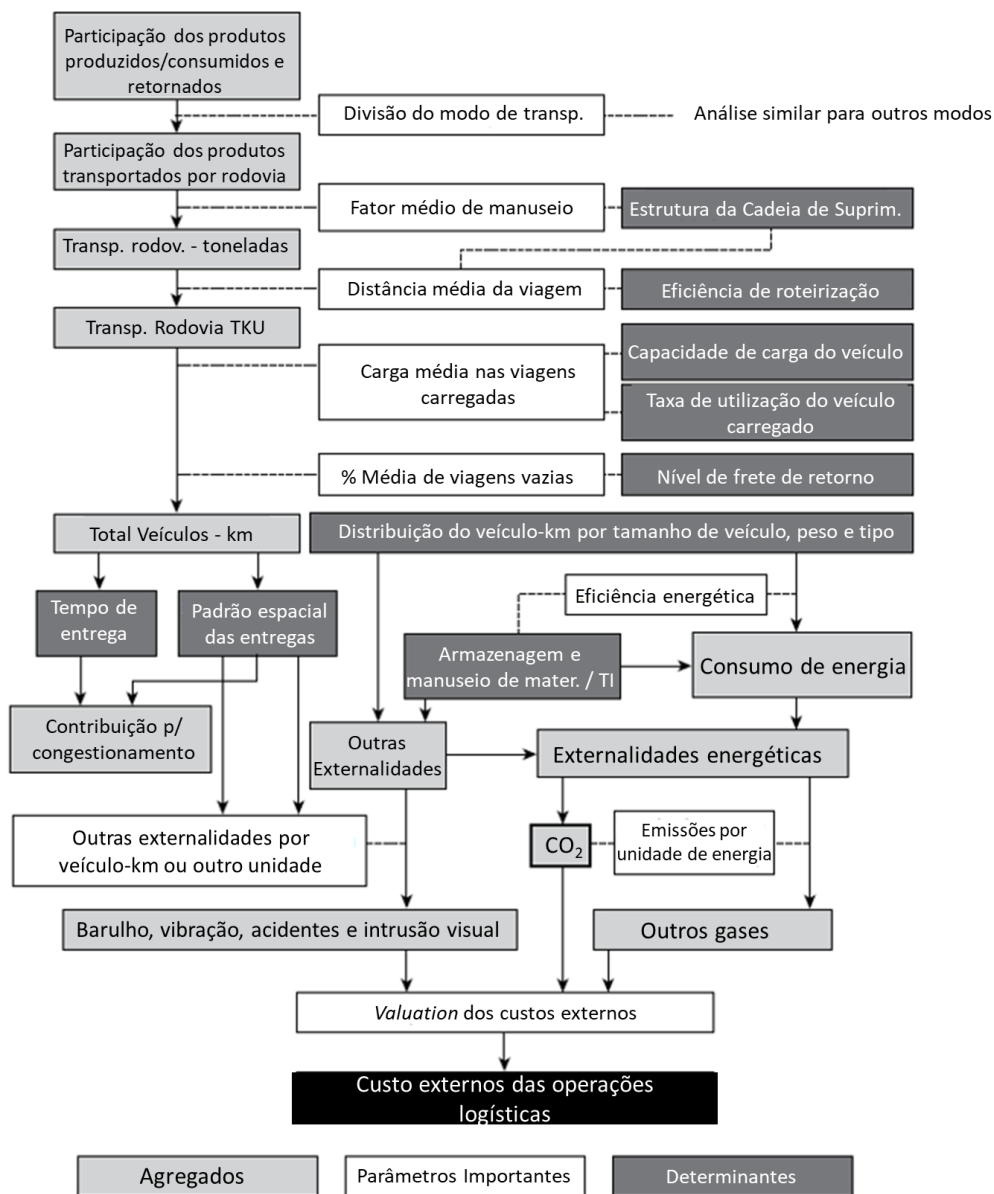


Figura 2 – Dinâmica de quantificação de externalidades do transporte

Fonte: adaptado pelo autor a partir do trabalho de McKinnon (2015)

A partir da dinâmica dos fatores determinantes das externalidades do transporte, Piecyk & McKinnon (2010) apresentam que existem seis grandes conjuntos de fatores que influenciam, especificamente, o impacto ambiental no transporte rodoviário, envolvendo: (i) fatores estruturais relacionados à rede de instalação do sistema logístico, os quais determinam a escolha do modo de transporte e distância média; (ii) fatores comerciais: relacionados às estratégias e

política de compras, as quais são determinantes na escolha do modo de transporte, distância média, taxa de utilização da capacidade do equipamento e taxa de viagens médias; (iii) fatores operacionais: relacionados à programação do fluxo ao longo da cadeia de suprimento, as quais são determinantes nas taxas de utilização do equipamento e viagens vazias; (iv) fatores funcionais: relacionados ao gerenciamento de recursos do transporte, tais como roteirização, escolha de veículos, logística colaborativa, os quais determinam a escolha do modo de transporte, da taxa de utilização do equipamento de transporte e na intensidade de carbono; (v) fatores do produto: relacionados à natureza da operação do transporte em função das características do produto movimentado e da embalagem, os quais são determinantes no modo de transporte, distância média e taxa de utilização do equipamento de transporte; e por fim, (vi) os fatores externos relacionados aos regulamentos, regulações, condições do mercado, os quais afetam o nível de preço dos combustíveis, qualidade das rodovias, disponibilidade de motorista e são determinantes na escolha do modo de transporte, na distância média, na taxa de viagens vazias, na eficiência energética do combustível e na intensidade de carbono.

De uma forma geral, uma das maiores preocupações envolvendo a *green logistics* tem sido a prática para redução das emissões de gases, principalmente de CO₂, em função da sua expressiva participação nas emissões totais.

As emissões globais de CO₂ totalizaram 33.621 milhões de toneladas em 2019, um crescimento de 10% em relação ao ano de 2010 (INTERNATIONAL ENERGY AGENCY - IEA, 2019). Mais especificamente ainda, o setor de transporte foi o segundo maior poluidor globalmente, sendo responsável por 24,5% de todas as emissões globais, perdendo apenas para o segmento de eletricidade e geração de calor, o qual emitiu por volta de 33.621 milhões de toneladas (IEA, 2019).

As emissões de CO₂ no setor de transporte, a nível global, pode ser estratificada por tipo de transporte: o transporte rodoviário de passageiros foi responsável por 45,1% das emissões; o transporte rodoviário de cargas por 29,4%; a aviação por 11,6%; o transporte marítimo por 10,6%; o transporte ferroviário por 1% e os demais (hidrovia, dutos etc.) por quase 2,3% (IEA, 2019).

No Brasil, o peso das emissões do setor de transporte é maior quando comparado às emissões globais: aproximadamente 47% das emissões de CO₂ ocorreram pelo referido setor, o qual também foi o maior poluidor no país (EMPRESA DE PESQUISA ENERGÉTICA - EPE, 2021a). As emissões de CO₂ no Brasil totalizaram 411 milhões de toneladas em 2019, um

crescimento de 9,9% em relação ao ano de 2010, sendo que as emissões no setor de transporte atingiram o nível de 194 milhões de toneladas, seguido da indústria com 86 milhões de toneladas (IEA, 2019).

Há uma série de mecanismos de políticas que podem ser adotados para controlar os impactos ambientais do transporte, envolvendo incentivos de mercado, por exemplo, para veículos (taxa de emissão para níveis permitidos, diferença de taxa de aquisição de novos veículos menos poluentes), para os combustíveis (diferenciação de taxa por tipo de combustível), para o tráfego (tarifa de congestionamento, tarifa de estacionamento e subsídios para modos de transporte menos poluentes), além de ações voltadas para instrumentos de controle, tais como a fiscalização compulsória dos níveis de emissões, estabelecimento de padrões de emissões, composição do combustível, restrições físicas de tráfego, obrigatoriedade de sucateamento de veículos antigos, dentre outros (BUTTON, 2010).

As externalidades geram custos sociais que são distintos dos custos dos usuários de transporte. Por exemplo, no modelo de transporte rodoviário motorizado de Rizzi & Ortúzar (2015), supõe-se que há uma demanda para o uso da rodovia (fluxo) e que a curva de custo médio percebida pelo usuário de transporte difere da curva de custo médio real, se forem aplicados impostos sob o combustível, conforme apresentado pela Figura 3. Em decorrência das externalidades, os custos marginais sociais do transporte são superiores aos seus custos médios, incorporando atrasos em viagens, riscos de acidades, poluição do ar, ruído etc. Como o motorista leva em consideração apenas o custo de transporte que incorre (incluindo os impostos sob o combustível), o equilíbrio ocorre no fluxo f^0 (demanda iguala ao custo médio percebido); todavia, existe o custo da externalidade AB. Com a aplicação, por exemplo, um pedágio ou uma taxa pigouviana, igual ao segmento FD, definiria o fluxo ótimo social f^* . Notadamente, a não aplicação dos impostos de combustível igualaria a curva de custo médio percebida pelo motorista com a curva de custo médio, ampliando mais ainda a perda de bem-estar social.

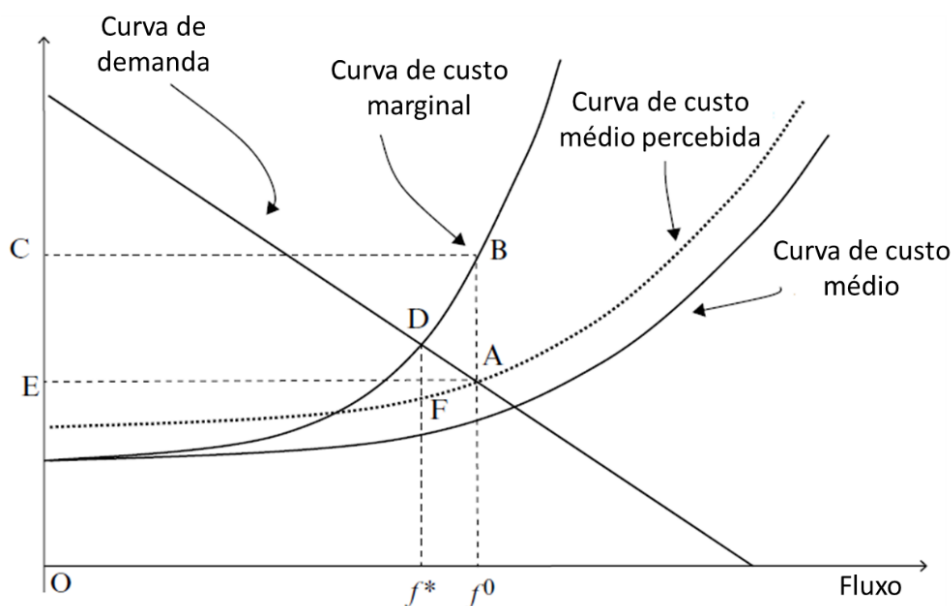


Figura 3 – Custos externos no transporte rodoviário
 Fonte: adaptado de Rizzi & Ortúzar (2015)

Sims *et al.* (2014) estabelecem que as emissões de GEE podem ser decompostas em quatro componentes: (i) infraestrutura de transporte – escolha do modo de transporte; (ii) intensidade do carbono no combustível; (iii) intensidade de energia por deslocamento; e, (iv) atividades (número de viagens, distância de viagem etc.). De uma forma geral, as estratégias de redução das emissões são tratadas dentro de cada um desses componentes, envolvendo a *green logistics*, nas próximas subseções.

2.3.1. Melhorias no rendimento do consumo de combustível, *eco-driving* e tecnologias dos veículos

Os elementos infraestrutura, veículo e motorista são componentes dependentes que condicionam o nível de serviço para o sistema de transporte e conseqüentemente trazem efeitos em parâmetros de produtividade, tais como, por exemplo, o consumo de combustível e a velocidade média (WORLD BANK & IRU, 2016). Nas últimas décadas o transporte rodoviário de cargas passou por transformações envolvendo desenvolvimentos tecnológicos, melhorias nas condições viárias, habilidades humanas, dentre outras, que permitiram mudanças de produtividade e eficiência, com o aumento na velocidade média e a redução no consumo de combustível, conforme apresentado pela Figura 4 (WORLD BANK & IRU, 2016).

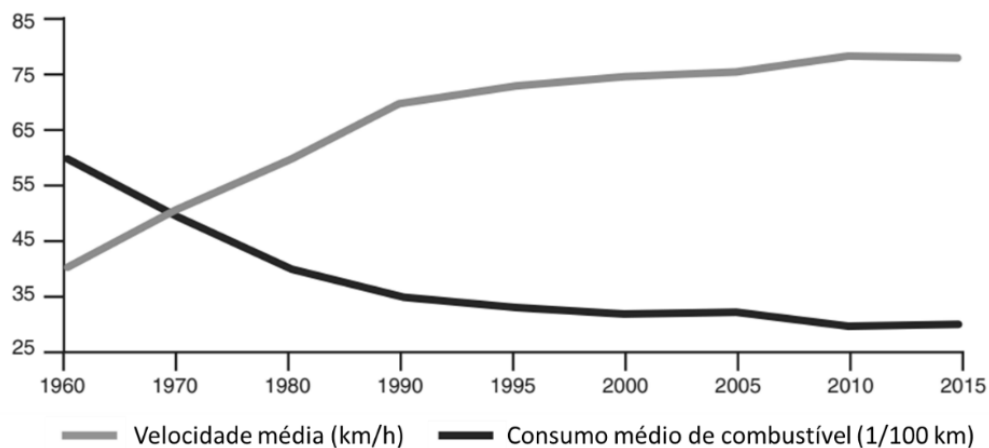


Figura 4 – Evolução na velocidade média e consumo de combustível no transporte rodoviário de cargas

Fonte: adaptado pelo autor a partir de WORLD BANK & IRU (2016)

Na literatura, têm se relatado ações voltadas à mitigação das emissões de GEE por meio da redução do consumo de combustível nas atividades logísticas relacionadas ao transporte, principalmente no modo rodoviário. Uma série de estratégias foram mapeadas por Demir, Bektas & Laporte (2014):

- Alteração na estrutura do veículo: ajustes no formato do equipamento, no dimensionamento adequado do equipamento, no peso bruto do equipamento, na temperatura do motor, no sistema de transmissão, no rendimento do consumo de combustível do veículo e no tipo de combustível;
- Ambiente de transporte (rodovias): tipo de pavimentação, temperatura do ambiente, altitude, inclinação da rodovia, condições de vento, outras características (umidade, condições da superfície etc.);
- Tráfego durante o trajeto: velocidade, aceleração/desaceleração e congestionamento;
- Motorista: agressividade do motorista, seleção de marcha e tempo ocioso; e,
- Operações: tamanho e composição da frota; capacidade do veículo; quilometragem rodada com veículo vazio e número de paradas.

Barth & Boriboonsomsin (2008) demonstraram padrões nos níveis de emissões de CO₂ no transporte rodoviário em função da velocidade média, captando efeitos do congestionamento, apresentando discussões de estratégias relacionadas à gestão da velocidade e à mitigação do congestionamento. Os autores quantificaram as emissões no estado estacionário (aquele em que não há oscilações de aceleração do veículo de transporte), comparando com a curva do que ocorre na realidade. Desta forma, destacaram três grandes

estratégias: (i) mitigação do congestionamento incluindo medição de rampa e gerenciamento de incidentes com foco para aumentar a velocidade; (ii) controle das velocidades altas, estabelecendo um limite através de radares; e, (iii) suavização do tráfego a partir de ações que reduzam o efeito “*stop-go*” (acelerações e desacelerações).

De uma forma geral, o consumo de combustível no transporte rodoviário de cargas e consequentemente as emissões, dependem de uma série de fatores, dentre eles: (i) veículos (tipo e *design*, eficiência do motor, condições dos equipamentos, tais como pneus, motores, filtros etc.); (ii) ambiente: condições geográficas e topografia das rodovias, temperatura, condições de vento, tráfego e congestionamento; e, (iii) direção: a forma de dirigir o equipamento por parte do motorista, envolvendo comportamentos de acelerações, escolha da velocidade de viagem etc. (BEKTAS *et al.* 2019).

O *eco-driving* pode ser entendido como um problema de otimização, cujo objetivo é cobrir a maior distância possível ao longo de um determinado horizonte de tempo de forma a consumir o mínimo de combustível possível ou ainda percorrer o par de origem-destino (trajeto) com o mínimo consumo de combustível e no mínimo tempo possível (HAUENSTEIN *et al.*, 2021).

Especificamente, Sivak & Schoettle (2012) identificam as principais decisões dos motoristas que influenciam o consumo de combustível sob uma abordagem de *eco-driving*, envolvendo decisões estratégicas, táticas e operacionais. No nível estratégico, as decisões envolvem: escolha de classe de veículo, escolha do modelo de veículo, configuração dos veículos, tipos de pneus e óleo de motor; no nível tático, as decisões envolvem: seleção da rota (tipo de rodovia), congestionamento e sobrepeso do veículo; no nível operacional, as decisões envolvem: escolha das marchas, velocidade, uso de ar-condicionado e direção agressiva.

As principais técnicas de *eco-driving* utilizadas nos programas de treinamento para os motoristas de carga envolvem: (i) evitar o aquecimento do motor após a partida do veículo; (ii) evitar o uso da marcha lenta; (iii) dirigir na faixa ótima de torque; (iv) manter a velocidade constante ao longo da rota, quando possível; (v) realizar o planejamento da viagem de forma antecipada; (vi) evitar condições climáticas adversas; (vii) evitar o uso da frenagem de forma a manter uma distância e velocidades seguras ao longo da viagem; (viii) distribuir a carga e o peso da forma correta no equipamento de transporte (PINEDA & XIE, 2021).

2.3.2. Combustíveis alternativos

Outra estratégia voltada para a redução das emissões de gases de efeito estufa no sistema de transporte de cargas pesadas, principalmente envolvendo o transporte rodoviário, é a busca de soluções de combustíveis alternativos ao convencionalmente utilizado (óleo diesel). Há um mercado global, inovador e em expansão envolvendo o desenvolvimento de tecnologias para que os equipamentos de transporte possam usufruir de tais combustíveis, incluindo: biodiesel, biometano, hidrogênio e eletricidade (LEONARDI, CULLINANE & EDWARDS, 2015).

Cunanan *et al.* (2021) discutem e apresentam as vantagens e desvantagens das diferentes fontes de energia que podem ser utilizadas no transporte rodoviário pesado (de cargas). O uso do combustível de óleo diesel apresenta uma alta emissão de GEE, apresenta alto custo de abastecimento e é fonte de poluição do ar local, embora apresente vantagens como ter um longo alcance e alta autonomia de combustível durante a viagem, com custos de aquisição de caminhões menores do que as demais tecnologias. Além disso, os autores comentam que o uso da tecnologia de célula de combustível de hidrogênio possui as vantagens de redução de GEE, maior eficiência energética do que os motores de combustão interna, porém apresentam um elevado custo inicial, pesado desenvolvimento de infraestrutura e maior custo de aquisição do veículo. Por fim, os veículos elétricos apresentam a vantagem de redução de emissões e poluição, porém apresentam as desvantagens de baixa autonomia e conseqüentemente baixo alcance (distância percorrida), custo de aquisição maior, peso e tamanho limitados.

Giuliano *et al.* (2021) analisaram o uso de diferentes tipos de fontes de combustíveis para caminhões pesados na Califórnia e identificaram alguns resultados, como: (i) o uso de caminhões pesados elétricos não são um substituto prático do óleo diesel no curto prazo em função dos impactos do frete relacionados ao alcance limitado e ao tempo de carregamento – sendo que o uso do equipamento aumenta o tamanho da frota para movimentar uma quantidade definida da carga, gerando um custo adicional; (ii) os caminhões elétricos híbridos se apresentaram como alternativas viáveis no curto prazo, pelo fato de não afetar consideravelmente as operações de fretes; e, (iii) recomendaram a necessidade de investimentos em infraestrutura de carregamento para promover o uso de caminhões elétricos a bateria de forma a se viabilizar ao longo do tempo a partir do ganho operacional no transporte.

Gray *et al.* (2021) também citam que os custos de combustíveis e a falta de infraestrutura de reabastecimento são as principais barreiras para a adoção de combustíveis alternativos para o transporte pesado, principalmente elétricos e recomenda políticas e incentivos financeiros

para desenvolver combustíveis com baixo teor de carbono. Hao *et al.* (2019) sugerem que a eletrificação em massa para veículos pesados deve ser tratada com cautela pelos formuladores de políticas e empresários pelo fato do impacto do aumento global na demanda de lítio.

Uma pesquisa de opinião com especialistas realizada pelo *The International Transportation Forum* – ITF (2018) identificou as principais barreiras para adoção de combustíveis alternativos no transporte de carga: rede de distribuição e carregamento dos veículos elétricos (25%), falta de regulações estritas de emissões (16%), tecnologia disponível do veículo (14%), falta de incentivos de financiamento (14%), tecnologia de produção de combustível (14%), alto nível de emissões dos combustíveis alternativos no ciclo de vida *well-to-wheel* (9%), permissões, regulações e padronizações (4%) e outras (4%).

É interessante notar que a temática de uso de veículos elétricos tem sido também discutida à luz da otimização para problemas de localização de troca de bateria e roteirização de veículos elétricos, levando em consideração o alcance limitado da autonomia dos veículos (YANG & SUN, 2015; BETKAS *et al.*, 2019).

Há uma série de discussões sobre o uso do óleo diesel (puro) e as diferentes composições da mistura de óleo diesel e biodiesel. Do ponto de vista ambiental, o biodiesel (puro), conforme o Programa Brasileiro de GHG Protocol (2020), apresenta uma vantagem de emitir 6,6% a menos do que o óleo diesel fóssil. Por outro lado, o rendimento de consumo de combustível (km/l) tende a ser menor do biodiesel puro em relação ao fóssil (US DEPARTMENT OF ENERGY – DOE, 2021; DU, HUQUE & KOMMALAPATI, 2018). Desta forma, utiliza-se uma mistura do biodiesel no diesel fóssil para melhorar a composição de custos, emissões e performance entre as alternativas disponíveis. Por exemplo, nos EUA o uso do diesel B20 (20% da presença do biodiesel) apresenta uma queda entre 1% a 2% de energia por litro (UNITED STATES DEPARTMENT OF ENERGY - DOE, 2021).

No Brasil, o uso do biometano como combustível pode ser promissor para o transporte rodoviário de cargas, em função do maior potencial de redução das emissões de GEE em relação ao combustível fóssil, além de apresentar uma diversidade de matéria-prima para a produção; porém, demanda uma infraestrutura de distribuição própria, bem como tecnologias nos veículos adequadas e com pouca oferta nacional (CONFEDERAÇÃO NACIONAL DO TRANSPORTE – CNT, 2021a).

Há ainda políticas ou programas para descarbonizar o transporte envolvendo o fomento do mercado de carbono. Por exemplo, na Califórnia existe também o programa de baixo carbono para o transporte, o qual estabelece um limite para a intensidade de carbono dos combustíveis no Estado, de forma a se tender para a um padrão mais rigoroso, bem como, para fomentar a mudança, existe um mercado de crédito de carbono para o combustível que possui uma intensidade de carbono abaixo do padrão estabelecido; ademais, tais créditos gerados podem ser usados pelas distribuidoras de combustíveis para satisfazer as obrigações de *compliance* (FILLIPO, CALLAHAN & GOLESTANI, 2019).

Especificamente no Brasil, existe a Política Nacional de Biocombustível, denominada RenovaBio, que visa garantir a expansão de biocombustíveis no país, em harmonia com o compromisso brasileiro na COP21 (MINISTÉRIO DO MEIO AMBIENTE - MMA, 2020). O mecanismo do RenovaBio está pautando em dois pilares: (1) metas de descarbonização; e (2) reconhecimento do desempenho ambiental dos biocombustíveis no ciclo de vida. O primeiro objetiva reduzir as emissões de carbono alinhado com o compromisso supracitado e ampliar a previsibilidade do papel dos biocombustíveis na matriz visando atrair novos investimentos para o setor. O segundo pilar visa garantir estímulos à busca da maior eficiência ambiental e econômica a partir da criação de um novo mercado de crédito de carbono, denominado CBIO.

No Brasil, há também o Programa de Controle da Poluição do Ar por Veículos Automotores – PROCONVE, que objetiva reduzir os níveis de emissões de gases poluentes emitidos por veículos automotores, definindo objetivos para diferentes fases ao longo do tempo, cada qual com um objetivo específico de redução de níveis, contemplando uma série de métricas, tais como limite de emissão de fuligem, limite de gases poluentes, durabilidade de emissões, limite de emissão de ruído, limite de opacidade, limite para material particulado, limite de número de partículas, dentre outras (MMA, 2016).

A chave do crescimento do uso dos combustíveis alternativos aos fósseis no transporte de cargas, de acordo com ITF (2018), envolve a redução ou remoção das diversas barreiras existentes, tais como falta de disponibilidade de tecnologia no mercado de diferentes regiões, incertezas sobre o retorno do investimento (relacionadas ao valor presente líquido dos retornos considerando as incertezas sobre preços de combustíveis no futuro), restrições de custo de capital (presença elevada em muitos países de transportadores pequenos com dificuldades de acesso ao crédito para adotar novas tecnologias), dentre outras.

2.3.3. Mudança de modo de transporte (*modal-shift*)

Outra estratégia bastante discutida é o *modal-shift*, ou mudança do modo de transporte, migrando o transporte de cargas dos caminhões para os trens e barcaças hidroviárias, por exemplo. O *modal-shift* tende a ocorrer quando há outros modos de transporte que apresentam vantagens comparativas em relação ao modo de transporte utilizado, tais como custos, tempo de viagem, emissões, confiabilidade etc., além de perspectiva de mudanças na oferta de transporte, decisões dos usuários, regulamentos e políticas (RODRIGUE, 2020). Obviamente, é uma estratégia que faz sentido se também existir a oferta disponível de capacidade de transporte nos modos de transporte mais vantajosos. A Figura 5 apresenta as características dos diferentes modos de transporte, evidenciando a relação entre os custos unitários, tempo de viagem, distribuição do volume e valor do tempo.

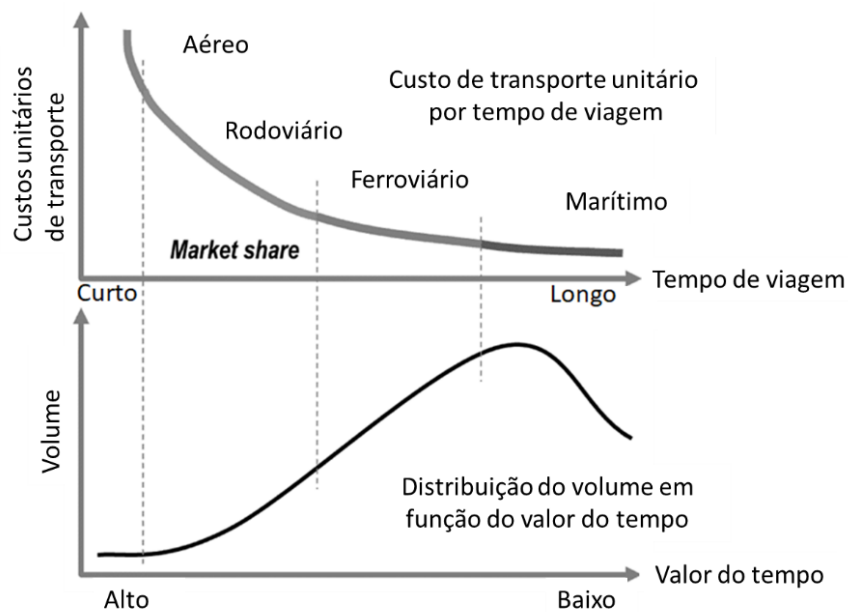


Figura 5 – Características dos modos de transporte (relação custo, volume e tempo)
Fonte: adaptado de Rodrigue (2020)

Eng-Larsson & Kohn (2012) identificaram a perspectiva dos embarcadores para uma mudança de modo de transporte visando favorecer uma logística verde em uma abordagem de multimodalidade (combinação de diferentes modos de transporte integrados para movimentar a carga entre origem e destino). Os autores constaram seis pontos importantes: (i) a qualidade do transporte multimodal é mais dependente do desempenho geral da transportadora do que do desempenho do modo de transporte; (ii) para uma qualidade de transporte não significativa entre dois modos de transporte, prevalece o critério de conveniência de contratação do que o preço de frete; (iii) a baixa volatilidade da demanda é mais importante do que o alto volume da

demanda para determinar o desempenho logístico; (iv) a distância mínima para viabilizar o *modal-shift* depende da competitividade relativa das soluções multimodais e unimodais no mercado específico; (v) a chance de sucesso do *modal-shift* depende do embarcador estar preparado para mudar o seu sistema; e, (vi) a qualidade do transporte pode ser subutilizada em função dos custos incorridos não serem superados pelas melhorias no atendimento ao cliente.

O transporte integrado de rodovias com ferrovias, por exemplo, requer mudanças do modo de transporte com terminais de transbordo, exigindo um elevado investimento para construção e manutenção dos terminais (TANIGUCHI & NEMOTO, 2008). A Figura 6 apresenta o modelo comparativo de custo de transporte rodoviário e multimodal (três pontas) entre um par de origem-destino avaliado por Taniguchi & Nemoto (2008), envolvendo dois transbordos (terminais de transferência de carga). No caso do transporte multimodal há a incidência dos seguintes custos: (i) rodoviário até o transbordo (ponto de transferência) para a ferrovia; (ii) custo do transbordo de acesso à ferrovia; (iii) custo de transporte ferroviário; (iv) custo de transbordo de saída da ferrovia; e, (v) custo do transporte rodoviário até o destino. No transporte rodoviário há apenas a incidência de um custo, o qual apresenta o intercepto e a inclinação iguais ao custo de transporte para os transbordos. A inclinação do custo ferroviário é menor do que o transporte rodoviário, no modelo avaliado. A distância crítica (d_c) de escolha entre a opção unimodal e multimodal ocorre quando a soma dos custos de transporte multimodais e de transbordos se iguala ao custo de transporte rodoviário unimodal.

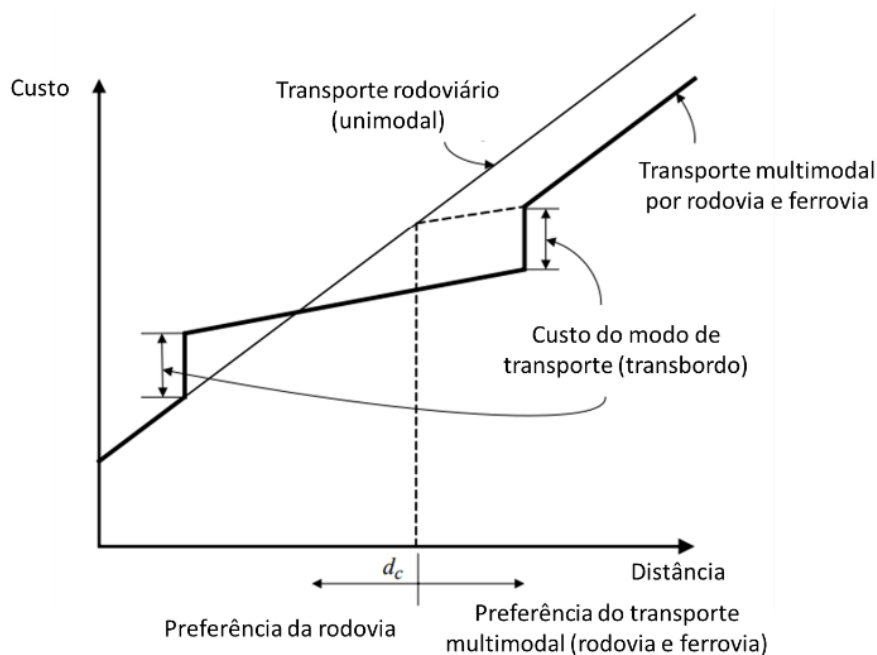


Figura 6 – Relações de custos entre transporte unimodal e multimodal
 Fonte: adaptado de Taniguchi & Nemoto (2008)

Pinto *et al.* (2018) comentam que a mudança do modo de transporte é uma estratégia importante para que os países possam cumprir as metas de redução de emissões para 2030 e 2050, acordadas na Conferência das Nações Unidas sobre as Mudanças Climáticas - COP e que parte das estratégias existentes. Por exemplo, impostos sobre combustíveis, subsídios aos biocombustíveis, dentre outros, não são suficientes para cumprir as metas das emissões e o *modal-shift* é uma forma de acelerar a redução das emissões de GEE e da poluição.

A mudança do transporte de carga das rodovias para as ferrovias pode trazer uma série de benefícios para redução da intensidade de emissões de GEE, nos curto e médio prazos, embora inadequações na infraestrutura ferroviária e a distância média curta para o caso de algumas rotas e cargas possam ser um gargalo para tal migração. Tal benefício pode ser ampliado com investimentos em melhorias das linhas férreas, das instalações ferroviárias e eletrificação do transporte (IEA, 2009; SCHILLER *et al.*, 2010; SALTER *et al.*, 2011; SIMS *et al.*, 2014). Aliás, a eletrificação das ferrovias é uma tendência no desenvolvimento social (LIU & LIN, 2021).

No Brasil, as emissões de CO₂ equivalentes no transporte rodoviário são, na média, por volta de 6 vezes maior do que no transporte ferroviário e por volta de 8,5 vezes maior do que no transporte hidroviário (EMPRESA DE PLANEJAMENTO E LOGÍSTICA – EPL, 2021a).

Há um conceito emergente, desenvolvido na região da Bélgica, Holanda e Luxemburgo, sobre a integração de modos de transporte de forma mais eficiente, denominado logística sincromodal (*synchromodal logistics*), a qual pode ser entendida como a prestação de serviços eficientes, confiáveis, flexíveis e sustentáveis que são coordenados e cooperados pelas partes interessadas e sincronizados com tecnologias de informação e sistemas de transporte inteligentes (GIUSTI *et al.*, 2019). Alguns autores, como Brümmerstedt, Meyer-Van Beek & Münsterberg (2017) destacam que a sincromodalidade é a próxima geração da multimodalidade.

A sincromodalidade permite a integração horizontal entre os modos de transporte de forma que o operador possa escolher o melhor modo no momento da movimentação, de forma a otimizar a logística, diferente da integração vertical vista na logística multimodal, a qual é definida, no momento da contratação, para o conjunto de modos de transporte para movimentar a carga do ponto de origem até o destino, podendo ser uni ou multimodal. Behdani *et al.* (2016) destacam que a logística sincromodal apresenta uma visão integrada de planejamento de forma a utilizar diferentes modos de transporte com flexibilidade de demanda, permitindo a

otimização dos *trade-offs* entre o nível de serviço e os custos dos múltiplos modos de transporte. A sincromodalidade é promissora para redução de custos e de emissões de gases de efeito estufa (DONG *et al.*, 2018).

2.3.4. Mudanças na produtividade operacional do transporte: capacidade de carga, tamanho da frota e frete de retorno

A produtividade operacional é um fator importante tanto na definição dos custos de transporte quanto também no dimensionamento da quantidade de equipamentos de transporte a ser utilizado para movimentar as cargas. Mais especificamente ainda, operações de frete ineficientes prejudicam a competitividade empresarial, ampliando custos de transporte para a sociedade (RØDSETH, 2017). Desta forma, mudanças nos fatores de produtividade de transporte afetam tanto os custos de transporte quanto também os níveis de emissões de GEE.

Por exemplo, para um par origem-destino conhecido de uma movimentação de carga do ponto i para o destino j , em um sistema cíclico envolvendo dois nós em uma rede de transporte, para a movimentação de apenas um produto e um único período, admitindo-se que a capacidade do veículo seja igual à quantidade efetivamente movimentada, é possível estimar a função de produção, a qual fornece o fluxo máximo no par origem-destino (ij) a partir de um conjunto do tamanho da frota, capacidade do veículo e velocidade de carregamento e descarregamento (JARA-DÍAZ, 2007). O tempo de ciclo de transporte para um par origem-destino (ij) a partir do carregamento no ponto i , transporte de i até j , descarregamento em j e retorno de j para i é formulado pela equação (2.1).

$$h(B, K, \mu) = \frac{B K}{t(K) + \frac{2K}{\mu} + t(0)} = \frac{B K}{t_c(K)} \quad (2.1)$$

Onde:

$h(B, K, \mu)$: É a função produção de máximo fluxo para o par origem-destino (ij);

B : Tamanho da frota;

K : capacidade por veículo;

$t(K)$: tempo de viagem da rota (ij) como uma função da capacidade do veículo carregado;

$t(0)$: tempo de viagem com o veículo vazio;

μ : velocidade de carregamento e descarregamento; e,

t_c : é o tempo total de ciclo do transporte.

A partir de alguns ajustes na formulação apresentada por Jara-Díaz (2007), definindo que a produção ($h(B, K, \mu)$) seja igual à razão entre a quantidade total de carga a ser movimentada (ω) no sistema e o prazo operacional de movimentação – período (T), é possível

é possível determinar o dimensionamento ótimo da frota para o par origem-destino (ij), conforme apresentado na equação (2.2).

$$B^* = \frac{\left[t(K) + \frac{2K}{u} + t(0) \right]}{K} \cdot \frac{\omega}{T} \quad (2.2)$$

Fica evidente que o tamanho da frota (quantidade total de veículos) para movimentar uma determinada carga em um intervalo de tempo com uma demanda conhecida, apresenta algumas relações interessantes. O tamanho da frota é afetado de forma diretamente proporcional pelo tempo de percurso do veículo carregado, tempo do percurso do veículo vazio e quantidade total a ser movimentada no sistema. A relação do tamanho frota é inversamente proporcional ao prazo operacional, à capacidade dos veículos e à velocidade de carregamento e descarregamento do equipamento de transporte.

O número de viagens (ω/K) do sistema de transporte permanece inalterado, independente do tempo de ciclo. Entretanto, o tamanho da frota é afetado pelo prazo operacional de entrega da carga. Intervalos curtos de entrega geram um pico maior de veículos para que o sistema possa movimentar a quantidade total (ω) de carga. Por exemplo, ações que pressionam os prazos de entrega, como políticas de estoques de produtos ou insumos do tipo *just-in-time*, tendem a demandar mais do sistema de transporte, pelos prazos curtos. Nessa linha, sistemas de armazenagem podem contribuir em evitar picos de demanda no sistema de transporte e consequentemente redução do tamanho da frota.

Os padrões de produtividade no transporte afetam diretamente aspectos de sustentabilidade no transporte. No planejamento das rotas, as empresas precisam avaliar os *trade-off* econômicos e ambientais no transporte. A eficiência das rotas de entrega, por exemplo, é afetada pelo tamanho (capacidade) dos caminhões, os quais apresentam padrões distintos do consumo de combustível e capacidade de carga (SAWIK, 2018).

Abate (2014) identificou no mercado de fretes dinamarquês, a partir de uma abordagem econométrica, que a distância da viagem apresenta um efeito positivo na capacidade de carga e na probabilidade de viagens carregadas, além também da identificação de que as transportadoras conseguem aumentar a capacidade de transporte de carga nas viagens em relação aos embarcadores que possuem frota própria, em função de serem mais capazes de agregar cargas.

O aumento da capacidade de transporte do caminhão e da otimização da ocupação do espaço de carga no veículo reduzem as emissões de GEE e trazem economias de escala nos

custos de transporte. A redução das emissões por estas vias normalmente são tratadas na literatura de *green logistics* como uma melhoria na taxa de utilização do veículo ou equipamento de transporte, pois não se restringe somente ao caminhão. Há uma série de trabalhos que tratam desta temática, como por exemplo, Harris *et al.* (2011), Koç *et al.* (2014), Helo & Ala-Harja (2018), Figliozzi, Saenz & Faulin (2020) e Wang *et al.* (2021).

A discussão especificamente sobre aumento da capacidade de veículos pesados é polêmica, pelo fato de muitas vezes implicar um risco maior de acidentes. Nesse contexto, Castillo-Manzano, Castro-Nuño & Fageda (2016) avaliaram o problema a partir de modelos econométricos de dados em painel na União Europeia e identificaram que o aumento da capacidade de cargas dos caminhões não necessariamente prejudica a segurança nas rodovias; mais ainda, os caminhões pesados não apresentaram associação com maior número de fatalidades e acidentes no trânsito, enquanto os caminhões médios tiveram o pior desempenho para fatalidade e os caminhões leves apresentaram um pior desempenho para acidentes.

As principais barreiras de aumento da capacidade de veículos no transporte de carga envolvem regulações restritivas, limitações de infraestrutura rodoviária e aumento nos danos nas rodovias, veículos limitados para certas demandas, dentre outras (ITF, 2018).

Outra estratégia relacionada à redução das emissões de GEE é a redução de viagens vazias utilizando o equipamento de transporte. Islam (2016) identificou uma série de benefícios para a redução do transporte com o caminhão vazio na região portuária envolvendo contêineres, contemplando aspectos de sustentabilidade ambiental (redução na quilometragem percorrida pelos veículos, redução dos níveis de GEE e redução do nível de tráfego e congestionamento), econômica (redução dos custos operacionais do transporte) e social (redução da rotatividade de motoristas, aumento na capacidade dos portos e adicional de ganhos para os motoristas).

O nível de retorno vazio do equipamento de transporte tende a ser inversamente proporcional à distância da viagem, em função do incentivo econômico para encontrar uma carga de retorno (ABATE, 2014; MCKINNON, 2015).

Há uma série de causas para o retorno vazio, tais como: flutuações de demanda, falta de conhecimento de oportunidades de carga, restrições de tamanho do veículo e de peso, incompatibilidade de janelas de programação de carregamento e descarregamento, entregas *just-in-time*, necessidades de manuseios de carga, limitação de capacidade das instalações, incompatibilidade de carga com os veículos e precária coordenação de compras, vendas e logística (MCKINNON, 2015).

Uma destas estratégias envolve encontrar cargas para o retorno dos caminhões até o ponto originalmente embarcado com carga. Nesse contexto, Li & Yu (2017) propõem um aplicativo de frete a otimizar o encontro da carga ao caminhão de forma a trazer ganhos econômicos ao transportador e ganhos ambientais a partir da redução dos níveis de emissões de GEE, decorrente da redução dos quilômetros percorridos vazios e combinação adequada do tipo de veículo à carga, no mercado de fretes chinês. A situação típica é o veículo retornar vazio para a região de origem, após a entrega da carga (Figura 7a). Porém, com o aplicativo de transporte é possível o transportador agendar um pedido para garantir carga de retorno em um horário determinado (Figura 7b) ou aceitar mais de uma carga, em diferentes destinos, para conseguir uma viagem de retorno não vazia maior (Figura 7c), incorporando os custos de espera e procura, bem como características dos veículos.

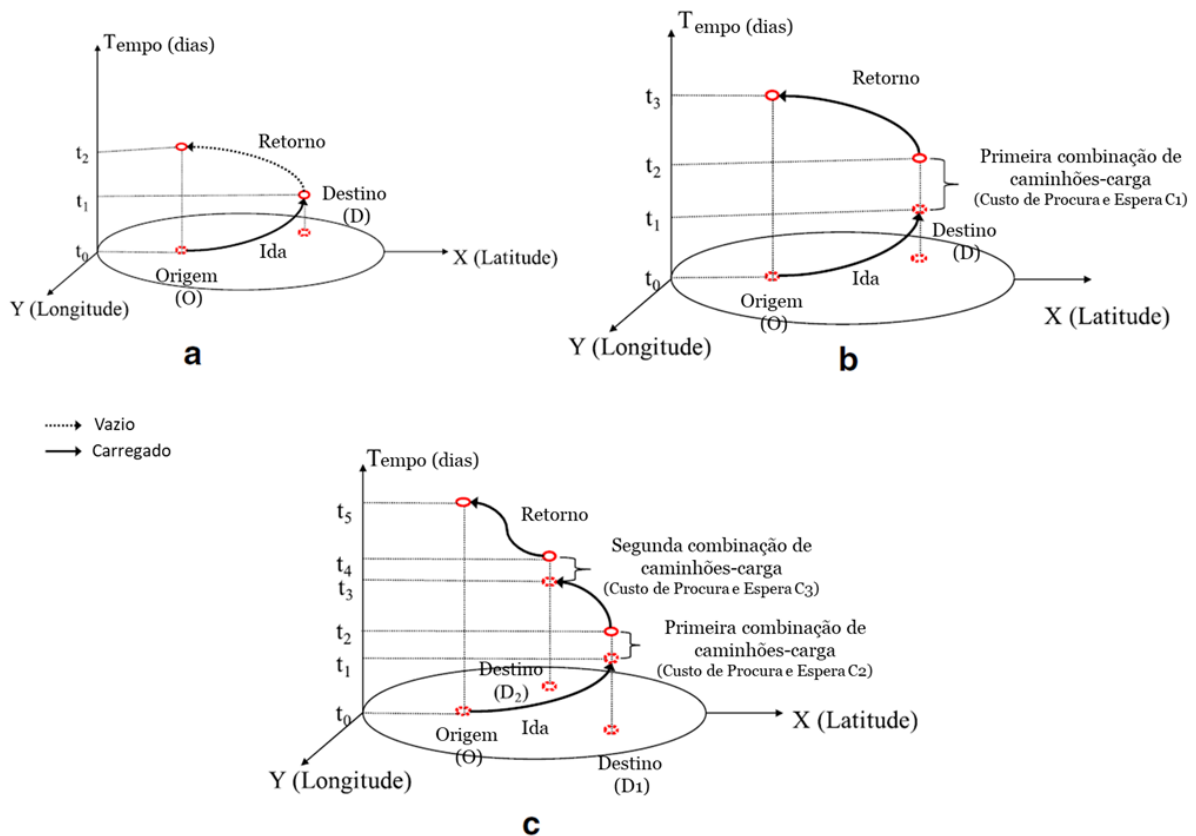


Figura 7 – Cenários de melhorias no sistema de transporte envolvendo o frete de retorno
Fonte: adaptado pelo autor a partir de Li & Yu (2017)

Os aplicativos de transporte, além de reduzirem a assimetria de informações no mercado de fretes, podem: (i) reintegrar oferta e demanda fragmentadas no tempo e espaço de forma mais ampla; (ii) atuar como facilitadores na comunicação para a combinação de carga-caminhão; e, (iii) reduzir emissões de gases de efeito estufa a partir da otimização de rotas com base em uma série de pontos de demanda, uso do espaço de descarregamento e informação de

tráfego em tempo real (LI & YU, 2017). Inclusive, o IFT (2018) enfatiza que a digitalização do mercado de fretes faz parte de um conjunto de inovações e tendência até 2030 na área de transporte de cargas, incluindo outras tendências como a intensificação do comércio eletrônico, a colaboração e compartilhamento de ativos, uso de *Internet of Things* (IoT) para conectar veículos e otimizar o sistema de transporte, e mudanças nas rotas comerciais etc.

Islam (2016) destaca a necessidade da evolução da logística colaborativa, envolvendo o compartilhamento de caminhões para fomentar a redução da taxa de veículos vazios. A logística colaborativa é usada para reduzir o fluxo de veículos vazios no retorno dos caminhões da viagem principal, de forma a encontrar serviços lucrativos (SANTOS *et al.*, 2021).

Islam & Olsen (2013) pontuam os maiores desafios para o compartilhamento de caminhões visando reduzir as viagens vazias, por parte de diferentes agentes: (i) dos clientes: demanda (falta de conhecimento), limitações locais (falta de espaço), localização pulverizada e dissimilar, peso do contêiner, documentação (falta de tempo), relacionamento com os motoristas; (ii) das transportadoras: falta de flexibilidade comercial, baixo frete, motorista cansado, falta de cooperação, complexidade de internalização de custos, falta de GPS, diferentes despachos; (iii) do porto: restrições de horário, prazos, altas penalidades (*demurrage*) e restrições nos terminais, falta de flexibilidade e quantidade de *slots* insuficientes; e, (iv) de outros fatores: feriados e eventos diversos (greves e desastres), tráfego (congestionamento e horários de pico), localização de armazém vazio, categorização dos contêineres, capacidade dos caminhões (restrições de equipamento e uso) e transporte de mercadorias perigosas.

As discussões sobre logística colaborativa envolvendo a colaboração de empresas e agentes de transporte nos problemas de transporte para redução de viagens com veículos vazios e aumento do uso da capacidade de transporte sob uma ótica econômica e ambiental podem ser visualizadas no trabalho de Santos *et al.* (2021), o qual analisou três funções objetivo diferentes em um modelo de otimização do transporte de uma indústria de alimentos: minimização dos custos operacionais totais, minimização do consumo total de combustíveis e minimização dos custos operacionais e das emissões, evidenciando que a colaboração permite reduzir o consumo global de combustível em 26% e os custos operacionais em 28%.

2.3.5. Sobre a renovação de frota de caminhões

Há uma série de programas para fomentar o aumento da eficiência do sistema de transporte dos diferentes países, envolvendo, por exemplo, programas de substituição

(eliminam os veículos antigos e os substituem por novos), de *retrofit* (instalam equipamentos adicionais de controle de poluição na frota existente) e de *repower* (substituem o motor e equipamentos de controle de emissão dos veículos existentes, podendo também alterar o tipo de combustível) (POSADA *et al.*, 2015).

O envelhecimento e a obsolescência da frota de veículos geram diversas consequências para a sociedade, tais como: perda da qualidade dos serviços de transporte, confiabilidade e previsibilidade; impactos na viabilidade econômico-financeira dos transportadores, como, por exemplo, o aumento do custo operacional de transporte, redução do lucro e perda de capacidade de reinvestimento em novos veículos; impactos diretos no ambiente a partir do aumento do congestionamento, emissões e consumo de combustível; concentração de transportadores em nichos específicos (por exemplo, transporte de contêineres nas regiões portuárias); aumento do preço do frete; impactos no desempenho da segurança viária a partir do aumento do número de acidentes pelo mau estado dos veículos antigos em circulação (WORLD BANK & IRU, 2016). Greene & Façanha (2019) destacam que caminhões antigos permanecem nas frotas dos países por décadas e afetam tanto o clima quanto a saúde, pelo fato de não possuírem tecnologias de controle e filtro de emissões.

A renovação da frota de caminhões de veículos pesados tem sido discutida como um instrumento de promoção da sustentabilidade, principalmente para redução dos níveis de emissões de GEE e de poluentes do ar. Os instrumentos de substituição acelerada de veículos apresentam diferentes efeitos nas economias, envolvendo: (i) melhoria na qualidade do ar; (ii) redução das emissões de GEE; (iii) melhora na segurança viária; e, (iv) apoio para a indústria automobilística em épocas de crise (INTERNATIONAL TRANSPORT FORUM, ORGANISATION FOR ECONOMIC CO-OPERATION AND DEVELOPMENT – OECD/ITF, 2011).

A partir de dados da frota de veículos pesados dos EUA envolvendo diversas fontes como o inventário de veículos do *United States Census Bureau - USCB*, Cooper *et al.* (2009) estimaram um perfil do transporte com veículos pesados no país, o qual pode ser segregado em dois conjuntos, com algumas características que os distinguem: (i) transporte média e longa distâncias: normalmente, utilizam-se caminhões mais novos para a movimentação neste tipo de transporte, o qual se caracteriza por viagens de longo alcance, com raio médio elevado (acima de 320 quilômetros), distância total percorrida anual por veículo que muitas vezes ultrapassa 100 mil quilômetros, com velocidade média maior e próximos ao limite das rodovias e com

fluxos que utilizam rodovias interestaduais; (ii) transporte regional: normalmente, utilizam-se caminhões mais velhos, com viagens em áreas urbanas ou áreas com rodovias intraestaduais, com velocidades médias reduzidas e com mais paradas, com raio médio de 320 quilômetros.

A partir dos estudos de Cooper et al. (2009), foi estruturada uma estimativa da vida útil da migração da frota de veículos pesados dos EUA, conforme apresentado pela Figura 8. Neste contexto, 80% dos veículos novos normalmente iniciam suas operações no transporte de longo curso e uma fração migra ao longo da vida útil para o transporte regional – estima-se que o maior período de migração de veículos para trajetos de longo curso para regional ocorre de 5 a 10 anos. A idade média dos caminhões no transporte regional está na faixa de 18 a 20 anos. Interessante destacar a dinâmica temporal do uso do caminhão ao longo da sua vida útil.

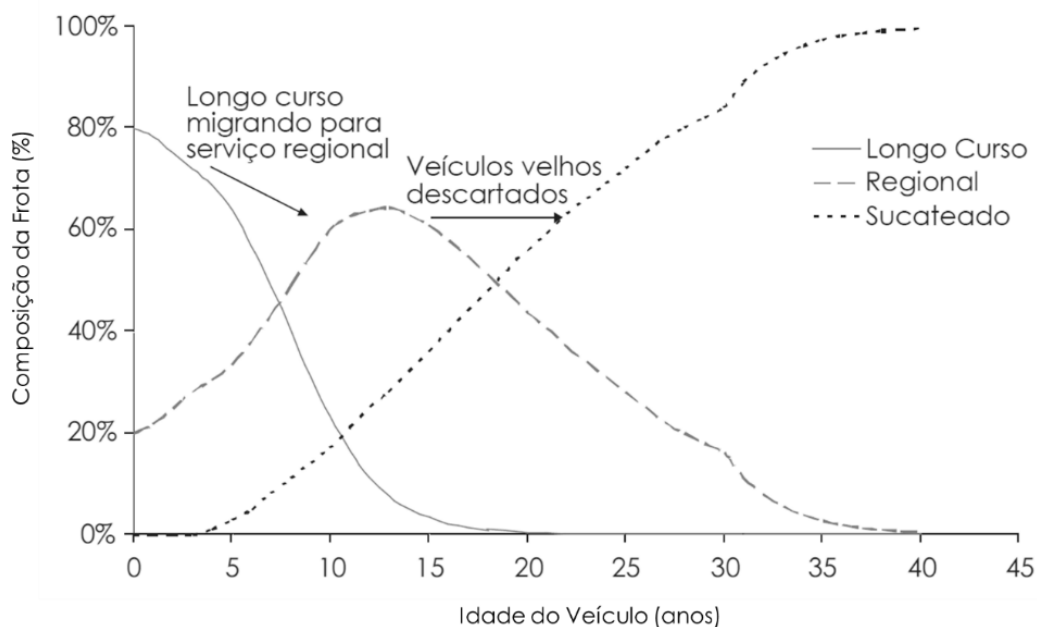


Figura 8 – Migração de veículos para diferentes perfis de uso

Fonte: adaptado pelo autor a partir de Cooper *et al.* (2009)

Norsworthy & Craft (2013) identificaram, a partir de programas voluntários de substituições de caminhões em áreas portuárias nos EUA – regiões com grande concentração de atividade industrial e de transporte e normalmente com frota antiga – potenciais de redução das emissões de poluentes, embora com níveis inferiores aos programas obrigatórios. Greene & Façanha (2019) destacam que há muitas oportunidades para a logística rodoviária de contêineres envolvendo os fluxos de transporte entre porto e região interior próxima, pois contemplam distâncias curtas, que utilizam caminhões antigos e em áreas normalmente urbanas.

Posada *et al.* (2015) definem cinco práticas importantes nos programas de substituições de veículos: (i) o programa deve buscar substituições de veículos o mais limpo possível (o programa será tão mais eficaz quanto maior a substituição por veículos limpos em termos de emissão de poluentes); (ii) a implementação e gestão devem assegurar que os benefícios esperados do programa sejam realmente atingidos; (iii) os incentivos fiscais devem ser vantajosos para otimizar os benefícios ambientais e a eficácia de custos, de forma que o incentivo seja superior ao valor de mercado do veículo antigo a ser substituído ou mesmo que seja um valor que contribua significativamente na substituição do veículo; (iv) os programas devem equilibrar as políticas nacionais, regionais e locais; e, (v) desenvolvimento de políticas e programas complementares como benefícios fiscais e incentivos adicionais, envolvendo, por exemplo, barreiras regulatórias, limites de idade obrigatórios etc.

Um conjunto de aspectos importantes sobre o entendimento da eficácia da renovação de frota de um país diz respeito ao público-alvo da política/programa e é elencado por *World Bank & IRU* (2016): (i) a solução é complexa: a substituição do veículo antigo por um novo pode não ser efetiva se o país apresentar rodovias em condições precárias e má condução por parte dos motoristas, gerando novamente ineficiência no sistema e fomentando um ciclo vicioso; (ii) o mercado dos veículos antigos, de uma forma geral, é dominado por pequenos transportadores rodoviários e informais (autônomos, por exemplo), que não estão organizados em associações e não possuem uma contabilidade apurada, situação que dificulta a tomada de crédito junto às instituições financeiras devido aos maiores riscos e às baixas (ou nulas) garantias; (iii) os bancos exigem que o novo caminhão comprado com crédito de longo prazo tenha seguro contra riscos, gerando um custo adicional ao motorista informal. Os transportadores informais tendem a preferir-lo e optam por adquirir veículos usados, de mais fácil acesso; e, (iv) o programa de renovação de frota pode ser também uma medida importante para a reciclagem dos motoristas e envolve a combinação de diferentes ações, tais como acesso facilitado ao crédito, assistência financeira, incentivos fiscais e fiscalização.

Há uma série de programas de substituição de veículos em diferentes países em andamento para veículos pesados, com foco na melhoria da qualidade do ar (redução dos poluentes), principalmente. Nos EUA, por exemplo, a Califórnia possui um programa para descarbonização do transporte e fomento de veículos de zero emissão (que envolvem tecnologias de veículos elétricos ou células de Hidrogênio); há também, em escala nacional, o *US National Clear Diesel Campaign*; na China, há também o *National Vehicle Scrappage*

Progam, o qual é obrigatório para veículos que passaram de um limite de idade, dentre outros (POSADA *et al.*, 2015).

Os EUA lançaram um programa de ação de ar limpo nos portos em 2006 e alcançaram reduções significativas na poluição por caminhões desde então; inclusive, os portos de Los Angeles e Long Beach, na costa oeste americana, assinaram uma meta de emissão zero até 2035 para os caminhões que atendem aos portos (FILLIPO, CALLAHAN & GOLESTANI, 2019).

No Brasil, em 2016, foi cogitada a possibilidade de um programa de substituição de frota rodoviária. Na ocasião, *The International Council on Clean Transportation – ICCT* (2016) fez uma série de recomendações, baseadas em experiências de outros países, para que o programa de renovação, em sua primeira fase, focasse na remoção dos veículos pesados (caminhões) a diesel e ônibus antigos com mais de 14 anos e que estivessem inferiores aos padrões do Proconve P3, de forma que os novos veículos ingressassem com padrões Proconve P8; além de recomendar que os pequenos transportadores (autônomos, por exemplo) pudessem optar pelo sucateamento dos seus veículos em troca de um certificado que poderia ser comercializado e conseqüentemente tendo um incentivo econômico para a aquisição de um veículo novo.

A discussão da renovação de frota não se restringe somente ao transporte rodoviário de cargas, mas também ao transporte marítimo, setor no qual tem se ampliado o número de regulações e metas de descarbonização. Patricksson, Fagerholt & Rakke (2015) estudaram os benefícios e desafios sobre a renovação de navios de forma a incorporar regulamentações mais rígidas, nos cenários avaliados, quanto ao baixo teor de enxofre e à instalação de um sistema de purificação de gases.

Por fim, políticas de renovação da frota contribuem por acelerar a transição para um ambiente mais sustentável na rede de transporte global (GREENE & FAÇANHA, 2019).

2.3.6. Alternativas diversas envolvendo outros modos de transporte: o transporte marítimo

Há uma série de alternativas para mitigação de poluentes e GEE envolvendo outros modos de transporte. Importante destacar que as estratégias apresentadas anteriormente são também válidas para os outros modos de transporte. Ocorre que o transporte marítimo de carga tem sido o mais estudado e fomentado para a redução de gases diversos por representar um

volume elevado de GEE na matriz total de emissões e merece um destaque adicional na análise de estratégias.

Recentemente tem sido muito discutida a descarbonização do transporte marítimo a partir das metas da *International Maritime Organization* – IMO. Especificamente, as discussões e definições de estratégias para cortes de GEE se iniciaram a partir de 2011, quando a IMO adotou regulações mandatórias de eficiência energética para novos navios e desde então, anualmente, uma série de medidas relacionadas à temática tem sido realizada (IMO, 2021). Além disso, foi estabelecida uma meta de redução das emissões de GEE de 50% até 2050, em relação ao ano base de referência – 2008 (IMO, 2021). A meta de 2050 demanda uma redução significativa de GEE emitidos por tonelada de carga por milha náutica, demandando mudanças das mais variadas: tamanho do navio, tipo de combustível e até gestão da velocidade de transporte (COMER, CHEN & RUTHERFORN, 2018).

A IMO criou um índice importante, denominado *Energy Efficiency Design Index* – EEDI, o qual é formulado para estimar o nível de emissões de CO₂ por transporte (toneladas-milha náutica), para novos navios de forma a avaliar a eficiência energética (ICCT, 2011; IMO, 2012). O EEDI envolve a razão entre a soma das emissões diversas do navio (motores principais, motores auxiliares, geradores e motores de eixo e computando ganhos da eficiência de tecnologia) e a produção do transporte (IMO, 2012).

Em 2019 foram discutidas e aprovadas algumas ações de abordagem com seu cronograma de implementação, envolvendo especificamente (JOUNG *et al.*, 2020): melhoria da eficiência energética dos navios existentes do tipo EEDI; desenvolvimento a estrutura EEDI para novos navios; melhoria da eficiência energética dos navios existentes construídos; identificação de indicadores pertinentes de eficiência energética operacional; desenvolvimento de mecanismos de otimização e de redução da velocidade; desenvolvimento de medidas regulatórias de redução do metano; desenvolvimento de medidas de redução das emissões dos Compostos Orgânicos Voláteis; estimativa do desenvolvimento de planos de ação nacionais; incentivos ao desenvolvimento e atividades portuárias para facilitar a redução das emissões de GEE no transporte marítimo; apoio às atividades de pesquisa e desenvolvimento; fomento de programas de desenvolvimento para os primeiros *players* a desenvolverem e aceitarem novas tecnologias; desenvolvimento de diretrizes de ciclo de vida envolvendo GEE e de intensidade de carbono para todos os tipos de combustíveis; implementação do programa para fomentar de

forma efetiva combustíveis alternativos de baixo carbono e de zero carbono; e, criação de novos e inovadores mecanismos de redução de emissões.

A Figura 9 apresenta diferentes estratégias e tecnologias que podem ser adotadas para mitigação de emissões de CO₂ no transporte marítimo, consolidadas por Joung *et al.* (2020). Alguns destaques relacionados aos maiores potenciais de redução: mudanças no tamanho do navio, utilização de biocombustíveis no transporte e otimização da velocidade de transporte.

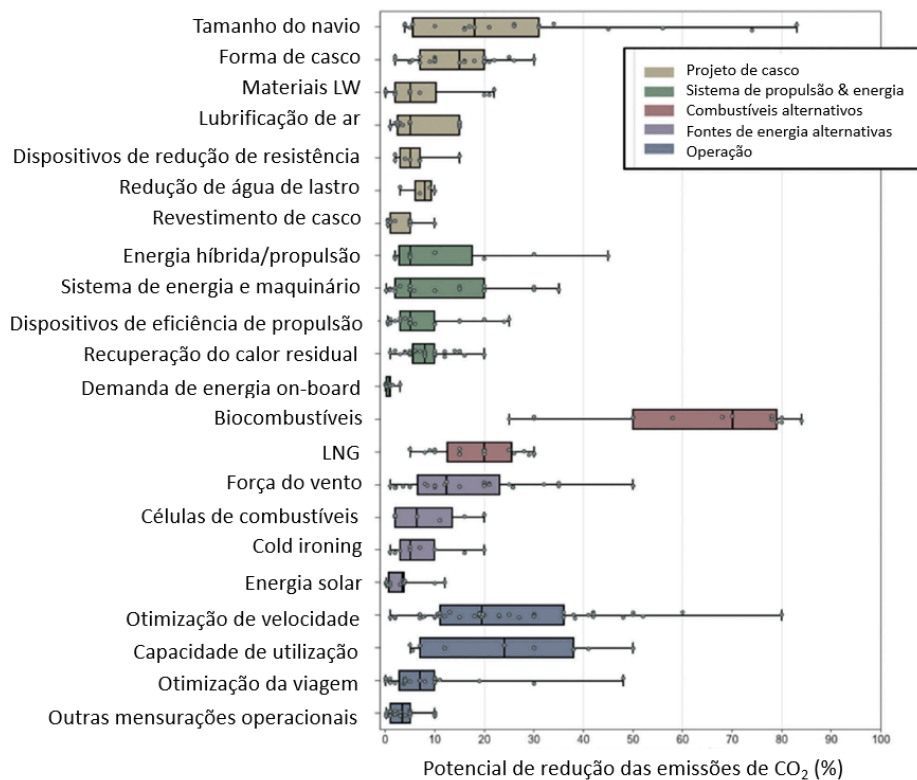


Figura 9 – Potencial de redução das emissões de CO₂ no transporte marítimo
Fonte: adaptado de Joung *et al.* (2020)

Na literatura, a partir das observações com dados empíricos, o consumo diário de combustível dos navios varia de forma exponencial com o aumento da velocidade (WANG & MENG, 2012), conforme apresentado pela equação (2.3). De forma mais específica, o β é tratado como sendo a capacidade de resposta do consumo de combustível às variações de velocidade (elasticidade); as observações, na literatura, apontam para um β igual a 3, inclusive tal evidência ficou conhecida como “lei cúbica”, embora alguns autores tenham argumentado que tal parâmetro cúbico é realista para condições de transporte específicas, quando, por exemplo, a velocidade de navegação é próxima à velocidade do projeto (ADLAND, CAIOU & WOLFF, 2020). De toda forma, para $\beta > 1$, pequenas variações na velocidade média do navio durante o transporte marítimo trazem maiores impactos no consumo de combustível e consequentemente nas emissões de GEE e dos custos.

$$F(s) = \alpha s^\beta \quad (2.3)$$

Onde:

$F(s)$: é o consumo diário de combustível, em toneladas por dia;

s : é a velocidade de transporte, em nós;

β : é a capacidade de resposta do consumo de combustível às variações de velocidade; e,

α : outros parâmetros do modelo.

Du *et al.* (2011) apresentam um exemplo da relação de consumo de combustível e velocidade para gestão de consumo na viagem de navios na determinação da velocidade ótima. Velocidades acima deste ponto de ótimo demandam desaceleração para economia de combustível, da mesma forma quando as velocidades estão abaixo do nível ótimo, demandam aceleração do navio. Tal prática de gestão de velocidade se assemelha com a de *eco-driving* discutida em uma das subseções deste capítulo. Há diversos estudos, como o de Adland, Caiou & Wolff (2020), que incorporam variáveis como distância, quantidade de carga movimentada, tempo de estadia no porto, parâmetro β , preço do combustível, dentre outros componentes, para estimar uma equação de lucro e encontrar a velocidade ótima de viagem que gera o máximo lucro ao operador do navio.

Reduzir a velocidade do navio é a forma mais fácil e relativamente econômica de mitigar as emissões, pois abranda o consumo de combustível e os custos operacionais; por outro lado, para movimentar uma mesma quantidade de carga em velocidades menores, é necessário aumentar a quantidade de navios, além da necessidade de reconfiguração de serviços e de transbordos (UNITED NATIONS CONFERENCE ON TRADE AND DEVELOPMENT – UNCTAD, 2021).

Outro assunto de importância para a temática é a utilização de navios maiores para o transporte de cargas, em função do efeito de economia de escala, a partir da diluição do custo fixo do navio. Por exemplo, Stopford (2008) consolida os custos unitários de transporte marítimo em função do tamanho do navio (em DWT¹), ilustrando que mudanças de navios do tipo *Panamax*² para *Capesize*³ podem gerar economias de 36% nos custos de transporte, por exemplo. Navios maiores para o transporte são alternativas muito interessantes para redução dos custos e emissões, inclusive alguns segmentos passaram por grandes mudanças tecnológicas em termos de crescimento da capacidade de navios (como é o caso de contêineres),

¹ DWT: dead-weight tons – peso que o navio carrega (combustível, carga, água de lastro, tripulação etc.)

² *Panamax*: navios que conseguem trafegar pelas eclusas do Canal do Panamá e que possuem capacidade entre 65 mil a 80 mil DTW;

³ *Capesize*: navios que não possuem dimensões para trafegar pelos canais do Panamá e Suez; normalmente utilizam a rota do Cabo de Boa Esperança, possuindo capacidade de transporte acima de 100 mil DWT.

sendo que exemplo pode ser encontrado no setor de mineração no Brasil, com o *Valemax* – que tem capacidade de 400 mil DWT – o qual faz o transporte de minério de ferro para a China (UNCTAD, 2020). O exemplo do efeito da redução das emissões em decorrência do aumento da capacidade do navio (envolvendo graneleiros) pode ser visualizado na Figura 10, para diferentes tipos de tamanho (desde o *small-vessel* até os navios maiores, do tipo *Capesize*).

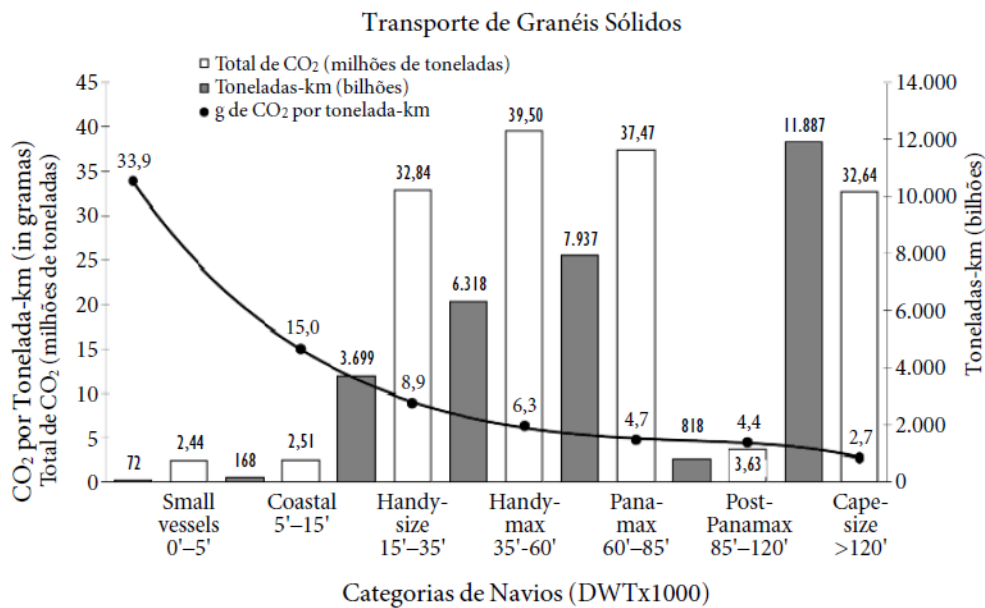


Figura 10 – Emissões dos navios graneleiros
Fonte: adaptado de Psaraftis & Kontovas (2009)

Bernacki (2021) estimou as elasticidades de custos de transporte de navios graneleiros e porta-contêineres, em relação ao aumento do tamanho do navio, a partir da derivação de regressões de custos, conforme apresentado pela Tabela 1. A partir dos coeficientes negativos do custo operacional total fica evidente o efeito da redução do custo com o aumento da capacidade do navio e em maior intensidade para os navios graneleiros do que porta contêineres, corroborando os entendimentos anteriormente apresentados por Stopford (2008).

Tabela 1 – Elasticidades do custo unitário de transporte em relação ao tamanho médio do navio

Custos	Elasticidades	
	Graneleiros	Porta contêineres
Custo Operacional Total	-0,751	-0,553
Custo de Capital	-0,713	-0,399
Outros Custos Operacionais (exceto combustível)	-0,804	-0,782
Custo de Combustível	-0,757	-0,702

Fonte: Bernacki (2021)

A barreira de crescimento ao uso de navios maiores é a profundidade dos canais portuários e terminais, uma vez que navios de maior capacidade demandam maiores profundidades das águas de acesso às instalações. Para um navio do tipo *Panamax*, a

profundidade do canal é de 12 - 15 metros; para um *Capesize* é acima de 15 metros (UNCTAD, 2020). Os benefícios de navios maiores não se restringem somente às economias de escala e reduções de emissões de GEE e poluentes, mas também na melhoria de desempenho e conectividade dos portos, envolvendo, por exemplo, redução do tempo do navio no porto (UNCTAD, 2020). Ampliar a profundidade dos canais portuários e dos berços de atracação são estratégias para receber navios maiores, mas envolve investimentos elevados em atividades de dragagem (MENEGAZZO & PETTERINI, 2018).

A partir dos dados apresentando na Figura 11 é possível observar a evolução da oferta global da capacidade da frota de navios graneleiros por tipo no período de 2007-2019, em milhões de DWT, evidenciando alguns aspectos: (i) a oferta de capacidade cresceu 123% no período; e, (ii) os navios do tipo Capesize representaram 29% da capacidade da frota de navios graneleiros, no ano de 2019, enquanto que os Handymax representaram 24%, Handysize 11%, Panamax 20%, Post-Panamax 6% e outros (9%).

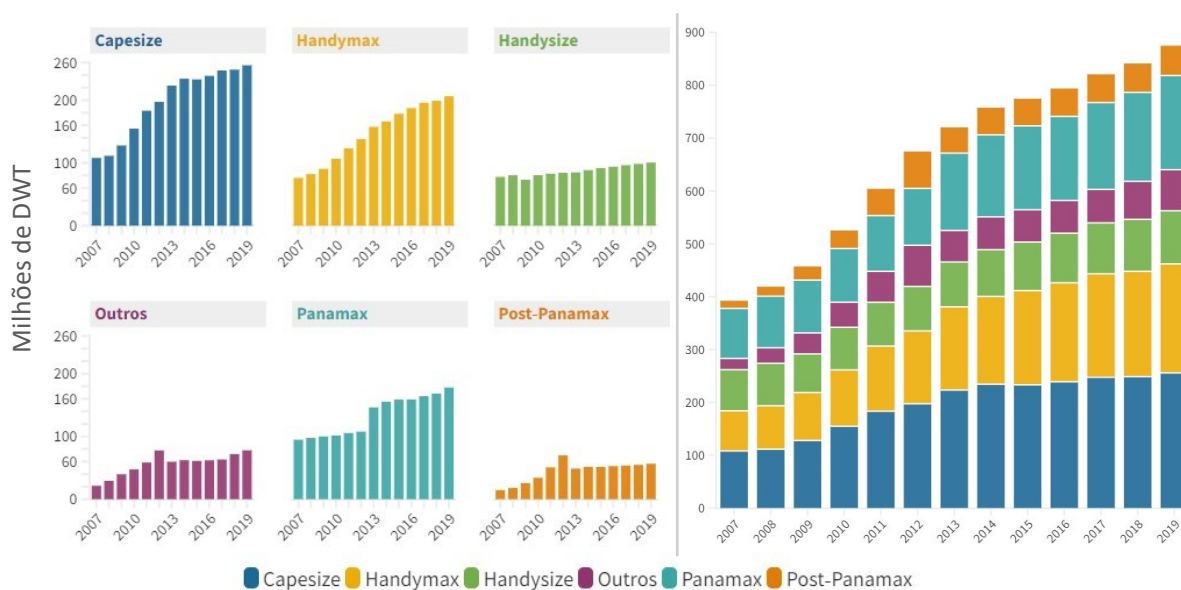


Figura 11 – Evolução da oferta de navio graneleiro por tamanho (em milhões de DWT)

Nota: Capesize (120.000 – 220.000 DWT), Handymax (40.000 – 65.000 DWT), Handysize (10.000 – 40.000 DWT), Panamax (65.000 – 85.000 DWT), Post-Panamax (85.000 – 120.000 DWT)

Fonte: elaborado pelo autor a partir de *United States Department of Agriculture – USDA* (2021)

Bektas *et al.* (2019) mapearam na literatura as aplicações com ferramentas de *Operational Research* para otimização da *green logistics* envolvendo o transporte marítimo, com destaque para algumas delas: roteirização e *scheduling* de navios, dimensionamento de frota, otimização de velocidade, *design* de rede de transporte, roteirização climática e gerenciamento de terminais, enfatizando a importância do aumento da interoperabilidade entre navio e porto e melhoria da eficiência da interface entre os modos de transporte.

2.4. Métricas de *green logistics* no transporte

As emissões totais de gases de efeito estufa em um sistema de transporte dependem de uma série de fatores, tais como: (i) a modalidade do sistema de infraestrutura escolhido para o transporte; (ii) a intensidade de carbono no combustível escolhido e utilizado no transporte; (iii) a intensidade de energia do combustível escolhido e utilizado no transporte, ou seja, o rendimento do consumo do combustível; (iv) o nível de atividade de transporte, mensurado como a distância total percorrida, número de viagens etc. (SIMS *et al.*, 2014). A Tabela 2 apresenta alguns exemplos de indicadores e métricas usadas para avaliar práticas de *green logistics* ou sustentáveis.

Tabela 2 – Métricas utilizadas envolvendo sustentabilidade no transporte e na logística verde

Métrica	Indicador	Fonte
Compartilhamento de veículos nas operações de fretes	Mensura o compartilhamento do veículo de transporte com outras companhias para maximizar a taxa de utilização do transporte	Kumar & Anbanandam (2020)
<i>Compliance</i> com boas práticas de sustentabilidade e leis	Mensura a existência de <i>compliance</i> com boas práticas de sustentabilidade econômica, ambiental e sociais e com as leis estabelecidas nas atividades logísticas	Kumar & Anbanandam (2020), Sureeyatanapas <i>et al.</i> (2018)
Eco-direção e monitoramento de indicadores operacionais do transporte	Mensura práticas de direção voltadas para redução do consumo de combustível, com monitoramento de velocidade, muitas vezes em tempo real utilizando telemetria	Kumar & Anbanandam (2020); Perotti <i>et al.</i> (2012); Sureeyatanapas <i>et al.</i> (2018)
Eficiência energética	Razão entre a energia consumida e os quilômetros percorridos pelo veículo. Quanto maior o nível de eficiência energético, menor o nível de emissões de carbono.	McKinnon <i>et al.</i> (2010)
Emissão total de gases de efeito estufa	Mensurado como o nível total de emissões de gases de efeito estufa no sistema de transporte	Fulzele & Shankar (2021), McKinnon <i>et al.</i> (2010), Hassini <i>et al.</i> (2012), Zhu and Sarkis (2004), Holden <i>et al.</i> (2016)
Indicadores financeiros do transporte (receita, custo, lucro)	Mensura indicadores financeiros das atividades logísticas relacionados ao transporte, envolvendo receita, custo, lucro, participação dos custos de transporte na receita etc.	McKinnon <i>et al.</i> (2010); Fulzele & Shankar (2021); Kelle <i>et al.</i> (2019); Liu & Wang (2009), Falsini <i>et al.</i> (2012)
Intensidade de carbono na fonte de energia	Quantidade de CO ₂ emitida por unidade de energia consumida no veículo. Cada tipo de combustível apresenta um nível de emissão de carbono diferenciado.	McKinnon <i>et al.</i> (2010)
Intensidade de transporte (IT)	Razão entre a movimentação de carga e a produção econômica. Quanto maior a intensidade do transporte, maior tende a ser o nível de emissão de carbono na economia.	McKinnon <i>et al.</i> (2010)

Investimentos em tecnologias ambientais	Mensura os investimentos realizados em tecnologias para monitoramento dos níveis de emissões de GEE nas atividades de transporte	Fulzele & Shankar (2021), Lieb & Lieb (2010)
Mobilidade	É uma medida de eficácia do sistema de transporte, definida como sendo o total de toneladas-horas de viagem do sistema, avaliado em TKUs	Kelle <i>et al.</i> (2019)
Modal-share	Proporção das movimentações de carga por tonelada-quilômetro (TKUs) dos modos de transportes menos intensivos de emissão de carbono (ferrovia, hidrovia, navio etc.) e mais intensivos de emissão (rodovias). Quanto menor a participação das rodovias na movimentação de cargas, menor o nível de emissão de carbono da economia.	McKinnon <i>et al.</i> (2010)
Monitoramento dos salários dos funcionários (motoristas, por exemplo)	Mensura o nível de salários dos funcionários do transporte, principalmente motoristas	Kumar & Anbanandam (2020), Hendiani and Bagherpou (2019)
Ocupação da infraestrutura de transporte	Mensura a razão entre a quantidade de veículos (caminhões ou trens) trafegados e a extensão da infraestrutura total do sistema (rodovia ou ferrovia)	IEA (2013)
Perdas nas operações de transporte	Mensura a quantidade avariada ou perdida de produtos nas atividades logísticas de transporte	Falsini <i>et al.</i> (2012); Caixeta-Filho & Péra (2018)
Performance ambiental	Mensurada como a razão entre a soma total do consumo de energia de fontes não renováveis e os TKUs utilizados no sistema de transporte	Kelle <i>et al.</i> (2019)
Políticas ambientais	Existência de políticas regulatórias para minimizar o impacto da logística no meio ambiente	Fulzele & Shankar (2021), Hervani <i>et al.</i> (2005)
Práticas e incentivos de comportamento verde no transporte	Identifica a existência de práticas e incentivos para o comportamento verde nas atividades de transporte	Kumar & Anbanandam (2020)
Programas de treinamento de motoristas	Mensura a quantidade de programas de treinamento ofertados para os transportadores	Fulzele & Shankar (2021), Hassini <i>et al.</i> (2012), Zhu & Sarkis (2004)
Restrição da jornada de trabalho dos motoristas (condução noturna)	Mensura a restrição de tempo envolvendo a jornada de trabalho dos transportadores, inclusive as práticas de condução noturna	Kumar & Anbanandam (2020)
Taxa de acidentes	Mensura o número de acidentes (fatais ou não) ocorridos no transporte em um intervalo de tempo	Fulzele & Shankar (2021), Zhu & Sarkis (2004)
Taxa de poluição	É a razão entre a soma total de poluição (podendo ser um algum poluente específico ou todos, padronizados em escala equivalente) e os TKUs correspondentes	Kelle <i>et al.</i> (2019)
Uso de veículos maiores para o transporte	Mensura a quantidade de veículos maiores no transporte, que podem contribuir para a redução de custos e de emissões, embora possam gerar outras externalidades como maior risco de acidentes nas estradas	Kumar & Anbanandam (2020), Rodrigues <i>et al.</i> (2015)
Utilização de veículos	Razão entre veículo-km e tonelada-km para mensurar a demanda de tráfego para movimentar uma determinada de carga. Quanto maior a utilização dos veículos, menor tende a ser o nível de emissões de carbono.	McKinnon <i>et al.</i> (2010)

Fonte: diversos autores

2.5. O sistema de transporte no Brasil

O setor de transporte no Brasil envolve um complexo de infraestruturas: rodovias, ferrovias, hidrovias, dutovias, portos, terminais de uso privativo, terminais de transbordo, dentre outras instalações.

O Valor Adicionado (VA) do transporte representou 3,6% do Valor Adicionado do Brasil, em 2019, além de empregar 4,8% dos trabalhadores formais (INSTITUTO BRASILEIRO DE GEOGRAFIA E ESTATÍSTICA - IBGE, 2021a). O setor do transporte rodoviário de cargas foi o responsável pelo maior valor adicionado do segmento de transporte, além também de ser o setor que mais registrou pessoal ocupado, atingindo a magnitude de mais de um milhão de pessoas, contemplando 103 mil empresas prestadoras de serviços, bem como apresentou a maior relação de gasto com pedágios em relação à receita operacional (RO). Os setores de transporte aéreo, transporte rodoviário de passageiros e transporte rodoviário de cargas foram os que apresentaram as maiores participações dos custos de combustíveis e lubrificantes em relação à receita operacional, conforme apresentado pela Tabela 3.

Tabela 3 – Indicadores gerais do transporte no Brasil em 2019

Setores	Valor Adicionado (% do Brasil)	Custo do Combustível (% da RO)	Número de Empresas	Pessoal Ocupado
Ferrovário e metroviário	0,2%	9,1%	60	58.426
Rodoviário de passageiros	0,6%	20,3%	31.924	668.840
Rodoviário de cargas	1,2%	16,6%	103.341	1.000.89
Dutoviário	0,2%	0,2%	9	7.754
Aquaviário	0,2%	5,1%	920	37.166
Aéreo	0,2%	27,8%	217	58.942
Armazenagem e apoio	1,0%	1,2%	24.994	466.530
Total	3,6%	13,0%	161.465	2.298.557

Fonte: IBGE (2021a)

O Brasil apresenta uma malha rodoviária desbalanceada em termos de rodovias pavimentadas e não pavimentadas. A extensão total da malha rodoviária do país é de 1,563 milhão de quilômetros; entretanto, apenas 213,4 mil quilômetros são pavimentados (13,6% do total) sendo que o restante envolve rodovias não pavimentadas (CNT, 2021b). Mais especificamente ainda, por volta de 30% das rodovias pavimentadas estão sob a jurisdição federal e o restante sob jurisdições estaduais e municipais (CNT, 2021b). Em termos de classificação do estado geral da qualidade das rodovias, apenas 11,9% se classificam como ótimo, 29,1% como bom, 34,6% como regular, 17,5% como ruim e 6,9% como péssimo (CNT, 2021b). Pelo fato de o país ter um grande volume de produção agropecuário, o indicador da

extensão das rodovias não pavimentadas é importante e preocupante, pelo fato de ser uma das principais vias iniciais de escoamento da produção, envolvendo o transporte rural.

Em relação ao sistema ferroviário brasileiro, as primeiras ferrovias são datadas da época de 1883, período no qual o Brasil construiu 5,7 mil quilômetros de ferrovias, tendo atingido a máxima extensão em 1950 com 38,2 mil quilômetros (IBGE, 2009). Atualmente, a malha ferroviária é de quase 30 mil quilômetros (ANTT, 2021a), sendo que se estima que apenas um terço da extensão territorial tenha operação comercial (CNT, 2021b). Mais especificamente ainda, após a década de 1990, com as concessões, o país apresenta um total de 15 concessões segregadas em malhas espalhadas no seu território (ANTT, 2021a).

Quanto ao transporte hidroviário, o país dispõe de uma rede hidroviária envolvendo 41,7 mil quilômetros, sendo que a maior concentração (55,9%) da rede ocorre na Bacia Amazônica (contemplando os rios Amazonas, Madeira, Tapajós, Teles Pires, Guaporé etc.), seguido da Bacia do Paraná com 11,5% (contemplando os rios Tietê e Paraná, dentre outros), Bacia do São Francisco com 10%, Bacia do Nordeste (7,3%), Bacia do Paraguai (6,7%), Bacia do Sudeste (3,3%), Bacia do Leste (2,6%) e Bacia do Uruguai com 2,9% (DEPARTAMENTO NACIONAL DE INFRAESTRUTURA DE TRANSPORTES – DNIT, 2016). Deste total de 41,7 mil quilômetros, estima-se que apenas 22 mil quilômetros são trechos economicamente navegáveis (CNT, 2021b).

Considerando as estatísticas de extensão da rede rodoviária pavimentada e das redes ferroviária e hidroviária, o Brasil apresenta a proporção de 7,11 quilômetro de rodovia pavimentada e 1,39 quilômetro de hidrovia para cada quilômetro de ferrovia (proporção de 7,11:1,39:1,00). Tal oferta de infraestrutura de transporte resulta em uma demanda da infraestrutura de transporte para o transporte de cargas, denominada de matriz de transporte, desequilibrada, com uma concentração maior de rodovias do que ferrovias e hidrovias. Para movimentação de cargas, a matriz de transporte é predominantemente rodoviária (61,1%), com uma participação do transporte ferroviário na ordem de 20,7%, do hidroviário na ordem de 13,6% e os demais (dutoviário e aéreo) somam o restante de 4,6% (CNT, 2021b).

O setor de transportes compete junto com a indústria na posição de maior consumidor de energia, sendo um importante componente na estrutura de demanda energética do país – em 2020, por exemplo, o setor de transportes consumiu 31% da energia final no Brasil, igualando a demanda do segmento da indústria (EPE, 2021a). Mais especificamente ainda, o segmento do transporte rodoviário, que é o mais relevante no consumo de energia do setor, consumiu como

fonte principal de energia o óleo diesel, com mais de 45% de participação em relação ao total de outras fontes de energia de combustível (EPE, 2021a). No caso especificamente do segmento do transporte ferroviário, fica bastante evidente a dependência ainda do óleo diesel na fonte de energia do setor, com 77% de participação, frente à baixa participação da eletricidade, com 14% (EPE, 2021a).

Em uma pesquisa de preferência declarada do embarcador, foi identificado que 38% das empresas embarcadoras terceirizam totalmente as suas operações de transporte e apenas 21% não fazem terceirização, sendo que o restante opera com um nível intermediário de frota própria e terceirizada (EPL, 2016). Nesta temática ainda de terceirização dos serviços de transporte, a preferência é massiva para contratação de transportadoras (77%), com apenas 31% contratando autônomos.

De uma forma geral, a eficiência e a eficácia do transporte rodoviário, em diferentes países, podem ser comprometidas a partir de uma série de fatores, tais como o alto nível de informalidade devido à ineficiência ou mesmo falta de regulação (a informalidade impacta na previsibilidade e confiabilidade dos serviços, segurança e preços), a falta de competência dos prestadores de serviços que afeta o grau de profissionalismo, o desrespeito das obrigações contratuais, os atrasos nas entregas resultando em serviços não confiáveis, a frota obsoleta (caminhões antigos, avariados, sem fiscalização e poluentes) e a fraca representação profissional dos prestadores de serviços, os quais normalmente são pequenos e pulverizados (WORLD BANK & IRU, 2016). Mais especificamente ainda, o sistema de transporte de baixa eficiência gera consequências diversas: preços elevados de fretes, custos elevados para empresas de transporte, baixa segurança nas rodovias, baixa previsibilidade e confiabilidade do transporte, problemas ambientais, dentre outros (WORLD BANK & IRU, 2016).

O sistema de transporte de cargas envolve diversos elementos que se interagem para atender aos objetivos da sociedade: movimentar mercadorias de forma econômica, segura e sustentável. A infraestrutura, a produtividade, os aspectos regulatórios, dentre outros elementos, afetam o sistema de transporte, como um todo. Tais elementos são objetos de discussões nas subseções desta tese, enfatizando a movimentação, especificamente, de grãos e quando necessário apresentando exemplos de outros países.

2.5.1. Aspectos da logística de transporte de grãos

A cadeia de suprimentos do agronegócio, que agrega desde os insumos (fertilizantes), produção agrícola e produtos derivados (alimentos e rações), movimentou mais de um bilhão de toneladas em 2019 de acordo com o Ministério da Agricultura, Pecuária e Abastecimento – MAPA (2020). Há uma crescente pressão para aumentar a produção de alimentos em escala global com uma preocupação sustentável. Para satisfazer essa nova demanda, as organizações de consumidores, grupos de defesa social e ambiental, agroindústrias e legisladores têm incorporado o conceito de responsabilidade social e ambiental nas gestões das suas operações, conforme discutido por Gunasekaran, Irani & Papadopoulos (2013) e Allaoui *et al.* (2018).

Colaboram com essa pressão maior nas gestões das operações do agronegócio, o ambiente regulatório e legal no Brasil, que nas últimas duas décadas tem atuado na criação de leis e regulações para melhorias das condições de trabalho do transportador rodoviário de cargas na economia do país como um todo assim como tem alterado os arranjos contratuais nas relações entre embarcadores (donos de carga), transportadoras e motoristas (ROULET, CAIXETA-FILHO & YOSHIZAKI, 2016).

O aumento da produção e principalmente das exportações – para um país de dimensões continentais e com uma alta dependência de rodovias – pressiona consideravelmente o sistema de transporte. A quantidade de grãos movimentada no sistema ferroviário cresceu 109%, passando de 22,3 milhões de toneladas em 2010 para 46,7 milhões de toneladas, em 2020 (ANTT, 2021a). Especificamente para o transporte hidroviário, o crescimento da quantidade movimentada de grãos no período 2010-2020 foi mais expressivo que os demais indicadores apresentados, 495%, passando de 3,7 milhões de toneladas em 2010 para 22,2 milhões de toneladas para 2020 (ANTAQ, 2021). A Figura 12 apresenta a evolução da produção, exportação, movimentações por ferrovia e hidrovia de grãos (soja e milho) no período 2010-2020, bem como as participações relativas da ferrovia e hidrovia nas exportações e produção. Em termos relativos, a participação da ferrovia no volume exportado de grãos no país se reduziu, passou de 56,0% (2010) para 39,8% (2020); enquanto a participação das hidrovias no volume exportado praticamente duplicou, passando de 9,3% (2010) para 18,9% (2020).

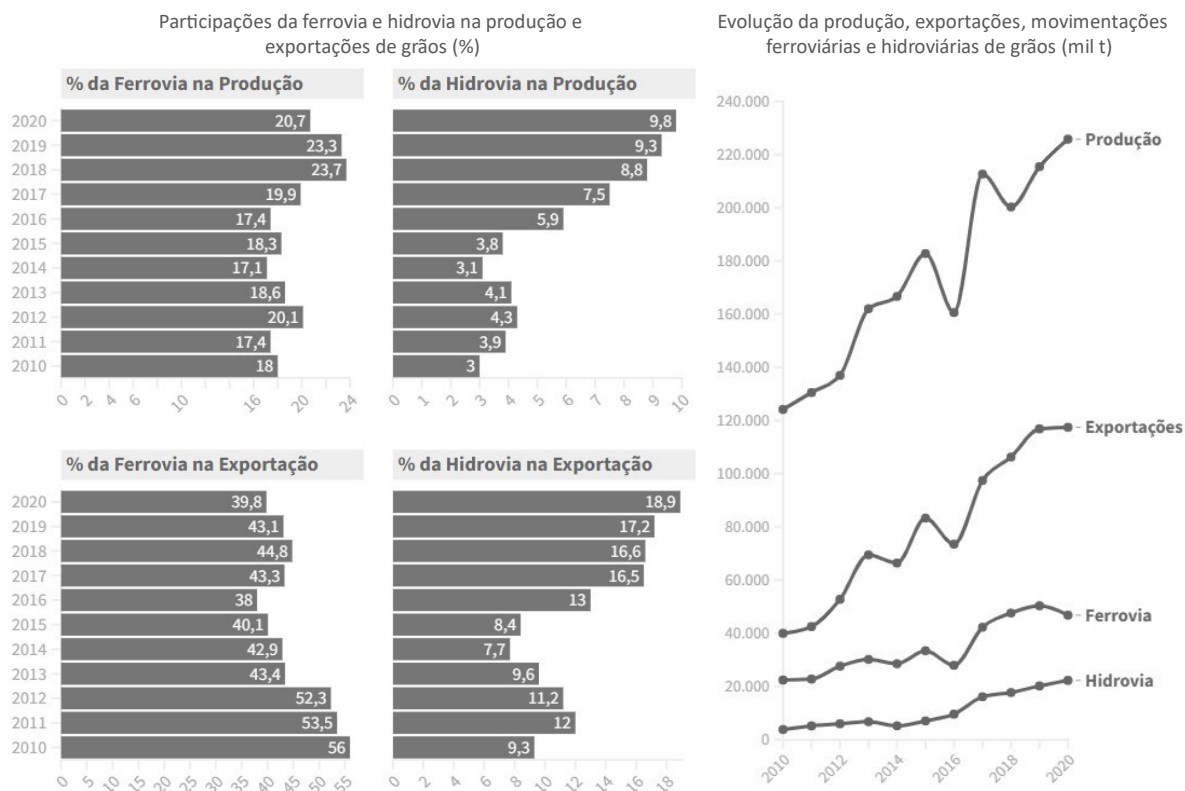


Figura 12 – Evolução da produção, exportação e movimentações de grãos nas ferrovias e hidrovias (2010-2020)

Fonte: elaborado pelo autor a partir de ANTAQ (2021), ANTT (2021a), SECEX (2021) e IBGE (2021b)

Péra, Caixeta-Filho & Salin (2021) destacaram que o maior volume movimentado de grãos nas ferrovias e hidrovias no país ocorre para exportação e ilustram que não houve uma efetiva diversificação da matriz de transporte nos últimos anos considerando a quantidade exportável, de forma que para ocorrer a diversificação dessa matriz de transporte, é preciso que a oferta de infraestrutura cresça de forma superior às exportações. Mais ainda, os autores constataam que a distância média das fazendas até os terminais ferroviários ou hidroviários no Brasil foi da ordem de 700 quilômetros, em decorrência da baixa densidade ferroviária e do número reduzido de terminais multimodais no país. Situação distinta vivenciada nos EUA, por exemplo, onde a matriz de transporte para exportação de soja é predominantemente hidroviária (54%), com uma participação da ferrovia menor do que a do Brasil (30%) e com uma distância média de transporte das fazendas aos terminais (*elevators*) de 150 quilômetros (SALIN, 2021). No Mato Grosso, por exemplo, maior estado produtor de grãos no Brasil, a multimodalidade apresentou uma vantagem econômica de 7% a 12% em relação ao transporte rodoviário, em decorrência da elevada distância entre as fazendas e os terminais (SALIN, 2021).

Em relação às exportações de soja, os maiores portos são os tradicionais: Santos, Paranaguá e Rio Grande (SECEX, 2021). Por outro lado, tem ganhado destaque a região do

Arco-Norte, um complexo de ferrovias, hidrovias e portos da região Norte e parte da região Nordeste. Os portos do Arco-Norte contemplando os portos de São Luís, Belém, Santarém e Manaus. Os destinos para a soja brasileira são diversos, envolvendo dezenas de países, embora com uma concentração muito expressiva para China, sendo que tal país foi o responsável pela importação de mais de 70% da soja em 2020 (SECEX, 2021). A Figura 13 apresenta os fluxos de exportação da soja brasileira desde os estados produtores, passando pelos portos até chegar aos países importadores, em 2020. Destaque deve ser dado para a vocação cativa dos portos em relação às grandes regiões de países importadores. Tradicionalmente, os portos da região Norte do país (tais como Belém, Manaus e Santarém) são cativos para exportação para os países europeus. Os portos do Sudeste, Sul e Nordeste são majoritariamente exportadores para os países asiáticos, principalmente China (SECEX, 2021).

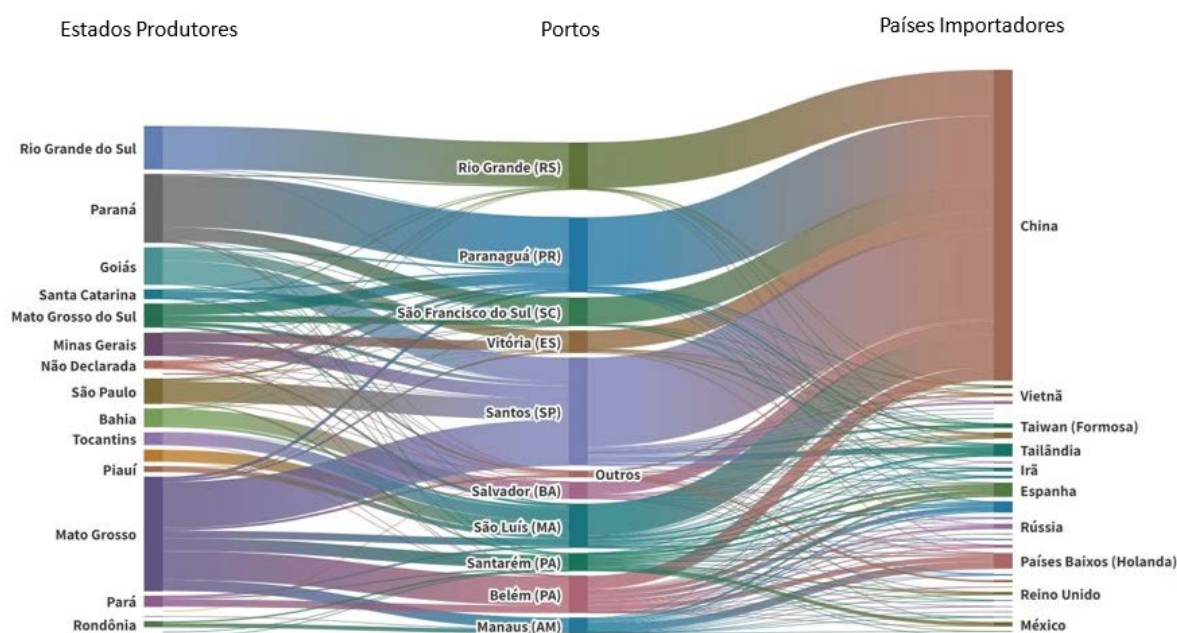


Figura 13 – Fluxos de exportação da soja brasileira (origem-porto-país) em 2020

Fonte: elaborado pelo autor a partir de SECEX (2021)

Em termos de logística marítima, majoritariamente as exportações brasileiras ocorrem por navios do tipo *Panamax* (ANTAQ, 2021). A configuração de profundidade dos canais limita o acesso de navios maiores, tais como *Capesizes*, para movimentação de grãos. Péra *et al.* (2019) destacaram a importância de *Capesizes* para promoção de corredores de menores emissões e menores custos para o abastecimento da China a partir do Centro-Oeste, identificando que a configuração com novos navios permite uma redução de custos de transporte na ordem de 13% e de emissões de GEE na ordem de 30%. Além disso, os autores identificaram que 70 – 80% dos custos logísticos de exportação para China estavam

concentrados no transporte interno no país e o restante no marítimo; por outro lado, quando foi analisada a emissão total de GEE, tal relação se inverte de forma que o transporte marítimo foi responsável por 75% das emissões totais.

Adentrando ao transporte rodoviário de grãos, um fator importante que afeta a competitividade do segmento é o preço de frete rodoviário. A Figura 14 apresenta a série histórica dos preços de fretes rodoviários de granéis sólidos agrícolas no Brasil, valores reais, para o período de janeiro de 1997 a setembro de 2021, bem como as médias móveis de curto prazo (12 meses) e de longo prazo (36 meses), para uma faixa de distância de mil quilômetros (SISTEMA DE INFORMAÇÕES DE FRETES – SIFRECA, 2021). É interessante notar, a partir do preço do frete real, a alta volatilidade do mercado decorrente dos fatores de oferta e demanda; além disso, a média móvel de curto prazo (12 meses) ilustra o comportamento da sazonalidade do frete envolvendo picos em épocas de colheita e vales na entressafra. A média móvel de 36 meses destaca a tendência de longo prazo, que durante o período do final dos anos 90 até 2005 apresentou um crescimento e desde então segue uma trajetória lenta de queda. Em muitos países, é comum o transporte rodoviário operar em um mercado altamente competitivo, em que os preços de fretes convergem para a remuneração do custo econômico de transporte – incluindo o custo do capital (FOWKES, 2015).

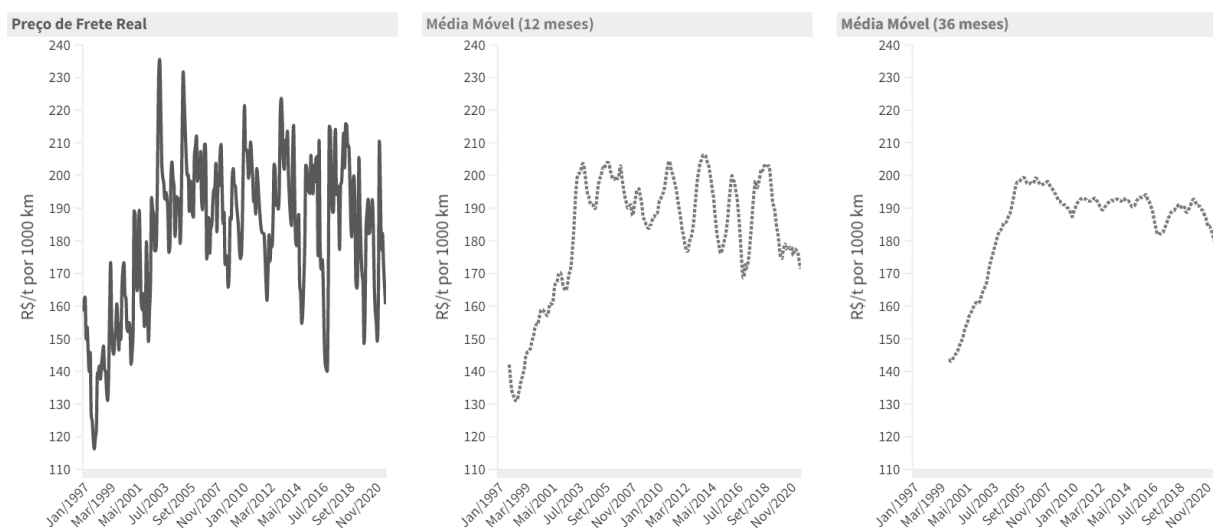


Figura 14 – Preços médios de fretes rodoviários de granéis agrícolas para uma faixa de distância de mil quilômetros

Preços corrigidos pelo Índice Geral de Preços ao Mercado (IGP-M), base de setembro/2021

Fonte: elaborado pelo autor a partir de SIFRECA (2021)

Outro tópico importante na temática da logística de grãos envolve os prestadores de serviço do transporte rodoviário de cargas. De acordo com a ANTT (2021b), o país dispõe de uma frota cadastrada no Registro Nacional do Transporte Rodoviário de Cargas (RNTRC), para

prestação de serviços, de 2,4 milhões de veículos, sendo a moda da distribuição dos veículos a composição de caminhão trator (24,64% dos veículos automotores) com semi-reboque (32,45% dos implementos rodoviários). Em termos de oferta de transportadores, há um total de 1,08 milhão de prestadores de serviços de transportes cadastrados no país, com uma concentração maior de transportadores autônomos de carga (76,21%), seguido de empresas transportadoras de carga (23,74%) e cooperativas de transporte de carga (0,05%); porém, em termos de oferta de veículos por categoria, tal concentração se altera: 61,5% dos veículos estão concentrados em empresas transportadoras de carga, 37,2% com os transportadores autônomos de carga e 1,3% com as cooperativas (ANTT, 2021b). A idade média da frota brasileira é de 14 anos, sendo que as empresas transportadoras de carga possuem uma idade média mais nova, na ordem de 9,96 anos, enquanto os transportadores autônomos de carga possuem uma idade média de 20,71 anos (ANTT, 2021b). De acordo com EPE (2021b), os caminhões de até 3 anos correspondiam a 15% da frota em 2019, os caminhões de 4 – 7 anos correspondiam a 24% da frota, veículos de 8 – 11 anos por 24%, veículos de 12 – 15 anos por 12%, veículos de 16 – 30 anos por 18% e acima de 30 anos por 6%.

Promover políticas de renovação de frota pode trazer uma série de melhorias no sistema de transporte a partir do aumento da eficiência energética e da redução de emissões de poluentes e gases de efeito estufa (GEE), tal como apresentado na subseção anterior. Entretanto, uma via importante para a promoção efetiva da renovação da frota é fomentar uma política de sucateamento de caminhões antigos, que inclusive pode também promover um reequilíbrio de oferta e demanda de fretes no país e para isso é importante criar mecanismos efetivos de retirada de caminhões do sistema, como por exemplo, certificações de sucateamento, coibindo assim a reentrada destes veículos no mercado (EPE, 2021b).

Em relação aos parâmetros de produtividade no transporte rodoviário de cargas, algumas melhorias foram observadas. Por exemplo, a capacidade de carga útil no período de 2003-2020 cresceu 15%, passando de 26 toneladas, em média, para 30 toneladas (EPE, 2021c). Quanto ao rendimento do consumo de combustível (quilômetro por litro), o país observou uma melhora nas diversas categorias de transporte de carga no período de 2000 – 2019, com um incremento anual de 0,6% ao ano (EPE, 2021c).

No setor ferroviário, a produtividade (razão entre quantidade movimentada e trens formados) aumentou 134% no período de 2010-2020, além de ter apresentado uma redução no consumo médio de combustível na movimentação de cargas, passando de 7,1 litros por mil

tonelada-quilômetro para 4,4 litros por mil tonelada-quilômetro no referido período (ANTT, 2021a).

Outro assunto de grande importância na temática da logística é a expressiva participação do custo de combustível na estrutura de custos de transporte rodoviário. Pelo fato de o país apresentar dimensões continentais e uma matriz de transporte desequilibrada para o uso de caminhões, a participação do custo do combustível no custo de transporte é representativa, em decorrência das elevadas distâncias percorridas entre a pulverizada produção e os diversos centros de processamento e portos. Conforme destacado pela EPE (2021c), a eficiência energética do transporte rodoviário pesado de cargas é da ordem de 2,5 quilômetros por litro.

Historicamente, a parcela do custo de combustível e lubrificantes no custo total (total de custos, total de despesas financeiras, arrendamento mercantil, participações acionárias, depreciação, amortização, despesas não operacionais, constituição de provisões e gastos com pessoal) das empresas do transporte rodoviário de cargas, na média, foi acima de 20% e atingiu o ápice em 2017, com algo em torno de 26% (IBGE, 2021a), para o período 2010-2019, conforme apresentado pela Figura 15.

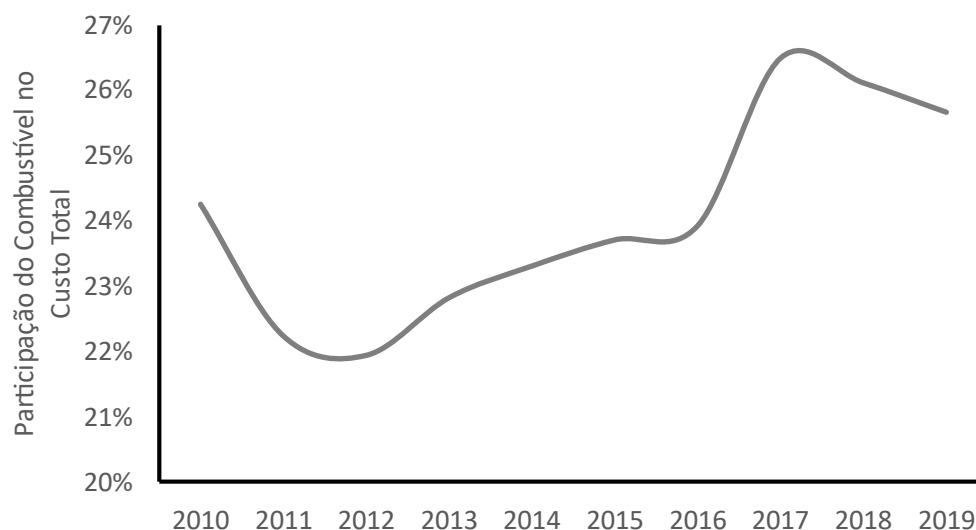


Figura 15 – Participação dos custos de combustível e lubrificantes no custo total das empresas transportadoras

Fonte: elaborado pelo autor a partir de IBGE (2021a)

O aumento de preço de combustível do transporte causa uma série de consequências na cadeia de suprimentos: racionalização do uso do transporte; queda da demanda do transporte menos eficiente energeticamente e consequente aumento na demanda de modos de transporte alternativos mais eficientes; redução na distância da mobilidade ou área de serviço; mudanças nas redes de transporte em termos de roteirização e seleção de corredores; além dos efeitos de

transmissão de preços ao longo da cadeia de suprimentos para os diferentes elos (fornecedores, produtores, distribuidores, atacadistas, varejistas e consumidores) ou mesmo acarretando o redesenho da cadeia (RODRIGUE, 2020).

Em 2016 a Petrobrás alterou a política de precificação do combustível no país de forma a manter uma paridade no mercado internacional, o que trouxe uma maior volatilidade de preços no mercado do óleo diesel e inclusive culminou em outro fato importante, a greve dos motoristas (PÉRA *et al.*, 2018). Em 2018, em função dos sucessivos aumentos do preço do combustível, os motoristas do transporte rodoviário de cargas fizeram uma grande paralisação, resultando na Política Nacional de Pisos Mínimos do Transporte Rodoviário de Cargas, a qual estabelece que os preços de fretes devem respeitar o piso, que é calculado com base no custo operacional do transporte, de forma a assegurar que o transportador consiga transmitir as variações de preços dos seus insumos ao contratante, especialmente os relacionados ao combustível (BRASIL, 2018).

Para efeitos comparativos, alguns países tiveram problemas semelhantes com a volatilidade de preços de combustível no transporte de cargas, como é o caso, por exemplo, dos EUA.

O mercado de transporte de cargas norte-americano no século anterior era altamente regulamentado. Especificamente, na década de 1970, com a crise do petróleo, os preços de combustíveis aumentaram drasticamente e isso prejudicou as transportadoras e motoristas, visto que a tarifa de frete era regulamentada e não conseguia captar as variações do preço do combustível de forma rápida. Após esses eventos, o setor de transporte buscou criar uma sobretaxa específica, denominada *Fuel surcharge*, de forma a captar as variações do combustível e incorporá-las nas tarifas de transporte com a finalidade de transferir riscos dos transportadores para os contratantes, tomando como base um preço médio de combustível, adicionando um prêmio ao frete caso o preço do combustível esteja acima deste patamar e um desconto, caso o preço do combustível esteja abaixo do preço de referência especificado (ROBINSON, 2013; DAT, 2018; UNITED STATES ENERGY INFORMATION ADMINISTRATION - EIA; 2020).

Basicamente, a sobretaxa de combustível (FS), em dólares por milha, é calculada como a razão da diferença dos preços de combustível vigente (P_c) e base (P_b), ambos em dólar por galão, sendo o rendimento do consumo de combustível (E) dado em milhas por galão. Inclusive, tal prática de sobretaxa pressiona discussões entre os agentes da cadeia sobre a eficiência do

transporte, em decorrência do parâmetro de eficiência (DAT, 2018). A expressão (2.4) apresenta o conceito do *fuel surcharge*.

$$FS = \frac{P_c - P_b}{E} \begin{cases} P_c > P_b, & \text{incide um prêmio na tarifa de frete} \\ P_c < P_b, & \text{incide um desconto na tarifa de frete} \end{cases} \quad (2.4)$$

Importante destacar que os agentes econômicos são livres para negociar o método e os parâmetros utilizados do *Fuel surcharge*, embora os indicadores de preços médios de combustível adotados como referências sejam da agência norte-americana de energia (EIA, 2020).

No caso brasileiro, a referida política de piso de frete consegue transmitir as oscilações do preço do combustível somente quando ocorrer variações acumuladas acima de 10% em relação à última atualização ou ajustes a cada seis meses, de forma a captar a atualização de efeitos relacionados aos outros insumos de transporte (BRASIL, 2018).

2.6. Considerações finais

Esta seção apresentou a evolução das preocupações da logística e suas novas abordagens, incluindo a preocupação ambiental, de forma que a denominada *green logistics* (logística verde) estude mecanismos para mitigar os efeitos da logística no meio ambiente e suas externalidades.

Também ficou evidente que ao incorporar novas abordagens para a logística, há situações que geram soluções do tipo *trade-offs* e outras soluções *win-win* e que em alguns casos não se deve esperar uma melhora no resultado financeiro ao incorporar melhores práticas ambientais. Foram identificadas na literatura diversas estratégias voltadas para reduzir a pressão ambiental envolvendo atividades do transporte, tais como melhoria no rendimento do consumo de combustível, práticas de *eco-driving* no transporte rodoviário, uso de combustíveis alternativos, mudanças do modo de transporte, mudanças nos padrões de produtividade operacional do transporte (capacidade de carga, tamanho da frota e frete de retorno), discussões sobre a renovação da frota de caminhões e substituição de navios, dentre outras.

Adicionalmente, foi desenvolvido um retrato do setor do transporte de cargas do país, com ênfase no transporte de grãos, identificando a alta dependência para com as rodovias, baixa diversificação da matriz de transporte ao longo do tempo, uma heterogeneidade de infraestrutura de transporte e idade avançada de caminhões, além da predominância do uso de

navios *Panamax* para atendimento da demanda internacional, a qual tem grande participação do mercado asiático, principalmente China.

3. MATERIAL E MÉTODOS

3.1. Referencial teórico do problema de otimização multiobjetivo

A otimização mono-objetivo, em um ambiente complexo e mais próximo da realidade, torna-se demasiadamente restritiva, demandando novas abordagens que contemplem os múltiplos objetivos do sistema de tomada de decisões – muitas vezes conflitantes – de forma a incorporar uma quantidade maior de informações (CARAMIA & DELL’OLMO, 2020). Neste contexto, o problema de otimização multiobjetivo (do inglês, *Multiobjective Optimization Problem* - MOP) surge para encontrar soluções ótimas para diferentes funções objetivo simultâneas. É interessante destacar que para problemas de quatro ou mais funções objetivo, a nomenclatura utilizada é de *Many-Objective Optimization Problem* – MaOP (QI *et al.*, 2017).

O problema de otimização multiobjetivo pode ser formulado, com n objetivos, para $n > 1$, conforme a expressão (3.1a e b) (DU & SWAMY, 2016; QI *et al.*, 2017; AMINE, 2019; CARAMIA & DELL’OLMO, 2020).

$$\min_x F(x) = \{f_1(x), f_2(x), \dots, f_n(x)\} \quad (3.1a)$$

$$s. a: x \in S$$

$$S = \{x \in \mathbb{R}^m: h(x) = 0, g(x) \geq 0\}, S \subset \mathbb{R}^m \quad (3.1b)$$

Onde $F(x)$ é o vetor das n funções objetivo do problema de otimização, S é o espaço m -dimensional da região viável de decisão, o qual contempla as restrições do modelo do tipo igualdade e desigualdade, definidas por $h(x)$ e $g(x)$, respectivamente. Além disso, $x = (x_1, x_2, \dots, x_m) \in S$ é chamado de variável de decisão do modelo. O espaço que agrega o vetor das funções objetivo é denominado de espaço objetivo, de forma que $F(x): S \rightarrow \mathbb{R}^n$. O conjunto (C) é definido de espaço objetivo factível, envolvendo a imagem formada em $F(x)$ decorrente da região viável de decisão, conforme apresentado pela relação da equação (3.2).

$$C = \{y \in \mathbb{R}^n: y = f(x), x \in \mathbb{R}^m\} \quad (3.2)$$

Na abordagem de otimização multiobjetivo, raramente existe apenas uma única solução ótima para todas as funções objetivo, gerando um conjunto conflitante (*trade-offs*) de soluções. Nesse contexto, para a escolha das melhores soluções, utiliza-se o método de Pareto, que se baseia no princípio de não-dominância das soluções, de forma a comparar os vetores das funções objetivo no espaço objetivo e ranqueá-los (DU & SWAMY, 2016). O ótimo de Pareto fornece um conjunto de soluções de forma que não seja possível melhorar uma função objetivo

sem deteriorar o resultado de pelo menos uma outra função objetivo. Algumas definições importantes são apresentadas a seguir (DU & SWAMY, 2016; QI *et al.*, 2017; AMINE, 2019; CARAMIA & DELL'OLMO, 2020).

Definição 3.1 (Dominância de Pareto): A solução $x_A \in S$ domina a solução $x_B \in S$, denotada de $x_A < x_B$, se e somente se, as duas condições forem satisfeitas: (i) $\forall i \in \{1, \dots, n\}, f_i(x_A) \leq f_i(x_B)$; e, (ii) $\exists j \in \{1, \dots, n\}: f_j(x_A) < f_j(x_B)$.

Definição 3.2 (Não-dominância): Uma solução $x_A \in S$ é dita como não-dominada se não existir outra solução $x_B \in S$ de tal modo que $x_B < x_A$ (o símbolo $<$ designa uma relação de dominância de uma variável sobre outra).

Definição 3.3 (Ótimo de Pareto, Pareto-Ótimo ou Solução Eficiente): O ponto $x^* \in S$ é um ótimo de Pareto, se e somente se, $\nexists x \in S, x < x^*$.

O conjunto de todas as soluções de Pareto-Ótimo (PS) ou conjunto eficiente pode ser definido formalmente pela expressão (3.3). A Fronteira de Pareto (FP) representa a correspondência dos pontos do conjunto de Pareto-Ótimo no espaço objetivo, conforme apresentado pela expressão (3.4).

$$PS = \{x^* | \nexists x \in S, x < x^*\} \quad (3.3)$$

$$FP = \{F(x) | x \in PS\}. \quad (3.4)$$

A Figura 16 apresenta um exemplo hipotético da relação entre o espaço de decisão e o espaço objetivo para um modelo biobjetivo de minimização, de forma que o gráfico da esquerda apresenta o espaço viável das variáveis de decisão envolvendo as restrições, enquanto que o gráfico da direita apresenta o espaço objetivo das duas funções objetivos (f_1 e f_2), que é conjunto imagem do espaço de decisão. Os pontos ótimos obtidos no espaço de decisão (valores de x_1 e x_2), envolvendo especificamente a região viável, são mapeados no espaço objetivo. A geometria da Fronteira de Pareto varia conforme o comportamento da otimização: min-min, max-max, min-max e max-min. A Fronteira de Pareto é formado pela interpolação das soluções de f_1 e f_2 que dominam as demais soluções. No exemplo, os pontos a , b e c são os pontos ótimos que projetam as soluções eficientes para compor a Fronteira de Pareto, envolvendo f_a , f_b e f_c .

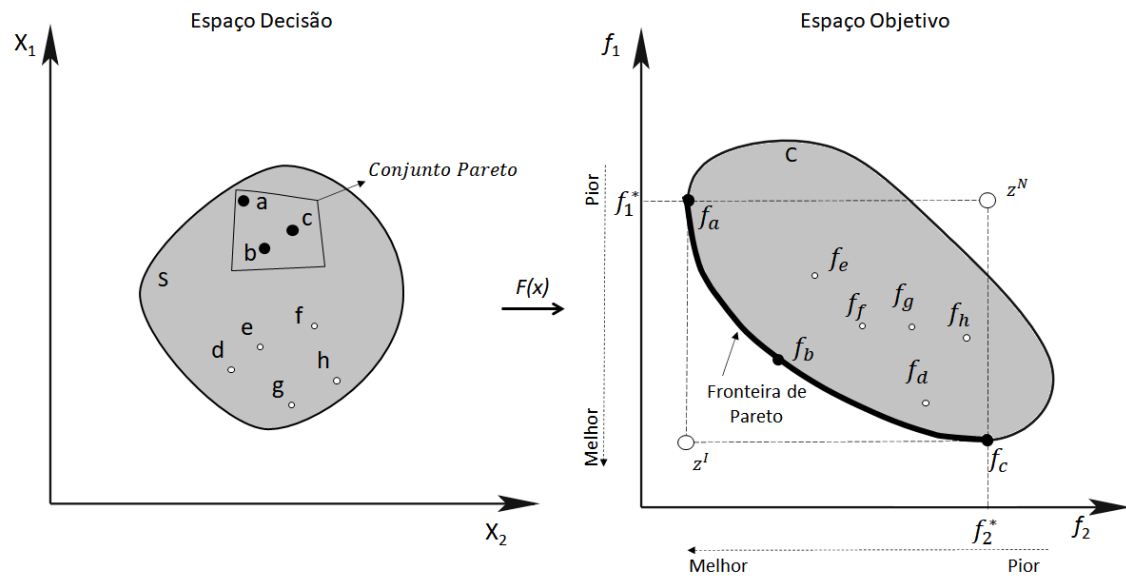


Figura 16 – Correspondência hipotética entre o espaço das variáveis e dos objetivos para um modelo biobjetivo de minimização (min-min)

Fonte: elaborado pelo autor

Especificamente ainda, há dois pontos no espaço objetivo importantes, envolvendo o ponto utopia (Z^I) e o ponto nadir (Z^N). O ponto utopia, também chamado de ponto ideal (Z^I), envolve a solução que minimiza todas as funções objetivo, porém é uma solução inviável. O ponto nadir é o que gera a pior solução multiobjetivo possível do conjunto ótimo de Pareto, conforme apresentado pela Figura 16. As equações (3.5) e (3.6) apresentam as definições dos pontos utopia e nadir (LU, ANDERSON-COOK & ROBINSON, 2011; QI *et al.*, 2017).

$$Z^I = \min_x \{f_i(x) \mid x \in S\}, \forall i \in \{1, \dots, n\} \quad (3.5)$$

$$Z^N = \max_x \{f_i(x) \mid x \in PS\}, \forall i \in \{1, \dots, n\} \quad (3.6)$$

O tomador de decisão poderá escolher, por algum critério, o ponto a ser almejado dentro do conjunto de imagens do vetor de decisão de Ótimo de Pareto (PS) no espaço objetivo. Tal método de escolha poderá ser baseado nas preferências do tomador de decisão ou algum tipo de critério. Um dos critérios de escolha envolve selecionar o ponto ótimo do conjunto de soluções que possui a menor distância, no espaço de objetivos, em relação ao ponto utopia (LU, ANDERSON-COOK & ROBINSON, 2011; CARAMIA & DELL'OLMO, 2020), conforme a expressão (3.7a), tendo como referência a distância euclidiana normalizada. A função objetivo normalizada ($\bar{f}_i(x)$) é calculada a partir dos pontos nadir e utopia, conforme expresso pela equação (3.7b).

$$\operatorname{argmin}_{x \in PS} \|z_i^l - \bar{f}_i(x)\| \quad (3.7a)$$

$$\bar{f}_i(x) = \frac{f_i(x) - Z_i^l}{Z_i^N - Z_i^l} \quad (3.7b)$$

No problema de otimização multiobjetivo, outro aspecto importante, é a definição de um método para estimar soluções do modelo para gerar a Fronteira de Pareto, compondo uma amostragem representativa de pontos (soluções) a serem comparadas. Normalmente, faz-se o uso de algum tipo de algoritmo. Os métodos podem ser classificados como *a priori* (o tomador de decisão define as suas preferências antes do processo da otimização; exemplo de métodos: programação por metas, lexicográfico etc.), *a posteriori* (o tomador de decisão escolhe a solução desejada após a otimização; exemplos de métodos: ε -restrito, pesos etc.), iterativos (o tomador de decisão ajusta os parâmetros de interesse de forma iterativa conforme suas preferências no processo de otimização; exemplos de métodos: Tchebycheff, *Light Beam Search* etc.) (MIETTINEN, 1999; DU & SWAMY, 2016; CARAMIA & DELL'OLMO, 2020).

Uma das ferramentas para gerar soluções em um problema de otimização multiobjetivo, utilizando a abordagem *a posteriori*, envolve o método de ε -restrito (conhecido também como *épsilon* restrito ou *ε -constrained*), proposto inicialmente por Chankong & Haimes (1983). A lógica consiste em transformar um problema multiobjetivo de otimização para um problema mono-objetivo, de forma que o tomador de decisão define uma função objetivo, dentre as n disponíveis. Normalmente, opta-se por escolher a função objetivo a ser otimizada como aquela de maior grau de importância definida pelo tomador de decisão. As demais funções objetivo são incorporadas na formulação como restrições do problema com condições do tipo menor ou igual aos valores-alvo – inclusive, tal método é capaz de gerar pontos eficientes em uma Fronteira de Pareto não convexa - vide formulação (3.8) (MIETTINEN, 1999; CARAMIA & DELL'OLMO, 2020).

$$\min f_j(x) \quad (3.8a)$$

$$s. a: f_i(x) \leq \varepsilon_i, \forall i \in \{1, \dots, n\} \setminus \{j\} \quad (3.8b)$$

$$x \in S \quad (3.8c)$$

Teorema 1: $x^* \in S$ é um ótimo de Pareto, se e somente se, x^* é a única solução do problema de ε -restrito para todo $j \in \{1, \dots, n\}$ de modo que $\varepsilon_i = f_i(x^*)$, $\forall i \in \{1, \dots, n\} \setminus \{j\}$.

Teorema 2: $x^* \in S$ é um ótimo de Pareto se x^* é a única solução do problema de ε -restrito para algum j de modo que $\varepsilon_i = f_i(x^*)$, $\forall i \in \{1, \dots, n\} \setminus \{j\}$.

Teorema 3: A única solução do problema de ε -restrito é um ótimo de Pareto para qualquer limite superior do vetor $\varepsilon = (\varepsilon_1, \dots, \varepsilon_{j-1}, \varepsilon_{j+1}, \dots, \varepsilon_n)^T \in \mathbb{R}^{n-1}$.

O detalhamento das demonstrações pode ser consultada em Miettinen (1999). Associa-se tal método a algum tipo de algoritmo para fazer a varredura em um intervalo de variações de ε_i , em sucessivas otimizações, para gerar uma amostra que seja suficiente para gerar um conjunto de Pareto-Ótimo e a respectiva Fronteira. O método apresenta um custo computacional elevado dependendo da complexidade do modelo de otimização e a sua eficiência se reduz conforme aumenta a quantidade de funções objetivo (CARAMIA & DELL'OLMO, 2020). Além disso, há outros métodos de geração de soluções multiobjetivos envolvendo escalonamento, programação por metas, métodos heurísticos, híbridos etc.

Nas próximas subseções será apresentado o algoritmo utilizado para geração de soluções utilizando o método de ε -restrito, a ser adotado nesta pesquisa.

3.2. Proposta do modelo de *green logistics* da soja no Brasil

Tem ganhado destaque a incorporação, de forma explícita, nos modelos matemáticos de planejamento de transporte, dos níveis de emissões de gases de efeito estufa e outras externalidade do transporte (DUKKANCI, BEKTRAS & KARA, 2019). Há uma série de técnicas para se propor uma logística verde, envolvendo, principalmente técnicas de programação matemática, incorporando múltiplos objetivos, de forma a minimizar os custos logísticos da rede de transporte avaliada, bem como, minimizar os impactos ambientais, mensurados pela emissão de gases de efeito estufa, poluição sonora, consumo de combustível, dentre outros. Os modelos multiobjetivos de programação matemática são ferramentas interessantes para avaliar os *trade-offs* das decisões na *green logistics* (DUKKANCI, BEKTRAS & KARA, 2019).

A abordagem de proposição de uma *green logistics* para a soja brasileira é de avaliar os efeitos das mudanças tecnológicas e de infraestrutura de transporte envolvendo diferentes métricas de sustentabilidade: custos de transporte, emissões de CO₂, perdas nas atividades logísticas, demanda de combustível, intensidade de transporte (demanda) dos diferentes modos e demanda de caminhões, de forma a se avaliar as soluções do tipo *trade-offs* ou soluções *win-win* com as mudanças tecnológicas e infraestruturais. Para isto, é formulado um modelo

matemático de *green logistics*, envolvendo uma abordagem de otimização, especificamente, utilizando o modelo de equilíbrio de rede de transporte.

Tal modelo agrega as principais atividades logísticas relacionadas ao transporte para abastecimento da soja tanto do mercado doméstico quanto do mercado internacional a partir das regiões de produção, utilizando os diferentes modos de transporte. As principais variáveis do modelo dizem respeito aos fluxos do transporte rodoviário, ferroviário, hidroviário e marítimo.

Além disso, serão avaliadas diferentes funções objetivo do modelo, direcionadas para a minimização de custos totais de transporte do sistema, de emissões totais de CO₂ decorrentes das atividades de transporte, das perdas existentes nas atividades logísticas e do custo logístico total, esta última internalizando o custo externo das perdas junto ao custo total de transporte do sistema. No planejamento de transporte, as perdas e avarias são entendidas como um custo relacionado ao risco da operação e deve ser quantificado no custo logístico total (FRIEDRICH, TAVASSZY e DAVYDENKO, 2014). A Figura 17 apresenta a rede multimodal estruturada.

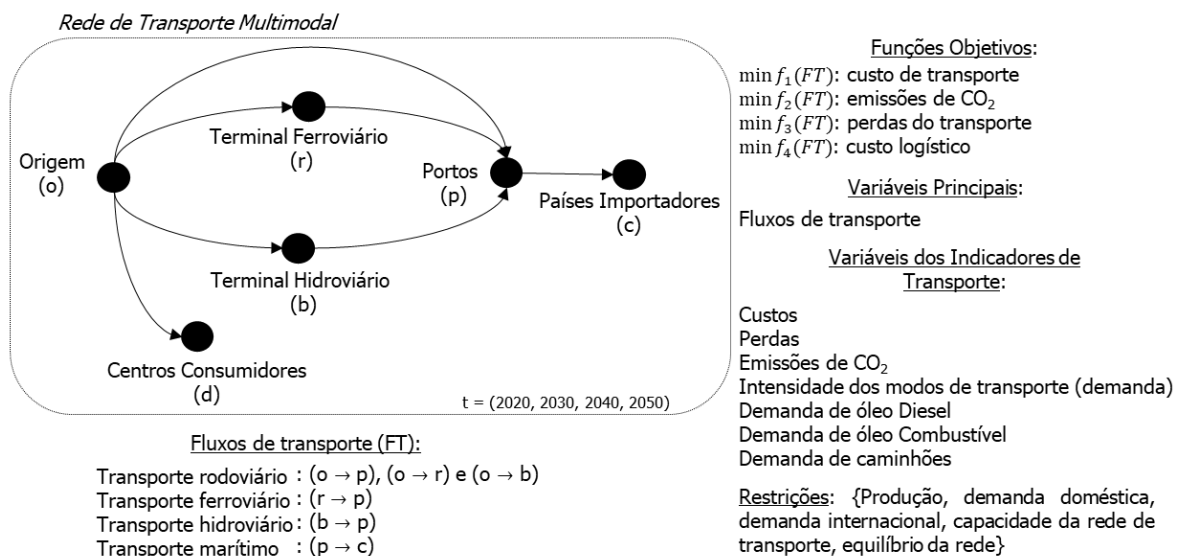


Figura 17 – Estrutura da rede (grafo) de transporte multimodal utilizado no modelo de *green logistics*

Fonte: elaborado pelo autor

As variáveis que compõem os indicadores de transporte para serem avaliados em uma abordagem de *green logistics* de forma a avaliar as suas variações a partir dos choques tecnológicos são: custos de transporte, perdas nas atividades de transporte, as emissões de CO₂, intensidade dos diferentes modos de transporte, demanda de óleo diesel (utilizado nos transportes rodoviário, ferroviário e hidroviário), demanda de óleo combustível (utilizado no transporte marítimo) e a demanda de caminhões no sistema. Além disso, o modelo é

multitemporal, envolvendo um horizonte de análise de 2020, 2030, 2040 e 2050, de forma que se possa analisar os impactos de mudanças tecnológicas temporalmente. O modelo é solucionado a partir do método de programação linear.

As premissas (condições de contorno) do modelo de *green logistics* são: (i) a estrutura formulada quantifica as variáveis de interesse somente para as atividades do transporte dos equipamentos carregados para a movimentação da soja e não contabiliza o retorno dos veículos de transporte (caminhão, trem, barcaça e navio) – tal premissa se fez necessária pelo aumento da complexidade gerada com a inclusão do retorno e da quantidade de novas premissas para a modelagem; (ii) assume-se que o mercado de transporte atua em um ambiente competitivo de longo prazo, de forma que os preços dos serviços de transporte (fretes) sejam iguais ao custos econômicos do transporte e que os choques tecnológicos de mudanças de produtividade sejam repassadas para os consumidores da logística (embarcadores).

Tal modelo será utilizado para a avaliação dos diferentes resultados desta pesquisa, especificamente:

- (1) na estimativa das elasticidades cruzadas de uma série de parâmetros do modelo (produtividade do transporte, disponibilidade de infraestrutura, custos etc.) nas variáveis de interesse do modelo, para compreensão de quais os parâmetros são mais importantes para promover uma logística verde;
- (2) na avaliação de cenários de mudanças tecnológicas no setor de transporte em diferentes cortes temporais (2030, 2040 e 2050) e seus efeitos sobre as variáveis de interesse; e,
- (3) na estimativa de soluções eficientes e da Fronteira de Pareto das diferentes mudanças tecnológicas e *infraestruturais* do transporte, sob uma abordagem de otimização multiobjetivo do modelo (minimização de custos logísticos e emissões CO₂; e, minimização de custos logísticos e perdas), de modo a avaliar os efeitos dos choques tecnológicos e recomendar estratégias e políticas que fomentem o desenvolvimento da *green logistics* da soja brasileira até 2050.

A próxima subseção apresenta a formulação matemática da estrutura do modelo de *green logistics*.

3.2.1. Formulação matemática do modelo de *green logistics* para soja

As variáveis de fluxo de transporte do modelo (FT), em toneladas:

$truckdomestic_{odt}$: fluxo de transporte por caminhão entre origem o e destino d no período t ;

$truckrail_{ort}$: fluxo de transporte por caminhão entre origem o e terminal r no período t ;
$truckbarge_{obt}$: fluxo de transporte por caminhão entre origem o e terminal b no período t ;
$truckexp_{opt}$: fluxo de transporte por caminhão entre origem o e porto p no período t ;
$barge_{bpt}$: fluxo de transporte por barcaça do terminal b para o porto p no período t ;
$rail_{rpt}$: fluxo de transporte por trem do terminal r para o porto p no período t ;
$maritime_{pct}$: fluxo de transporte marítimo do porto p para o país c no período t .

As variáveis de quantificação das perdas na rede de transporte, em toneladas:

$losstruckdomestic_{odt}$: perda no transporte por caminhão entre origem o e destino d no período t ;
$losstruckrail_{ort}$: perda no transporte por caminhão entre origem o e terminal r no período t ;
$losstruckbarge_{obt}$: perda no transporte por caminhão entre origem o e terminal b no período t ;
$losstruckexp_{opt}$: perda no transporte por caminhão entre origem o e porto p no período t ;
$lossbarge_{bpt}$: perda no transporte por barcaça do terminal b para o porto p no período t ;
$lossrail_{rpt}$: perda no transporte por trem do terminal r para o porto p no período t ;
$lossbargeterminal_{bt}$: perda no terminal hidroviário b no período t ;
$lossrailterminal_{rt}$: perda no terminal ferroviário r no período t ;
$lossportterminal_{pt}$: perda no terminal portuário p no período t .

As variáveis dos indicadores de interesse do modelo de *green logistics* para avaliação dos choques tecnológicos nos cenários:

$costperperiod_t$: custo de transporte no período t , em R\$;
$lossesperiod_t$: perda no período t , em toneladas;
$tkutruck_t$: intensidade de transporte (demanda) rodoviário no período t , em t.km;
$tkurail_t$: intensidade de transporte (demanda) ferroviário no período t , em t.km;
$tkubarge_t$: intensidade de transporte (demanda) hidroviário no período t , em t.km;
$tkumaritime_t$: intensidade de transporte (demanda) marítimo no período t , em t.km;
$emissionsperiod_t$: emissões de CO ₂ totais no período t , em kg;
$qdiesel_t$: demanda de óleo diesel no sistema, em litros;
$qcomboil_t$: demanda de óleo combustível no sistema, em litros;
$qtruck_t$: demanda de caminhões no transporte, em unidades.

As funções objetivo do modelo de *green logistics*:

$f_1(FT) = transportationcost$: custo total de transporte, em R\$;
$f_2(FT) = emissions$: emissões totais de CO ₂ , em toneladas;
$f_3(FT) = losses$: perdas totais de soja no sistema, em toneladas;
$f_4(FT) = logcost$: custo logístico, em R\$.

A função objetivo relacionada ao custo total de transporte, $f_1(FT)$, é definida pela equação (3.9), envolvendo o somatório de todos os custos de transporte desde as regiões de produção de soja, passando pelos terminais multimodais, portos até os diferentes mercados internacionais, além da distribuição para o mercado doméstico.

$$\begin{aligned}
\text{transportationcost} = & \sum_o \sum_d \sum_t \text{CTRD}_{od} \text{truckdomestic}_{odt} + \\
& \sum_o \sum_r \sum_t \text{CTRF}_{or} \text{truckrail}_{ort} + \sum_o \sum_b \sum_t \text{CTRB}_{ob} \text{truckbarge}_{obt} + \\
& \sum_o \sum_p \sum_t \text{CTRE}_{op} \text{truckexp}_{opt} + \sum_b \sum_p \sum_t \text{CB}_{bp} \text{barge}_{bpt} + \sum_r \sum_p \sum_t \text{CF}_{rp} \text{rail}_{rpt} + \\
& \sum_p \sum_c \sum_t \text{CMAR}_{pc} \text{maritime}_{pct}
\end{aligned} \quad (3.9)$$

Onde:

CTRD_{od} : custo de transporte rodoviário entre a origem o e destino d doméstico, R\$/t;
 CTRE_{op} : custo de transporte rodoviário entre origem o e porto p , para exportação, R\$/t;
 CTRF_{or} : custo de transporte rodoviário entre origem o e terminal ferroviário r , R\$/t;
 CTRB_{ob} : custo de transporte rodoviário entre origem o e terminal hidroviário b , R\$/t;
 CF_{rp} : custo de transporte ferroviário entre terminal ferroviário r e porto p , R\$/t;
 CB_{bp} : custo de transporte hidroviário entre terminal hidroviário b e o porto p , R\$/t;
 CMAR_{pc} : custo de transporte marítimo entre o porto p e o país consumidor c , R\$/t.

A função objetivo das emissões de CO₂ no sistema de transporte ($f_2(FT)$) é definida pela equação (3.10), agregando todas as emissões nas atividades logísticas relacionadas ao transporte no modelo de *green logistics*. A quantificação ocorre a partir da ponderação entre os fatores de emissões e a razão da demanda de transporte (t.km) pela eficiência energética. A demanda de transporte ou intensidade de transporte será definida nas próximas equações.

$$\begin{aligned}
\text{emissions} = & \text{truckemissionsfact} \left(\sum_t \frac{\text{tktruck}_t}{\text{truckeff} \cdot \text{truckcapacity}} \right) + \\
& \text{railemissionsfact} \left(\sum_t \frac{\text{tkurail}_t}{\text{raileff}} \right) + \text{bargeemissionsfact} \left(\sum_t \frac{\text{tkubarget}_t}{\text{bargeeff}} \right) + \\
& \text{maritimeemissionsfact} \left(\sum_t \frac{\text{tkumaritime}_t}{\text{maritimeeff}} \right)
\end{aligned} \quad (3.10)$$

Onde:

raileff : eficiência do transporte de trem, em t.km por litro;
 bargeeff : eficiência do transporte de barça, em t.km por litro;
 maritimeeff : eficiência do transporte de navio, em t.km por litro;
 truckeff : eficiência do transporte de caminhão, em km por litro;
 truckcapacity : capacidade do transporte por caminhão, em t;
 $\text{truckemissionsfact}$: fator de emissão do transp. rodoviário de CO₂, kg por litro de combustível;
 railemissionsfact : fator de emissão do transp. ferroviário de CO₂, kg por litro de combustível;
 $\text{bargeemissionsfact}$: fator de emissão do transp. hidroviário de CO₂, kg por litro de combustível;
 $\text{Maritimemissionsfact}$: fator de emissão do transp. marítimo de CO₂, kg por litro de combustível.

A equação (3.11) define a função objetivo das perdas nas atividades logísticas, $f_3(FT)$, que envolve a soma de todas as variáveis de perdas ocorridas nas atividades de transporte e nos terminais ferroviários, hidroviários e portuários.

$$\begin{aligned}
\text{losses} = & \sum_o \sum_d \sum_t \text{lostruckdomestic}_{odt} + \sum_o \sum_r \sum_t \text{lostruckrail}_{ort} + \\
& \sum_o \sum_b \sum_t \text{lostruckbarge}_{obt} + \sum_o \sum_p \sum_t \text{lostruckexp}_{opt} + \sum_b \sum_p \sum_t \text{lossbarge}_{bpt} + \\
& \sum_r \sum_p \sum_t \text{lossrail}_{rpt} + \sum_b \sum_t \text{lossbargeterminal}_{bt} + \sum_r \sum_t \text{lossrailterminal}_{rt} + \\
& \sum_p \sum_t \text{lossportterminal}_{pt}
\end{aligned} \quad (3.11)$$

A quarta função objetivo do modelo, $f_4(FT)$, denominada de custo logístico, internaliza o custo econômico das perdas na função objetivo de custos totais de transporte ($f_1(FT)$), a partir da valoração da perda ocorrida no sistema de transporte, tendo como referência o preço do produto ($P_{soybean}$). A expressão (3.12) apresenta a formulação.

$$\text{logcost} = \text{transportationcost} + P_{soybean} \cdot \text{losses} \quad (3.12)$$

As equações de quantificação das perdas nos arcos de transporte (fluxos) são apresentadas nas equações (3.13) a (3.18). A perda no transporte é quantificada como o produto entre o coeficiente de perda e a variável de fluxo de transporte.

$$\text{lossdomestic}_{odt} = \text{roadlosses} \cdot \text{truckdomestic}_{odt} \quad , \quad \forall o, d, t \quad (3.13)$$

$$\text{losstruckrail}_{ort} = \text{roadlosses} \cdot \text{truckrail}_{ort} \quad , \quad \forall o, r, t \quad (3.14)$$

$$\text{losstruckbarge}_{obt} = \text{roadlosses} \cdot \text{truckbarge}_{obt} \quad , \quad \forall o, b, t \quad (3.15)$$

$$\text{losstruckexp}_{opt} = \text{roadlosses} \cdot \text{truckexp}_{opt} \quad , \quad \forall o, p, t \quad (3.16)$$

$$\text{lossbarge}_{bpt} = \text{bargeloss} \cdot \text{barge}_{bpt} \quad , \quad \forall b, p, t \quad (3.17)$$

$$\text{lossrail}_{rpt} = \text{railloss} \cdot \text{rail}_{rpt} \quad , \quad \forall r, p, t \quad (3.18)$$

Onde:

roadlosses: perdas no transporte rodoviário (%);

raillosses: perdas no transporte ferroviário (%);

bargelosses: perdas no transporte hidroviário (%);

railterminallosses: perdas no terminal ferroviário (%);

bargeterminallosses: perdas no terminal hidroviário (%).

Especificamente, as quantificações das perdas que ocorrem nos terminais hidroviários, ferroviários e portuários são apresentadas nas expressões (3.19) a (3.21). O modelo adotado incorpora as perdas em todo o sistema de transporte. A lógica de quantificação das perdas dos terminais envolve a ponderação entre o coeficiente de perda do terminal pela quantidade líquida de soja que chega ao terminal, ou seja, o fluxo de transporte descontado da perda ocorrida no transporte até o terminal.

$$\text{lossbargeterminal}_{bt} = \text{bargeterminallosses} \cdot (\sum_o \text{truckbarge}_{obt} - \sum_o \text{losstruckbarge}_{obt}) \quad , \quad \forall b, t \quad (3.19)$$

$$\text{lossrailterminal}_{rt} = \text{railterminallosses} \cdot (\sum_o \text{truckrail}_{ort} - \sum_o \text{losstruckrail}_{ort}) \quad , \quad \forall r, t \quad (3.20)$$

$$\text{lossportterminal}_{pt} = \text{portterminallosses} \cdot [(\sum_o \text{truckexp}_{opt} - \sum_o \text{losstruckexp}_{opt}) + (\sum_r \text{rail}_{rpt} - \sum_r \text{lossrail}_{rpt}) + (\sum_b \text{barge}_{bpt} - \sum_b \text{lossbarge}_{bpt})] \quad , \quad \forall p, t \quad (3.21)$$

Onde:

railterminallosses: perdas no terminal ferroviário (%);

bargeterminallosses: perdas no terminal hidroviário (%);

portterminallosses: perdas no terminal portuário (%).

A equação (3.22) apresenta a restrição de oferta do modelo, envolvendo a movimentação de soja de todas as regiões de produção o para cada período t .

$$\sum_d \text{truckdomestic}_{odt} + \sum_r \text{truckrail}_{ort} + \sum_b \text{truckbarge}_{obt} + \sum_p \text{truckexp}_{opt} = \text{SUPPLY}_{ot}, \quad \forall o, t \quad (3.22)$$

Onde:

SUPPLY_{ot} : oferta do na região o para o período t , em toneladas.

A restrição de demanda doméstica é apresentada pela equação (3.23), envolvendo o somatório de fluxos da região de produção o para os centros consumidores domésticos d para o período t .

$$\sum_o \text{truckdomestic}_{odt} \geq \text{DEMAND}_{dt}, \quad \forall d, t \quad (3.23)$$

Onde:

DEMAND_{dt} : demanda do na região d para o período t , em toneladas.

A expressão (3.24) apresenta a restrição de demanda internacional dos países consumidores c , para cada período t .

$$\sum_p \text{maritime}_{pct} \geq \text{INTDEMAND}_{ct}, \quad \forall c, t \quad (3.24)$$

Onde:

INTDEMAND_{ct} : demanda internacional do país c do produto p no período t , em t.

As expressões (3.25), (3.26) e (3.27) apresentam as restrições de capacidade dos terminais ferroviários, hidroviários e portuários. Tais restrições de capacidade consideram a quantidade líquida de carga que chega ao terminal, descontadas as perdas durante as atividades do transporte.

$$\sum_o \text{truckrail}_{ort} - \sum_o \text{losstruckrail}_{ort} \leq \text{RAILCAP}_{rt}, \quad \forall r, t \quad (3.25)$$

$$\sum_o \text{truckbarge}_{obt} - \sum_o \text{losstruckbarge}_{obt} \leq \text{BARGECAP}_{bt}, \quad \forall b, t \quad (3.26)$$

$$\left(\sum_o \text{truckexp}_{opt} - \sum_o \text{losstruckexp}_{opt} \right) + \left(\sum_r \text{rail}_{rpt} - \sum_r \text{lossrail}_{rpt} \right) + \left(\sum_b \text{barge}_{bpt} - \sum_b \text{lossbarge}_{bpt} \right) \leq \text{PORTCAP}_{pt}, \quad \forall p, t \quad (3.27)$$

Onde:

RAILCAP_{rt} : capacidade dos terminais ferroviários r no período t , em t;

BARGECAP_{bt} : capacidade dos terminais hidroviários b no período t , em t;

PORTCAP_{pt} : capacidade dos portos p no período t , em t.

A equação (3.28) apresenta a restrição de equilíbrio da rede de transporte para os terminais ferroviários, incluindo o equilíbrio gerado a partir das perdas do transporte dos fluxos de recepção dos terminais e dos próprios terminais.

$$\sum_o \text{truckrail}_{ort} - \sum_o \text{losstruckrail}_{ort} = \sum_p \text{rail}_{rpt} + \text{lossrailterminal}_{rt} , \forall r, t \quad (3.28)$$

A restrição do equilíbrio da rede para os terminais hidroviários pode ser visualizada pela equação (3.29), considerando as perdas no equilíbrio de transporte.

$$\sum_o \text{truckbarge}_{obt} - \sum_o \text{losstruckbarge}_{obt} = \sum_p \text{barge}_{bpt} - \text{lossbargeterminal}_{bt} , \forall b, t \quad (3.29)$$

O equilíbrio da rede de transporte dos terminais portuários pode ser visualizada pela expressão (3.30), considerando os diferentes fluxos de recepção dos portos, descontado as perdas, bem como, os fluxos de saída dos portos para o transporte marítimo, considerando as perdas existentes nos terminais.

$$\left(\sum_o \text{truckexp}_{opt} - \sum_o \text{losstruckexp}_{opt} \right) + \left(\sum_r \text{rail}_{rpt} - \sum_r \text{lossrail}_{rpt} \right) + \left(\sum_b \text{barge}_{bpt} - \sum_b \text{lossbarge}_{bpt} \right) = \sum_c \text{maritime}_{pct} + \text{lossporterterminal}_{pt} , \forall p, t \quad (3.30)$$

Nesta última parte é apresentada a formulação dos indicadores (variáveis) de interesse de análise para avaliação dos choques de mudança tecnológica. O primeiro indicador diz respeito ao custo de transporte por período (t), conforme a expressão (3.31).

$$\text{costperperiod}_t = \sum_o \sum_d \text{CTRD}_{od} \text{truckdomestic}_{odt} + \sum_o \sum_r \text{CTRF}_{or} \text{truckrail}_{ort} + \sum_o \sum_b \text{CTRB}_{ob} \text{truckbarge}_{obt} + \sum_o \sum_p \text{CTRE}_{op} \text{truckexp}_{opt} + \sum_b \sum_p \text{CB}_{bp} \text{barge}_{bpt} + \sum_r \sum_p \text{CF}_{rp} \text{rail}_{rpt} + \sum_p \sum_c \text{CMAR}_{pc} \text{maritime}_{pct} , \forall t \quad (3.31)$$

Outro indicador importante é a quantidade de emissões de CO₂ por período para o horizonte temporal de análise, quantificando todo o sistema de transporte dos diferentes modos de transporte, a partir dos fatores de emissões por período, intensidade de transporte e eficiência energética dos modos de transporte, conforme apresentado pela equação (3.32).

$$\text{emissionsperperiod}_t = \text{truckemissionsfact} \left(\frac{\text{tkutruck}_t}{\text{truckeff.truckcapacity}} \right) + \text{railemissionsfact} \left(\frac{\text{tkurail}_t}{\text{raileff}} \right) + \text{bargeemissionsfact} \left(\frac{\text{tkubarget}_t}{\text{bargeeff}} \right) + \text{maritimeemissionsfact} \left(\frac{\text{tkumaritime}_t}{\text{maritimeeff}} \right) , \forall t \quad (3.32)$$

As perdas na logística das atividades de transporte, por período, também compõem os indicadores de interesse de avaliação do sistema e podem ser visualizadas na expressão (3.33).

$$\begin{aligned} \text{lossesperperiod}_t = & \sum_o \sum_d \text{losstruckdomestic}_{odt} + \sum_o \sum_r \text{losstruckrail}_{ort} + \\ & \sum_o \sum_b \text{losstruckbarge}_{obt} + \sum_o \sum_p \text{losstruckexp}_{opt} + \sum_b \sum_p \text{lossbarge}_{bpt} + \\ & \sum_r \sum_p \text{lossrail}_{rpt} + \sum_b \text{lossbargeterminal}_{bt} + \sum_r \text{lossrailterminal}_{rt} + \\ & \sum_p \text{lossportterminal}_{pt} , \forall t \end{aligned} \quad (3.33)$$

A intensidade do transporte rodoviário, que também pode ser interpretada como sendo a demanda de transporte rodoviário, envolve a soma do produto da distância dos fluxos pela quantidade movimentada nos respectivos fluxos. No caso do transporte rodoviário, há quatro tipos distintos de fluxos: transporte doméstico, transporte das regiões de produção para os terminais ferroviários, hidroviários e portuários. A expressão (3.34) define a intensidade de transporte rodoviário.

$$\begin{aligned} \text{tkutruck}_t = & \sum_o \sum_d \text{DTRD}_{od} \text{truckdomestic}_{odt} + \sum_o \sum_r \text{DTRF}_{or} \text{truckrail}_{ort} + \\ & \sum_o \sum_b \text{DTRB}_{ob} \text{truckbarge}_{obt} + \sum_o \sum_p \text{DTRE}_{op} \text{truckexp}_{opt} , \forall t \end{aligned} \quad (3.34)$$

Onde:

- DTRD_{od} : distância de transporte rodoviário entre a origem o e destino d doméstico, km;
- DTRE_{op} : distância de transporte rodoviário entre origem o e porto p , para exportação, km;
- DTRF_{of} : distância de transporte rodoviário entre origem o e terminal ferroviário r , km;
- DTRB_{ob} : distância de transporte rodoviário entre origem o e terminal hidroviário b , km.

A intensidade do transporte (demanda) ferroviária pode ser observada pela expressão (3.35), envolvendo a ponderação entre a quantidade total movimentada de soja em todo o sistema ferroviário pela distância de cada trajeto, para cada período no tempo.

$$\text{tkurail}_t = \sum_r \sum_p \text{DF}_{rp} \text{rail}_{rpt} , \forall t \quad (3.35)$$

Onde:

- DF_{rp} : distância de transporte ferroviário entre terminal ferroviário r e porto p , km.

A expressão (3.36) apresenta a intensidade do transporte hidroviário, calculada para cada período do tempo.

$$\text{tkubarge}_t = \sum_b \sum_p \text{DB}_{bp} \text{barge}_{bpt} , \forall t \quad (3.36)$$

Onde:

- DB_{bp} : distância de transporte hidroviário entre terminal hidroviário b e o porto p , km

A intensidade do transporte marítimo pode ser observada na expressão (3.37).

$$\text{tkumaritime}_t = \sum_p \sum_c \text{DMAR}_{pc} \text{maritime}_{pct} , \forall t \quad (3.37)$$

Onde:

$DMAR_{pc}$: distância de transporte marítimo entre o porto p e o país consumidor c , km.

Outro indicador importante para os resultados do modelo construído é a demanda de óleo diesel no sistema para cada período do tempo, conforme a expressão (3.38). A demanda do referido combustível é calculada pela razão entre a intensidade de transporte e a eficiência energética para cada modo de transporte que utiliza o combustível, especificamente os transportes rodoviário, ferroviário e hidroviário.

$$qdiesel_t = \frac{tkutruck_t}{truckeff.truckcapacity} + \frac{tkurail_t}{raileff} + \frac{tkubarge_t}{bargeeff}, \forall t \quad (3.38)$$

A demanda de óleo combustível para os diferentes períodos de análise é calculada como sendo a razão entre a intensidade de transporte marítimo e a eficiência energética do transporte marítimo, conforme expresso pela equação (3.39). Por exemplo, serão simulados impactos de substituição do navio do sistema atual, que utiliza *Panamax*, para os *Capesize*. Nesta substituição, serão alterados os parâmetros da eficiência energética, provocando efeitos na demanda do Óleo Combustível.

$$qcomboil_t = \frac{tkumaritime_t}{maritimeeff}, \forall t \quad (3.39)$$

Por fim, o último indicador gerado é a demanda de caminhões do modelo de *green logistics* para avaliação de estratégias, expressa na equação (3.40). A demanda estimada é basicamente uma ponderação entre o parâmetro de demanda relativa de caminhões por tonelada transportada e a quantidade movimentada nos fluxos de transporte (variável endógena do modelo).

$$qtruck_t = \sum_o \sum_d FLEETD_{od} truckdomestic_{odt} + \sum_o \sum_r FLEETF_{or} truckrail_{ort} + \sum_o \sum_b FLEETB_{ob} truckbarge_{obt} + \sum_o \sum_p FLEETE_{op} truckexp_{opt}, \forall t \quad (3.40)$$

Onde:

$FLEETD_{od}$: demanda relativa de caminhão entre a origem o e destino d doméstico, em caminhão/t;

$FLEETE_{op}$: demanda relativa de caminhão entre a origem o e o porto p , em caminhão/t;

$FLEETF_{or}$: demanda relativa de caminhão entre a origem o e terminal r , em caminhão/t;

$FLEETB_{ob}$: demanda relativa de caminhão entre a origem o e o terminal b , em caminhão/t.

A demanda relativa de caminhões por tipo de fluxo é um parâmetro calculado envolvendo a razão entre o tempo total de ciclo (tempo de viagem, considerando o retorno do veículo somado ao tempo de carregamento e descarregamento) estimado do transporte e o produto da capacidade pelo tempo útil de trabalho anual do caminhão, o qual depende da

jornada de trabalho do motorista. Como no Brasil a exportação de soja é significativa e apresenta uma concentração elevada de movimentação em um determinado período do ano, foi criado um indicador médio de ponderação da demanda relativa, em dois períodos.

O (θ_5) representa a concentração relativa do volume movimentado de soja em um período definido de cinco meses, o qual altera também o tempo útil de disponibilidade do caminhão no período. O ($1 - \theta_5$), por sua vez, representa a quantidade relativa restante de soja a ser movimentada no período de sete meses. Desta forma, a demanda relativa de caminhões (*Fleet*), quantidade de caminhões necessários para movimentar uma tonelada, é o estimador para o cálculo de $FLEETD_{od}$, $FLEETF_{or}$, $FLEETB_{ob}$ e $FLEETE_{op}$.

Tal ajuste de ponderação foi necessário para evitar o subdimensionamento na demanda de caminhão, envolvendo o efeito significativo da sazonalidade do transporte da soja. A expressão de $Frota'$, usada como estimador dos parâmetros da equação (3.40), pode ser visualizada pela expressão (3.41).

$$Fleet' = \theta_5 \left(\frac{\frac{2 \cdot distance}{vel} + t_{load} + t_{unload}}{truckcapacity \cdot worktime_5} \right) + (1 - \theta_5) \left(\frac{\frac{2 \cdot distance}{vel} + t_{load} + t_{unload}}{truckcapacity \cdot worktime_7} \right) \quad (3.41)$$

Onde:

$Fleet'$: é a demanda relativa de caminhão, número de caminhões por tonelada;

$distance$: distância da rota, em km;

t_{load} : é o tempo de carregamento do caminhão, em horas;

t_{unload} : é o tempo de descarregamento do caminhão, em horas;

vel : é a velocidade média de transporte, em km/h;

$worktime_5$, $worktime_7$: tempo útil de trabalho do caminhão (= jornada de trabalho do motorista) no período de 5 meses e 7 meses, respectivamente, em horas;

α_5 : é a concentração da quantidade transportada de soja no período de 5 meses em relação ao ano, em %.

3.2.2. Estimativa das elasticidades do modelo

Nesta subseção é apresentado o método de estimativa das elasticidades das principais variáveis de interesse em relação aos diversos parâmetros diretos (aqueles declarados diretamente na formulação matemática) ou indiretos (aqueles que são estimadores dos parâmetros diretos, como, por exemplo, a velocidade do transporte rodoviário, a qual altera o custo de transporte). Tal abordagem permite realizar uma análise de sensibilidade do sistema de transporte para identificar quais as variáveis que são mais sensíveis às variações dos parâmetros do transporte testado. Na literatura, por exemplo, Jourquin & Beuthe (2019) estimaram as elasticidades em arco para um modelo de rede de transporte para avaliar os

impactos da variação de um componente do transporte em outras variáveis, envolvendo, por exemplo, velocidade que afeta custos e tempos de trânsito na Europa. Beuthe, Jourquin & Urbain (2014), em um modelo de rede multimodal de transporte, estimaram as elasticidades diretas e cruzadas de fatores de transporte a partir de variações dos custos de transporte na rede. Ambos os trabalhos, porém, estimaram as elasticidades apenas no sentido da variação negativa do custo de transporte.

O procedimento de estimativa envolve identificar os valores das variáveis de interesse na solução de ótimo inicial. Na sequência, aplica-se um choque percentual em todos os elementos da matriz ou do vetor de um determinado parâmetro do modelo de *green logistics* e gera-se a nova solução de ótimo do modelo, identificando os novos valores das variáveis de interesse e suas variações em relação à solução de ótimo inicial. Com isso, calculam-se as elasticidades como sendo as variações percentuais das variáveis de interesse em relação à variação percentual do choque realizado no parâmetro específico. No caso, a variação percentual é igual para todos os parâmetros.

As expressões (3.42a, b e c) apresentam as equações de estimativa das elasticidades dos efeitos dos parâmetros (k) nas variáveis de interesse (w).

$$\xi_{w,k} = \frac{1}{2} \left(\xi_{w,k}^+ \{ \min_{f_1} | +\alpha_k \} + \xi_{w,k}^- \{ \min_{f_1} | -\alpha_k \} \right) \quad (3.42a)$$

$$\xi_{w,k}^+ \{ \min_{f_1} | +\alpha_k \} = \frac{\left(Q_{w, \{ \min_{f_1} | +\alpha_k \}}^* - Q_{w, \{ \min_{f_1} \}}^* \right) / Q_{w, \{ \min_{f_1} \}}^*}{\alpha_k} \quad (3.42b)$$

$$\xi_{w,k}^- \{ \min_{f_1} | -\alpha_k \} = \frac{\left(Q_{w, \{ \min_{f_1} | -\alpha_k \}}^* - Q_{w, \{ \min_{f_1} \}}^* \right) / Q_{w, \{ \min_{f_1} \}}^*}{-\alpha_k} \quad (3.42c)$$

Onde:

$\xi_{w,k}$: é a elasticidade média do efeito de variação do parâmetro k e sua resposta na variável de interesse w ;

$\xi_{w,k}^+ \{ \min_{f_1} | +\alpha_k \}$: é a elasticidade do efeito de uma variação percentual positiva α (+10%) do parâmetro k e sua resposta na variável de interesse w , na condição de ótimo após o choque;

$\xi_{w,k}^- \{ \min_{f_1} | -\alpha_k \}$: é a elasticidade do efeito de uma variação percentual negativa α (-10%) do parâmetro k e sua resposta na variável de interesse w na condição de ótimo após o choque;

$Q_{w, \{ \min_{f_1} | +\alpha_k \}}^*$: é a quantidade ótima observada da variável de interesse w na condição de ótimo após o choque de variação percentual positiva α (+10%) realizado no parâmetro k ;

$Q_{w\{f_1^{min} | -\alpha_k\}}^*$: é a quantidade ótima observada da variável de interesse w na condição de ótimo após o choque da variação percentual negativa α (-10%) realizado no parâmetro k ;
 $Q_{w\{f_1^{min}\}}^*$: é a quantidade ótima observada da variável de interesse w na condição ótima inicial (sem os choques);
 α_k : é a variação percentual na matriz ou vetor de parâmetro k do modelo.

A interpretação do coeficiente de elasticidade apresenta a variação média esperada em uma determinada variável de interesse, em percentual, a partir da variação de 1% no parâmetro avaliado. O sinal positivo do coeficiente de elasticidade demonstra que a variação média da variável de interesse ocorre no mesmo sentido da variação do parâmetro, enquanto o sinal negativo demonstra um efeito contrário.

Importante destacar que por ser um modelo de otimização, envolvendo equações simultâneas com variáveis de folga e excesso, a interpretação dos coeficientes das elasticidades fica restrito somente ao intervalo de variação dos parâmetros avaliados.

3.2.3. Algoritmo de geração do conjunto de soluções eficientes e da Fronteira de Pareto para a otimização multiobjetivo do modelo

Conforme discutido na subseção de referencial teórico, a geração de soluções eficientes para compor a Fronteira de Pareto depende de um método de estimativa das soluções. Nesse contexto, o método empregado nesta pesquisa, envolvendo o modelo de *green logistics*, quando incorporado às funções multiobjetivo, foi o ε -restrito, contemplando um algoritmo de geração de soluções proposto por Allaoui *et al.* (2018).

Basicamente, o algoritmo consiste, inicialmente, em gerar os dois pontos extremos da solução de Pareto para variá-los no ε -restrito, envolvendo a combinação linear dos ótimos dos pontos extremos. Inicialmente, minimiza-se a função objetivo $f_A(x)$ e encontra-se o seu valor ótimo, denominado de $LI_A(x)$ (limite inferior da função objetivo A), que é o seu melhor resultado. Na sequência, minimiza-se a função objetivo $f_B(x)$, incorporando como restrição nesta otimização a condição de que a função objetivo $f_A(x)$ deve ser igual ao $LI_A(x)$, obtendo-se assim o limite superior da função objetivo B ($LS_B(x)$), que é o seu pior resultado. Com isso, obtém-se o primeiro ponto extremo da fronteira de Pareto ($LI_A(x), LS_B(x)$). Repete-se o procedimento de forma que seja obtido o outro extremo da Fronteira de Pareto ($LS_A(x), LI_B(x)$).

Na sequência, são gerados dois conjuntos de soluções de Pareto, envolvendo uma varredura do ε -restrito contemplando a diferença do limite superior e do limite inferior para a

$f_A(x)$ e para $f_B(x)$. O conjunto final de solução de Pareto que compõe a fronteira é a união entre os dois conjuntos. Por exemplo, para a minimização da $f_A(x)$, incorpora-se a restrição $f_B(x) \leq \varepsilon_B$; encontram-se os pontos ótimos da solução eficiente variando ε_B em pequenos intervalos (de 0,1 até 1), conforme exemplificado na equação (3.43), para obtenção de mais pontos.

$$\varepsilon_A = 0,1. (LS_A(x) - LI_A(x)) + LI_A(x) = 0,1. D_A + LI_A(x) \quad (3.43a)$$

$$\varepsilon_B = 0,1. (LS_B(x) - LI_B(x)) + LI_B(x) = 0,1. D_B + LI_B(x) \quad (3.43b)$$

Por fim, a Fronteira de Pareto, composta pelo conjunto de soluções eficientes, é o resultado da união entre o conjunto de solução da minimização da função objetivo A (SP_A) e da função objetivo B (SP_B), eliminando as soluções dominadas por outras.

A Figura 18 ilustra a implementação do algoritmo utilizado para a geração das soluções eficientes da Fronteira de Pareto, de forma mais detalhada.

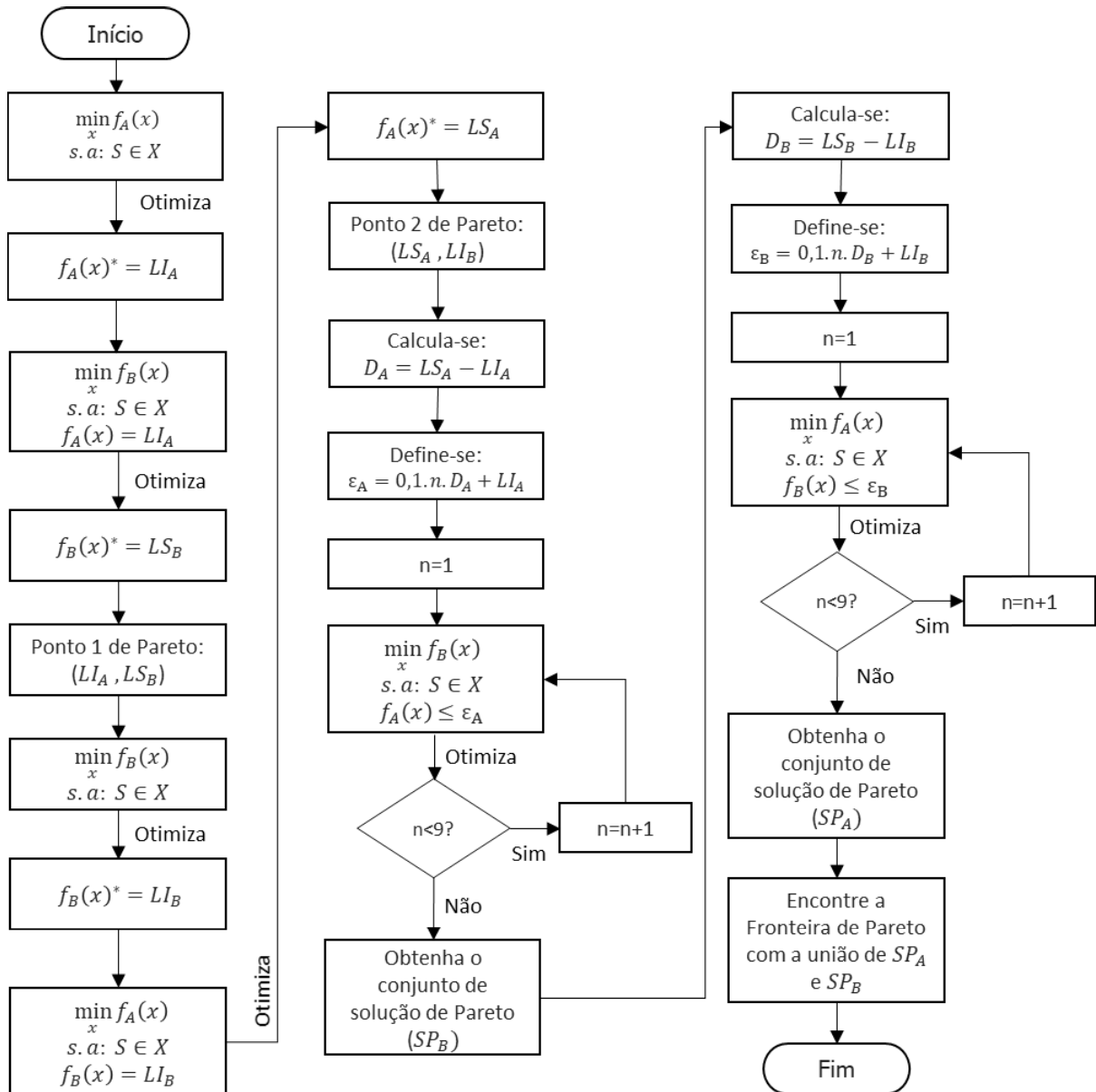


Figura 18 – Implementação do algoritmo utilizado para geração das soluções eficientes que compõe a Fronteira de Pareto

Fonte: elaboração baseada no método proposto de Allaoui *et al.* (2018)

O método utilizado é o de otimização *a posteriori*, ou seja, o método gera a Fronteira de Pareto e não indica qual é o ponto desejado na Fronteira. Para fins de definição do ponto ótimo (solução a ser alcançada) que será utilizado para a análise dos choques de mudanças tecnológicas no sistema de transporte em relação ao cenário sem o progresso tecnológico (contrafactual), será escolhido a solução que apresentar a menor distância euclidiana normalizada em relação ao ponto utopia ou ideal, definido no referencial teórico.

O algoritmo do ε -restrito foi implementado no *General Algebraic Modeling System – GAMS*. As funções objetivo avaliadas pela abordagem multiobjetivo serão especificadas na subseção de especificação das funções objetivo e de avaliação de resultados.

3.3. Especificação dos dados do modelo de *green logistics*

3.3.1. Custo e produtividade operacional do transporte rodoviário

O custo unitário do transporte rodoviário foi estimado a partir da quantificação do custo econômico de forma a incorporar o custo de capital na sua estrutura. O estimador dos custos de transporte rodoviário dos parâmetros ($CTRD_{od}$, $CTRE_{op}$, $CTRF_{or}$ e $CTRB_{ob}$) do modelo de *green logistics* pode ser visualizado pela equação (3.44).

$$Crod_{vq} = \frac{\frac{cm}{JT} \cdot \left(T_{car} + T_{desc} + \frac{dist_{vq}}{v} \right) + cd \cdot dist_{vq} + \frac{dist_{vq}}{EEr} \cdot P_{comb} + PED_{vq}}{\text{capacidade}} \quad (3.44)$$

Onde:

$Crod_{vq}$: é o custo unitário do transporte rodoviário, em R\$/t

cm : é o coeficiente de custo mensal do transporte rodoviário, em R\$/mês;

JT : é o tempo útil do transporte mensal, envolvendo a jornada de trabalho do motorista, em horas/mês;

T_{car} : é o tempo de carregamento do transporte, em horas;

T_{desc} : é o tempo de descarregamento do transporte, em horas;

$dist_{vq}$: é a distância de transporte no fluxo de transporte entre v e q , em km;

v : é a velocidade média do transporte rodoviário, em km/h;

cd : é o custo de deslocamento do caminhão, em R\$/km;

EEr : é a eficiência energética do caminhão, em km/litros de óleo diesel;

PED_{vq} : é o custo de pedágio no fluxo de transporte entre v e q , em R\$;

capacidade: é a capacidade de transporte do caminhão, em toneladas;

P_{comb} : é o preço do combustível, em R\$/litro.

O coeficiente de custo mensal (cm) agrega os custos de depreciação do veículo e implemento, custo do capital do veículo e implemento, custo de mão de obra do motorista, custos de tributos e taxas, além do custo de seguro. O coeficiente de custo de deslocamento (cd) contempla o custo de manutenção, custo de ARLA (Agente Redutor Líquido Automotivo)⁴, custo de lubrificantes, custo de lavagens e graxas e custos de pneus e recauchutagem. Alguns elementos, como tempo útil (jornada de trabalho), eficiência energética, velocidade e tempos de carregamento serão alterados nos cenários simulados para fins de avaliação de melhoria na promoção de uma logística mais sustentável. O veículo utilizado como referência é um bitrem graneleiro de 7 eixos, com capacidade de carga de 37 toneladas.

⁴ ARLA: é um reagente utilizado na combustão do óleo diesel para reduzir as emissões de poluentes no transporte.

Os coeficientes e o custo de pedágio por rota foram obtidos a partir de ESALQ-LOG (2021) referentes ao ano de 2020, sendo os valores de cm , cd e P_{comb} , respectivamente, R\$ 12.930,84/mês, R\$ 0,9564 por km e R\$ 4,00 por litro. Adotou-se uma jornada de trabalho mensal de 252 horas.

Em relação à identificação dos padrões de produtividade do transporte rodoviário (velocidade, tempos e eficiência energética), foi realizada uma análise de *cluster* utilizando o algoritmo *K-means* (CHARRAD *et al.*, 2015) para um conjunto de dados obtidos de uma pesquisa junto aos agentes representativos do transporte no âmbito da definição da Política Nacional de Pisos Mínimos do Transporte Rodoviário de Cargas, filtrado para agregar veículos que declararam movimentação de grãos agrícolas para veículos compatíveis com a movimentação de soja, disponibilizada pelo ESALQ-LOG (2020). Tais análises e seus resultados são apresentadas na seção de Apêndices de forma detalhada, incluindo os padrões de produtividade identificados, a partir de número ótimo de três *clusters* indicados pelos testes realizados. A Tabela 4 apresenta os padrões de produtividade adotados no modelo de *green logistics*, envolvendo fluxos de longa distância (destinos portuários) e curta e média distâncias (destinos para os terminais ferroviários, hidroviários e mercado doméstico).

Tabela 4 – Parâmetros operacionais adotados para a estruturação dos custos de transporte rodoviário

Parâmetros operacionais	Unidade	Longa Distância (Porto) ¹	Curta e Média Distância (Mercado Doméstico e Terminais) ²
Velocidade média	km/h	63,57	63,57
Tempo de Carregamento e Descarregamento	h	15,15	5,00
Eficiência Energética	km/l	2,05	2,05
Eixos da composição veicular	eixos	7	7

Fontes: ¹ Análise de *Cluster* (K-means, $k^*=3$) da base de dados dos respondentes da pesquisa de piso de frete; ² ESALQ-LOG (2020).

3.3.2. Custo e produtividade operacional do transporte ferroviário

Especificamente para a estimativa do custo do transporte ferroviário, optou-se por uma abordagem econométrica, ao invés de uma abordagem de estruturação dos componentes de custos de transporte, tal como realizado para o rodoviário. Isso se fez necessário, pois no caso do custo ferroviário, as empresas operam no modelo de integração vertical sob regime de concessão, ou seja, as concessionárias são responsáveis tanto pela operação quanto pela infraestrutura, diferentemente do transporte rodoviário, no qual a estrutura do custo é somente relativa ao equipamento de transporte e não à infraestrutura (rodovia). Como o estudo é focado apenas no setor de soja, a estruturação do custo ferroviário criaria condições para predizer

inúmeras premissas, visto a necessidade de estimativa de demanda de outras cargas para definição do custo unitário do transporte, por exemplo. As estimativas dos custos ferroviários de transporte são mais complexas do que as estimativas dos custos de transporte rodoviário, em decorrência da existência da produção conjunta de empresas, economias de escala e de densidade, dentre outros fatores, os quais normalmente são tratados por abordagens econométricas de custos (FORKENBROCK, 2001).

Na literatura, há uma série de trabalhos que estimam o custo de transporte ferroviário a partir de uma abordagem econométrica, envolvendo, principalmente, componentes de produção, tecnologia e preços dos insumos utilizados. Parte dessas abordagens da função de custo discute a eficiência do uso dos recursos do setor para fins de avaliação de produtividade de forma a estruturar a otimização do custo, com as derivações a partir do lema de Shepard para encontrar as demandas ótimas dos fatores de produção (ANGULO, 2012; BITZAN & KARANKI, 2021). De toda forma, há uma série de formas funcionais para estimativas da função custo ferroviário na literatura, tais como função Cobb-Douglas, Translog, dentre outras, sendo que a escolha depende da disponibilidade de dados e do objetivo da análise (LINK, 2015).

Muitas vezes os dados utilizados são oriundos da estrutura contábil das empresas ferroviárias para as estimativas da função de custo. De uma forma geral, os trabalhos envolvendo modelos sobre custos ferroviários têm uma concentração maior nas ferrovias verticalmente integradas, porém com formas funcionais das mais diversas, bem como, diferentes tipos de custos considerados (alguns incluem despesas gerais na função custo, por exemplo), o que dificulta comparativos de elasticidades no setor (LINK, 2015).

O método proposto para estimativa da função do custo de transporte ferroviário, a ser integrado ao modelo de otimização de *green logistics*, é de uma abordagem econométrica, de forma a incorporar características das empresas ferroviárias, possibilitando avaliar as suas elasticidades. Castro (2002) desenvolveu uma abordagem semelhante ao utilizar um modelo de regressão multivariado para estimar os custos do transporte ferroviário no Brasil, tendo como variáveis exógenas a quantidade movimentada, a distância, a extensão da malha e variáveis *dummies* temporais, para captar efeitos de mudanças nas empresas.

Primeiramente foi estruturado um banco de dados de custos operacionais do transporte ferroviário a partir dos relatórios contábeis das empresas concessionárias ferroviárias disponibilizados pela ANTT (2021b), envolvendo o período de 2015 a 2020, para as cinco maiores empresas que movimentaram cargas agrícolas no período, com uma concentração de

mais de 90% das movimentações destes produtos. As empresas avaliadas foram: Ferrovia Centro-Atlântico (FCA), Ferrovia Norte-Sul (FNS), MRS, Rumo Malha Norte (RMN) e Rumo Malha Sul (RMS). Além disso, foram consolidadas informações da produtividade destas empresas relacionadas à operação do transporte ferroviário para compor o banco de dados, como: quantidade movimentada (toneladas), velocidade média (km/h), eficiência energética (t.km/litro) e distância média percorrida (km).

Para se estimar o custo econômico, somou-se o custo operacional à estimativa do custo de capital, o qual foi calculado como sendo a soma dos custos de depreciação e de ativo imobilizado das empresas ponderado pelo *Weighted Average Cost of Capital* (WACC) regulatório, utilizado pela ANTT para fins de determinação do valor de outorga nos contratos de concessão. O WACC utilizado foi de 10,88% (ANTT, 2021a). Os valores foram deflacionados pelo IGP-M, referente ao mês de dezembro/2020 (FUNDAÇÃO GETÚLIO VARGAS – FGV, 2021).

Foram estruturados dois conjuntos de modelos econométricos com abordagens distintas para estimar o custo unitário do transporte ferroviário. O primeiro modelo, estruturado em dados em painel para o referido período, foi utilizado para calcular as elasticidades das variáveis de produtividade do transporte ferroviário que foram significativas nos testes realizados. Entretanto, este modelo não foi utilizado diretamente para estimar os custos ferroviários dos fluxos de transporte do modelo de *green logistics*, pelo fato de incorporar a quantidade transportada como variável exógena (no modelo de *green logistics*, tal variável é endógena, gerando uma não-linearidade incompatível com o método de programação matemática proposto). Então, optou-se por estimar um modelo de custo ferroviário em função da distância para utilizá-lo como estimador dos custos de transporte ferroviário (CF_{rp}).

O modelo dos estimadores dos custos unitários do transporte ferroviário pode ser consultado na equação (3.45), o qual foi estimado a partir do Método de Mínimos Quadrados Generalizados (MQG), de forma a corrigir problemas de heterocedasticidade e autocorrelação, na estrutura log-log. A Tabela 5 apresenta os coeficientes obtidos.

$$\ln \text{Custo}_{\text{ferroviario}} = \beta_0 + \beta_1 \ln \text{distancia} + \varepsilon \quad (3.45)$$

Onde:

$\text{Custo}_{\text{ferroviario}}$: é o custo do frete ferroviário para a distância i , em R\$/t;
 distancia: é a distância de transporte ferroviário, em quilômetros;
 ε : é o termo de erro aleatório.

Tabela 5 – Estimadores do modelo de custo de transporte ferroviário

Variáveis	Coefficientes
ln DIST	1,170828* (0,01333)
Intercepto	-3,494631* (0,911462)
R ²	70,57
Teste F	77,08*
Nº observações.	30

Erros padrões robustos apresentados entre parênteses

* Estatisticamente significativo ao nível de 1%

Fonte: resultado da análise

As elasticidades identificadas das variáveis significativas no modelo em painel foram: velocidade (-1,007) e eficiência energética (-0,2124). Tais elasticidades serão utilizadas como choques na estrutura de custos de transporte ferroviário nas diversas simulações do modelo de *green logistics*. O detalhamento do modelo econométrico de dados em painel, sua formulação, resultados e testes estatísticos realizados podem ser consultados na seção de Apêndices.

Por fim, foi calculada a eficiência energética do transporte ferroviário em 153,84 t.km por litro de combustível, baseada nos dados das empresas ferroviárias no ano de 2020 (ANTT, 2021a).

3.3.3. Custo e produtividade operacional dos transportes marítimo e hidroviário

O custo de transporte marítimo pode ser segmentando em cinco componentes de custos: (i) os custos operacionais (os quais dependem do tamanho da tripulação, salário da tripulação, estoques, lubrificantes, reparos, manutenção, seguro e administração); (ii) os custos de viagem (que dependem do consumo de combustível, motor principal, motores auxiliares, preço do combustível, velocidade, tarifas portuárias, tarifárias de canais de acesso etc.); (iii) os custos de manuseio de carga (os quais dependem do tipo de carga, *design* do navio, unitização da carga, custos dos estivadores etc.); (iv) o custo do capital (o qual depende da participação do capital próprio e de terceiros, taxa de juros, termos de financiamento etc.); e, por fim, dos custos de manutenção (os quais dependem da idade do navio, política de manutenção, regulações etc.) (STOPFORD, 2009). O custo unitário do transporte marítimo pode ser visualizado na equação (3.46).

$$C_{\text{mar}} = \frac{OC + PM + VC + CHC + K}{DWT} \quad (3.46)$$

Onde:

C: custo unitário do transporte marítimo, em unidades monetárias por DWT;

OC: custo operacional do navio;

PM: custo anual de manutenção do navio;

VC : custo de viagem do navio;
 K : é o custo de capital do navio; e ,
 DWT : é a capacidade do navio, em DWT.

Foram utilizados os custos unitários do transporte marítimo dos navios graneleiros *Panamax* e *Capesize* obtidos a partir de Bernacki (2021) e referentes ao ano de 2019⁵, os quais são, respectivamente, R\$ 4,2770/mil t.km e R\$ 2,4910/mil t.km. O cálculo do custo de transporte marítimo das rotas internacionais do modelo de *green logistics*, envolveu a ponderação entre o custo unitário de transporte e a distância percorrida.

$$C_{mar_{pc,n}} = dist_{pc} \cdot c_{marunitario_n} \quad (3.47)$$

Onde:

$C_{mar_{p,c,n}}$: custo do transporte marítimo utilizando do navio n (*Panamax* ou *Capesize*) na rota marítima com origem no porto brasileiro p e destino no país c , em R\$/tonelada;
 $dist_{pc}$: é a distância entre o porto brasileiro p e destino no país c , em quilômetro;
 $c_{marunitario_n}$: é o coeficiente de custo unitário de transporte em R\$/t.km do navio n .

A elasticidade utilizada para os choques de mudança de capacidade do navio foi de -0,751, em relação ao custo unitário do transporte marítimo, obtido a partir de Bernacki (2021).

A eficiência energética do transporte marítimo foi calculada a partir dos valores apresentados na Tabela 6, envolvendo a conversão da quantidade de consumo de combustível por dia dos navios *Panamax* e *Capesize*, em deslocamento diário baseado na velocidade média de navegação e capacidade do navio. A eficiência energética foi obtida a partir da razão entre o deslocamento diário ponderado pela capacidade e o consumo diário de combustível.

Tabela 6 – Estimativa da eficiência energética do transporte marítimo por tipo de navio

Indicadores	<i>Panamax</i>	<i>Capesize</i>	Fonte
Consumo de combustível (t/dia)	36,3	54,65	Chang & Chang (2013)
Consumo de combustível (l/dia)	36.300	54.650	Conversão para litros a partir do peso específico de GHG Protocol (2020)
Velocidade média (nós)	14,40	14,40	Chang & Chang (2013)
Velocidade média (km/h)	17,07	17,07	Conversão da velocidade média em nós para km/t (fator de 1,852)
Deslocamento diário (km/dia)	409,60	409,60	Produto entre a velocidade e a número de horas no dia
Capacidade do navio (t)	67.000	140.000	Premissa adotada
t.km diário (mil)	27.443,2	57.344,0	Produto entre o deslocamento diário e capacidade de transporte
Eficiência energética (t.km/litro)	756,02	1.049,31	Razão entre o deslocamento diário ponderado pela capacidade e o consumo diário de combustível

Fonte: elaborado pelo autor

⁵ Os valores foram convertidos de Euro para Real, utilizando o câmbio BRL/EUR de 4,70

Em relação aos custos do transporte hidroviário, estes podem ser agrupados nas seguintes categorias: custo de capital envolvido para os equipamentos (barcaças e empurradores hidroviários), manutenção (barcaças e empurradores hidroviários), operação (tripulação, combustíveis e lubrificantes e seguros), dentre outros (EPL, 2015). Os custos de transporte hidroviário utilizados foram obtidos para cada uma das rotas hidroviárias a partir da EPL (2017), envolvendo a categoria de granel sólido agrícola, corrigidos pelo IGP-M para 2020. A eficiência energética adotada para o transporte hidroviário foi de 769,23 t.km/litro de combustível (EPL, 2021a).

3.3.4. Oferta e demanda de soja

A regionalização adotada para fins de modelagem, envolvendo oferta e demanda adotada, incluiu: (i) produção: nível de mesorregião, escolhendo-se como centroide representativo o município de maior produção; (ii) consumo doméstico: nível de município; (iii) portos de exportação: nível de município; (iv) terminais hidroviários e ferroviários: nível de município; (v) países consumidores: delimitados em dois blocos comerciais: Europa e Ásia, sendo os centroides definidos, respectivamente, como Holanda e China (vide seção de Apêndices para visualização dos centroides selecionados).

Os dados da produção utilizados foram oriundos do IBGE (2021b) e das exportações por porto a partir de SECEX (2021). O consumo doméstico de soja foi estimado de forma residual, pela diferença entre a produção e exportação. Tal consumo foi rateado, inicialmente, pela produção declarada de farelo de soja das unidades federativas (capacidade de moagem). Na sequência, tal produção foi desagregada de forma proporcional ao nível de município, pela quantidade de moageiras existentes por município nas unidades federativas. Os dados utilizados foram obtidos a partir da Associação Brasileira das Indústrias de Óleo de Soja – ABIOVE (2021). O ano de referência utilizado foi 2020.

As projeções de crescimento da produção de soja foram realizadas a partir das projeções no período 2020-2030 do Ministério da Agricultura, Pecuário e Abastecimento – MAPA (2021) e para os demais períodos, a partir das estatísticas de projeção da *Food and Agriculture Organization of the United Nations* – FAO para o Brasil (ALEXANDRATOS & BRUINSMA, 2012), envolvendo especificamente as taxas de crescimento para o cenário estimado de *stratified societies*. As taxas de crescimento adotadas por período: 2020-2030: 29,5%; 2030-2040: 2040-2050: 5,3%. Assumiu-se que a demanda total cresceu na mesma proporção.

3.3.5. Demais parâmetros do modelo

A Tabela 7 apresenta os demais parâmetros definidos e utilizados no modelo de *green logistics*, com as respectivas fontes.

Tabela 7 – Parâmetros do modelo (capacidades de transporte dos terminais, distâncias, fatores de emissões, perdas e preço do produto)

Parâmetro	Designação	Fonte
Capacidade dos terminais ferroviários	Movimentação de soja nos terminais ferroviários em 2020 (33 terminais, vide lista na seção de Apêndices), em toneladas	ANTT (2021a)
Capacidade dos terminais hidroviários	Movimentação de soja nos terminais hidroviários em 2020 (4 terminais, vide lista na seção de Apêndices), em toneladas	Agência Nacional de Transporte Aquaviário - ANTAQ (2021)
Capacidade dos terminais portuários (portos)	Movimentação de soja nos terminais portuários/portos em 2020	SECEX (2021)
Distâncias	Matriz gerada pela rede de transporte do <i>Transcad</i> , em km	<i>Transcad</i>
Fator de emissões do óleo combustível	2,603 kg de CO ₂ /litro	Programa Brasileiro GHG PROTOCOL (2020)
Fator de emissões do óleo diesel	3,17 kg de CO ₂ /litro	CHANG & CHANG, 2013
Perdas no transporte ferroviário e hidroviário	0,17%	Péra (2017)
Perdas no transporte rodoviário	Soma das perdas do transporte nas estradas de saída das fazendas (0,5%) e no transporte por rodovias (0,132%). Perda = $1 - [(1 - 0,5\%) \times (1 - 0,132\%)] = 0,631\%$	Péra (2017)
Perdas nos terminais ferroviários, hidroviários e portuários	0,25%	Péra (2017)
Preço de soja	R\$ 1279/t (média de preço dos últimos 5 anos: 2016-2020)	CEPEA (2021)

Fonte: organizado pelo autor

3.4. Especificação dos cenários de mudanças tecnológicas e infraestruturais e das análises de elasticidades do modelo de *green logistics*

As especificações dos cenários avaliados para as mudanças tecnológicas podem ser visualizadas na Tabela 8. Inicialmente, é estruturado um cenário base (referência) para o período de 2020. Na sequência é estruturado o cenário denominado de contrafactual para o período de 2030-2050, de forma que contempla o crescimento da produção e demanda de soja, porém não existe o progresso tecnológico do transporte, ou seja, não há alteração de custos, de fatores de emissões e de capacidades das ferrovias e hidrovias. Tal situação ilustra o pior cenário possível. A estruturação lógica do cenário contrafactual é a mesma utilizada pelo Plano Nacional de Logística 2035 – PNL (EPL, 2021b). Na sequência são introduzidos os novos cenários com algum tipo de mudança, envolvendo: melhorias na produtividade do transporte

rodoviário (reduções dos tempos de carregamento/descarregamento e aumento na eficiência energética), produtividade do transporte ferroviário (aumento da eficiência energética), ampliação de capacidade das infraestruturas de transporte, substituições dos navios atuais utilizados (*Panamax*) para navios maiores (*Capesize*) e cenários que combinam as mudanças anteriores.

Tabela 8 – Especificação dos cenários avaliados de mudanças tecnológicas

Cenário	Período	Definições e premissas
Base	2020	Cenário calibrado para os dados de 2020
(1) Contrafactual (sem progresso tecnológico)	2030-2050	Cenário que projeta o crescimento da produção e da demanda (doméstica e internacional) de soja, porém com estagnação do progresso tecnológico da infraestrutura e da produtividade do transporte (mantém estas condições iguais ao cenário de base de 2020)
(2) Produtividade do Transporte Rodoviário de Cargas – TRC: Tempos de carreg. e descarregamento	2030-2050	Alteração do tempo total de carregamento e descarregamento para 4 horas, para o transporte o transporte rodoviário (porto, terminais e mercado doméstico) e consequentemente reajuste da estrutura do custo do transporte rodoviário
(3) Produtividade do TRC: Eficiência energética	2030-2050	Alteração da eficiência energética do transporte rodoviário (porto, terminal e mercado doméstico) para 3,00 km/l e consequentemente reajuste da estrutura de custo do transporte rodoviário
(4) Pacote Tecnológico do TRC	2030-2050	Alteração do tempo total de carregamento e descarregamento para 4 horas e da eficiência energética do transporte rodoviário para 3,00 km/l e consequentemente reajuste da estrutura de custo
(5) Produtividade Ferroviária: Eficiência energética	2030-2050	Alteração da eficiência energética do transporte ferroviário com o incremento de 20% em relação ao contrafactual e consequentemente redução dos custos de transporte ferroviário na ordem de 4,24% oriundos das elasticidades obtidas no modelo econométrico de custos ferroviários
(6) <i>Modal Shift</i> : inclusão de novas ferrovias	2030-2050	Inclusão das novas ferrovias com capacidades irrestritas, mantendo as capacidades das infraestruturas existentes iguais ao contrafactual. Novas ferrovias: <u>Ferrovia Norte-Sul</u> (São Simão, GO – Santos, SP; Rio Verde, GO – Santos, SP), <u>Ferrogrão</u> (Sinop, MT – Itaituba, PA), <u>Ferrovia Autorizada de Transporte Olacyr de Moraes – FATO</u> (Lucas do Rio Verde, MT – Santos, SP), <u>Ferrovia de Integração do Centro-Oeste – FICO</u> (Água Boa, MT – Santos, MT; Água Boa, MT – São Luís, MA); <u>Ferrovia de Integração Oeste-Leste – FIOL</u> (Barreiras, BA – Salvador, BA; Figueirópolis, TO – São Luís, MA; Figueirópolis, TO – Salvador, BA)
(7) <i>Modal Shift</i> : inclusão de novas ferrovias e capacidades irrestritas dos terminais	2030-2050	Inclusão das novas ferrovias e expansão irrestrita de capacidade para todos os terminais ferroviários e hidroviários (existentes e novos)
(8) Mudanças de navio: <i>Capesize</i>	2030-2050	Alteração do tipo de navio utilizado no sistema, com ajuste nos custos de transporte marítimo e da eficiência energética compatíveis com o <i>Capesize</i>
(9) Sistema de transporte melhorado s/ <i>Capesize</i>	2030-2050	Sinergia dos cenários anteriores: alterações simultâneas dos parâmetros dos cenários (4), (5) e (7).
(10) Sistema de transporte melhorado c/ <i>Capesize</i>	2030-2050	Sinergia dos cenários anteriores: alterações simultâneas dos parâmetros dos cenários (4), (5), (7) e (8).

Fonte: elaborado pelo autor

O cenário denominado de *modal-shift* representa a mudança do modo de transporte do sistema avaliado a partir de dois cenários: inclusão de novas ferrovias, sem alteração na capacidade dos demais terminais ferroviários e hidroviários, de forma a apenas captar os efeitos destas; e, inclusão das novas ferrovias com capacidades irrestritas de infraestrutura ferroviária e hidroviária.

3.5. Especificação das funções objetivo e de avaliação dos resultados

Para a realização das três análises propostas (estimativa das elasticidades, avaliação das mudanças tecnológicas temporalmente e estimativa das Fronteiras de Pareto em uma abordagem multiobjetivo) foram realizadas alterações nas funções objetivo do modelo de *green logistics* formulado, conforme apresentado pela Tabela 9. Para a análise proposta, são necessárias 486 otimizações do modelo matemático.

A primeira análise relacionada às estimativas de elasticidades envolveu a utilização da função objetivo correspondente à minimização dos custos de transporte, especificamente o período de 2020 (cenário base), somente. Ao total foram realizadas 37 otimizações do modelo para gerar as variações necessárias para o cálculo das elasticidades (duas otimizações, por parâmetro definido do modelo, sendo uma variação negativa e outra positiva) e outra otimização referente ao *status* inicial. A segunda análise, que avalia as mudanças tecnológicas e infraestruturais do transporte temporalmente, utilizou a função objetivo relacionada à minimização de custos de transporte, com resultados gerados para todos os cenários (10), em diferentes cortes temporais: 2030, 2040 e 2050.

A terceira análise objetiva identificar as soluções eficientes, para projetar as Fronteiras de Pareto, envolvendo as diferentes funções objetivo do modelo, para o período de 2030-2050, de modo que se possa avaliar os *trade-offs* entre as funções objetivo para uma mesma tecnologia/infraestrutura e estimar os choques das mudanças de tecnologia e infraestruturais em relação ao cenário sem o progresso tecnológico (contrafactual).

São avaliados dois conjuntos de Pareto (vide equações de Fronteira de Pareto). O primeiro deles é a minimização da função objetivo de custo logístico, a qual internaliza o custo das perdas junto ao custo de transporte, e a minimização das emissões de CO₂ para o período de 2030-2050. Tal otimização é realizada utilizando-se o algoritmo proposto em uma abordagem *a priori* pelo método de ϵ -restrito, de forma que a fronteira eficiente é a união das

soluções eficientes dos resultados da minimização de cada função objetivo. Serão geradas as soluções eficientes e a Fronteira de Pareto para cada cenário proposto.

$$\text{Custos vs. Emissões} \begin{cases} \min_{FT} f_4(FT) = \text{logcost}, & \text{s. a: } FT \in S_{GL}, f_2(FT) \leq \varepsilon_{\text{emissions}} \\ \min_{FT} f_2(FT) = \text{emissions}, & \text{s. a: } FT \in S_{GL}, f_4(FT) \leq \varepsilon_{\text{logcost}} \end{cases} \quad (3.48)$$

Após a geração dos resultados, para cada Fronteira de Pareto será selecionada uma solução na Fronteira para ser a referência de comparação dos choques tecnológicos no sistema. Tal ponto, denominado de solução a ser alcançada, será escolhido pelo critério da menor distância euclidiana normalizada em relação ao ponto utopia (u^0 , ponto formado pelos mínimos de cada função objetivo). Na sequência é calculado o efeito do choque da mudança tecnológica ou infraestrutural de cada cenário q (variando do cenário 1, contrafactual, até 10) para cada variável de interesse (custo de transporte, perdas, emissões de CO₂, demanda de combustíveis, intensidade dos diferentes modos de transporte e demanda de caminhões) na solução a ser alcançada, em relação ao cenário sem o progresso tecnológico (contrafactual). Formalmente, a equação do efeito do choque pode ser avaliada na expressão (3.49).

$$\delta_{x,\varphi_q} = \frac{x(p_{\text{flogcost,femissions},\varphi_q}^*)}{x(p_{\text{flogcost,femissions},\varphi_1}^*)} - 1 \quad (3.49)$$

Onde:

δ_{x,φ_q} : é o efeito do choque da mudança tecnológica e/ou infraestrutural na variável de interesse x na sua condição de solução alcançada (p^*) da Fronteira de Pareto (φ_q) em relação à sua solução alcançada na Fronteira de Pareto sem o progresso tecnológico (φ_1), em variação percentual;

$x(p_{\text{flogcost,femissions},\varphi_q}^*)$: é o valor da variável x na solução alcançada (p^*) da Fronteira de Pareto da tecnologia/cenário q entre as funções objetivo de custo logístico e emissões de CO₂;

$x(p_{\text{flogcost,femissions},\varphi_1}^*)$: é o valor da variável x na solução alcançada (p^*) da Fronteira de Pareto da tecnologia/cenário contrafactual (sem progresso tecnológico) entre as funções objetivo de custo logístico e emissões de CO₂.

A segunda análise de otimização multiobjetivo envolve a minimização dos custos logísticos e das perdas, de forma que as Fronteiras de Pareto se deslocam com as mudanças tecnológicas e infraestruturais, conforme apresentado pela equação (3.50).

$$\text{Custos vs. Perdas} \begin{cases} \min_{FT} f_4(FT) = \text{logcost}, & \text{s. a: } FT \in S_{GL}, & f_3(FT) \leq \varepsilon_{\text{losses}} \\ \min_{FT} f_3(FT) = \text{losses}, & \text{s. a: } FT \in S_{GL}, & f_4(FT) \leq \varepsilon_{\text{logcost}} \end{cases} \quad (3.50)$$

A Tabela 9 sumariza a delimitação dos modelos e cenários utilizados para geração dos resultados propostos.

Tabela 9 – Sumário da delimitação dos cenários e modelos para avaliação dos resultados

Análise	Modelo	Período	Nº de otimizações do modelo	Cenários
(1) Estimativas de Elasticidades	$\min_{FT} f_1(FT) = \text{transportationcost}$ s. a: $FT \in S_{GL}$	2020	37	Base, apenas
(2) Avaliação das Mudanças tecnológicas e Infraestruturais Temporalmente	$\min_{FT} f_1(FT) = \text{transportationcost}$ s. a: $FT \in S_{GL}$	2030, 2040 e 2050	10	Todos (10)
	<u>Pareto 1</u> (custo logístico vs. emissões): $\min_{FT} f_4(FT) = \text{logcost}$ s. a: $FT \in S_{GL}$ $f_2(FT) \leq \varepsilon_{\text{emissions}}$	2030-2050	220	Todos (10)
(3) Estimativa das Soluções Eficientes, da Fronteira de Pareto e dos Choques de Mudanças Tecnológicas e Infraestruturais	$\min_{FT} f_2(FT) = \text{emissions}$ s. a: $FT \in S_{GL}$ $f_4(FT) \leq \varepsilon_{\text{logcost}}$			
	<u>Pareto 2</u> (custo logístico vs. perdas): $\min_{FT} f_4(FT) = \text{logcost}$ s. a: $FT \in S_{GL}$ $f_3(FT) \leq \varepsilon_{\text{losses}}$	2030-2050	220	Todos (10)
	$\min_{FT} f_3(FT) = \text{losses}$ s. a: $FT \in S_{GL}$ $f_4(FT) \leq \varepsilon_{\text{logcost}}$			

S_{GL} : espaço da região viável das variáveis do modelo de *green logistics*, agregando as restrições do modelo formulado, equações de (3.13) a (3.40).

Fonte: elaborado pelo autor

Os modelos foram implementados e processados no *General Algebraic Modeling System* – GAMS, envolvendo o método de programação linear, utilizando o *solver* CPLEX.

4. RESULTADOS E DISCUSSÃO

Nesta seção são apresentados os resultados do modelo de *green logistics*, envolvendo alguns conjuntos de análises: (i) estimativa e discussões sobre as elasticidades cruzadas no sistema de transporte para o ano de 2020; (ii) avaliação da otimização do sistema de *green logistics* para soja no período de 2030-2050, envolvendo dez cenários; (iii) estimativa da Fronteira de Pareto em uma análise multiobjetivo a partir da otimização de diferentes funções objetivo; e, por fim, a subseção (iv) desenvolve uma série de reflexões e recomendações sobre estratégias para se atingir a sustentabilidade ao longo do tempo, de forma equacionar os diferentes *trade-offs*.

4.1. Estimativa das elasticidades cruzadas do modelo de *green logistics*

O primeiro conjunto de resultados relacionados envolve as estimativas e análise das elasticidades cruzadas de alguns parâmetros do modelo nas variáveis de interesse do sistema de transporte do modelo calibrado com dados do ano de 2020, envolvendo o modelo de minimização dos custos de transporte. As elasticidades podem ser interpretadas como sendo uma análise de sensibilidade do modelo, na condição ótima, da média de variações de -10% e +10% nos parâmetros sob as variáveis de interesse. A estimativa das elasticidades consistiu, inicialmente, em calcular as variações percentuais nas variáveis de interesse do sistema de transporte, após a sua otimização decorrente de variações (choques) em um determinado parâmetro do modelo, mantendo os demais fixos. De forma específica, a elasticidade do efeito de um determinado parâmetro em determinada variável de interesse foi calculada como sendo a média dos resultados obtidos após a otimização do sistema com a variação de -10% e +10% do parâmetro de interesse. É interessante destacar que os choques dos parâmetros em algumas variáveis são assimétricos, conforme o sentido da variação.

A Tabela 10 apresenta os resultados das elasticidades calculadas a partir da média dos choques dos parâmetros. A interpretação do coeficiente de elasticidade $\xi_{w,k}$ mostra o percentual de variação da variável w quando o parâmetro k varia em 1%. Caso o sinal seja positivo, significa que a variável w varia no mesmo sentido do que a variação do parâmetro k ; caso contrário, a variável w varia no sentido oposto à variação do parâmetro k . Tal tabela consolida o resultado de 37 otimizações do modelo de *green logistics*, de forma que foram realizadas duas otimizações para cada um dos 18 parâmetros avaliados, mais o resultado do cenário base.

Os indicadores mais elásticos ($|\xi_{w,k}| \geq 1$) foram destacados na Tabela 10. É interessante observar que os coeficientes da demanda da Ásia nas variáveis avaliadas são bastante elásticos para algumas variáveis. Por exemplo, o aumento de 1% no parâmetro da demanda da Ásia provoca um aumento de 1,305% na variável de custo total de transporte, um aumento de 1,197% nas emissões de CO₂, um aumento de 0,264% nas perdas durante o transporte, um aumento de 1,346% na demanda de caminhões no país, um aumento de 1,733% na demanda de óleo diesel, um aumento de 0,966% na demanda de óleo combustível (usado para o transporte marítimo), um aumento de 0,621% na demanda (intensidade de transporte) ferroviária, um aumento de 3,476% na demanda (intensidade de transporte) hidroviária, um aumento de 0,966% na demanda (intensidade de transporte) marítima e um aumento de 1,895% na demanda (intensidade de transporte) rodoviária.

A demanda de óleo diesel é bastante afetada pelos componentes de demanda de soja: Ásia (1,733), Europa (0,328) e mercado doméstico (0,430), além também de ser afetada pelo custo do transporte rodoviário até o porto (-0,357) e pelas produtividades operacionais do transporte envolvendo eficiência energética (-0,733) e capacidade de carga do caminhão (-0,703). Especificamente a demanda de óleo combustível, utilizado no transporte marítimo, é bastante sensível à demanda da Ásia (0,966) e à capacidade de carga do navio (-0,761).

O sinal negativo do coeficiente de elasticidade indica um efeito de variação inversamente proporcional entre o parâmetro e a variável. Por exemplo, o coeficiente de eficiência energética do caminhão apresentou uma elasticidade de -0,733 na demanda de óleo diesel, ilustrando que o aumento de 1% na eficiência energética provoca uma redução média de 0,733% no consumo do referido combustível.

Tabela 10 – Elasticidades dos parâmetros ($\xi_{w,k}$) do modelo de *green logistics* sob as variáveis do modelo, para uma variação de $\alpha = \pm 10\%$ nos parâmetros

Parâmetros	Variáveis									
	CUSTO	ECO ₂	PERDAS	Demandas						
				CAMIN	DIES	OCOMB	FER	HID	MAR	ROD
Capacidade dos Terminais Ferroviários	-0,018	-0,026	0,086	-0,259	-0,088	0,000	0,911	0,000	0,000	-0,271
Capacidade dos Terminais Hidroviários	-0,025	-0,011	0,007	-0,031	-0,036	0,000	-0,015	-0,154	0,000	-0,037
Custo do Transporte Ferroviário	0,118	0,021	-0,047	0,192	0,070	0,000	-0,808	0,273	0,000	0,225
Custo do Transporte Hidroviário	0,048	0,043	-0,032	0,171	0,152	0,000	0,063	-1,830	0,000	0,214
Custo do Transporte Marítimo	0,346	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000
Custo do Transporte Rodoviário (dom. e term.)	0,153	0,016	-0,068	0,179	0,057	0,000	-0,573	-0,175	0,000	0,176
Custo do Transporte Rodoviário (porto)	0,343	-0,102	0,189	-0,672	-0,357	0,001	1,506	2,234	0,000	-0,756
Demanda da Ásia	1,305	1,197	0,264	1,346	1,733	0,966	0,621	3,476	0,966	1,895
Demanda da Europa	0,233	0,151	0,061	0,254	0,328	0,073	0,015	1,408	0,073	0,360
Demanda do Mercado Doméstico	0,196	0,128	0,003	0,336	0,430	0,000	-0,014	0,179	0,000	0,517
Eficiência Energética do Transporte Ferroviário	-0,027	-0,047	0,024	-0,056	-0,160	0,000	0,198	0,000	0,000	-0,050
Velocidade Média do Transporte Ferroviário	-0,083	-0,017	0,039	-0,153	-0,057	0,000	0,618	-0,135	0,000	-0,178
Capacidade de Carga dos Navios	-0,260	-0,534	0,000	0,000	0,000	-0,761	0,000	0,000	0,000	0,000
Capacidade de Carga dos Caminhões	-0,439	-0,210	-0,057	-0,790	-0,703	0,000	-0,376	-1,276	0,000	0,281
Eficiência Energética do Transporte Rodoviário	-0,186	-0,219	-0,049	0,188	-0,733	0,000	-0,272	-1,075	0,000	0,217
Jornada de Trabalho do Motorista – T. Rodoviário	-0,158	0,013	-0,036	-0,916	0,047	0,000	-0,236	-0,370	0,000	0,108
Tempos de Car. e Descarregamento do T. Rodov.	0,080	-0,004	0,025	0,291	-0,012	0,000	0,199	0,000	0,000	-0,051
Velocidade Média do Transporte Rodoviário	-0,077	0,000	0,000	-0,661	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000

CUSTO: custo total de transporte; ECO₂: emissões totais de dióxido de carbono; PERDAS: perdas físicas totais nas atividades logísticas; CAMIN: demanda de caminhões para o transporte de soja; DIES: demanda total de óleo diesel; OCOMB: demanda de óleo combustível; FER: intensidade do transporte ferroviário (demanda); HID: intensidade do transporte hidroviário (demanda); MAR: intensidade do transporte marítimo (demanda); ROD: intensidade do transporte rodoviário (demanda). Valores em negrito: indicadores mais elásticos ($|\xi_{w,k}| \geq 1$)

Fonte: resultados da pesquisa

Outra análise interessante envolve as elasticidades de substituição dos modos de transporte a partir de variações nos custos unitários de transporte. O aumento de 1% na matriz dos custos unitários ferroviários provoca uma retração na sua demanda de transporte na ordem de 0,808%, a qual é substituída pelo aumento da demanda do transporte hidroviário em 0,273% e rodoviária em 0,225%. O aumento de 1% na matriz do custo unitário de transporte hidroviário provoca a retração de 1,830% da sua demanda, a qual é substituída pelo aumento de 0,063% na demanda de transporte ferroviário e 0,214% na demanda de transporte rodoviário. Especificamente para o transporte rodoviário com destino ao porto, o aumento de 1% na sua matriz de custo unitário provoca a redução de 0,756% na sua demanda, a qual é transferida pela um aumento da demanda do transporte ferroviário na ordem de 1,506% e do transporte hidroviário em 2,234%. Fica bastante evidente como a demanda por outros modos de transporte é bastante elástica em relação às variações do custo do transporte rodoviário para o porto.

Especificamente envolvendo o custo do transporte rodoviário para o mercado doméstico e terminais, o aumento de 1% no seu custo unitário provoca um aumento da demanda do transporte rodoviário em 0,176% e uma redução na demanda do transporte ferroviário em 0,573 e na demanda hidroviária em 0,175. Tal situação ocorre pelo fato deste tipo de transporte rodoviário ser um bem complementar aos demais modos de transporte e não substituto como é o caso do transporte rodoviário para o porto.

Algumas relações do tipo *trade-off* e *win-win* podem ser visualizadas a partir da Tabela 10, para as variáveis de interesse de custo total de transporte, emissões de CO₂ e perdas. Nesta abordagem, entende-se como sendo um *trade-off* quando se observa que um choque de determinado parâmetro gera variações em sentidos opostos nas variáveis de análise, visualizadas pelos sinais dos coeficientes das elasticidades. Enquanto a relação do tipo *win-win* se configura como um choque em determinado parâmetro que gera variações do mesmo sentido nas variáveis de análise, ou seja, com os mesmos sinais nos coeficientes das elasticidades.

Os *trade-offs* identificados que melhoram os custos totais de transporte e as emissões de CO₂, porém, pioram as perdas: (i) aumento da capacidade dos terminais ferroviários; (ii) aumento da capacidade dos terminais hidroviários; (iii) redução do custo do transporte ferroviário; (iv) redução do custo do transporte hidroviário; (v) aumento da eficiência energética do transporte ferroviário; e, (vi) aumento da velocidade média do transporte ferroviário. Os *trade-offs* identificados que melhoram os custos totais de transporte e as perdas, porém pioram

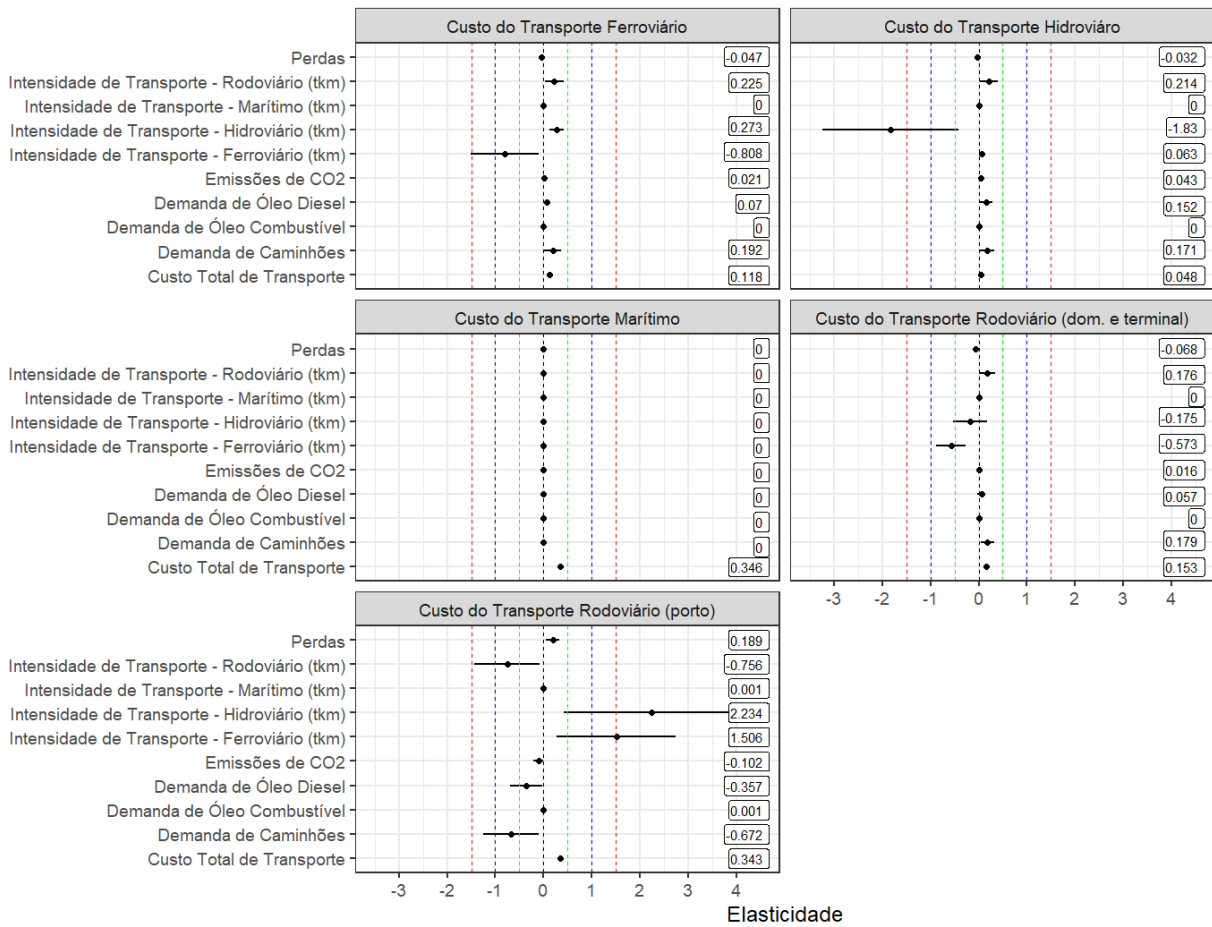
as emissões de CO₂: (i) redução do custo do transporte rodoviário para o porto; (ii) aumento da jornada de trabalho do motorista; e, (iii) aumento da velocidade média do transporte rodoviário.

As principais soluções do tipo *win-win* identificadas: (i) redução da demanda da Ásia; (ii) redução da demanda da Europa; (iii) redução da demanda do mercado doméstico; (iv) aumento da capacidade de carga dos caminhões; e, (v) aumento da eficiência energética do transporte rodoviário.

Tal situação ocorre pelo fato do nível de perdas nas atividades multimodais (integração entre rodovias e ferrovias ou hidrovias) ser superior ao nível de perdas nas atividades de transporte unimodais. Desta forma, ações que fomentem a demanda de transporte por ferrovias ou hidrovias tendem a trazer uma redução dos custos e das emissões, porém aumentam os níveis de perdas durante o transporte do sistema avaliado.

Outra análise desta seção consiste em apresentar os valores obtidos de cada elasticidade para cada variável quando os parâmetros variaram -10% e +10%, ilustrando que a maior parte das elasticidades médias calculadas são simétricas e com uma variação baixa ou mesmo nula. Enquanto outras são assimétricas e com variações elevadas envolvendo os valores ótimos obtidos com as variações nos parâmetros.

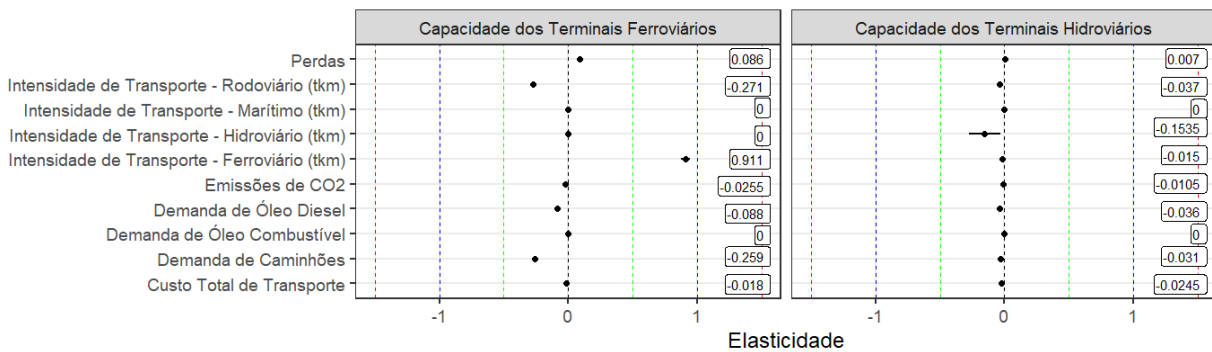
As Figura 19, Figura 20, Figura 21, Figura 22 e Figura 23 apresentam o intervalo de variação das elasticidades para o choque de -10% e +10% de cada parâmetro e seus efeitos nas variáveis de interesse. Quanto maior a faixa de variação (linha horizontal preta), maior é a assimetria do efeito do choque de -10% e de +10%. O ponto presente na faixa representa a média dos efeitos, que é a elasticidade média apresentada. Quando não há faixa de variação (linha horizontal preta), significa que o efeito é simétrico para a variável de interesse tanto para a variação de -10% quanto na de +10% no parâmetro de interesse. Por exemplo, a variação positiva na matriz do custo de transporte ferroviário (vide Figura 19) gerou uma elasticidade de -1,515 para a intensidade de transporte ferroviário, enquanto a variação negativa na matriz do custo de transporte ferroviário gerou uma elasticidade de -0,101 para a intensidade de transporte ferroviário, gerando um valor médio de -0,808.



Legenda: Linha horizontal: representa a faixa de variação da elasticidade a partir dos choques; Ponto: representa o valor médio da elasticidade (calculada como sendo a média do arco); Valores apresentados à direita dos gráficos representam a elasticidade média

Figura 19 – Análise das elasticidades dos parâmetros dos custos unitários de transporte nas variáveis de interesse do modelo de *green logistics*

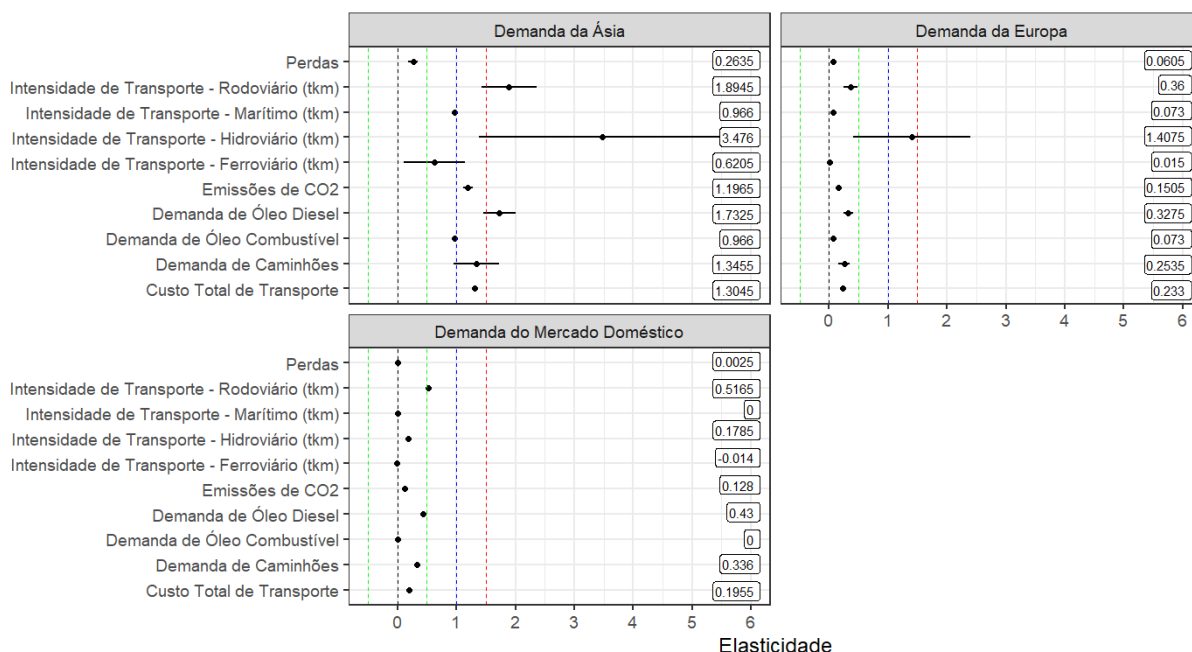
Fonte: resultados da pesquisa



Legenda: Linha horizontal: representa a faixa de variação (arco) da elasticidade a partir dos choques; Ponto: representa o valor médio da elasticidade (calculada como sendo a média do arco); Valores apresentados à direita dos gráficos representam a elasticidade média

Figura 20 – Análise das elasticidades dos parâmetros das capacidades de transporte dos terminais ferroviários e hidroviários nas variáveis de interesse do modelo de *green logistics*

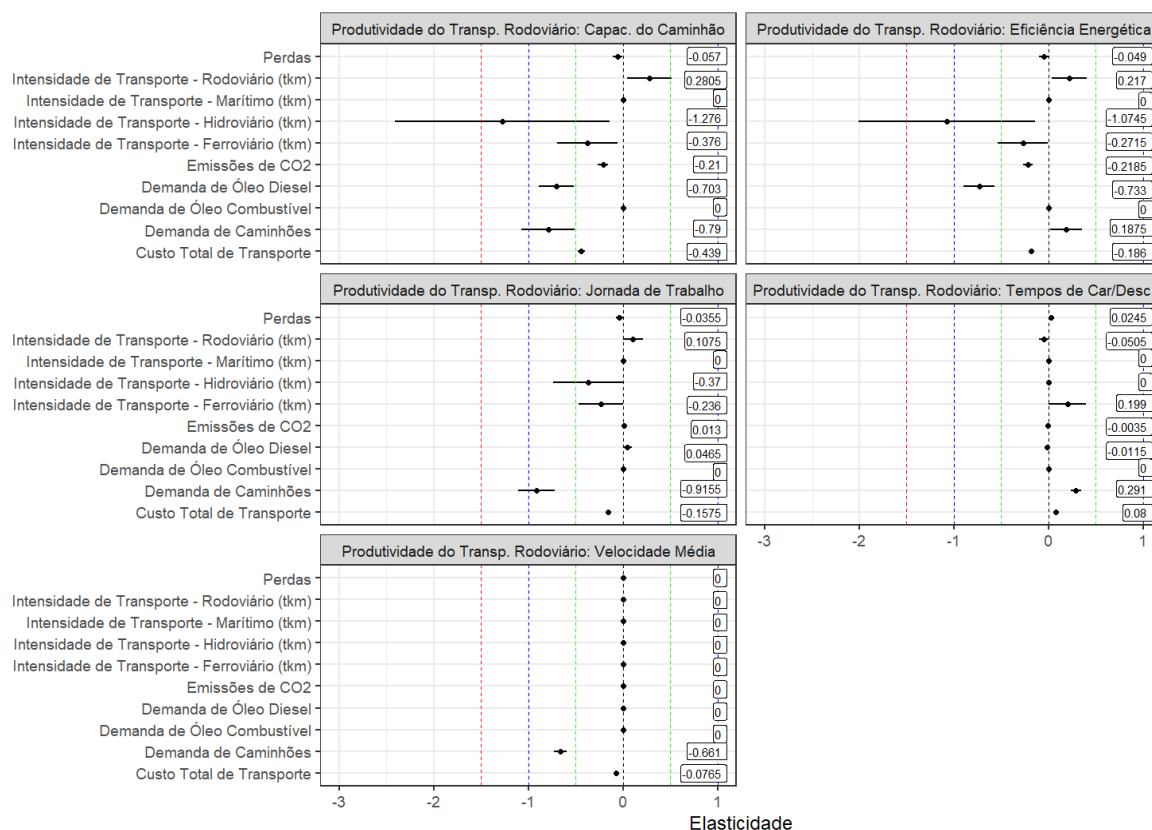
Fonte: resultados da pesquisa



Legenda: Linha horizontal: representa a faixa de variação (arco) da elasticidade a partir dos choques; Ponto: representa o valor médio da elasticidade (calculada como sendo a média do arco); Valores apresentados à direita dos gráficos representam a elasticidade média

Figura 21 – Análise das elasticidades dos parâmetros das demandas de soja na Ásia, Europa e Mercado Doméstico nas variáveis de interesse do modelo de *green logistics*

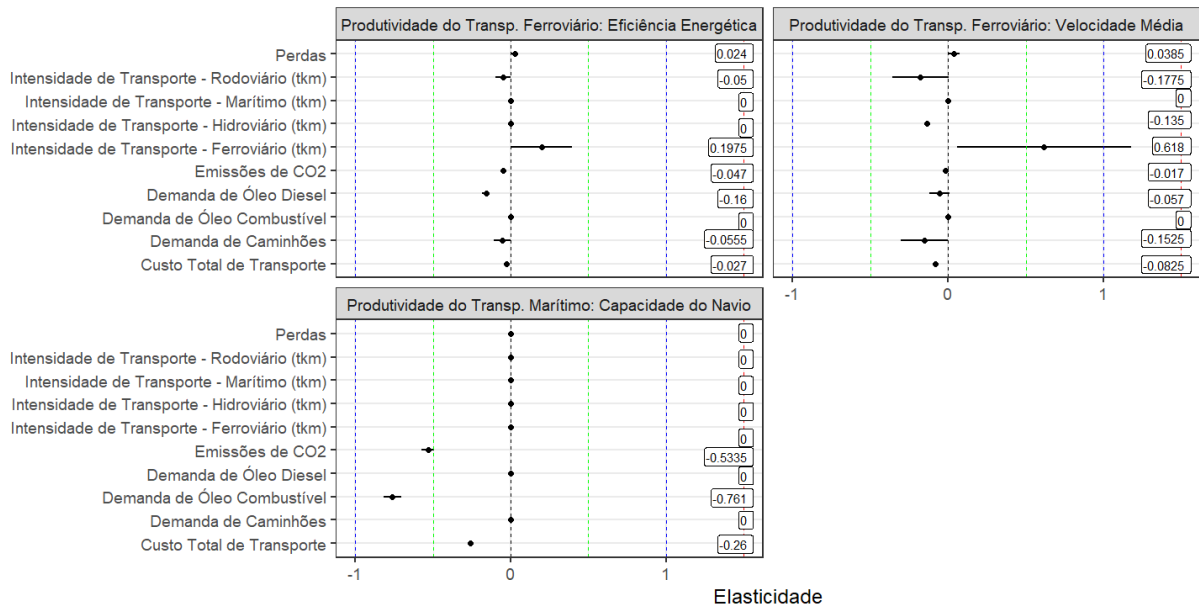
Fonte: resultados da pesquisa



Legenda: Linha horizontal: representa a faixa de variação (arco) da elasticidade a partir dos choques; Ponto: representa o valor médio da elasticidade (calculada como sendo a média do arco); Valores apresentados à direita dos gráficos representam a elasticidade média

Figura 22 – Análise das elasticidades dos parâmetros da produtividade operacional do transporte rodoviário nas variáveis de interesse do modelo de *green logistics*

Fonte: resultados da pesquisa



Legenda: Linha horizontal: representa a faixa de variação (arco) da elasticidade a partir dos choques; Ponto: representa o valor médio da elasticidade (calculada como sendo a média do arco); Valores apresentados à direita dos gráficos representam a elasticidade média

Figura 23 – Análise das elasticidades dos parâmetros da produtividade operacional dos transportes ferroviário e marítimo nas variáveis de interesse do modelo de *green logistics*

Fonte: resultados da pesquisa

Por fim, a Tabela 11 apresenta as potenciais estratégias e políticas que podem ser adotadas para otimizar, no sentido da minimização, algumas variáveis de interesse (custos totais de transporte, emissões de CO₂, perdas nas atividades logísticas e demanda de caminhões) a partir da melhoria dos parâmetros mais sensíveis, que puderam ser aferidos pelos coeficientes de elasticidades. Adotou-se como referência, para cada efeito dos parâmetros nas variáveis, o módulo do coeficiente de elasticidade acima de 0,18.

Tabela 11 – Potenciais estratégias e políticas para minimização de algumas variáveis de interesse a partir de ações nos parâmetros mais sensíveis

Variáveis de interesse	Parâmetros mais sensíveis ($ \xi_{w,k} \geq 0,18$)	Algumas potenciais estratégias e políticas para otimização da variável de interesse (minimização)
Custos Totais de Transporte	Demanda da Ásia (1,305) Capacidade do Caminhão (-0,439) Custo do Transporte Marítimo (0,346) Custo do Transporte Rodoviário p/ porto (0,343) Capacidade dos Navios (-0,260) Demanda da Europa (0,233) Eficiência Energética do Transporte Rodoviário de Cargas (-0,186)	(1) Fomento de novos parceiros comerciais internacionais mais próximos ao Brasil (redução pressão na intensidade de transporte); (2) Fomento à expansão de caminhões maiores em corredores rodoviários mais seguros e com melhor qualidade de via, quando viáveis; (3) Melhorias nas condições viárias; (4) Fomento na redução dos custos do transporte marítimo a partir do aumento da eficiência operacional dos navios, portos e terminais; (5) Fomento da ampliação da profundidade dos canais de acesso e dos berços de atracação dos portos e terminais a partir de investimentos em operações de dragagens, bem como, fomento para investimentos de novos terminais de uso privativo em regiões de águas naturais profundas, de forma a possibilitar o atracamento de navios maiores para exportação de grãos; (6) Fomento na redução dos custos do transporte rodoviário de longa distância para os portos a partir de pacotes tecnológicos que fomentem a melhoria na produtividade operacional, melhoria na qualidade das rodovias brasileiras; e, (7) Uso de novas tecnologias, práticas de <i>eco-driving</i> , renovação de frota e melhorias nas condições viárias visando fomentar o aumento da eficiência energética dos caminhões no transporte de cargas.
Emissões de CO ₂	Demanda da Ásia (1,197) Capacidade dos Navios (-0,534) Eficiência Energética do Transporte Rodoviário de Cargas (-0,219) Capacidade dos Caminhões (-0,210)	(1), (2), (5) e (7);
Perdas	Demanda da Ásia (0,264) Custo do Transporte Rodoviário p/ porto (0,189)	(1), (6) e (8) Fomento do mercado doméstico de processamento de soja como substituição às exportações, principalmente para a Ásia.
Demanda de Caminhões	Demanda da Ásia (1,346) Jornada de Trabalho do Motorista (-0,916) Capacidade do Caminhão (-0,790) Custo do Transporte Rodoviário p/ porto (-0,672) Velocidade Média do Transporte Rodoviário (-0,661) Capacidade dos terminais ferroviários (-0,259) Demanda do Mercado Doméstico (0,336) Tempo de carregamento e descarregamento do transporte rodoviário (0,291) Demanda da Europa (0,254)	(1), (2), (6), (9) Ampliação da jornada de trabalho do motorista de forma a ampliar o tempo disponibilizado de transporte através, por exemplo, do aumento do número de motoristas, respeitando a legislação; (10) Fomento do aumento da velocidade média do transporte rodoviário de cargas a partir de investimento na melhoria das condições das rodovias brasileiras de forma a garantir segurança no trânsito e aumento da produtividade; (11) Ampliação da capacidade de movimentação de grãos nos terminais ferroviários; e, (12) Fomento da melhoria na produtividade operacional nos tempos de carregamento e descarregamento do transporte rodoviário a partir de melhores práticas de gestão e investimentos de tecnologias.

Fonte: elaborado pelo autor

4.2. Análise temporal das mudanças tecnológicas e infraestruturais no modelo de *green logistics*

Nesta seção são apresentados os resultados das mudanças tecnológicas e infraestruturais no modelo de *green logistics* para as diversas variáveis de interesse. A função objetivo utilizada no modelo para a análise destes resultados é a minimização dos custos de transporte, conforme especificada na seção metodológica.

Inicialmente, é apresentado o diagnóstico do sistema para o ano base (referência) de 2020 e as projeções dos valores nominais do cenário contrafactual, conforme apresentado pela Tabela 12. A lógica da projeção da análise do contrafactual é apresentar um cenário de estagnação do progresso tecnológico da infraestrutura e da produtividade de transporte no país, porém com crescimento da produção e da demanda de soja.

O cenário base (2020) identifica os valores nominais do custo médio de transporte de R\$ 142,08 por tonelada de soja, com níveis de emissões de dióxido de carbono da ordem de 68,83 kg de CO₂ por tonelada transportada de soja e perdas no transporte que totalizam 1,1 milhão de toneladas – o equivalente a 0,92% da produção. Além disso, estima-se uma demanda de caminhões da ordem de 56 mil veículos para realizar a logística da soja no país. Outra informação relevante é o indicador “Razão de Transporte/Produção” que mensura a quantidade de soja transportada em relação à quantidade de soja produzida no período. Em função da característica da cadeia de suprimento da soja ser longa – envolvendo o transporte multimodal – a quantidade transportada é cerca de 31% superior à quantidade produzida. Além disso, no cenário de 2020, são apresentadas as distâncias médias de transporte por modo de transporte, bem como, a intensidade de transporte e as demandas de combustível. Estima-se que a logística da soja apresentou uma demanda de 954 mil metros cúbicos de óleo diesel para as atividades de transporte rodoviário, ferroviário e hidroviário, além de 1.852 mil metros cúbicos de óleo combustível para o transporte marítimo. Em termos de *modal-share* (participação do modo de transporte), verifica-se a concentração do transporte rodoviário em 62,4%, do transporte ferroviário em 23,0% e do transporte hidroviário em 14,6%.

Na comparação horizontal envolvendo a série temporal 2030-2050 do contrafactual em relação ao período de referência (2020), a demanda de caminhões aumenta consideravelmente ao longo do período, quase duplicando de tamanho. Do ponto de vista de custos e emissões relativas à produção, verifica-se um aumento. Quanto ao *modal-share*, verifica-se a ampliação da participação do modo do transporte rodoviário frente aos demais. Além disso, observa-se também um crescimento da distância média do transporte rodoviário. Os resultados em formato

tabular semelhantes ao apresentado para o diagnóstico do cenário base e contrafactual podem ser visualizados na seção de Apêndice deste documento para cada um dos cenários avaliados.

Tabela 12 – Indicadores do modelo de *green logistics* para o ano base (2020) e o cenário contrafactual para o período 2030-2050

Agregados	Indicadores	Unidade	Factual	Contrafactual		
			(base)	2030	2040	2050
Indicadores Gerais	Custos de Transporte	R\$ bilhões	17,27	22,64	24,33	25,69
	Custos de Transporte	R\$/t	142,08	143,83	144,36	144,74
	Emissões de CO ₂	milhões de toneladas	8,37	10,98	11,82	12,49
	Emissões de CO ₂	kg de CO ₂ /t de soja	68,83	69,79	70,14	70,36
	Perdas no Transporte	mil toneladas	1.115,20	1.404,91	1.493,24	1.563,85
	Perdas no Transporte	% da produção	0,92%	0,89%	0,89%	0,88%
	Demanda de Caminhões	mil veículos	56,64	80,02	87,91	94,1
	Razão de Transporte/Produção ¹	un.	1,31	1,25	1,24	1,22
Demanda (Intensidade de Transporte)	Rodoviário	bilhões t.km	60,11	85,64	94,41	101,24
	Ferroviário		22,13	22,37	22,42	22,46
	Hidroviário		14,09	15,73	15,1	14,97
	Marítimo		1.400,15	1.813,07	1.941,71	2.044,54
Modal Share ²	Rodoviário	%	62,4%	69,2%	71,6%	73,0%
	Ferroviário		23,0%	18,1%	17,0%	16,2%
	Hidroviário		14,6%	12,7%	11,4%	10,8%
Distância Média de Transporte	Rodoviário	km	494,62	544,16	560,15	570,41
	Ferroviário		842,19	839,29	838,33	837,57
	Hidroviário		1.226,65	1.217,16	1.168,59	1.159,05
Demanda de Combustível	Óleo diesel	mil metros cúbicos	954,65	1.294,87	1.410,07	1.500,18
	Óleo combustível		1.852,00	2.398,18	2.568,34	2.704,34

¹Razão de transporte/produção: Relação entre a quantidade total movimentada no território brasileiro e a quantidade produzida.

²Modal-share: participação dos modos de transporte no território brasileiro calculada como a intensidade de transporte (t.km) em relação ao somatório das intensidades dos transportes rodoviário, ferroviário e hidroviário.

Fonte: resultados da pesquisa

Na análise dos cenários, as comparações apresentadas são realizadas em termos de variação percentual, em uma análise na vertical, comparando a variação do cenário avaliado para um período *t* em relação ao cenário contrafactual para o mesmo período.

A Figura 24 apresenta as variações dos indicadores de interesse nos diferentes cenários avaliados, em relação ao contrafactual, para o período 2030, 2040 e 2050. Observam-se que as intensidades de transporte (demanda de transporte) são as mais sensíveis em termos de variação com as mudanças tecnológicas e infraestruturais, tal como observado na análise das elasticidades discutida na seção anterior. Por exemplo, os impactos nos diferentes cenários para a intensidade de transporte ferroviário variaram de -35% a 152%, enquanto as perdas variaram de -5% a 14%. A intensidade do transporte marítimo apresentou variação quase nula para todos os cenários, em decorrência da existência da demanda mínima a ser atendida no mercado internacional.

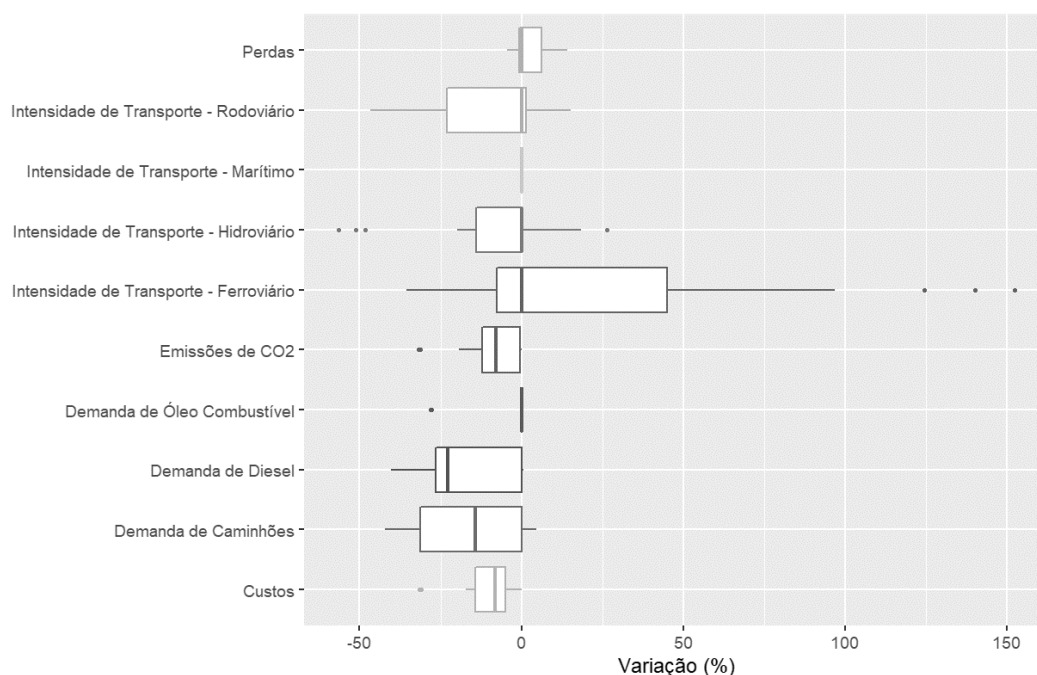


Figura 24 – *Box-plot* das variações observadas nos indicadores de interesse dos cenários avaliados em relação ao cenário contrafactual nos períodos 2030, 2040 e 2050

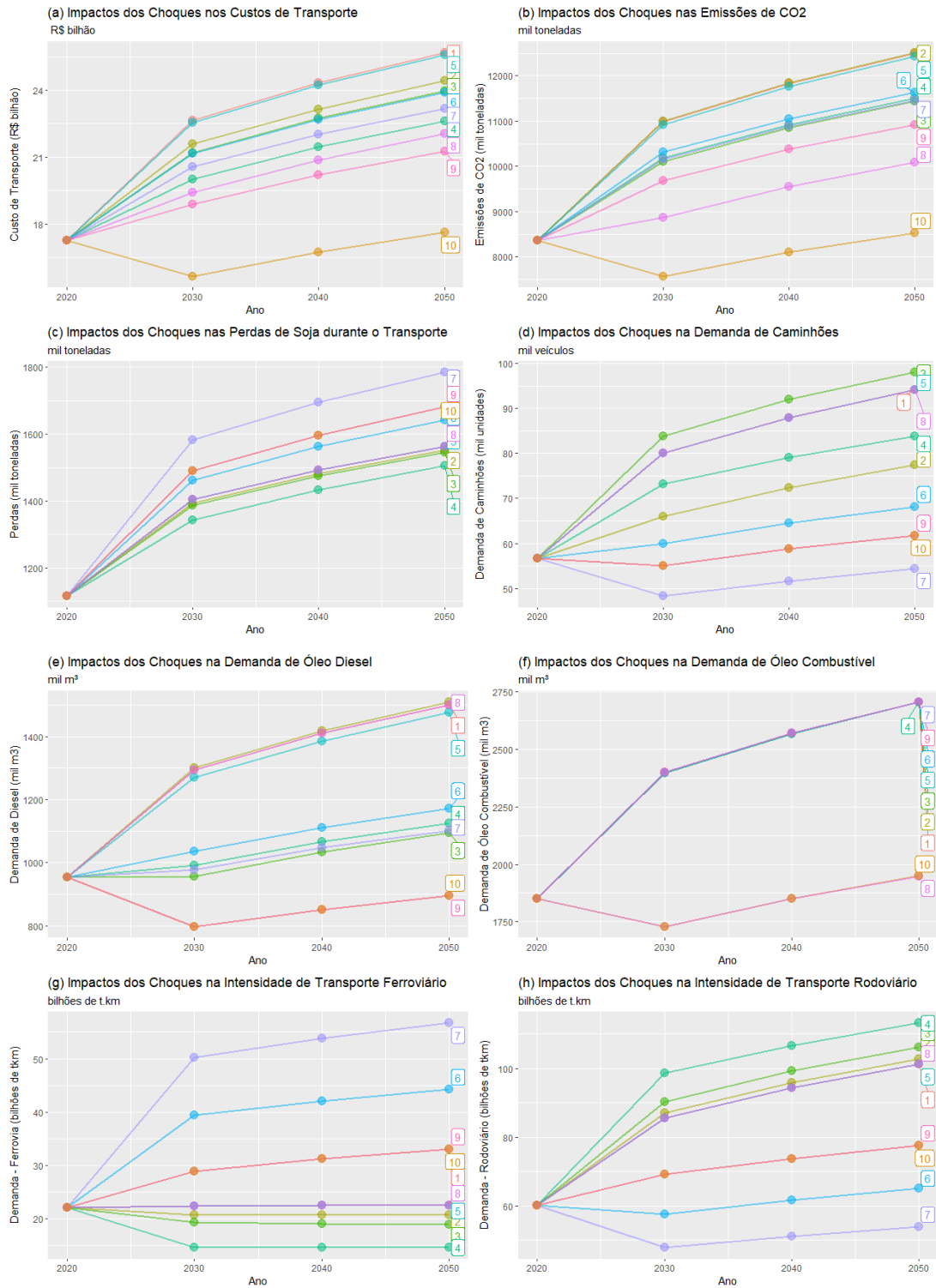
Fonte: resultados da pesquisa

Os resultados dos diferentes cenários no horizonte temporal de 2020, 2030, 2040 e 2050 podem ser visualizados pela Figura 25 para cada variável de interesse (custos de transporte, emissões de CO₂, perdas nas atividades do transporte, demanda de caminhões, demanda de óleo diesel, demanda de óleo combustível e intensidade dos diferentes modos de transporte). O período de 2020 é igual para todos os cenários. Por exemplo, a Figura 25a apresenta a evolução dos custos totais de transporte nos diferentes cenários, ilustrando que o pior cenário possível é o contrafactual (sem progresso tecnológico e infraestrutural) e o melhor é o de melhoria do sistema do transporte com o uso do navio *Capesize* (10), os demais cenários apresentaram resultados intermediários entre os dois extremos.

Tais resultados serão discutidos e apresentados nas próximas subseções, como variações percentuais em relação ao cenário contrafactual para cada um dos períodos, de forma a estimar os choques das mudanças tecnológicas e infraestruturas em relação ao cenário sem o progresso tecnológico.

Cenários Simulados

- (1) Contrafactual
- (2) Produtividade do TRC: Tempos de car. e desc.
- (3) Produtividade do TRC: Eficiência energética
- (4) Produtividade do TRC: Pacote tecnológico
- (5) Produtividade Ferroviária: Eficiência energética
- (6) *Modal Shift*: novas ferrovias
- (7) *Modal Shift*: novas ferrovias e capacidade irrestritas de infra.
- (8) Substituição de navio: *Capesize*
- (9) Sistema de Transporte Melhorado s/ *Capesize*
- (10) Sistema de Transporte Melhorado c/ *Capesize*



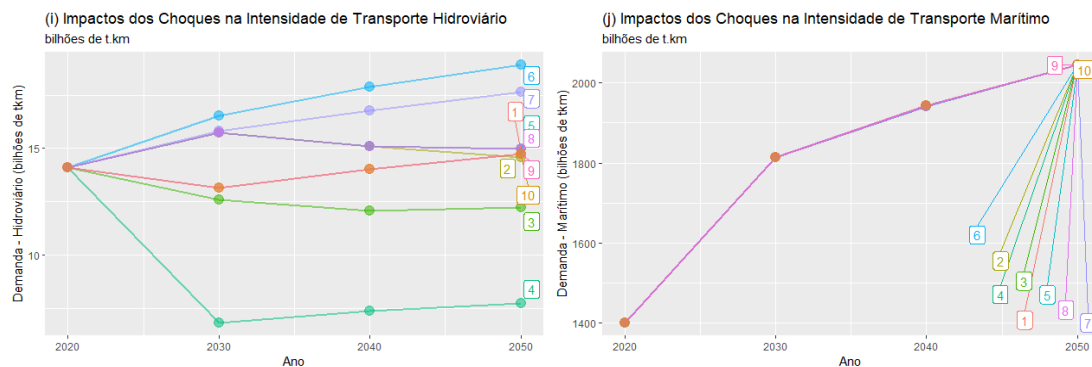


Figura 25 – Comportamento das variáveis de interesse nos diferentes cenários simulados para o horizonte temporal de 2020, 2030, 2040 e 2050

Fonte: resultados da pesquisa

4.2.1. Impactos nos custos de transporte

Os impactos do custo total de transporte no horizonte temporal 2030-2050 podem ser visualizados pela Tabela 13, envolvendo os diferentes cenários. O cenário que apresentou a maior redução de custos em relação ao contrafactual (sem progresso tecnológico) foi o do sistema de transporte melhorado com a utilização de navios do tipo *Capesize* (10), o qual apresentou reduções de custos superiores a 30% nos diferentes cortes temporais avaliados. O segundo cenário de maior redução de custo no horizonte temporal analisado é o sistema de transporte melhorado sem o uso do *Capesize* (9), que trouxe reduções de custos acima de 16%, demonstrando a importância da sinergia de estratégias voltadas em melhorar o sistema de transporte do país, relacionadas à produtividade operacional (melhoria nas eficiências energéticas do transporte rodoviário e ferroviário, nos tempos de carregamento e descarregamento do transporte rodoviário) e aos investimentos em promover a expansão de capacidades de modos alternativos ao rodoviário.

Somente a estratégia de substituição do tipo de navio *Panamax* para o *Capesize* (cenário 9), em decorrência da economia de escala decorrente da diluição dos custos unitários de transporte com a maior quantidade de carga transportada por navio, traz uma redução superior a 14% (tal fato ocorre em função da elevada demanda internacional pela soja brasileira, principalmente pela Ásia, incorrendo em elevadas distâncias percorridas no transporte marítimo).

A estratégia de *modal-shift* envolvendo novas ferrovias (6) apresentou reduções de custos superiores a 6% em relação ao cenário contrafactual nos diferentes períodos. Ao incorporar os efeitos combinados das novas ferrovias com expansão irrestrita de capacidade de

ferrovias e hidrovias no país, a redução dos custos de transporte ultrapassa 9% em relação ao cenário sem progresso tecnológico e infraestrutural.

Quanto aos impactos de melhorias na produtividade operacional, observa-se que a estratégia de menor impacto – inclusive de todos os cenários avaliados – é a de aumento da eficiência energética da ferrovia (5), uma redução de custo de 0,4%. A redução do tempo de carregamento do transporte rodoviário (2) apresentou reduções superiores a 4,5%, ilustrando a importância de tecnologias voltadas para mitigação das filas e para o aumento da eficiência nas atividades de carregamento e descarregamento dos veículos. O aumento da eficiência energética do transporte rodoviário (3) apresentou reduções de custos superiores a 6%, evidenciando a importância de tecnologias que promovam o aumento da eficiência energética, práticas de *eco-driving* e melhorias nas condições viárias de transporte no país. O pacote tecnológico do transporte rodoviário (4), que envolve a sinergia de melhoria nos tempos de carregamentos/descarregamento e da eficiência energética, apresentou reduções de custos superiores a 11%.

Tabela 13 – Impactos no custo total de transporte de soja no período de 2030-2050 em relação ao cenário contrafactual das diferentes estratégias

Cenários	Impacto dos Cenários em relação ao Contrafactual (%)		
	2030	2040	2050
(2) Produtividade do TRC: tempos	-4,7%	-4,8%	-4,9%
(3) Produtividade do TRC: eficiência energética	-6,4%	-6,5%	-6,6%
(4) Pacote Tecnológico do TRC	-11,6%	-11,8%	-12,0%
(5) Produtividade da Ferrovia: eficiência energética	-0,4%	-0,4%	-0,4%
(6) <i>Modal Shift</i> : novas ferrovias	-6,6%	-6,8%	-6,9%
(7) <i>Modal Shift</i> : novas ferrovias e capacidades de infraestrutura irrestritas	-9,2%	-9,5%	-9,8%
(8) Mudança de navio: <i>Capesize</i>	-14,3%	-14,3%	-14,2%
(9) Sistema de transporte melhorado (sem <i>Capesize</i>)	-16,6%	-17,0%	-17,2%
(10) Sistema de transporte melhorado (com <i>Capesize</i>)	-31,0%	-31,2%	-31,4%

Fonte: resultados da pesquisa

4.2.2. Impactos nas emissões de CO₂

No horizonte temporal de análise, as emissões de dióxido de carbono na logística da soja brasileira foram mitigadas nos diversos cenários avaliados, com exceção do aumento da produtividade do transporte rodoviário a partir da redução dos tempos de carregamento e descarregamento (2), que ampliou as emissões, em decorrência de ter sido reduzido o custo do transporte rodoviário e fomentado mais o seu uso, em substituição aos outros modos de transporte menos poluentes (vide a seção dos impactos na intensidade de transporte). Mais especificamente ainda, a estratégia de maior mitigação, tal como para redução de custos, é o

sistema de transporte melhorado com substituição de navio pelo *Capesize* (10), com reduções superiores a 30%. Somente a substituição de navio do cenário contrafactual (8), que utiliza o *Panamax*, pelo *Capesize*, provoca uma redução da ordem de 19% nas emissões de CO₂, mitigação superior inclusive à de melhoria em toda a produtividade operacional do transporte rodoviário e ferroviário somado com a expansão das capacidades de infraestrutura ferroviária e hidrovia e com novas ferrovias. Tal fato ocorre em função da elevada intensidade do transporte marítimo em decorrência da concentração espacial de demanda nos países asiáticos. A Tabela 14 apresenta os resultados consolidados.

A inclusão de novas ferrovias (6) tem potencial para reduzir as emissões em no mínimo 6% com relação ao cenário contrafactual analisado. Com capacidades irrestritas de todos os terminais ferroviários e hidroviários – incluindo as novas infraestruturas – o potencial de mitigação aumenta para pelo menos 7,5%, podendo atingir a magnitude de 8,3% em 2050.

Quanto às estratégias de melhoria na produtividade operacional, fica bastante evidente o papel da ampliação da eficiência energética do transporte rodoviário (3) para redução das emissões de CO₂, que podem ser reduzidas em pelo menos 8% com relação ao contrafactual.

Tabela 14 – Impactos nas emissões de dióxido de carbono na logística da soja no período de 2030-2050 em relação ao cenário contrafactual das diferentes estratégias

Cenários	Impacto dos Cenários em relação ao Contrafactual (%)		
	2030	2040	2050
(2) Produtividade do TRC: tempos	0,2%	0,2%	0,2%
(3) Produtividade do TRC: eficiência energética	-8,0%	-8,3%	-8,5%
(4) Pacote Tecnológico do TRC	-7,2%	-7,6%	-7,9%
(5) Produtividade da Ferrovia: eficiência energética	-0,6%	-0,5%	-0,5%
(6) <i>Modal Shift</i> : novas ferrovias	-6,1%	-6,6%	-6,8%
(7) <i>Modal Shift</i> : novas ferrovias e capacidades de infraestrutura irrestritas	-7,5%	-8,0%	-8,3%
(8) Mudança de navio: <i>Capesize</i>	-19,3%	-19,2%	-19,2%
(9) Sistema de transporte melhorado (sem <i>Capesize</i>)	-11,8%	-12,3%	-12,6%
(10) Sistema de transporte melhorado (com <i>Capesize</i>)	-31,2%	-31,5%	-31,8%

Fonte: resultados da pesquisa

4.2.3. Impactos nas perdas das atividades logísticas

Os impactos nas perdas das atividades logísticas envolvendo as diferentes estratégias simuladas são conflitantes com as demais variações observadas anteriormente, inclusive tal *trade-off* foi explorado na seção anterior. A estratégia com o maior potencial de redução de perdas é o pacote tecnológico do transporte rodoviário (4), que inclui melhorias na eficiência energética e a redução do tempo total de carregamento e descarregamento, atingindo a magnitude de redução de 3,8% a 4,3% das perdas, dependendo do período de análise, em relação ao contrafactual. Os destaques de conflitos com as estratégias *win-win* em termos de

maior redução de emissões de CO₂ e custos de transporte são as de melhoria do sistema do transporte sem o *Capesize* (9) e melhoria do sistema de transporte com o *Capesize* (10), os quais aumentam as perdas em no mínimo 6%. Tal fato decorre de que atividades multimodais possuem um nível de perda maior do que atividades unimodais, em função da existência de perdas no transporte rodoviário das regiões produtoras aos terminais, das perdas nos terminais e das perdas durante o transporte ferroviário ou hidroviário. Inclusive, os cenários de expansão de infraestrutura com as novas ferrovias (6) e capacidades de transporte ferroviário e hidroviário ilimitados (7) apontam para o crescimento do nível das perdas em relação ao contrafactual, que variou de 4% até 14,1%. As estratégias de melhoria da eficiência energética da ferrovia e substituição do tipo de navio para *Capesize* não surtiram efeitos nas perdas durante o transporte. Os resultados podem ser visualizados na Tabela 15.

Tabela 15 – Impactos nas perdas nas atividades logísticas de soja no período de 2030-2050 em relação ao cenário contrafactual das diferentes estratégias

Cenários	Impacto dos Cenários em relação ao Contrafactual (%)		
	2030	2040	2050
(2) Produtividade do TRC: tempos	-0,8%	-0,7%	-0,7%
(3) Produtividade do TRC: eficiência energética	-1,2%	-1,3%	-1,2%
(4) Pacote Tecnológico do TRC	-4,3%	-4,0%	-3,8%
(5) Produtividade da Ferrovia: eficiência energética	0,0%	0,0%	0,0%
(6) <i>Modal Shift</i> : novas ferrovias	4,0%	4,6%	5,0%
(7) <i>Modal Shift</i> : novas ferrovias e capacidades de infraestrutura irrestritas	12,6%	13,5%	14,1%
(8) Mudança de navio: <i>Capesize</i>	0,0%	0,0%	0,0%
(9) Sistema de transporte melhorado (sem <i>Capesize</i>)	6,1%	6,9%	7,5%
(10) Sistema de transporte melhorado (com <i>Capesize</i>)	6,1%	6,9%	7,5%

Fonte: resultados da pesquisa

4.2.4. Impactos na demanda de caminhões

Os impactos na demanda de caminhões são elevados em relação ao cenário contrafactual, dependendo da estratégia avaliada. Conforme apresentado pela Tabela 16, o cenário de maior redução da demanda de caminhões é o de expansão da infraestrutura de transporte ferroviário e hidroviário de forma irrestrita e com a inclusão das novas ferrovias (7), de forma que a queda na demanda varia de 39,7% a 42,2%, dependendo do período. Tanto a melhoria do sistema de transporte sem mudança de navio (9) quanto a mudança de navio para *Capesize* (10) provêm reduções na demanda de caminhões de no mínimo 31%. Em relação às estratégias de melhorias nos indicadores de produtividade operacional do transporte rodoviário, percebe-se que a redução do tempo total de carregamento e descarregamento (2) mitiga a demanda de caminhões na ordem de 17%, enquanto a melhoria da eficiência energética (3) promove um crescimento da demanda de caminhões na ordem de 4%. O efeito combinado de

mudança de tempo e eficiência energética no transporte rodoviário a partir de um pacote de tecnologia (3) gera um efeito de redução da demanda de caminhões entre 8,6% e 10,9% A melhoria da eficiência energética do transporte ferroviário (6) e a substituição do navio para um de maior capacidade (8) alteraram a demanda por caminhões no sistema.

Tabela 16 – Impactos na demanda de caminhões para o transporte de soja no período de 2030-2050 em relação ao cenário contrafactual das diferentes estratégias

Cenários	Impacto dos Cenários em relação ao Contrafactual (%)		
	2030	2040	2050
(2) Produtividade do TRC: tempos	-17,5%	-17,7%	-17,8%
(3) Produtividade do TRC: eficiência energética	4,7%	4,6%	4,2%
(4) Pacote Tecnológico do TRC	-8,6%	-10,1%	-10,9%
(5) Produtividade da Ferrovia: eficiência energética	0,0%	0,0%	0,0%
(6) <i>Modal Shift</i> : novas ferrovias	-25,0%	-26,6%	-27,6%
(7) <i>Modal Shift</i> : novas ferrovias e capacidades de infraestrutura irrestritas	-39,7%	-41,2%	-42,2%
(8) Mudança de navio: <i>Capesize</i>	0,0%	0,0%	0,0%
(9) Sistema de transporte melhorado (sem <i>Capesize</i>)	-31,3%	-33,1%	-34,4%
(10) Sistema de transporte melhorado (com <i>Capesize</i>)	-31,3%	-33,1%	-34,4%

Fonte: resultados da pesquisa

4.2.5. Impactos na demanda de combustível

Os impactos decorrentes das avaliações das estratégias dos cenários simulados na demanda de óleo Diesel, utilizado para o transporte rodoviário, ferroviário e hidroviário para a movimentação da soja, para o período de 2030-2050, em relação ao cenário contrafactual, podem ser observados na Tabela 17. Os cenários com as maiores reduções da demanda de óleo Diesel ocorrem com a melhoria do sistema de transporte com ou sem a substituição de navios (9 e 10), com reduções de 38,5% a 40,3%. A substituição do tipo de navio não afeta a demanda do referido combustível no sistema. A expansão do sistema de transporte ferroviário, incluindo capacidades irrestritas (6 e 7), mitigam a demanda do óleo Diesel na ordem de 20% a 26,5%. Em relação ao aumento da eficiência energética do transporte ferroviário (5) verifica-se uma pequena variação negativa na demanda, da ordem de 1,6% a 1,9%, diferentemente do que ocorre com o aumento da eficiência energética do transporte rodoviário (3), o qual mitiga as emissões na ordem de 26,2% a 27%. A melhoria no tempo total de carregamento e descarregamento nas atividades do transporte rodoviário provoca um pequeno aumento na demanda do combustível, em decorrência do fomento da demanda do transporte rodoviário a partir da redução do custo de transporte, sem interferir diretamente em algum tipo de parâmetro de eficiência energética. O pacote tecnológico do transporte rodoviário (4), que capta os efeitos de melhorias de eficiência energética e tempos de carregamento e descarregamento, reduz a demanda de óleo Diesel em no mínimo 26% ao longo do período de análise.

Tabela 17 – Impactos na demanda de combustível (óleo diesel) transporte de soja no período de 2030-2050 em relação ao cenário contrafactual das diferentes estratégias

Cenários	Impacto dos Cenários em relação ao Contrafactual (%)		
	2030	2040	2050
(2) Produtividade do TRC: tempos	0,5%	0,5%	0,6%
(3) Produtividade do TRC: eficiência energética	-26,2%	-26,6%	-27,0%
(4) Pacote Tecnológico do TRC	-23,4%	-24,4%	-25,0%
(5) Produtividade da Ferrovia: eficiência energética	-1,9%	-1,7%	-1,6%
(6) <i>Modal Shift</i> : novas ferrovias	-20,0%	-21,2%	-21,9%
(7) <i>Modal Shift</i> : novas ferrovias e capacidades de infraestrutura irrestritas	-24,5%	-25,7%	-26,5%
(8) Mudança de navio: <i>Capesize</i>	0,0%	0,0%	0,0%
(9) Sistema de transporte melhorado (sem <i>Capesize</i>)	-38,5%	-39,6%	-40,3%
(10) Sistema de transporte melhorado (com <i>Capesize</i>)	-38,5%	-39,6%	-40,3%

Fonte: resultados da pesquisa

A demanda de óleo combustível, utilizado na navegação marítima para o transporte de soja, apresenta impactos em termos de redução nos cenários que envolvem substituições do tipo de navio para o *Capesize* (8 e 10), com variações negativas na demanda na ordem de 28%, em decorrência do ganho de escala de eficiência energética com o uso de navios maiores, conforme apresentado pela Tabela 18.

Tabela 18 – Impactos na demanda de combustível (óleo combustível) transporte de soja no período de 2030-2050 em relação ao cenário contrafactual das diferentes estratégias

Cenários	Impacto dos Cenários em relação ao Contrafactual (%)		
	2030	2040	2050
(2) Produtividade do TRC: tempos	0,0%	0,0%	0,0%
(3) Produtividade do TRC: eficiência energética	0,0%	0,0%	0,0%
(4) Pacote Tecnológico do TRC	0,0%	0,0%	0,0%
(5) Produtividade da Ferrovia: eficiência energética	0,0%	0,0%	0,0%
(6) <i>Modal Shift</i> : novas ferrovias	0,0%	0,0%	0,0%
(7) <i>Modal Shift</i> : novas ferrovias e capacidades de infraestrutura irrestritas	0,0%	0,0%	0,0%
(8) Mudança de navio: <i>Capesize</i>	-28,0%	-28,0%	-28,0%
(9) Sistema de transporte melhorado (sem <i>Capesize</i>)	0,0%	0,0%	0,0%
(10) Sistema de transporte melhorado (com <i>Capesize</i>)	-27,9%	-27,9%	-27,9%

Fonte: resultados da pesquisa

4.2.6. Impactos na intensidade (demanda) de transporte

A intensidade de transporte é uma medida de demanda de transporte, envolvendo a ponderação entre quantidade movimentada e distância percorrida para cada modo de transporte. A Tabela 19 apresenta os impactos na intensidade de transporte para os diferentes modos no período de referência. Diferentemente dos outros indicadores avaliados, as intensidades de transporte apresentam variações mais elevadas para ambos os sentidos, negativo e positivo, quando comparado ao cenário contrafactual.

A estratégia simulada que apresentou maior variação positiva na intensidade do transporte rodoviário foi a implantação do pacote tecnológico do transporte rodoviário (4), com melhorias simultâneas na eficiência energética e no tempo total de carregamento e descarregamento, com aumento na faixa de 11,9% a 15,1%, conforme o período de referência. Tal situação ocorre pelo fato de o pacote tecnológico provocar uma redução do custo de transporte, incorrendo em um aumento da demanda de transporte rodoviário em substituição aos demais modos de transporte para a movimentação de soja no sistema. No extremo oposto, os cenários de expansão da infraestrutura de transporte com as novas ferrovias (6) e capacidade irrestritas de ferrovias e hidrovias (7) reduzem a demanda do transporte rodoviário na ordem de 32,9% a 46,7%, em decorrência da substituição do modo principal de transporte. A mudança do tipo de navio para o transporte (8) não trouxe impactos para a intensidade de transporte rodoviário. As estratégias de melhoria do sistema de transporte com ou sem substituição de navios (9 e 10) provocam uma retração na intensidade de transporte rodoviário entre 19,2% e 23,4%.

No caso do transporte ferroviário, a sua intensidade de transporte é ampliada em relação ao cenário contrafactual nos cenários de expansão do sistema ferroviário com as novas ferrovias (6) e com capacidades irrestritas de ferrovias e hidrovias no sistema de transporte (7), com aumentos que variam de 76,0% a 152,5%. No extremo oposto, o pacote tecnológico do transporte rodoviário (4) reduziu a demanda da ferrovia na ordem de 13 a 15,7%, em decorrência da substituição da sua demanda por caminhões, em função da redução do custo de transporte rodoviário. As substituições do tipo de navio não trouxeram impactos na intensidade de transporte ferroviário.

Especificamente ainda sobre o transporte hidroviário, as estratégias com maiores variações positivas da intensidade de transporte são a de inclusão das novas ferrovias (6) e da expansão irrestrita de capacidade de infraestrutura ferroviária e hidroviária (7), com variações de 0,5% a 26,3%. Por outro lado, o cenário com as maiores retrações na demanda de hidrovias no país ocorre com o pacote tecnológico do transporte rodoviário (4), com variações de 48,3% a 56,6%. Os cenários de melhoria no tempo total de carregamento e descarregamento dos caminhões (2) e mudança do tipo de navio (8) não trouxeram impactos diretos nas variações de demanda hidroviária, em relação ao cenário contrafactual.

A intensidade do transporte marítimo não sofre variações nas estratégias avaliadas, pelo fato de a função objetivo de modelo matemático minimizar os custos logísticos sujeito à demanda mínima do mercado internacional. Desta forma, tanto variações de custos no

transporte interno do país quanto do custo de transporte marítimo não afetaram a demanda de transporte marítimo pelo fato da existência da condição mínima de atendimento da demanda dos países asiáticos e europeus, que é uma restrição atuante do modelo.

Tabela 19 – Impactos na intensidade de transporte dos diferentes modos para movimentação de soja no período de 2030-2050 em relação ao cenário contrafactual

Cenários	Impacto dos Cenários em relação ao Contrafactual (%)		
	2030	2040	2050
Rodoviário			
(2) Produtividade do TRC: tempos	1,6%	1,5%	1,6%
(3) Produtividade do TRC: eficiência energética	5,5%	5,3%	4,8%
(4) Pacote Tecnológico do TRC	15,1%	13,0%	11,9%
(5) Produtividade da Ferrovia: eficiência energética	0,0%	0,0%	0,0%
(6) <i>Modal Shift</i> : novas ferrovias	-32,9%	-34,6%	-35,6%
(7) <i>Modal Shift</i> : novas ferrovias e capacidades de infraestrutura irrestritas	-44,2%	-45,8%	-46,7%
(8) Mudança de navio: <i>Capesize</i>	0,0%	0,0%	0,0%
(9) Sistema de transporte melhorado (sem <i>Capesize</i>)	-19,2%	-21,8%	-23,4%
(10) Sistema de transporte melhorado (com <i>Capesize</i>)	-19,2%	-21,8%	-23,4%
Ferrovário			
(2) Produtividade do TRC: tempos	-7,7%	-7,7%	-7,8%
(3) Produtividade do TRC: eficiência energética	-13,7%	-15,2%	-15,7%
(4) Pacote Tecnológico do TRC	-35,1%	-35,3%	-35,4%
(5) Produtividade da Ferrovia: eficiência energética	0,0%	0,0%	0,0%
(6) <i>Modal Shift</i> : novas ferrovias	76,0%	87,5%	96,8%
(7) <i>Modal Shift</i> : novas ferrovias e capacidades de infraestrutura irrestritas	124,5%	140,2%	152,5%
(8) Mudança de navio: <i>Capesize</i>	0,0%	0,0%	0,0%
(9) Sistema de transporte melhorado (sem <i>Capesize</i>)	29,0%	38,9%	47,0%
(10) Sistema de transporte melhorado (com <i>Capesize</i>)	29,0%	38,9%	47,0%
Hidroviário			
(2) Produtividade do TRC: tempos	0,0%	0,0%	-2,5%
(3) Produtividade do TRC: eficiência energética	-19,9%	-19,9%	-18,3%
(4) Pacote Tecnológico do TRC	-56,6%	-51,2%	-48,3%
(5) Produtividade da Ferrovia: eficiência energética	0,0%	0,0%	0,0%
(6) <i>Modal Shift</i> : novas ferrovias	5,2%	18,5%	26,3%
(7) <i>Modal Shift</i> : novas ferrovias e capacidades de infraestrutura irrestritas	0,5%	11,1%	17,7%
(8) Mudança de navio: <i>Capesize</i>	0,0%	0,0%	0,0%
(9) Sistema de transporte melhorado (sem <i>Capesize</i>)	-16,3%	-7,1%	-1,6%
(10) Sistema de transporte melhorado (com <i>Capesize</i>)	-16,3%	-7,1%	-1,6%
Marítimo			
(2) Produtividade do TRC: tempos	0,0%	0,0%	0,0%
(3) Produtividade do TRC: eficiência energética	0,0%	0,0%	0,0%
(4) Pacote Tecnológico do TRC	0,0%	0,0%	0,0%
(5) Produtividade da Ferrovia: eficiência energética	0,0%	0,0%	0,0%
(6) <i>Modal Shift</i> : novas ferrovias	0,1%	0,1%	0,1%
(7) <i>Modal Shift</i> : novas ferrovias e capacidades de infraestrutura irrestritas	0,1%	0,1%	0,1%
(8) Mudança de navio: <i>Capesize</i>	0,0%	0,0%	0,0%
(9) Sistema de transporte melhorado (sem <i>Capesize</i>)	0,1%	0,1%	0,1%
(10) Sistema de transporte melhorado (com <i>Capesize</i>)	0,1%	0,1%	0,1%

Fonte: resultados da pesquisa

Por fim, outro resultado importante de ser diagnosticado, envolvendo a intensidade de transporte, diz respeito às mudanças nas distâncias percorridas para os diferentes modos de transporte. Conforme inicialmente comentado, a intensidade de transporte é o produto entre a quantidade transportada e a distância percorrida de cada modo. A Figura 26 apresenta a relação entre a distribuição da quantidade transportada acumulada de soja e a distância percorrida para os diferentes modos de transporte envolvendo os cenários contrafactuais de 2050 (Figura 26a) e o cenário de *modal-shift* considerando as novas ferrovias e as capacidades irrestritas de ferrovias e hidrovias em 2050 (Figura 26b). Neste contexto, verifica-se a distância média percorrida do sistema se reduz com a expansão da oferta de infraestrutura de ferrovias e hidrovias no sistema. No cenário contrafactual, por exemplo, por volta de 80% da quantidade total acumulada de soja transportada embarcou em uma distância de até 1.030 quilômetros (linha preta contínua), enquanto que no cenário de *modal-shift*, 80% da quantidade total de soja transportada embarcou em uma distância de até 742 quilômetros, em decorrência de uma redução da distância dos diferentes modos de transporte, principalmente do transporte rodoviário, o qual se acumulou mais rapidamente em distâncias menores (linha tracejada).

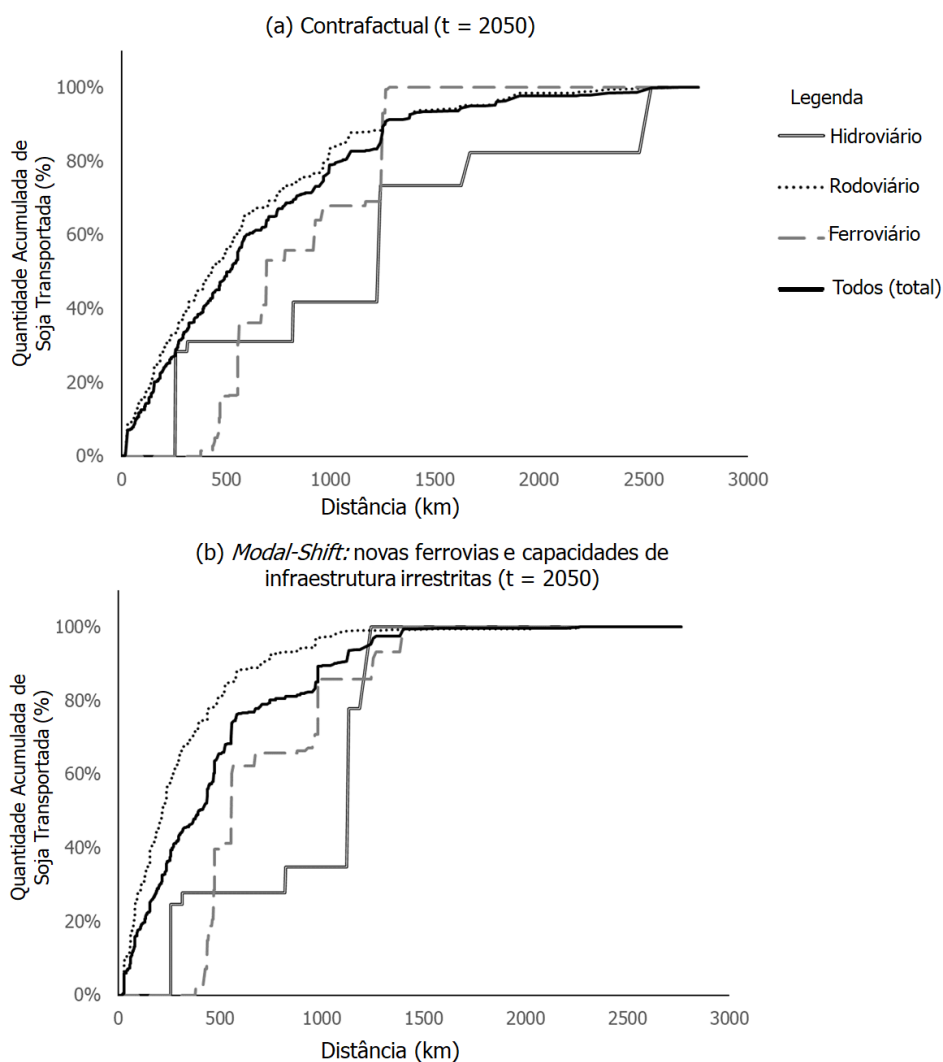


Figura 26 – Distribuição entre a quantidade transportada acumulada e a distância percorrida nos diferentes modos de transporte em cenários selecionados (t = 2050)

Fonte: resultados da pesquisa

As expansões de capacidade dos terminais ferroviários e hidroviários promoveram também uma concentração de embarcações em distâncias mais próximas das regiões de produção de soja, reduzindo a intensidade do transporte rodoviário, principalmente nos fluxos entre as regiões de produção e os terminais. Por exemplo, no cenário contrafactual, 80% da quantidade acumulada de soja transportada no sistema embarcou em uma distância no modo de transporte rodoviário de até 992 quilômetros, enquanto no cenário de *modal-shift* houve uma redução desta distância para 490 quilômetros. Quanto maior a acumulação da quantidade transportada de soja em curtas distâncias (crescimento rápido pelo canto superior esquerdo do gráfico), menor é a intensidade do transporte (consequentemente, menores os níveis de custos e de emissões de dióxido de carbono do sistema de transporte).

4.3. Soluções eficientes e Fronteiras de Pareto das mudanças tecnológicas e infraestruturais

O objetivo desta seção é identificar as soluções eficientes, para projetar as Fronteiras de Pareto, envolvendo as diferentes funções objetivo do modelo, para o período de 2030-2050, de modo que se possa avaliar *os trade-offs* entre as funções objetivo de minimização de custos logísticos e emissões de dióxido de carbono para uma mesma tecnologia e estimar os efeitos dos choques das mudanças de tecnologia em relação ao cenário sem progresso tecnológico (contrafactual).

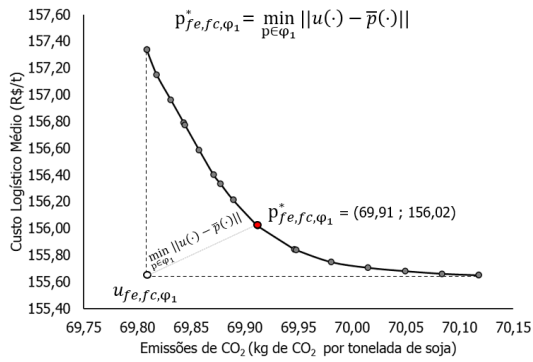
A segunda análise de otimização multiobjetivo envolve a minimização dos custos logísticos e das perdas, de forma a avaliar os deslocamentos das Fronteiras de Pareto com as mudanças tecnológicas e infraestruturais.

4.3.1. Multiobjetivo: minimização dos custos logísticos e minimização das emissões de CO₂

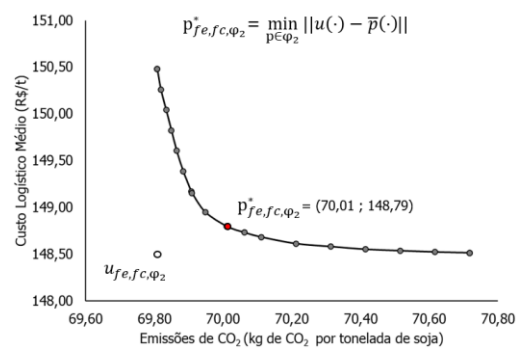
Nesta subseção são apresentadas as soluções eficientes e as Fronteiras de Pareto para as duas funções objetivo de minimização dos custos logísticos e minimização das emissões de CO₂, envolvendo o período de 2030-2050, conforme a abordagem *a priori* utilizando o método ε -restrito pelo algoritmo especificado no capítulo referente ao método da pesquisa.

A Figura 27 apresenta o conjunto das dez fronteiras geradas a partir dos diferentes cenários. Ilustrando, como exemplo, no cenário contrafactual (sem progresso tecnológico, φ_1), na Figura 27a, o ponto utopia é determinado por (u_{fe,fc,φ_1}) que representa o ponto que minimiza simultaneamente as funções objetivo de custo logístico e emissões, o que obviamente é uma solução inviável. Pela análise da Fronteira de Pareto é evidente o *trade-off* existente entre minimizar custo e minimizar emissões, inclusive a geometria da fronteira se altera conforme os cenários, alguns se aproximam mais do ponto utopia do que outros. Ainda na análise do contrafactual, a minimização dos custos logísticos gera um custo médio de R\$ 155,65 por tonelada e um nível de emissão médio de 70,11 kg de CO₂ por tonelada de soja transportada, enquanto a minimização das emissões gera um nível médio de 69,80 kg de CO₂ e um custo médio de R\$ 157,34 por tonelada. Ou seja, trocar a solução de mínimo custo logístico traz um ganho de 0,44% na redução das emissões de CO₂ em detrimento de um aumento de custo de 1,09%. Tais níveis de trocas entre os mínimos das funções objetivo tendem a aumentar conforme as mudanças tecnológicas e infraestruturais no sistema. Por exemplo, no cenário 10 (que agrega todas as mudanças tecnológicas e infraestruturais), a troca da função de mínimo custo reduz em 4,43% as emissões de CO₂ em detrimento de um aumento de custo de 3,60%.

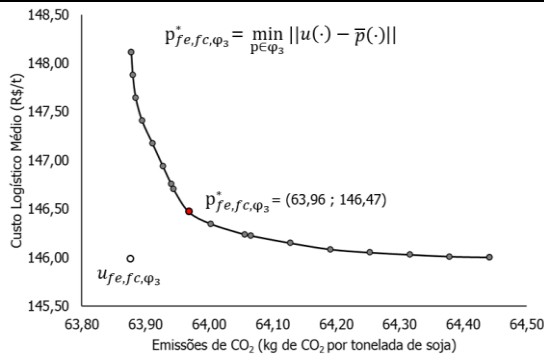
(a) Contrafactual (2030-2050): φ_1



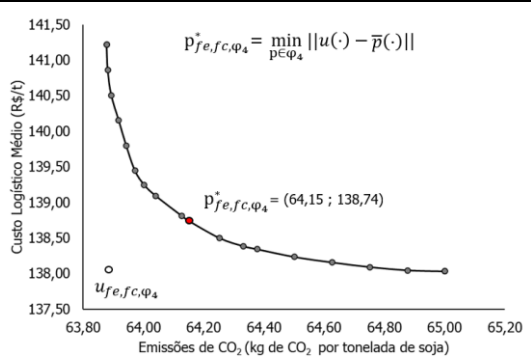
(b) Melhoria na Produtividade do Transp. Rodoviário – Tempo de carregamento/descarregamento: φ_2



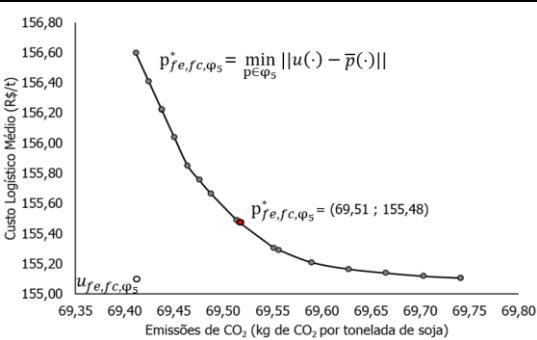
(c) Melhoria na Eficiência Energética do Transp. Rodoviário: φ_3



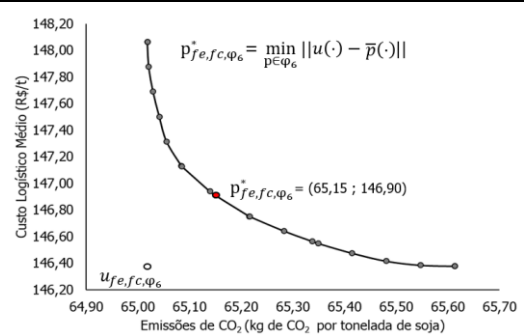
(d) Pacote Tecnológico do Transp. Rodoviário (Tempo de carregamento/ descarregamento e eficiência energética): φ_4



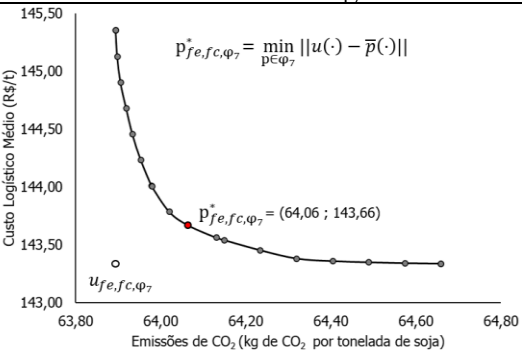
(e) Melhoria na Eficiência Energética do Transporte Ferroviário: φ_5



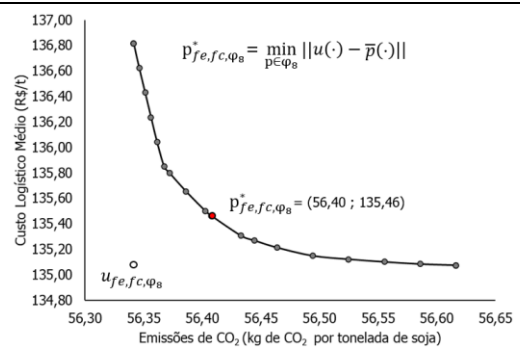
(f) Modal Shift – Inclusão de Novas Ferrovias: φ_6



(g) Modal Shift – Novas ferrovias e Capacidades irrestritas das ferrovias e hidrovias: φ_7



(h) Substituição de Navio p/ Capesize: φ_8



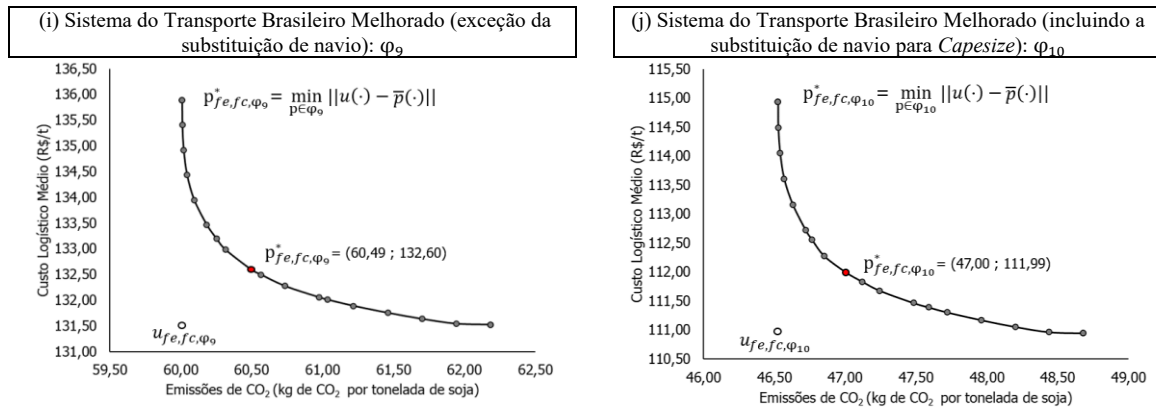


Figura 27 – Soluções eficientes e Fronteiras de Pareto para os cenários de mudanças tecnológicas e infraestruturais: min-min custo logístico e emissões de CO₂

Fonte: resultados da pesquisa

A Figura 28 apresenta o comparativo das Fronteiras de Pareto geradas para os diferentes cenários avaliados. Ficam bastante evidenciados os efeitos das mudanças tecnológicas e infraestruturais na geração de novas soluções dominantes que deslocam simultaneamente o custo logístico (considerando o custo internalizado das perdas) e as emissões de CO₂, em relação ao cenário contrafactual, sem o progresso tecnológico (φ_1). A tecnologia (φ_{10}) referente ao cenário que implementa todas as mudanças tecnológicas e infraestruturais no sistema de transporte traz um deslocamento de aproximadamente 30% nos custos logísticos e nas emissões de CO₂, apresentando soluções eficientes que dominam todas as demais. Por outro lado, o nível tecnológico (φ_5), que amplia a eficiência energética das ferrovias, apresentou o menor deslocamento simultâneo das funções objetivo. Outro resultado de destaque é o (φ_2), referente às tecnologias que alteram o tempo total de carregamento e descarregamento dos veículos. Houve um deslocamento da Fronteira de Pareto apenas no sentido vertical (redução de custos), em relação ao contrafactual (sem progresso tecnológico).

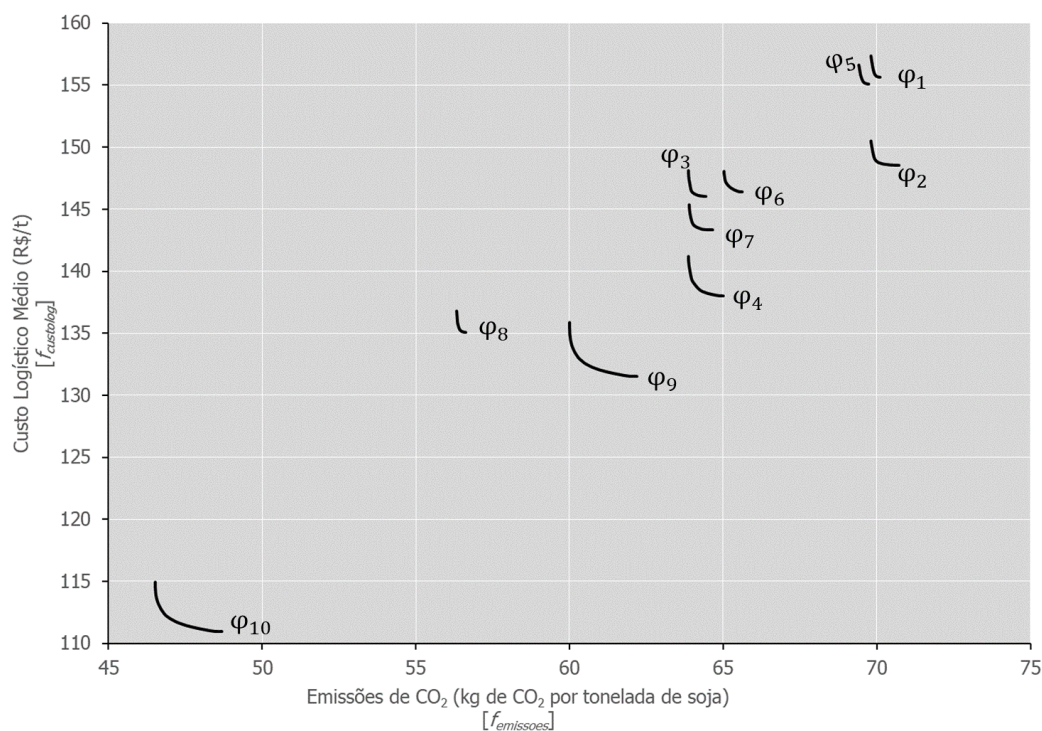


Figura 28 – Fronteiras de Pareto das diferentes mudanças tecnológicas e infraestruturas no transporte entre custos logísticos e emissões de dióxido de carbono

Fonte: resultados da pesquisa

O próximo resultado envolve a identificação dos efeitos das mudanças tecnológicas e infraestruturais em todas as variáveis de interesse, não somente emissões e custos, as quais foram bem ilustradas nos gráficos bidimensionais das funções objetivo. Os efeitos dos choques tecnológicos e infraestruturais (δ_{x,φ_i}) nas variáveis de interesse, os quais comparam as variações da solução a ser alcançada de cada fronteira em relação ao mesmo ponto para a fronteira sem o progresso tecnológico, pode ser visualizado na Tabela 20.

Tabela 20 – Efeitos dos choques tecnológicos e infraestruturais nas variáveis de interesse no período 2030-2050 (min-min custos logísticos e emissões de dióxido de carbono)

Variáveis	Respostas aos choques das mudanças tecnológicas e infraestruturais								
	φ_2	φ_3	φ_4	φ_5	φ_6	φ_7	φ_8	φ_9	φ_{10}
CUSTOL	-4,6%	-6,1%	-11,1%	-0,3%	-5,8%	-7,9%	-13,2%	-15,0%	-28,2%
ECO ₂	0,1%	-8,5%	-8,2%	-0,6%	-6,8%	-8,4%	-19,3%	-13,5%	-32,8%
PERDAS	-0,2%	-0,1%	-2,1%	0,0%	5,5%	13,1%	0,0%	7,8%	7,6%
DCAMIN	-18,1%	0,8%	-14,0%	-0,1%	-29,8%	-43,4%	-0,1%	-43,8%	-43,5%
DDIESEL	0,5%	-27,6%	-26,7%	-1,9%	-22,0%	-27,2%	0,0%	-43,8%	-43,7%
DCOMB	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%	-0,1%	0,0%	-28,0%	0,0%	-27,9%
DRODO	1,2%	1,1%	7,5%	-0,1%	-38,4%	-49,6%	-0,1%	-37,8%	-37,4%
DFERRO	-4,7%	-4,9%	-31,3%	0,5%	107,0%	149,5%	0,5%	92,3%	90,9%
DHIDRO	-5,0%	-1,7%	-5,0%	-0,2%	-1,8%	-4,9%	0,0%	-5,2%	-5,2%
DMARITIMO	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%

φ_2 : Produtividade: tempo de carregamento e descarregamento do caminhão; φ_3 : Eficiência energética do caminhão; φ_4 : Pacote tecnológico do TRC - produtividade do tempo e eficiência energética; φ_5 : Eficiência energética da ferrovia; φ_6 : *Modal-shift*: novas ferrovias; φ_7 : *Modal-shift*: novas ferrovias e expansão irrestritas de ferrovias e hidrovias; φ_8 : Substituição do navio no transporte marítimo para o *Capsize*; φ_9 : Sistema de transporte melhorado, sem o *Capsize*; φ_{10} : Sistema de transporte melhorado, com o *Capsize*

Fonte: resultados da pesquisa

A mudança tecnológica decorrente da melhoria de todo o sistema de transporte, incluindo a substituição dos navios de *Panamax* para *Capesize* (φ_{10}), gerou uma solução *win-win* para as variáveis de custos logísticos (CUSTOL) e emissões (ECO₂), as quais apresentaram reduções de 28,2% e 32,8% respectivamente, em seus níveis comparados ao cenário sem progresso tecnológico. Porém, as perdas de soja nas atividades logísticas (PERDAS) aumentaram em 7,6%, mesmo considerando a internalização dos custos das perdas na função objetivo, gerando um *trade-off* de custos logísticos, emissões e perdas. Tal aumento do nível das perdas ocorreu em função do maior uso de ferrovias e hidrovias, os quais perdem mais do que o transporte rodoviário. As reduções na demanda de caminhões (DCAM), demanda de óleo diesel (DDIESEL) e intensidade do transporte rodoviário (DRODO) foram significativas, mais de 35%. A demanda de óleo diesel, por exemplo, reduziu 43,7%. No caso do transporte marítimo, a demanda por óleo combustível foi reduzida em quase 28%. Por outro lado, a intensidade do transporte ferroviário (DFERRO) quase duplicou no período. No caso do transporte hidroviário, houve uma queda na intensidade do transporte (DHIDRO), em função do ganho de competitividade de corredores multimodais ferroviários.

A substituição do navio para o *Capesize* não é algo trivial, pelo fato de demandar mudanças na infraestrutura dos portos ou mesmo desenvolver novos terminais que tenham profundidades suficientes para atracá-los e desatracá-los integralmente. A mudança tecnológica de todo o sistema de transporte, sem a substituição dos navios (φ_9), apresentou resultados interessantes também quanto às variáveis de interesse. As diferenças ocorrem nos níveis de redução dos custos e emissões, em relação ao outro cenário (φ_{10}), que caem pela metade – os demais indicadores permanecem muito próximos. Isso se deve ao fato do *Capesize* promover economias de escala tanto no custo e quanto nas emissões. Por exemplo, no cenário que avalia apenas a substituição de navio para o *Capesize* (φ_8), fica bastante evidente a redução dos custos e das emissões na ordem de 13% e 19%, respectivamente, sem apresentar quase alguma variação nas intensidades dos diferentes modos de transporte. A economia com o óleo combustível é de 28%.

Em uma análise apenas das variáveis custos logísticos, emissões e perdas (as principais do modelo), apenas um cenário gerou soluções *win-win* com variações negativas em todas as variáveis: pacote tecnológico do TRC - produtividade do tempo e eficiência energética (φ_4). Tal mudança tecnológica reduziu os custos em 11,1%, as emissões de CO₂ em 8,2% e as perdas em 2,10%. Dois cenários foram indiferentes na redução das perdas, porém trouxeram reduções de custos e emissões: melhoria da eficiência energética da ferrovia (φ_5) e substituição do navio

no transporte marítimo para o Capesize (φ_8). As demais mudanças tecnológicas e infraestruturais são do tipo *trade-off*, com conflitos entre as variáveis de interesse.

O pior resultado para os custos foi a mudança do incremento da eficiência energética do transporte ferroviário (φ_5), a qual trouxe uma redução de apenas 0,3%. Especificamente para as emissões de dióxido de carbono, o pior cenário foi o de melhoria dos tempos de carregamento e descarregamento (φ_2), que aumentou a emissão em 0,1%. A mudança tecnológica que gerou o pior resultado para as perdas foi a de inclusão de novas ferrovias com a rede de transporte ferroviário e hidroviário irrestrita em termos de capacidade (φ_7), o qual ampliou as perdas em 13,1% em relação ao cenário sem o progresso tecnológico, em função do deslocamento do transporte das rodovias para as ferrovias.

Por fim, a Tabela 21 apresenta os valores nominais das principais variáveis do modelo de *green logistics*, emissões médias de dióxido de carbono, custo logístico médio e perdas médias de cada cenário de mudança tecnológico e infraestrutural avaliado, no ponto de ótimo do objetivo a ser alcançado de cada Fronteira de Pareto, no período de 2030-2050. O destaque é o elevado nível de perda, em relação aos demais, no cenário infraestrutural de inclusão de novas ferrovias e capacidades irrestritas de multimodalidade (φ_7), que ultrapassa 1% da produção. Apesar de um percentual baixo de perda, a produção anual ultrapassa cem milhões de toneladas, com projeções de produção em 2050 de quase 180 milhões de toneladas.

Tabela 21 – Níveis de emissões médias de dióxido de carbono, custo logístico médio nominal e perdas para cada ponto escolhido nas diferentes Fronteiras de Pareto dos cenários

Cenários	Emissões médias (kg de CO ₂ /t soja)	Custo logístico médio (R\$/t)	Perdas (% da produção)
φ_1	69,91	156,02	0,886%
φ_2	70,01	148,79	0,884%
φ_3	63,96	146,47	0,885%
φ_4	64,15	138,74	0,867%
φ_5	69,51	155,48	0,886%
φ_6	65,15	146,90	0,935%
φ_7	64,06	143,66	1,002%
φ_8	56,40	135,46	0,886%
φ_9	60,49	132,60	0,955%
φ_{10}	47,00	111,99	0,953%

φ_1 : Contrafactual (sem progresso tecnológico); φ_2 : Produtividade: tempo de carregamento e descarregamento do caminhão; φ_3 : Eficiência energética do caminhão; φ_4 : Pacote tecnológico do TRC - produtividade do tempo e eficiência energética; φ_5 : Eficiência energética da ferrovia; φ_6 : *Modal-shift*: novas ferrovias; φ_7 : *Modal-shift*: novas ferrovias e expansão irrestritas de ferrovias e hidroviás; φ_8 : Substituição do navio no transporte marítimo para o Capesize; φ_9 : Sistema de transporte melhorado, sem o Capesize; φ_{10} : Sistema de transporte melhorado, c/ o Capesize

Fonte: resultados da pesquisa

4.3.2. Multiobjetivo: minimização dos custos logísticos e minimização das perdas nas atividades logísticas

Diferentemente das análises realizadas anteriormente, nesta subseção é apenas apresentado o conjunto das Fronteiras de Pareto para as duas funções objetivo de minimização dos custos logísticos e de minimização das perdas das atividades logísticas para o período 2030-2050 (vide Figura 29). As curvas de Pareto individualizadas das mudanças tecnológicas e infraestruturais, envolvendo a escolha do ponto de solução a ser alcançada, podem ser consultadas na seção de Apêndices.

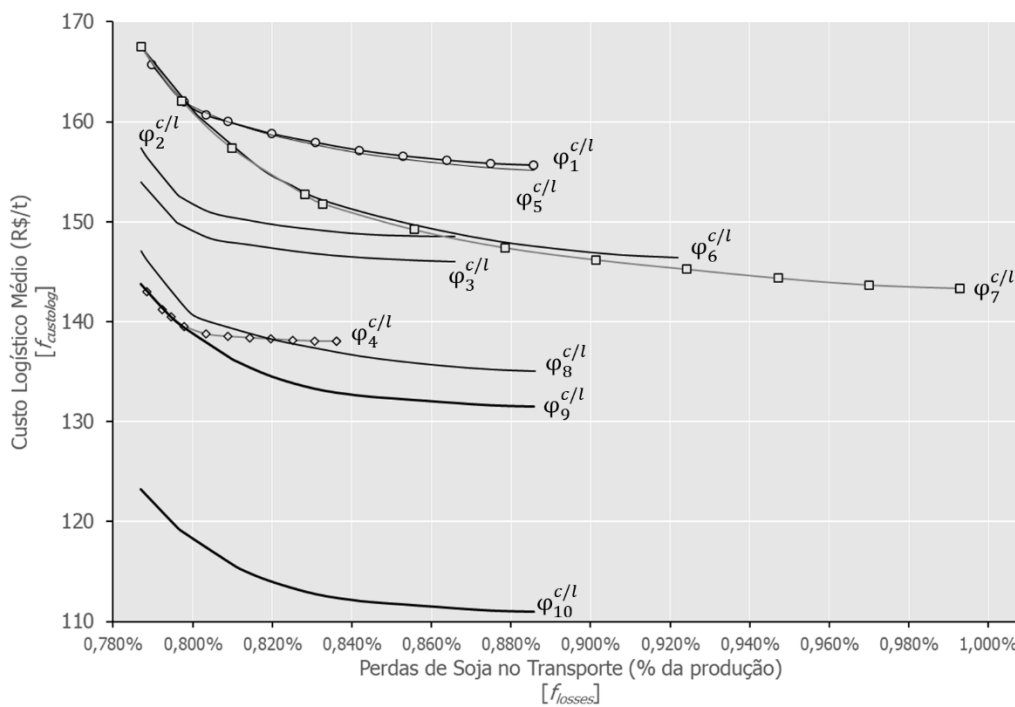


Figura 29 – Fronteiras de Pareto das diferentes mudanças tecnológicas e infraestruturais no transporte entre custos logísticos e perdas no transporte

Fonte: resultados da pesquisa

Os níveis de troca entre os mínimos são maiores nesta relação de custos logísticos e perdas, do que na relação de custos logísticos e emissões. No cenário contrafactual, relacionado à ausência de progresso tecnológico, trocar a solução de mínimo custo logístico reduz as perdas em 10,84%, porém aumenta o custo em 6,49%. Outro aspecto de destaque é que as mudanças tecnológicas e infraestruturais no sistema não deslocam as fronteiras no sentido de redução das perdas – apenas no sentido de redução de custos - demonstrando que os níveis mínimos de perda no sistema, independentemente da tecnologia, é próximo de 0,787%. Obviamente que mudanças tecnológicas nos padrões de perdas em cada atividade logística podem alterar esta dinâmica.

A Tabela 22 apresenta as variações dos pontos escolhidos de cada fronteira de Pareto (solução alcançada) dos cenários avaliados da otimização biobjetivo de custos-perdas, em relação à minimização biobjetivo de custos-emissões. Fica notório que com a minimização de custos-perdas, os níveis de perdas são reduzidos em patamares que superam 10%, em relação à minimização de custos-emissões, em detrimento de um pequeno aumento dos custos logísticos (de 0% a 3,9%). Porém, o maior destaque desta mudança na análise multiobjetivo está relacionado às emissões. A minimização do biobjetivo custos-perdas provoca um aumento expressivo nas emissões de CO₂ em relação à outra otimização. Inclusive, o maior aumento do nível de emissão de CO₂ (7,4%) ocorre na mudança tecnológica que gerou a melhor solução *win-win* na otimização de custos-emissões.

Tabela 22 – Variação (%) dos níveis de ótimo de perdas, custos logísticos e emissões na min. do biobjetivo perdas-custos logísticos em relação à min. biobjetivo emissões-custos logísticos

Cenários	Perdas	Custos Logísticos	Emissões de CO ₂
φ ₁	-8,7%	2,6%	4,8%
φ ₂	-9,1%	1,5%	5,1%
φ ₃	-9,1%	1,3%	2,5%
φ ₄	-7,3%	0,0%	2,3%
φ ₅	-7,5%	2,0%	4,2%
φ ₆	-11,0%	3,6%	6,0%
φ ₇	-14,6%	3,9%	5,5%
φ ₈	-7,5%	2,1%	4,7%
φ ₉	-14,1%	1,4%	5,7%
φ ₁₀	-14,0%	1,8%	7,4%

φ₁: Contrafactual (sem progresso tecnológico); φ₂: Produtividade: tempo de carregamento e descarregamento do caminhão; φ₃: Eficiência energética do caminhão; φ₄: Pacote tecnológico do TRC - produtividade do tempo e eficiência energética; φ₅: Eficiência energética da ferrovia; φ₆: *Modal-shift*: novas ferrovias; φ₇: *Modal-shift*: novas ferrovias e expansão irrestritas de ferrovias e hidrovias; φ₈: Substituição do navio no transporte marítimo para o *Capesize*; φ₉: Sistema de transporte melhorado, sem o *Capesize*; φ₁₀: Sistema de transporte melhorado, c/ o *Capesize*

Fonte: resultados da pesquisa

Desta forma, verifica-se que a inclusão da minimização das perdas na promoção da *green logistics* gera resultados antagônicos ao fomento de um sistema de transporte mais limpo, conforme evidenciados nos diversos resultados, por priorizar o transporte rodoviário, em detrimento dos outros modos de transporte menos poluentes, porém que geram maiores perdas. Desta forma, entende-se que a primeira abordagem (minimização custos logísticos-emissões) seja a mais interessante para avaliar estratégias e impactos das mudanças tecnológicas e infraestruturais para fomentar a logística verde. Mais ainda, os custos logísticos adotados incorporaram em partes a preocupação das perdas, em função da internalização destas na estrutura de custo.

4.4. Recomendações de políticas que promovam a logística verde

A partir do conjunto de resultados analisados fica evidente a importância de determinadas mudanças tecnológicas e infraestruturais que alteram a intensidade de impactos nas diversas variáveis para o fomento de uma logística verde, principalmente quando geram soluções *win-win* (ganha-ganha) em termos de redução dos custos logísticos e descarbonização, a partir da redução da intensidade do transporte rodoviário e do consumo energético dos combustíveis.

Desta forma, para o Brasil promover uma logística da soja e usufruir dos benefícios teóricos quantificados no cenário de melhoria do sistema de transporte, incluindo a substituição de navio (φ_{10}), o qual apresentou as soluções dominadoras de todos os cenários avaliados na minimização do biobjetivo de custos logísticos e emissões, é preciso formular uma série de políticas públicas e empresariais para os níveis operacionais, tático e estratégico. O sistema de transporte melhorado inclui mudanças nos padrões de produtividade de carregamento e descarregamento, melhorias na eficiência energética do transporte rodoviário e ferroviário, inclusão de novas ferrovias, expansão da capacidade das ferrovias e hidrovias existentes, além da substituição dos navios para exportação.

Especificamente, sobre os tempos de carregamento e descarregamento nas operações do transporte rodoviário, o setor de grãos no país apresenta níveis elevados de tempos, principalmente para rotas portuárias, incorrendo em custos adicionais e maior demanda de caminhões no sistema de transporte. Tecnologias, sistemas de gestão e de controle dos tempos são fundamentais para mitigar tais reduções de tempos. No campo de política pública, podem ser recomendadas medidas mais eficazes e efetivas na legislação existente sobre estadia, bem como, fomentar práticas de modernização dos portos e terminais portuários para práticas de agendamento de cargas de forma eficiente. No campo das políticas empresariais, estratégias relacionadas à gestão de custos, tecnologias embarcadas de telemetria, controle de indicadores, podem ser interessantes para a mitigação dos tempos. Outro aspecto importante é a tecnologia de aplicativos que pode auxiliar em um controle adequado dos tempos e de estratégias para a redução de filas.

No caso da melhoria da eficiência energética do transporte rodoviário, especificamente no campo de política pública envolve promover um programa adequado de renovação da frota de veículos pesados no país, compreendendo a retirada dos caminhões antigos e de baixa eficiência, que são poluidores e poluentes, para veículos mais modernos, com níveis de

eficiência energética superiores ao padrão médio brasileiro. Especificamente, conforme retratado na seção de revisão de literatura, a idade média dos caminhões brasileiros ultrapassa 14 anos. Além disso, investimentos em infraestrutura do transporte rodoviário podem promover melhorias nas condições viárias e conseqüentemente aumentar a eficiência energética. Apesar do Brasil ter uma matriz de transporte predominantemente rodoviário, não significa que as rodovias devem ser preteridas frente às alternativas. Pelo contrário, o Brasil é um país de dimensões continentais, que por mais que a capacidade de infraestrutura ferroviária e hidroviária existente seja ilimitada, ainda existe a dependência do transporte rodoviário de curta distância das regiões de produção para os terminais. Repor a depreciação das rodovias e estradas, bem como, revitalizar trajetos importantes, podem contribuir para a descarbonização do transporte a partir do ganho de eficiência do transporte rodoviário.

Em termos de políticas empresariais, a estratégia de implementação de práticas de *eco-driving* por meio de treinamentos aos motoristas é fundamental para que os efeitos práticos de novas tecnologias eficientes e melhorias nas condições viárias se tornem efetivas. Fomentar, por exemplo, práticas de negociação de sobretaxa de combustível na composição do frete, tal como discutido na seção de revisão de literatura, pode ser uma estratégia interessante. Tal sobretaxa é um adicional relacionado ao custo do combustível, a qual é adicionada ao frete negociado entre os embarcadores e transportadores. A sobretaxa é calculada a partir dos parâmetros de preço do combustível e eficiência energética, obrigando os agentes a identificarem padrões energéticos no transporte. Além disso, a sobretaxa pode ser um mecanismo interessante também de garantir o efetivo repasse dos preços de combustíveis, por parte dos transportadores para os embarcadores, em cenários de alta volatilidade de preços de combustíveis.

Conforme observado, são fundamentais os investimentos em expansão da capacidade de transporte ferroviário e hidroviário, tanto pela via de criação de novas ferrovias quanto também pela expansão da capacidade da infraestrutura existente. Um país de dimensões continentais como o Brasil, com distâncias elevadas de transporte, é mandatório transportar por meios mais eficientes do ponto de vista ambiental quanto do ponto de vista econômico. Para isto, é necessário que sejam formuladas políticas de fomento de ferrovias privadas no país, além da criação de um ambiente regulatório e institucional eficiente para investimentos, bem como, fomentar um programa de revitalização da malha subutilizada. Em relação à melhoria da eficiência energética do transporte ferroviário, são primordiais os investimentos em renovação da frota de locomotivas e vagões, bem como na malha existente.

Na questão portuária e marítima, ficou evidente a importância de navios maiores para a redução de custos e emissões. A substituição do navio típico utilizado no transporte marítimo da soja para Europa e Ásia, *Panamax*, para um *Capesize*, não é uma solução trivial, pelo fato de demandar altos investimentos e envolver uma ação coordenada na cadeia de suprimentos em nível global. Os gargalos para esta solução envolvem a profundidade dos canais de acessos aos portos e terminais brasileiros, que precisam ser compatíveis com o calado do *Capesize* – principalmente quando carregado em sua totalidade, para um efetivo ganho de economia de escala tanto de custo quanto de emissões de dióxido de carbono. Desta forma, incentivar a construção de Terminais de Uso Privativo (TUPs) em regiões com profundidades naturais elevadas é fundamental para aumentar a usabilidade dos *Capesize* no país, além de fomentar uma infraestrutura (rodoviária, ferroviária e hidroviária) de acesso aos portos e terminais existentes com aptidões a navios maiores, de forma a ampliar a competitividade destes corredores.

A partir destas políticas públicas e empresariais é possível a promoção da logística verde da soja brasileira, de forma a equacionar os multiobjetivos de descarbonização e redução de custos, ampliando a competitividade do país e do segmento do agronegócio da soja.

5. CONCLUSÕES

O objetivo desta pesquisa foi identificar mudanças tecnológicas e infraestruturais para promover a logística verde da soja brasileira de longo prazo a partir da escolha de soluções eficientes na redução de métricas importantes, tais como custos logísticos, emissões de CO₂, perdas nas atividades logísticas, demanda de caminhões, demanda de combustíveis e intensidade dos diferentes modos de transporte.

Em uma primeira abordagem de forma a identificar os parâmetros mais elásticos relacionados ao modelo de *green logistics* da soja sob uma ótica de minimização dos custos totais de transporte, ficou evidente a constatação de soluções do tipo *trade-off* e do tipo *win-win* para as variáveis mais importantes envolvendo custos, emissões e perdas. Os principais *trade-offs* analisados que melhoram o custo total de transporte e as emissões de gases de efeito estufa, porém ampliam as perdas nas atividades logísticas: aumento da capacidade dos terminais ferroviários; aumento da capacidade dos terminais hidroviários; redução do custo do transporte ferroviário; redução do custo do transporte hidroviário; aumento da eficiência energética do transporte ferroviário; e, aumento da velocidade média do transporte ferroviário. Os *trade-offs* identificados que melhoram os custos totais de transporte e as perdas, porém pioram as emissões de CO₂: redução do custo do transporte rodoviário para o porto; aumento da jornada de trabalho do motorista; e, aumento da velocidade média do transporte rodoviário. As principais soluções do tipo *win-win* identificadas: redução da demanda da Ásia; redução da demanda da Europa; redução da demanda do mercado doméstico; aumento da capacidade de carga dos caminhões; e, aumento da eficiência energética do transporte rodoviário.

Os parâmetros com maiores níveis de elasticidades na variável de custos de transporte foram: demanda asiática de soja, capacidade do caminhão, custo unitário do transporte marítimo, custo unitário do transporte rodoviário para os portos, capacidade dos navios, demanda da Europa e eficiência energética do transporte rodoviário. Especificamente, as maiores elasticidades dos parâmetros nas emissões de dióxido de carbono foram: demanda da Ásia, capacidade dos navios, eficiência energética do transporte rodoviário e capacidade dos caminhões. Estritamente para as perdas, as maiores elasticidades observadas foram decorrentes dos parâmetros: demanda da Ásia e custo de transporte unitário rodoviário até o porto. A elasticidade da demanda asiática da soja, por exemplo, impacta todos as métricas positivamente, sendo um dos parâmetros mais elásticos para variáveis importantes como custos de transporte, emissões de dióxido de carbono, perdas nas atividades logísticas e demanda dos combustíveis.

A China, principal importador da oleaginosa brasileira, pressiona bastante as métricas de logística verde.

Outro resultado de interesse é o ganho de eficiência possível na promoção da logística verde da soja com as mudanças tecnológicas e infraestruturais em uma abordagem multiobjetivo de minimização de emissões de dióxido de carbono e de custos logísticos, os quais se incorporam às preocupações com as perdas de forma a internalizar os custos das perdas junto aos custos de transporte. Para um mesmo nível de tecnologia e infraestrutura, a minimização do biobjetivo emissões-custos logísticos gera um *trade-off*, visto que não existe uma única solução que apresenta o mínimo possível de cada objetivo. Por outro lado, mudanças tecnológicas e de infraestrutura de transporte deslocam às Fronteiras de Pareto do conjunto de soluções eficientes e geram soluções *win-win*. Neste contexto, foi possível identificar os melhores cenários estratégicos em termos de impactos de tais mudanças em relação ao cenário sem o progresso tecnológico no período de 2030-2050, em relação a 2020.

Nesta abordagem ficou evidente um conjunto de possibilidades para que o país possa consolidar a logística verde da soja, envolvendo mudanças que variam desde aspectos operacionais (tempos de carregamento e descarregamento), substituição de navios até expansão da infraestrutura multimodal existente, incluindo novas importantes ferrovias. O conjunto de mudanças tecnológicas e infraestruturais que apresentou os maiores impactos nas métricas da logística verde para o período de 2030-2050 foi a implementação sinérgica da melhoria do tempo de carregamento e descarregamento nas operações de transporte rodoviário, aumento da eficiência energética do transporte rodoviário e ferroviário, expansões da capacidade da infraestrutura multimodal e construção de novas ferrovias (Ferrovia de Integração Oeste-Leste, Ferrovia de Integração do Centro-Oeste, Ferrovia Autorizada Olacyr de Moares e Ferrogrão) e substituição dos navios atualmente utilizados, *Panamax*, para navios *Capesize*. Os efeitos destas mudanças provocam reduções de custos logísticos de 28%, de emissões de dióxido de carbono superiores à 32%, de demanda de caminhões na ordem de 43%, de demanda de óleo diesel na ordem de 43%, de óleo combustível (transporte marítimo) de 28%. Neste cenário, a intensidade do transporte ferroviário é praticamente duplicada. Entretanto, os níveis de perdas em relação ao cenário contrafactual aumentam na ordem de quase 8%, mesmo incorporando os custos das perdas nos custos logísticos.

Interessante destacar que muito se discute em promover o *modal-shift* para reduzir custos e emissões, porém há outros caminhos interessantes que inclusive promovem maiores benefícios ambientais e econômicos, tal como a melhoria do sistema de transporte rodoviário,

envolvendo especificamente o cenário do pacote tecnológico (melhorias dos tempos de carregamento/descarregamento dos veículos associado à melhoria da eficiência energética dos caminhões), além também da substituição da frota marítima para navios maiores.

Outro resultado interessante advém da análise da otimização biobjetivo de perdas-custos logísticos, identificando que as soluções eficientes geradas reduzem as perdas, em detrimento de um aumento relativamente baixo dos custos (de 0% a 3,9%), porém com um nível de emissões maiores (de 2,3% a 7,4%) no sistema, não promovendo uma logística verde da soja, pelo fato de priorizar o modo de transporte de menor eficiência energética, que é o rodoviário, além do fato deste apresentar menores níveis de perdas em relação ao transporte multimodal. Além disso, variações tecnológicas e infraestruturais não deslocaram as soluções no sentido de redução de perdas, apenas de custos. Desta forma, recomenda-se mudança tecnológica nas atividades logísticas das perdas envolvendo os transportes ferroviários e hidroviários, além das perdas nos terminais portuários, ferroviários e hidroviários, para que a logística verde amplie mais ainda a sua competitividade a ponto de reduzir os níveis atuais de perdas, tornando-se uma solução *win-win* na relação custos, emissões e perdas. Do contrário, a perda vai continuar sendo um *trade-off* com custos e emissões.

Recomendam-se políticas públicas e privadas que visem sustentar estas mudanças tecnológicas e infraestruturais discutidas para que o Brasil possa usufruir dos benefícios da promoção de uma logística verde com contribuições globais na descarbonização. O fomento pode ser ainda mais apelativo considerando discussões de taxações de carbono nas atividades do transporte.

Importante destacar em termos de limitações do trabalho que nesta análise utilizou-se um modelo para avaliar os efeitos de mudanças tecnológicas e infraestruturais somente no transporte e que tais mudanças podem ocasionar alterações no uso e ocupação do solo no longo prazo, alterando a dinâmica de produção, fornecimento e comercialização de soja e outras *commodities*.

Sugerem-se para futuros trabalhos sobre a temática de logística verde da soja, a análise também de mudanças tecnológicas relativas à substituição de combustíveis limpos (*green fuels*) para avaliar os choques nas variáveis de interesse, além também de incorporar perspectivas relacionadas à logística colaborativa, especificamente na tratativa do retorno dos veículos de transporte (caminhões, trens, barcaças/puxadores hidroviários e navios) vazios, bem como, a

internalização dos custos das emissões na estrutura de custo logístico e a integração do modelo de transporte com modelos de uso e ocupação do solo, para uma visão holística.

Desta forma, conclui-se que há muitas oportunidades para o Brasil descarbonizar o transporte de soja simultaneamente com a redução de custos logísticos, a partir de mudanças tecnológicas e de infraestrutura que variam desde soluções mais simples e operacionais até soluções complexas (substituição dos navios e novas infraestruturas). É fundamental que o país defina sua estratégia de promoção de logística verde de longo prazo.

REFERÊNCIAS

- Abate, M. (2014). Determinants of Capacity Utilisation in Road Freight Transportation. *Journal of Transport Economics and Policy*, 48(1), 137–152. <http://www.jstor.org/stable/24396253>
- Adland, R., Cariou, P., & Wolff, F. C. (2020). Optimal ship speed and the cubic law revisited: Empirical evidence from an oil tanker fleet. *Transportation Research Part E: Logistics and Transportation Review*, 140, 101972. <https://doi.org/10.1016/J.TRE.2020.101972>
- Agência Nacional de Transportes Aquaviários - ANTAQ. (2021). *Anuário Estatística do Setor Aquaviário*. ANTAQ. <http://anuario.antaq.gov.br/QvAJAXZfc/pendoc.htm?document=painel%5Cantaq-anuario-2014-v0.9.3.qvw&lang=pt-BR&host=QVS%40graneleiro&anonymous=true>
- Agência Nacional de Transportes Terrestres - ANTT. (2021a). *Anuário do Setor Ferroviário - Agência Nacional de Transportes Terrestres - ANTT*. ANTT. <https://portal.antt.gov.br/anuario-do-setor-ferroviario>
- Agência Nacional de Transportes Terrestres - ANTT. (2021b). *Registro Nacional dos Transportadores Rodoviários de Carga*. ANTT. <https://portal.antt.gov.br/rntrc>
- Ahi, P., & Searcy, C. (2013). A comparative literature analysis of definitions for green and sustainable supply chain management. *Journal of Cleaner Production*, 52, 329–341. <https://doi.org/10.1016/J.JCLEPRO.2013.02.018>
- Alexandratos, N., & Bruinsma, J. (2012). World Agriculture towards 2030/2050: the 2012 revision. *WORLD AGRICULTURE*. www.fao.org/economic/esa
- Allaoui, H., Guo, Y., Choudhary, A., & Bloemhof, J. (2018). Sustainable agro-food supply chain design using two-stage hybrid multi-objective decision-making approach. *Computers & Operations Research*, 89, 369–384. <https://doi.org/10.1016/J.COR.2016.10.012>
- Amine, K. (2019). Multiobjective Simulated Annealing: Principles and Algorithm Variants. *Advances in Operations Research*, 2019. <https://doi.org/10.1155/2019/8134674>
- Angulo, L. P. (2012). Labour inputs substitution during corporate restructuring: a translog model approach for US freight railroads. *Applied Economics*, 45(18), 2547–2562. <https://doi.org/10.1080/00036846.2012.669465>
- Associação Brasileira das Indústrias de Óleos Vegetais - ABIOVE. (2021). *Estatísticas de produção do complexo soja*. Arquivos com pesquisa de capacidade instalada. <https://abiove.org.br/estatisticas/>
- Ballou, R. H. (2007). The evolution and future of logistics and supply chain management. *European Business Review*, 19(4), 332–348. <https://doi.org/10.1108/09555340710760152/>
- Barth, M., & Boriboonsomsin, K. (2008). Real-World Carbon Dioxide Impacts of Traffic Congestion: *Transportation Research Record: Journal of the Transportation Research Board*, 2058, 163–171. <https://doi.org/10.3141/2058-20>
- Behdani, B., Fan, Y., Wiegmanns, B., & Zuidwijk, R. (2016). Multimodal schedule design for synchromodal freight transport systems. *European Journal of Transport and*

- Infrastructure Research*, 16(3), 424–444. <https://doi.org/10.18757/EJTIR.2016.16.3.3151>
- Bektaş, T., Ehmke, J. F., Psaraftis, H. N., & Puchinger, J. (2019). The role of operational research in green freight transportation. *European Journal of Operational Research*, 274(3), 807–823. <https://doi.org/10.1016/J.EJOR.2018.06.001>
- Bernacki, D. (2021). Assessing the Link between Vessel Size and Maritime Supply Chain Sustainable Performance. *Energies* 2021, Vol. 14, Page 2979, 14(11), 2979. <https://doi.org/10.3390/EN14112979>
- Beuthe, M., Jourquin, B., & Urbain, N. (2014). Estimating Freight Transport Price Elasticity in Multi-mode Studies: A Review and Additional Results from a Multimodal Network Model. *Transport Reviews*, 34(5), 626–644. <https://doi.org/10.1080/01441647.2014.946459>
- Bitzan, J., & Karanki, F. (2021). A Look at Railroad Costs, Scale Economies, and Differential Pricing (Summary). *United States Department of Agriculture*. <https://doi.org/10.9752/TS320.05-2021>
- Brasil. (2018). *Lei nº 13.703, de 8 de agosto de 2018*. Presidência da República. Secretária-Geral. Subchefia para Assuntos Jurídicos. http://www.planalto.gov.br/ccivil_03/_ato2015-2018/2018/lei/l13703.htm
- Brümmerstedt, K., Meyer-Van Beek, H., & Münsterberg, T. (2017). Comparative Analysis of Synchronomodality in Major European Seaports. *Proceedings of the Hamburg International Conference of Logistics (HICL)* 24, 24.
- Button, K. (2010). *Transport economics*. Edward Elgar Publishing. <https://www.elgar.com/shop/usd/transport-economics-3rd-edition-9781840641899.html>
- Caixeta-Filho, J. V., & Péra, T. G. (2018). Post-harvest losses during the transportation of grains from farms to aggregation points. *International Journal of Logistics Economics and Globalisation*, 7(3), 209. <https://doi.org/10.1504/IJLEG.2018.093755>
- Caramia, M., & Dell’Olmo, P. (2020). Multi-objective Management in Freight Logistics. *Multi-objective Management in Freight Logistics*. <https://doi.org/10.1007/978-3-030-50812-8>
- Castillo-Manzano, J. I., Castro-Nuño, M., & Fageda, X. (2016). Exploring the relationship between truck load capacity and traffic accidents in the European Union. *Transportation Research Part E: Logistics and Transportation Review*, 88, 94–109. <https://doi.org/10.1016/J.TRE.2016.02.003>
- Castro, N. (2002). Estrutura, desempenho e perspectivas do transporte ferroviário de carga. *Pesquisa e Planejamento Econômico - IPEA*, 32(2). <https://ppe.ipea.gov.br/index.php/ppe/article/view/145/0>
- Centro de Estudos Avançados em Economia Aplicada - CEPEA. (2021). *Indicadores de preços de soja*. CEPEA; Imagenet Tecnologia.
- Chang, C. C., & Chang, C. H. (2013). Energy conservation for international dry bulk carriers via vessel speed reduction. *Energy Policy*, 59, 710–715. <https://doi.org/10.1016/J.ENPOL.2013.04.025>
- Chankong, V., & Haimes, Y. Y. (1983). *Multiobjective Decision Making: Theory and Methodology* (North-Holl, Vol. 1). Elsevier Science Publishing. https://scienceclopedia.files.wordpress.com/2013/12/book-vira_v-_chankong_yacov_y-

_haimes_multiobjective-decision-making.pdf

- Charrad, M., Ghazzali, N., Boiteau, V., & Maintainer, A. N. (2015). *Package “NbClust” Title Determining the Best Number of Clusters in a Data Set Depends R (>= 3.1.0)*. <http://cran.rediris.es/web/packages/NbClust/NbClust.pdf>
- Chegere, M. J. (2018). Post-harvest losses reduction by small-scale maize farmers: The role of handling practices. *Food Policy*, 77, 103–115. <https://doi.org/10.1016/J.FOODPOL.2018.05.001>
- Comer, B., Chen, C., & Rutherford, D. (2018). *Relating short-term measures to IMO’s minimum 2050 emissions reduction target*.
- Concil of Supply Chain Management Professionals – CSCMP. (2021). *SCM Definitions and Glossary of Terms*. https://cscmp.org/CSCMP/Educate/SCM_Definitions_and_Glossary_of_Terms.aspx
- Confederação Nacional do Transporte - CNT. (2021a). *Biometano. Uma alternativa limpa para o modal rodoviário*. <https://www.cnt.org.br/analises-transporte>
- Confederação Nacional do Transporte - CNT. (2021b). *Anuário CNT do Transporte. Estatísticas consolidadas*. <https://anuariodotransporte.cnt.org.br/2021/>
- Cooper, C., Kamakaté, F., Reinhart, T., Kromer, M., & Wilson, R. (2009). *NESCCAF Northeast States Center for a Clean Air Future ICCT International Council on Clean Transportation Heavy-Duty Long Haul Combination Truck Fuel Consumption and CO2 Emissions*.
- Cooper, M. C., Lambert, D. M., & Pagh, J. D. (1997). Supply Chain Management: More Than a New Name for Logistics. *The International Journal of Logistics Management*, 8(1), 1–14. <https://doi.org/10.1108/09574099710805556/FULL/XML>
- Cunanan, C., Tran, M.-K., Lee, Y., Kwok, S., Leung, V., & Fowler, M. (2021). A Review of Heavy-Duty Vehicle Powertrain Technologies: Diesel Engine Vehicles, Battery Electric Vehicles, and Hydrogen Fuel Cell Electric Vehicles. *Clean Technologies 2021, Vol. 3, Pages 474-489*, 3(2), 474–489. <https://doi.org/10.3390/CLEANTECHNOL3020028>
- DAT. (2018). *How the Fuel Surcharge Affects Truckload Freight Rates - DAT*. DAT. <https://www.dat.com/blog/post/how-the-fuel-surcharge-affects-truckload-freight-rates>
- Davis-Sramek, B., Thomas, R. W., & Fugate, B. S. (2018). Integrating Behavioral Decision Theory and Sustainable Supply Chain Management: Prioritizing Economic, Environmental, and Social Dimensions in Carrier Selection. *Journal of Business Logistics*, 39(2), 87–100. <https://doi.org/10.1111/JBL.12181>
- Dekker, R., Bloemhof, J., & Mallidis, I. (2012). Operations Research for green logistics – An overview of aspects, issues, contributions and challenges. *European Journal of Operational Research*, 219(3), 671–679. <https://doi.org/10.1016/J.EJOR.2011.11.010>
- Demir, E., Bektaş, T., & Laporte, G. (2014). A review of recent research on green road freight transportation. *European Journal of Operational Research*, 237(3), 775–793. <https://doi.org/10.1016/J.EJOR.2013.12.033>
- Demir, E., Huang, Y., Scholts, S., & Van Woensel, T. (2015). A selected review on the negative externalities of the freight transportation: Modeling and pricing. *Transportation Research Part E: Logistics and Transportation Review*, 77, 95–114. <https://doi.org/10.1016/J.TRE.2015.02.020>

- Departamento Nacional de Infraestruturas de Transporte – DNIT. (2016). *Infraestrutura Aquaviária — Português (Brasil)*. <https://www.gov.br/dnit/pt-br/assuntos/aquaviario>
- Dong, C., Boute, R., McKinnon, A., & Verelst, M. (2018). Investigating synchromodality from a supply chain perspective. *Transportation Research Part D: Transport and Environment*, 61, 42–57. <https://doi.org/10.1016/J.TRD.2017.05.011>
- Du, H., Huque, Z., & Kommalapati, R. R. (2018). Impacts of Biodiesel Applied to the Transportation Fleets in the Greater Houston Area. *Journal of Renewable Energy*, 2018, 1–9. <https://doi.org/10.1155/2018/7350715>
- Du, K. L., & Swamy, M. N. S. (2016). Search and optimization by metaheuristics: Techniques and algorithms inspired by nature. *Search and Optimization by Metaheuristics: Techniques and Algorithms Inspired by Nature*, 1–434. <https://doi.org/10.1007/978-3-319-41192-7>
- Du, Y., Chen, Q., Quan, X., Long, L., & Fung, R. Y. K. (2011). Berth allocation considering fuel consumption and vessel emissions. *Transportation Research Part E: Logistics and Transportation Review*, 47(6), 1021–1037. <https://doi.org/10.1016/J.TRE.2011.05.011>
- Dukkanci, O., Bektaş, T., & Kara, B. Y. (2019). Green Network Design Problems. *Sustainable Transportation and Smart Logistics: Decision-Making Models and Solutions*, 169–206. <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-814242-4.00007-7>
- Empresa de Pesquisa Energética - EPE. (2021a). *BEN - Balanço Energético Nacional*. EPE. <http://shinyepe.brazilsouth.cloudapp.azure.com:3838/ben/>
- Empresa de Pesquisa Energética - EPE. (2021b). *Transporte Rodoviário de Cargas: Proposta para o Reequilíbrio*. Nota Para Discussão. ND-DPG-SDB-01-2021. [https://www.epe.gov.br/sites-pt/publicacoes-dados-abertos/publicacoes/PublicacoesArquivos/publicacao-567/EPE-ND-DPG-01-2021_Proposta para reequilíbrio do TRC.pdf](https://www.epe.gov.br/sites-pt/publicacoes-dados-abertos/publicacoes/PublicacoesArquivos/publicacao-567/EPE-ND-DPG-01-2021_Proposta%20para%20reequilibrio%20do%20TRC.pdf)
- Empresa de Pesquisa Energética - EPE. (2021c). *Transporte Rodoviário de Cargas – Brasil 2021 – Benchmarking internacional*.
- Empresa de Planejamento e Logística - EPL. (2015). *Estudo dos Custos do Transporte Hidroviário no Brasil - Volume III*. <https://www.epl.gov.br/estudo-dos-custos-do-transporte-hidroviario-no-brasil-elaboracao-de-ferramenta-de-simulacao>
- Empresa de Planejamento e Logística - EPL. (2016). *Perfil de Embarcadores e Serviços Demandados*. <https://www.epl.gov.br/perfil-de-embarcadores-e-servicos-demandados>
- Empresa de Planejamento e Logística - EPL. (2017). *Simulador de Custo de Transporte – ONTL*. EPL. <https://ontl.epl.gov.br/aplicacoes/simulador-de-custo-de-transporte/>
- Empresa de Planejamento e Logística - EPL. (2021a). *METODOLOGIA EPL-IEEMA PARA EMISSÕES DE GEE E POLUENTES LOCAIS*.
- Empresa de Planejamento e Logística - EPL. (2021b). *Plano Nacional de Logística (PNL) - 2035*. EPL. https://www.gov.br/infraestrutura/pt-br/assuntos/politica-e-planejamento/politica-e-planejamento/RelatorioExecutivoPNL_2035final.pdf
- Eng-Larsson, F., & Kohn, C. (2012). Modal shift for greener logistics - the shipper's perspective. *International Journal of Physical Distribution and Logistics Management*, 42(1), 36–59. <https://doi.org/10.1108/09600031211202463>

- ESALQ-LOG - Grupo de Pesquisa e Extensão em Logística Agroindustrial. (2020). *Compilado de informações da Política Nacional de Pisos Mínimos do Transporte Rodoviário de Cargas - Questionário de Informações Primárias*.
- ESALQ-LOG - Grupo de Pesquisa e Extensão em Logística Agroindustrial. (2021). *Dados de custos de transporte rodoviário de cargas*. www.esalqlog.esalq.usp.br
- Falsini, D., Fondi, F., & Schiraldi, M. M. (2012). A logistics provider evaluation and selection methodology based on AHP, DEA and linear programming integration. *International Journal of Production Research*, 50(17), 4822–4829. <https://doi.org/10.1080/00207543.2012.657969>
- Figliozzi, M., Saenz, J., & Faulin, J. (2020). Minimization of urban freight distribution lifecycle CO2e emissions: Results from an optimization model and a real-world case study. *Transport Policy*, 86, 60–68. <https://doi.org/10.1016/J.TRANPOL.2018.06.010>
- Filippo, J. Di, Callahan, C., Golestani, N., & Di, J. (2019). *Zero-Emission Drayage Trucks Challenges and Opportunities for the San Pedro Bay Ports ZERO-EMISSION DRAYAGE TRUCKS: CHALLENGES AND OPPORTUNITIES FOR THE SAN PEDRO PORTS ii Authorship This report was produced by the UCLA Luskin Center for Innovation (LCI)*.
- Forkenbrock, D. J. (2001). Comparison of external costs of rail and truck freight transportation. *Transportation Research Part A: Policy and Practice*, 35(4), 321–337. [https://doi.org/10.1016/S0965-8564\(99\)00061-0](https://doi.org/10.1016/S0965-8564(99)00061-0)
- Fowkes, T. (2015). Freight costs. *Handbook of Research Methods and Applications in Transport Economics and Policy*, 71–89. <https://doi.org/10.4337/9780857937933.00010>
- Friedrich, H., Tavasszy, L., & Davydenko, I. (2014). Distribution Structures. *Modelling Freight Transport*, 65–87. <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-410400-6.00004-5>
- Fulzele, V., & Shankar, R. (2021). Performance measurement of sustainable freight transportation: a consensus model and FERA approach. *Annals of Operations Research*, 1–42. <https://doi.org/10.1007/S10479-020-03876-2/FIGURES/7>
- Fundação Getúlio Vargas - FGV. (2021). *IGP-M: Resultados 2020*. FGV. https://portal.fgv.br/noticias/igp-m-resultados-2020?utm_source=portal-fgv&utm_medium=fgvnoticias&utm_campaign=fgvnoticias-2021-01-04
- Giuliano, G., Dessouky, M., Dexter, S., Fang, J., Hu, S., & Miller, M. (2021). Heavy-duty trucks: The challenge of getting to zero. *Transportation Research Part D: Transport and Environment*, 93, 102742. <https://doi.org/10.1016/J.TRD.2021.102742>
- Giusti, R., Manerba, D., Bruno, G., & Tadei, R. (2019). Synchromodal logistics: An overview of critical success factors, enabling technologies, and open research issues. *Transportation Research Part E: Logistics and Transportation Review*, 129, 92–110. <https://doi.org/10.1016/J.TRE.2019.07.009>
- Gray, N., McDonagh, S., O’Shea, R., Smyth, B., & Murphy, J. D. (2021). Decarbonising ships, planes and trucks: An analysis of suitable low-carbon fuels for the maritime, aviation and haulage sectors. *Advances in Applied Energy*, 1, 100008. <https://doi.org/10.1016/J.ADAPEN.2021.100008>
- Greene, S., & Façanha, C. (2019). Carbon offsets for freight transport decarbonization. *Nature Sustainability* 2019 2:11, 2(11), 994–996. <https://doi.org/10.1038/s41893-019-0413-0>

- Greene, W. H. (2008). *Econometric Analysis* (6 ed.). Prentice Hall.
- Gružauskas, V., Baskutis, S., & Navickas, V. (2018). Minimizing the trade-off between sustainability and cost effective performance by using autonomous vehicles. *Journal of Cleaner Production*, *184*, 709–717. <https://doi.org/10.1016/J.JCLEPRO.2018.02.302>
- Gunasekaran, A., Irani, Z., & Papadopoulos, T. (2017). Modelling and analysis of sustainable operations management: certain investigations for research and applications. *Journal of the Operational Research Society*, *65*(6), 806–823. <https://doi.org/10.1057/JORS.2013.171>
- Hao, H., Geng, Y., Tate, J. E., Liu, F., Chen, K., Sun, X., Liu, Z., & Zhao, F. (2019). Impact of transport electrification on critical metal sustainability with a focus on the heavy-duty segment. *Nature Communications* *2019 10:1*, *10*(1), 1–7. <https://doi.org/10.1038/s41467-019-13400-1>
- Harris, I., Naim, M., Palmer, A., Potter, A., & Mumford, C. (2011). Assessing the impact of cost optimization based on infrastructure modelling on CO2 emissions. *International Journal of Production Economics*, *131*(1), 313–321. <https://doi.org/10.1016/J.IJPE.2010.03.005>
- Hassini, E., Surti, C., & Searcy, C. (2012). A literature review and a case study of sustainable supply chains with a focus on metrics. *International Journal of Production Economics*, *140*(1), 69–82. <https://doi.org/10.1016/J.IJPE.2012.01.042>
- Hauenstein, J., Mertens, J. C., Diermeyer, F., & Zimmermann, A. (2021). Cooperative- and Eco-Driving: Impact on Fuel Consumption for Heavy Trucks on Hills. *Electronics* *2021, Vol. 10, Page 2373*, *10*(19), 2373. <https://doi.org/10.3390/ELECTRONICS10192373>
- Helo, P., & Ala-Harja, H. (2018). Green logistics in food distribution – a case study. *International Journal of Logistics Research and Applications*, *21*(4), 464–479. <https://doi.org/10.1080/13675567.2017.1421623>
- Hendiani, S., & Bagherpour, M. (2019). Developing an integrated index to assess social sustainability in construction industry using fuzzy logic. *Journal of Cleaner Production*, *230*, 647–662. <https://doi.org/10.1016/J.JCLEPRO.2019.05.055>
- Hervani, A. A., Helms, M. M., & Sarkis, J. (2005). Performance measurement for green supply chain management. *Benchmarking*, *12*(4), 330–353. <https://doi.org/10.1108/14635770510609015/>
- Holden, R., Xu, B., Greening, P., Piecyk, M., & Dadhich, P. (2016). Towards a common measure of greenhouse gas related logistics activity using data envelopment analysis. *Transportation Research Part A: Policy and Practice*, *91*, 105–119. <https://doi.org/10.1016/J.TRA.2016.06.001>
- Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística - IBGE. (2009). *Transporte efetivo das estradas de ferro*. Estatísticas do Século XX. <https://seculoxx.ibge.gov.br/economicas/tabelas-setoriais/transporte-e-comunicacao/transporte-efetivo-das-estradas-de-ferro-1904-85>
- Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística - IBGE. (2021a). *Pesquisa Anual de Serviço - PAS*. Sistema IBGE de Recuperação Automática - SIDRA. <https://sidra.ibge.gov.br/pesquisa/pas/tabelas>
- Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística - IBGE. (2021b). *Produção Agrícola Municipal - PAM*. Sistema IBGE de Recuperação Automática - SIDRA.

- <https://sidra.ibge.gov.br/pesquisa/pam/tabelas>
- International Council on Clean Transportation, The - ICCT. (2011). *The Energy Efficiency Design Index (EEDI). Policy Update*. https://theicct.org/sites/default/files/publications/ICCTpolicyupdate15_EEDI_final.pdf
- International Council on Clean Transportation, The - ICCT. (2016). *Brazil's vehicle fleet renewal program should aim to benefit from others' successes, and their mistakes - International Council on Clean Transportation*. ICCT. <https://theicct.org/brazils-vehicle-fleet-renewal-program-should-aim-to-benefit-from-others-successes-and-their-mistakes/>
- International Energy Agency – IEA. (2009). *TRANSPORT, ENERGY AND CO2 Moving Toward Sustainability*. www.iea.org/about/copyright.asp
- International Energy Agency – IEA. (2013). *Global land transport infrastructure requirements. Estimating road and railway infrastructure capacity and costs to 2050*. <https://www.iea.org/reports/global-land-transport-infrastructure-requirements>
- International Energy Agency – IEA. (2019). *Brazil - Countries & Regions - IEA. CO2 emissions*. <https://www.iea.org/countries/brazil>
- International Maritime Organization - IMO. (2012). *GUIDELINES ON THE METHOD OF CALCULATION OF THE ATTAINED ENERGY EFFICIENCY DESIGN INDEX (EEDI) FOR NEW SHIPS*.
- International Maritime Organization - IMO. (2021). *Fourth IMO GHG Study 2020. Safe, secure and eficiente shipping on clean oceans. Executive Summary*.
- International Transportation Forum – ITF. (2018). *Corporate Partnership Board CPB Towards Road Freight Decarbonisation Trends, Measures and Policies Decarbonising Transport. Policy Papers*. www.itf-oecd.org
- Islam, S. (2017). Empty truck trips problem at container terminals: A review of causes, benefits, constraints and solution approaches. *Business Process Management Journal*, 23(2), 248–274. <https://doi.org/10.1108/BPMJ-06-2015-0086/>
- Islam, S., & Olsen, T. (2014). Truck-sharing challenges for hinterland trucking companies: A case of the empty container truck trips problem. *Business Process Management Journal*, 20(2), 290–334. <https://doi.org/10.1108/BPMJ-03-2013-0042/>
- Jara-Díaz, S. (2007). Transport production and cost structure. *Transport Economic Theory*, 11–49. <https://doi.org/10.1108/9780080548999-001>
- Joung, T.-H., Kang, S.-G., Lee, J.-K., & Ahn, J. (2020). The IMO initial strategy for reducing Greenhouse Gas(GHG) emissions, and its follow-up actions towards 2050. *Journal of International Maritime Safety, Environmental Affairs, and Shipping*, 4(1), 1–7. <https://doi.org/10.1080/25725084.2019.1707938>
- Jourquin, B., & Beuthe, M. (2019). Cost, transit time and speed elasticity calculations for the European continental freight transport. *Transport Policy*, 83, 1–12. <https://doi.org/10.1016/J.TRANPOL.2019.08.009>
- Khan, S. A. R., Zhang, Y., Anees, M., Golpîra, H., Lahmar, A., & Qianli, D. (2018). Green supply chain management, economic growth and environment: A GMM based evidence. *Journal of Cleaner Production*, 185, 588–599. <https://doi.org/10.1016/J.JCLEPRO.2018.02.226>

- Kelle, P., Song, J., Jin, M., Schneider, H., & Claypool, C. (2019). Evaluation of operational and environmental sustainability tradeoffs in multimodal freight transportation planning. *International Journal of Production Economics*, 209, 411–420. <https://doi.org/10.1016/J.IJPE.2018.08.011>
- Koç, Ç., Bektaş, T., Jabali, O., & Laporte, G. (2014). The fleet size and mix pollution-routing problem. *Transportation Research Part B: Methodological*, 70, 239–254. <https://doi.org/10.1016/J.TRB.2014.09.008>
- Kumar, A., & Anbanandam, R. (2020). Assessment of environmental and social sustainability performance of the freight transportation industry: An index-based approach. *Transport Policy*. <https://doi.org/10.1016/J.TRANPOL.2020.01.006>
- Leonardi, J., Cullinane, S., & Edwards, J. (2015). Alternative fuels and freight vehicles Status, costs and benefits, and growth. In A. C. McKinnon, M. Browne, A. E. Whiteing, & M. Piecyk (Orgs.), *Green logistics : improving the environmental sustainability of logistics* (3rd Editio, p. 278–290).
- Li, Y., & Yu, Y. (2017). The use of freight apps in road freight transport for CO2 reduction. *European Transport Research Review*, 9(3), 1–13. <https://doi.org/10.1007/S12544-017-0251-Y/FIGURES/7>
- Lieb, K. J., & Lieb, R. C. (2010). Environmental sustainability in the third-party logistics (3PL); industry. *International Journal of Physical Distribution & Logistics Management*, 40(7), 524–533. <https://doi.org/10.1108/09600031011071984/FULL/XML>
- Link, H. (2015). Road and rail infrastructure costs. *Handbook of Research Methods and Applications in Transport Economics and Policy*, 9–37. <https://doi.org/10.4337/9780857937933.00008>
- Liu, H. T., & Wang, W. K. (2009). An integrated fuzzy approach for provider evaluation and selection in third-party logistics. *Expert Systems with Applications: An International Journal*, 36(3 PART 1), 4387–4398. <https://doi.org/10.1016/J.ESWA.2008.05.030>
- Liu, W., & Lin, B. (2021). Electrification of rails in China: Its impact on energy conservation and emission reduction. *Energy*, 226, 120363. <https://doi.org/10.1016/J.ENERGY.2021.120363>
- Lu, L., Anderson-Cook, C. M., & Robinson, T. J. (2012). Optimization of Designed Experiments Based on Multiple Criteria Utilizing a Pareto Frontier. *Technometrics*, 53(4), 353–365. <https://doi.org/10.1198/TECH.2011.10087>
- Matos, S. V., Schleper, M. C., Gold, S., & Hall, J. K. (2020). The hidden side of sustainable operations and supply chain management: unanticipated outcomes, trade-offs and tensions. *International Journal of Operations and Production Management*, 40(12), 1749–1770. <https://doi.org/10.1108/IJOPM-12-2020-833/>
- McKinnon, A. C. (2010). Optimizing the road freight transport system. In C. D. J. Waters (Org.), *Global Logistics: New directions in supply chain management* (6° ed, p. 284–304). Kogan Page.
- McKinnon, A. C. (2015). Environmental sustainability: A new priority for logistics managers. In A. C. McKinnon, M. Browne, A. E. Whiteing, & M. Piecyk (Orgs.), *Green logistics : improving the environmental sustainability of logistics* (3rd ed, p. 3–26). Kogan Page.
- Menegazzo, L., & Petterini, F. (2018). Maiores Navios no Mundo, mais um Desafio no Brasil:

- uma análise do Programa Nacional de Dragagem. *Estudos Econômicos (São Paulo)*, 48(1), 175–209. <https://doi.org/10.1590/0101-41614816175LMF>
- Mentzer, J. T., DeWitt, W., Keebler, J. S., Min, S., Nix, N. W., Smith, C. D., & Zacharia, Z. G. (2001). DEFINING SUPPLY CHAIN MANAGEMENT. *Journal of Business Logistics*, 22(2), 1–25. <https://doi.org/10.1002/J.2158-1592.2001.TB00001.X>
- Miettinen, K. (1999). *Nonlinear Multiobjective Optimization* (Vol. 12). Springer US. <https://doi.org/10.1007/978-1-4615-5563-6>
- Min, S., Zacharia, Z. G., & Smith, C. D. (2019). Defining Supply Chain Management: In the Past, Present, and Future. *Journal of Business Logistics*, 40(1), 44–55. <https://doi.org/10.1111/JBL.12201>
- Ministério da Agricultura, Pecuária e Abastecimento - MAPA. (2020). *Projeções de Longo Prazo. Brasil 2019/20 a 2029/2030*. <https://www.gov.br/agricultura/pt-br/assuntos/politica-agricola/todas-publicacoes-de-politica-agricola/projecoes-do-agronegocio/projecoes-do-agronegocio-2020-2021-a-2030-2031.pdf>
- Ministério do Meio Ambiente - MMA. (2016). *Programa de Controle da poluição do ar por veículos automotores (PROCONVE)*. <http://www.ibama.gov.br/emissoes/veiculos-automotores/programa-de-controle-de-emissoes-veiculares-proconve>
- Ministério do Meio Ambiente - MMA. (2020). *RenovaBio — Português (Brasil)*. MMA. <https://www.gov.br/anp/pt-br/assuntos/renovabio>
- Norsworthy, M., & Craft, E. (2013). Emissions reduction analysis of voluntary clean truck programs at US ports. *Transportation Research Part D: Transport and Environment*, 22, 23–27. <https://doi.org/10.1016/J.TRD.2013.02.012>
- Organisation for Economic Co-Operation and Development - OECD. (2011). *Car Fleet Renewal Schemes: Environmental and Safety Impacts*. www.globalfuelconomy.org
- Organização das Nações Unidas - ONU. (2016). *Mobilizing sustainable transport for development. High-level Advisory Group on Sustainable Transport*. [https://sustainabledevelopment.un.org/content/documents/2375Mobilizing Sustainable Transport.pdf](https://sustainabledevelopment.un.org/content/documents/2375Mobilizing_Sustainable_Transport.pdf)
- Panagakos, G. (2016). Green Corridors Basics. In Harilaos N. Psaraftis (Org.), *Green Transportation Logistics: The Quest for Win-Win Solutions* (p. 81–121). Springer, Cham. https://doi.org/10.1007/978-3-319-17175-3_3
- Parmigiani, A., Klassen, R. D., & Russo, M. V. (2011). Efficiency meets accountability: Performance implications of supply chain configuration, control, and capabilities*. *Journal of Operations Management*, 29(3), 212–223. <https://doi.org/10.1016/J.JOM.2011.01.001>
- Patricksson, Ø. S., Fagerholt, K., & Rakke, J. G. (2015). The fleet renewal problem with regional emission limitations: Case study from Roll-on/Roll-off shipping. *Transportation Research Part C: Emerging Technologies*, 56, 346–358. <https://doi.org/10.1016/J.TRC.2015.04.019>
- Péra, T. G. (2017). *Modelagem das perdas na agrologística de grãos no Brasil: uma aplicação de programação matemática*. [Biblioteca Digital de Teses e Dissertações da Universidade de São Paulo]. <https://doi.org/10.11606/D.3.2017.TDE-17072017-160658>

- Péra, T. G., Bartholomeu, D. B., Su, C. T., & Caixeta-Filho, J. V. (2019). Evaluation of green transport corridors of Brazilian soybean exports to China. *Brazilian Journal of Operations & Production Management*, 16(3), 398–412. <https://doi.org/10.14488/BJOPM.2019.V16.N3.A4>
- Péra, T. G., Caixeta-Filho, J. V., & Salin, D. L. (2021). Brazil Modal Share Analysis for Corn and Soybeans: 2010-19 (Summary). *United States Department of Agriculture*. <https://doi.org/10.9752/TS310.02-2021>
- Péra, T. G., Rocha, F. V., Silva Neto, S., & Caixeta-Filho, J. V. (2018). *Análise dos impactos da Medida Provisória nº 832 de 2018 (Política de Preços Mínimos do Transporte Rodoviário de Cargas) na logística do agronegócio Brasileiro*. ESALQ-LOG. www.esalqlog.esalq.usp.br
- Perotti, S., Zorzini, M., Cagno, E., & Micheli, G. J. L. (2012). Green supply chain practices and company performance: The case of 3PLs in Italy. *International Journal of Physical Distribution and Logistics Management*, 42(7), 640–672. <https://doi.org/10.1108/09600031211258138/>
- Piecyk, M., Cullinane, S., & Edwards, J. (2015). Assessing the external impacts of freight transport. In A. McKinnon, M. Browne, A. Whiteing, & M. Piecyk (Orgs.), *Green Logistics: Improving the Environmental Sustainability of Logistics* (3rd ed). Kogan Page.
- Piecyk, M. I., & McKinnon, A. C. (2010). Forecasting the carbon footprint of road freight transport in 2020. *International Journal of Production Economics*, 128(1), 31–42. <https://doi.org/10.1016/J.IJPE.2009.08.027>
- Pineda, L., & Xie, Y. (2021). *TRUCK ECO-DRIVING PROGRAMS CURRENT STATUS IN LATIN AMERICA AND INTERNATIONAL BEST PRACTICES APRIL 2021*. www.theicct.org
- Pinto, J. T. de M., Mistage, O., Bilotta, P., & Helmers, E. (2018). Road-rail intermodal freight transport as a strategy for climate change mitigation. *Environmental Development*, 25, 100–110. <https://doi.org/10.1016/J.ENVDEV.2017.07.005>
- Posada, F., Wagner, D. V., Bansal, G., & Fernandez, R. (2015). *SURVEY OF BEST PRACTICES IN REDUCING EMISSIONS THROUGH VEHICLE REPLACEMENT PROGRAMS*. www.theicct.org
- Programa Brasileiro GHG Protocol. (2020). *Ferramenta de Inventário das Emissões*. GVAces. <http://ferramenta.ghgprotocolbrasil.com.br/>
- Psaraftis, H. N., & Kontovas, C. A. (2009). CO2 emission statistics for the world commercial fleet. *WMU Journal of Maritime Affairs* 2009 8:1, 8(1), 1–25. <https://doi.org/10.1007/BF03195150>
- Qi, Y., Zhang, Q., Ma, X., Quan, Y., & Miao, Q. (2017). Utopian point based decomposition for multi-objective optimization problems with complicated Pareto fronts. *Applied Soft Computing*, 61, 844–859. <https://doi.org/10.1016/J.ASOC.2017.08.036>
- Rizzi, L. I., & Ortúzar, J. D. D. (2015). Valuing transport externalities. In C. Nash (Org.), *Handbook of Research Methods and Applications in Transport Economics and Policy* (p. 93–111). Edward Elgar Publishing Ltd. <https://doi.org/10.4337/9780857937933.00012>
- Robinson, C. H. (2013). *Truckload fuel surcharges – How They work and what They cost*. MIT Center for Transportation & Logistics.

- https://www.supplychainbrain.com/ext/resources/secure_download/KellysFiles/WhitePapersAndBenchMarkReports/CHRobinson/CHR_TruckloadFuelSurchargeWhitepaper.pdf
- Rodrigue, J.-P. (2020). The Geography of Transport Systems. In *The Geography of Transport Systems* (5th Editio). Routledge. <https://doi.org/10.4324/9780429346323>
- Rodrigue, J.-P., Slack, B., & Comtois, C. (2017). Green Logistics. In *Handbook of Logistics and Supply-Chain Management* (Vol. 2, p. 339–350). Emerald Group Publishing Limited. <https://doi.org/10.1108/9780080435930-021>
- Rodrigues, V.S., Piecyk, M., Mason, R., & Boenders, T. (2015). The longer and heavier vehicle debate: A review of empirical evidence from Germany. *Transportation Research Part D: Transport and Environment*, 40, 114–131. <https://doi.org/10.1016/J.TRD.2015.08.003>
- Rødseth, K. L. (2017). Productivity growth in urban freight transport: An index number approach. *Transport Policy*, 56, 86–95. <https://doi.org/10.1016/J.TRANPOL.2017.02.009>
- Roulet, M. C., Caixeta-Filho, J. V., & Yoshizaki, H. T. Y. (2016). A Multiple-Criteria Analysis Application for Vertical Coordination in the Transportation of Agricultural Commodities in Brazil. *Journal of Food Products Marketing*, 22(6), 694–706. <https://doi.org/10.1080/10454446.2015.1121436>
- Salin, D. L. (2021). Soybean Transportation Guide: Brazil 2020. In *U.S. Dept. of Agriculture, Agricultural Marketing Service*. <https://doi.org/10.9752/TS048.08-2021>
- Salter, R., Dhar, S., & Newman, P. (2011). *Technologies for Climate Change Mitigation - Transport Sector*. https://www.researchgate.net/publication/235338990_Technologies_for_Climate_Change_Mitigation_-_Transport_Sector
- Santos, M. J., Curcio, E., Amorim, P., Carvalho, M., & Marques, A. (2021). A bilevel approach for the collaborative transportation planning problem. *International Journal of Production Economics*, 233, 108004. <https://doi.org/10.1016/J.IJPE.2020.108004>
- Sawik, B. (2018). Weighted-sum approach for Bi-objective optimization of fleet size with environmental aspects. *Applications of Management Science*, 19, 101–116. <https://doi.org/10.1108/S0276-897620180000019006/FULL/XML>
- Schiller, P. L., Bruun, E. C., & Kenworthy, J. R. (2010). *An introduction to sustainable transportation : policy, planning and implementation*. Earthscan.
- Secretária de Comércio Exterior – SECEX. (2021). *Comex Stat*. Estatísticas de Comércio Exterior. <http://comexstat.mdic.gov.br/pt/home>
- Seroka-Stolka, O., & Ociepa-Kubicka, A. (2019). Green logistics and circular economy. *Transportation Research Procedia*, 39, 471–479. <https://doi.org/10.1016/J.TRPRO.2019.06.049>
- Seuring, S. (2013). A review of modeling approaches for sustainable supply chain management. *Decision Support Systems*, 54(4), 1513–1520. <https://doi.org/10.1016/J.DSS.2012.05.053>
- Shafiee-Jood, M., & Cai, X. (2016). Reducing Food Loss and Waste to Enhance Food Security and Environmental Sustainability. *Environmental Science and Technology*, 50(16), 8432–8443. https://doi.org/10.1021/ACS.EST.6B01993/SUPPL_FILE/ES6B01993_SI_001.PDF

- Sims, R., Schaeffer, R., Creutzig, X., Cruz-Núñez, M., D'Agosto, D., Dimitriu, M. J., Figuerola Meza, L., Kobayashi, S., Lah, O., McKinnon, A., Newman, P., Ouyang, M., Shaur, J. J., Sperling, D., & Tiwari, G. (2014). Transport. In O. Edenhofer, R. Pichs-Madruga, E. Farahani, S. Kadner, K. Seyboth, A. Adler, I. Baum, S. Brunner, P. Eickemeier, B. Kriemann, J. Savolainen, S. Scholomer, C. von Stechow, T. Zwickel, & J. C. Minx (Orgs.), *Climate Change 2014: Mitigation of Climate Change. Part of the Working Group III Contribution to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change*. (p. 1–161). Cambridge University Press. <https://doi.org/10.1017/CBO9781107415416.005>
- Sistema de Informações de Fretes - SIFRECA. (2021). *Indicadores de preços de fretes rodoviários de cargas agrícolas*. ESALQ-LOG. <https://sifreca.esalq.usp.br/>
- Sivak, M., & Schoettle, B. (2012). Eco-driving: Strategic, tactical, and operational decisions of the driver that influence vehicle fuel economy. *Transport Policy*, 22, 96–99. <https://doi.org/10.1016/J.TRANPOL.2012.05.010>
- Stopford, M. (2009). *Maritime Economics*. Routledge; 3 edition.
- Sureeyatanapas, P., Poophiukhok, P., & Pathumnakul, S. (2018). Green initiatives for logistics service providers: An investigation of antecedent factors and the contributions to corporate goals. *Journal of Cleaner Production*, 191, 1–14. <https://doi.org/10.1016/J.JCLEPRO.2018.04.206>
- Taniguchi, E., & Nemoto, T. (2008). Intermodal freight transport in Urban areas in Japan. *The Future of Intermodal Freight Transport: Operations, Design and Policy*, 58–65. <https://doi.org/10.4337/9781848441392.00010>
- Tseng, M. L., Islam, M. S., Karia, N., Fauzi, F. A., & Afrin, S. (2019). A literature review on green supply chain management: Trends and future challenges. *Resources, Conservation and Recycling*, 141, 145–162. <https://doi.org/10.1016/J.RESCONREC.2018.10.009>
- United Nations Conference on Trade and Development - UNCTAD. (2020). *Review of Maritime Transport 2020*.
- United Nations Conference on Trade and Development - UNCTAD. (2021). *Review of Maritime Transport 2021*. <https://shop.un.org>
- United States Department of Agriculture - USDA. (2021). *Ocean and type of Datasets - Open Ag Transport Data*. Ocean bulk vessel fleet size by capacity. <https://agtransport.usda.gov/browse?category=Ocean&limitTo=datasets>
- United States Department of Energy - DOE. (2021). *Alternative Fuels Data Center: Biodiesel Blends*. Energy Efficiency & Renewable Energy. https://afdc.energy.gov/fuels/biodiesel_blends.html
- United States Energy Information Administration - EIA. (2021). *Diesel fuel surcharges*. EIA. <https://www.eia.gov/energyexplained/diesel-fuel/diesel-fuel-surcharges.php>
- Van der Byl, C. A., & Slawinski, N. (2015). Embracing Tensions in Corporate Sustainability: A Review of Research From Win-Wins and Trade-Offs to Paradoxes and Beyond. *Organization & Environment*, 28(1), 54–79. <https://doi.org/10.1177/1086026615575047>
- Wang, S., & Meng, Q. (2012). Sailing speed optimization for container ships in a liner shipping network. *Transportation Research Part E: Logistics and Transportation Review*, 48(3), 701–714. <https://doi.org/10.1016/J.TRE.2011.12.003>

- Wang, X., Song, G., Zhai, Z., Wu, Y., Yin, H., & Yu, L. (2021). Effects of Vehicle Load on Emissions of Heavy-Duty Diesel Trucks: A Study Based on Real-World Data. *International Journal of Environmental Research and Public Health* 2021, Vol. 18, Page 3877, 18(8), 3877. <https://doi.org/10.3390/IJERPH18083877>
- World Bank, The, & IRU. (2016). Road Freight Transport Services Reform. *Road Freight Transport Services Reform*. <https://doi.org/10.1596/25853>
- Wu, Z., & Pagell, M. (2011). Balancing priorities: Decision-making in sustainable supply chain management. *Journal of Operations Management*, 29(6), 577–590. <https://doi.org/10.1016/J.JOM.2010.10.001>
- Yang, J., & Sun, H. (2015). Battery swap station location-routing problem with capacitated electric vehicles. *Computers & Operations Research*, 55, 217–232. <https://doi.org/10.1016/J.COR.2014.07.003>
- Zaman, K., & Shamsuddin, S. (2017). Green logistics and national scale economic indicators: Evidence from a panel of selected European countries. *Journal of Cleaner Production*, 143, 51–63. <https://doi.org/10.1016/J.JCLEPRO.2016.12.150>
- Zhang, G., Li, G., & Peng, J. (2020). Risk Assessment and Monitoring of Green Logistics for Fresh Produce Based on a Support Vector Machine. *Sustainability* 2020, Vol. 12, Page 7569, 12(18), 7569. <https://doi.org/10.3390/SU12187569>
- Zhang, S., Lee, C. K. M., Chan, H. K., Choy, K. L., & Wu, Z. (2015). Swarm intelligence applied in green logistics: A literature review. *Engineering Applications of Artificial Intelligence*, 37, 154–169. <https://doi.org/10.1016/J.ENGAPPAI.2014.09.007>
- Zhang, W., Zhang, M., Zhang, W., Zhou, Q., & Zhang, X. (2020). What influences the effectiveness of green logistics policies? A grounded theory analysis. *Science of The Total Environment*, 714, 136731. <https://doi.org/10.1016/J.SCITOTENV.2020.136731>
- Zhu, Q., & Sarkis, J. (2004). Relationships between operational practices and performance among early adopters of green supply chain management practices in Chinese manufacturing enterprises. *Journal of Operations Management*, 22(3), 265–289. <https://doi.org/10.1016/J.JOM.2004.01.005>

APÊNDICES

APÊNDICE A: Modelo econométrico dos custos ferroviários: elasticidades de produtividade

A partir da estruturação de uma base de dados de custos econômicos e indicadores operacionais de cinco empresas ferroviárias (Ferrovia Centro-Atlântica, Ferrovia Norte-Sul, MRS, Rumo Malha Norte e Rumo Malha Sul) que concentram mais de 90% da movimentação de cargas agrícolas no país, foi estruturado um conjunto de modelos econométricos para estimar as elasticidades de alguns indicadores operacionais, de forma a avaliar choques nestes componentes no modelo de *green logistics*, envolvendo o período anual de 2015 até 2020. O modelo econométrico, na sua forma funcional, a ser avaliado em dados em painel (*pool*, efeitos fixos e efeitos aleatórios), pode ser visualizado na equação (A1). Também foram adicionados na formulação duas variáveis *dummies* temporais, envolvendo os períodos 2015-2016 e 2017-2018, como variáveis controles em relação ao período 2019-2020.

$$C_{\text{ferroviario}_{it}} = \beta_0 + \beta_1 \text{DIST}_{it} + \beta_2 \text{VEL}_{it} + \beta_3 \text{EFIC}_{it} + \beta_4 Q_{it} + \varepsilon_{it} \quad (\text{A1})$$

Onde:

$C_{\text{ferroviario}_{it}}$: é o logaritmo natural do custo unitário de transporte ferroviário da empresa ferroviária i no período t , em Reais por tonelada;

DIST_{it} : é o logaritmo natural da distância média (quilômetros) de transporte da empresa ferroviária i no período t ;

VEL_{it} : é o logaritmo natural da velocidade média (quilômetros por hora) de transporte ferroviário da empresa i no período t ;

EFIC_{it} : é o logaritmo natural da eficiência energética no transporte ferroviário relacionada ao consumo de combustível (quilômetros por litro) da empresa i no período t ;

Q_{it} : é o logaritmo natural da quantidade movimentada de carga na ferrovia, em toneladas úteis, da empresa i no período t ;

ε_{it} : é o termo de erro dos modelos.

Foram estimados três modelos de regressão envolvendo os dados em painel dos custos econômicos unitários de transporte ferroviários de forma a selecionar o mais adequado, a partir dos testes estatísticos realizados, para utilizá-lo como estimadores para as análises do modelo de *green logistics*. Os modelos estimados são *polled* (dados empilhados), efeitos fixos e efeitos aleatórios. Os resultados das estatísticas e testes realizados podem ser visualizados na Tabela A1. O primeiro modelo de regressão, *polled*, foi estimado pelo método de Mínimos Quadrados Ordinários (MQO). Especificamente ainda, quanto à multicolinearidade, aplicou-se a análise do Fator de Inflação da Variância (VIF), o qual não apresentou valores críticos (acima de 10), indicando a não existência de multicolinearidade. Os VIFs obtidos ficaram abaixo de quatro. Foram realizados os testes de Wald Modificado para heterocedasticidade em grupo de forma a

avaliar a presença de heterocedasticidade, bem como, o teste de Wooldridge para autocorrelação serial. O teste de Wald modificado não rejeitou a hipótese nula de homogeneidade ao nível de significância de 95%. O teste de Wooldridge indicou a presença de autocorrelação serial de primeira ordem no painel para um nível de significância de 95%. Em vistas aos resultados, foi realizada a correção do modelo pelo método de Huber-White envolvendo erros-padrão robustos.

Especificamente quanto à decisão na escolha do melhor modelo, foram aplicados os testes de Hausman, do multiplicador de Lagrange de Breusch-Pagan e de Chow (GREENE, 2008). O teste de Hausman rejeitou a hipótese nula, a qual diz que a modelagem obtida por efeitos aleatórios oferece estimadores consistentes dos parâmetros. O teste de Chow rejeitou a hipótese nula de o modelo *pool* ser o mais adequado, de forma que as características observáveis dos dados são importantes na modelagem. Portanto, o modelo apropriado para utilizar como estimadores do modelo é o de efeito fixo, o qual será explicado na sequência.

Tabela A1 - Estatísticas e parâmetros estimados dos modelos de custo econômico ferroviário

Variáveis	<i>Polled</i>	Efeito Fixo (EF) ¹	Efeito Aleatório (EA) ¹
Intercepto	3,6191* (0,9331)	12,9915* (2,2969)	3,6191* (0,3214)
DIST	0,8217* (0,0873)	1,04** (0,3065)	0,8217* (0,0437)
VEL	-0,6905* (0,0603)	-1,007* (0,1392)	-0,6905* (0,0294)
EFIC	-0,2218* (0,0376)	-0,2124* (0,0405)	-0,2218* (0,0178)
Q	-0,0864* (0,0265)	-0,6638* (0,0598)	-0,0864* (0,0051)
2015-2016	0,0766*** (0,0445)	-0,0489 (0,0251)	0,0766 (0,091)
2017-2018	0,0193** (0,0428)	0,0222 (0,019)	0,0193 (0,042)
R ²	97,74		
R ² within		87,45	57,89
R ² between		88,72	99,94
R ² overall		87,29	97,74
Teste F para <i>Pooled</i> e EF / Wald (χ^2) para EA	165,92*	22,06*	995,54*
Teste de Wooldridge p/ autocorr. (F)		10,79**	
Teste de Wald Modificado p/ heter. (χ^2)		50,82*	
Teste de Hausman (χ^2)		50,40*	
Teste de Chow (F)		11,72*	
Teste do Multiplicador de Lagrange de Breuch-Pagan (χ^2)			0
N observações	30		

Erros padrões apresentados entre parêntese para *polled* e erros padrões robustos para EF e EA
VIFs: DIST (4,01), Q (2,01), EFIC (1,87), VEL (1,76), 2015-2016 (1,45) e 2017-2018 (1,34)

* Estatisticamente significativo ao nível de 1%

** Estatisticamente significativo ao nível de 5%

*** Estatisticamente significativo ao nível de 10%

¹ Regressão por *Generalized Least Squares* (GLS)

Fonte: resultados da pesquisa

O modelo de efeitos fixos, mais apropriado para avaliação, demonstrou que o custo unitário de transporte ferroviário pode ser explicado pelas variáveis velocidade média (VEL) e quantidade (Q) – estatisticamente significativas ao nível de 5%, enquanto distância (DIST) e eficiência energética (EFIC) são estatisticamente significativas ao nível de 10%. Como as variáveis exógenas e a endógena estão em logaritmos, os coeficientes calculados são as próprias elasticidades. Verifica-se o efeito positivo da distância no custo ferroviário, com elasticidade de 1,040. O efeito da velocidade média no custo ferroviário é negativo, com elasticidade de -1,007. O efeito da eficiência energética é negativo em relação ao custo ferroviário, com elasticidade de -0,2124. Por fim, a elasticidade da quantidade transportada em relação ao custo ferroviário é de -0,6638, a qual é negativa, pois o custo avaliado é o unitário, demonstrando o efeito de economia de escala do transporte ferroviário com o aumento da quantidade transportada. As variáveis binárias “2015-2016” e “2017-2018” não foram significativas quando comparadas ao período de referência (2019-2020). Tais variáveis serviram de controle para captar eventuais efeitos temporais ocorridos no período.

A partir da avaliação dos resultados do modelo econométrico fica evidente a importância de melhorias na eficiência energética e na velocidade média do transporte ferroviário para redução dos custos unitários de transporte. Além disso, foi observado que o custo de transporte ferroviário é relativamente sensível às variações de distância e velocidade, com elasticidades em módulo acima de um. As elasticidades estimadas deste modelo foram simuladas como choques nos cenários do modelo de *green logistics*.

APÊNDICE B: Padrões de produtividade do transporte rodoviário de granéis agrícolas

A identificação dos padrões de produtividade do transporte rodoviário (velocidade, tempos e eficiência energética) foi realizada a partir de uma análise de *cluster* utilizando o algoritmo *K-means* (CHARRAD *et al.*, 2015) para um conjunto de dados obtidos de uma pesquisa junto aos agentes representativos do transporte no âmbito da definição da Política Nacional de Pisos Mínimos do Transporte Rodoviário de Cargas, filtrado para agregar veículos que declararam movimentação de granéis agrícolas para veículos compatíveis com a movimentação de soja, disponibilizada pelo ESALQ-LOG (2020).

Foram realizados 23 testes para identificar o número ótimo de clusters (k^*) para representar adequadamente os indivíduos de análise. Especificamente, 9 testes indicaram 3 clusters (k^*): KL, Hartigan, TrCovW, TraceW, Rubin, Silhouette, Ratkowsky, Ball, SDindex; 5 testes indicaram 2 clusters: CH, Duda, Pseudo T2, Beale e McClain; 3 testes propuseram 5 clusters: Scott, Marriot e Friedman; 2 testes propuseram 10 clusters: Dunn e SDbw; os demais clusters apresentaram apenas um teste com recomendação do número ótimo: 6 clusters (PtBiserial), 7 clusters (Cindex), 8 clusters (DB) e 9 clusters (CCC). Portanto, adotou-se o número ótimo de três clusters, em função da maior quantidade de indicações dos testes realizados.

As características dos três *clusters* de produtividade podem ser visualizados na Tabela B1. O *Cluster 1* é caracterizado por apresentar alto valor para a eficiência de consumo de combustível associado com baixos valores para tempo de descarregamento, tempo de carregamento, quilometragem mensal percorrida e número médio de eixos. O *Cluster 2* é caracterizado por apresentar altos valores para os tempos de carregamento, tempo de descarregamento e quilometragem mensal percorrida e baixo valor para o número médio de eixos. Por fim, o *Cluster 3* apresenta alto valor para o número médio de eixos e baixos valores para as variáveis de eficiência energética e de quilometragem mensal percorrida.

Tabela B1 – *Clusters* de produtividade operacional de longa distância (portos) do transporte rodoviário

Indicadores de Produtividade	unidade	<i>Clusters</i>		
		1	2	3
Velocidade média	km/h	63,57	63,58	64,26
Número de eixos médios	unidades	6,51	6,61	9,00
Distância média percorrida	km/mês	10.201,15	11.238,78	10.388,57
Eficiência de consumo de combustível	km/litro	2,05	1,93	1,66
Tempo médio de carregamento	horas	7,25	21,39	13,06
Tempo médio de descarregamento	horas	7,90	22,00	14,16
Frequência de observações	%	50,9%	28,7%	20,5%

Fonte: resultados da pesquisa

A partir da análise de *clusters*, foi escolhido o *cluster* típico (1) da produtividade operacional para calibrar o modelo de custo de transporte, principalmente por ser o de maior frequência das observações de indivíduos na amostra realizada. Especificamente ainda, optou-se por segregar dois tipos de transporte: longa distância (com destino aos portos) e curta e média distâncias (com destino aos centros consumidores dos mercados domésticos e terminais ferroviários e hidroviários). Tal distinção se fez necessária pela observação dos elevados tempos de carregamento e descarregamentos obtidos na análise de *cluster*, que são compatíveis para percursos com finalidade de longa distância, principalmente portuária; entretanto, não são observáveis para rotas com destino ao mercado doméstico ou terminais ferroviários ou hidroviários, os quais apresentam tempos totais de carregamento e descarregamento inferiores, em decorrência da maior produtividade. Adotou-se como tempo total de carregamento e descarregamento de 5 horas para estes trajetos, conforme observado por ESALQ-LOG (2020). As informações utilizadas para calibração da estrutura de custo de transporte rodoviário são apresentadas na Tabela B2.

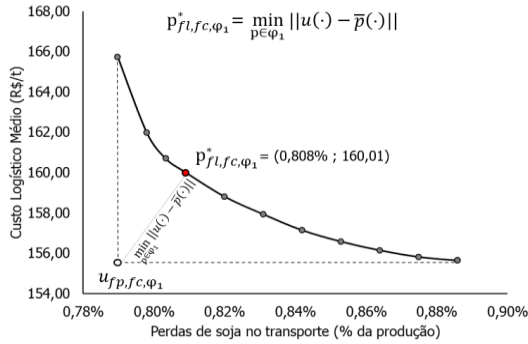
Tabela B2 – Parâmetros operacionais adotados para a estruturação dos custos de transporte rodoviário

Parâmetros operacionais	Unidade	Longa Distância (Porto) ¹	Curta e Média Distância (Mercado Doméstico e Terminais) ²
Velocidade média	km/h	63,57	63,57
Tempo de Carregamento e Descarregamento	h	15,15	5,00
Eficiência Energética	km/l	2,05	2,05
Eixos da composição veicular	eixos	7	7

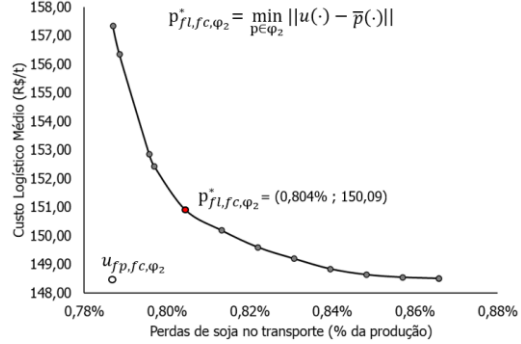
Fontes: ¹ Análise de *Cluster (K-means)* da base de dados dos respondentes da pesquisa de piso de frete; ² ESALQ-LOG (2020).

APÊNDICE C: Fronteiras de Pareto: minimização dos custos logísticos e minimização das perdas nas atividades logísticas

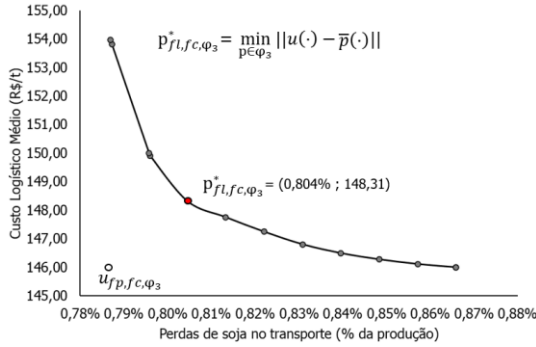
(a) Contrafactual (2030-2050): $\varphi_1^{c/l}$



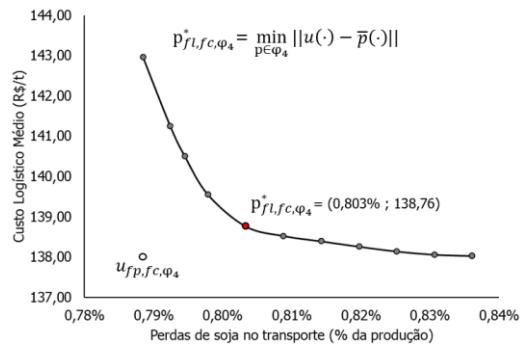
(b) Melhoria na Produtividade do Transp. Rodoviário – Tempo de carreg/descarregamento: $\varphi_2^{c/l}$



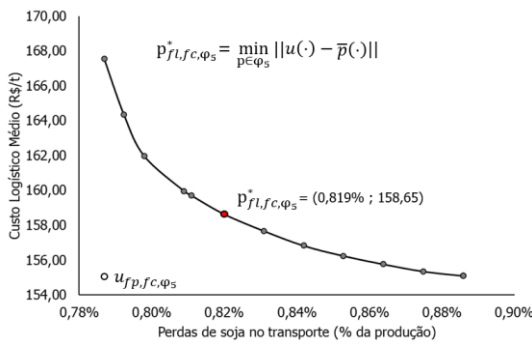
(c) Melhoria na Eficiência Energética do Transp. Rodoviário: $\varphi_3^{c/l}$



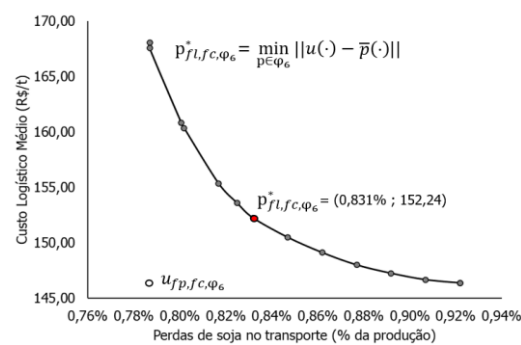
(d) Pacote Tecnológico do Transp. Rodoviário (Tempo de carreg/descarreg. e eficiência energética): $\varphi_4^{c/l}$



(e) Melhoria na Eficiência Energética do Transporte Ferroviário: $\varphi_5^{c/l}$



(f) Modal Shift – Inclusão de Novas Ferrovias: $\varphi_6^{c/l}$



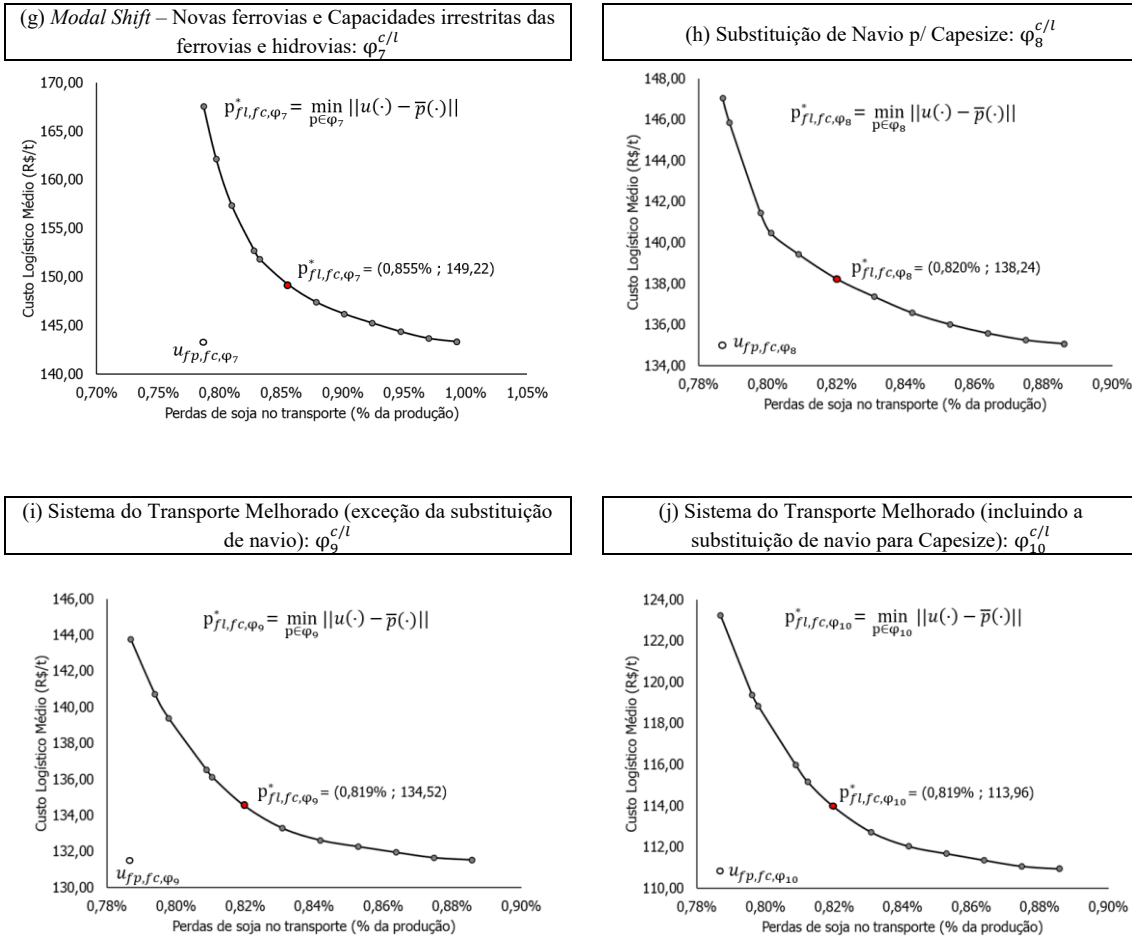


Figura C1 – Soluções eficientes e Fronteiras de Pareto para os cenários de mudanças tecnológicas: min-min custos logísticos e perdas nas atividades logísticas
 Fonte: resultados da pesquisa

APÊNDICE D: Resultados das variáveis do transporte dos cenários simulados em diferentes cortes temporais

Tabela D1 – Indicadores nos diferentes cortes temporais para o cenário de melhoria nos tempos de carregamento e descarregamento do transporte rodoviário (C2) no período 2030-2050

Agregados	Indicadores	Unidade	Cenário 2		
			2030	2040	2050
Indicadores Gerais	Custos de Transporte	R\$ bilhões	21,57	23,16	24,42
	Custos de Transporte	R\$/t	137,07	137,39	137,60
	Emissões de CO ₂	milhões de toneladas	11,00	11,84	12,51
	Emissões de CO ₂	kg de CO ₂ /t de soja	69,90	70,25	70,49
	Perdas no Transporte	mil toneladas	1.394,08	1.482,23	1.552,70
	Perdas no Transporte	% da produção	0,89%	0,88%	0,87%
	Demanda de Caminhões	mil veículos	66,02	72,33	77,38
	Razão de Transporte/Produção	un.	1,24	1,22	1,21
Demanda (Intensidade de Transporte)	Rodoviário	bilhões t.km	86,99	95,81	102,84
	Ferrovário		20,65	20,68	20,71
	Hidroviário		15,73	15,10	14,59
	Marítimo		1.813,08	1.941,71	2.044,54
Distância Média de Transporte Interno	Rodoviário	km	552,76	568,42	579,44
	Ferrovário		857,82	857,28	856,85
	Hidroviário		1.217,16	1.168,59	1.129,53
Demanda de Combustível	Diesel	mil metros cúbicos	1.301,56	1.417,16	1.509,41
	Óleo combustível		2.398,19	2.568,34	2.704,34

Fonte: resultados da pesquisa

Tabela D2 – Indicadores nos diferentes cortes temporais para o cenário da eficiência energética do transporte rodoviário (C3) no período 2030-2050

Agregados	Indicadores	Unidade	Cenário 3		
			2030	2040	2050
Indicadores Gerais	Custos de Transporte	R\$ bilhões	21,19	22,74	23,98
	Custos de Transporte	R\$/t	134,64	134,93	135,13
	Emissões de CO ₂	milhões de toneladas	10,10	10,84	11,43
	Emissões de CO ₂	kg de CO ₂ /t de soja	64,17	64,33	64,41
	Perdas no Transporte	mil toneladas	1.387,41	1.473,77	1.544,77
	Perdas no Transporte	% da produção	0,88%	0,87%	0,87%
	Demanda de Caminhões	mil veículos	83,78	91,91	98,02
	Razão de Transporte/Produção	un.	1,22	1,21	1,20
Demanda (Intensidade de Transporte)	Rodoviário	bilhões t.km	90,38	99,40	106,12
	Ferrovário		19,30	19,01	18,94
	Hidroviário		12,60	12,09	12,24
	Marítimo		1.813,07	1.941,71	2.044,54
Distância Média de Transporte Interno	Rodoviário	km	574,28	589,72	597,91
	Ferrovário		813,51	815,64	815,88
	Hidroviário		1.077,92	1.030,37	1.020,59
Demanda de Combustível	Diesel	mil metros cúbicos	956,02	1.034,71	1.095,02
	Óleo combustível		2.398,18	2.568,34	2.704,34

Fonte: resultados da pesquisa

Tabela D3 – Indicadores nos diferentes cortes temporais para o cenário do pacote tecnológicos – melhoria dos tempos de carregamento/descarregamento e eficiência energética (C4) no período 2030-2050

Agregados	Indicadores	Unidade	Cenário 4		
			2030	2040	2050
Indicadores Gerais	Custos de Transporte	R\$ bilhões	20,01	21,45	22,61
	Custos de Transporte	R\$/t	127,14	127,29	127,39
	Emissões de CO ₂	milhões de toneladas	10,19	10,92	11,51
	Emissões de CO ₂	kg de CO ₂ /t de soja	64,73	64,79	64,83
	Perdas no Transporte	mil toneladas	1.343,90	1.433,49	1.504,99
	Perdas no Transporte	% da produção	0,85%	0,85%	0,85%
	Demanda de Caminhões	mil veículos	73,18	79,07	83,81
	Razão de Transporte/Produção	un.	1,16	1,15	1,15
Demanda (Intensidade de Transporte)	Rodoviário	bilhões t.km	98,59	106,73	113,26
	Ferrovário		14,51	14,51	14,51
	Hidroviário		6,82	7,37	7,73
	Marítimo		1.813,07	1.941,71	2.044,54
Distância Média de Transporte Interno	Rodoviário	km	626,48	633,23	638,18
	Ferrovário		856,02	856,02	856,02
	Hidroviário		840,60	866,22	879,62
Demanda de Combustível	Diesel	mil metros cúbicos	991,41	1.065,43	1.124,79
	Óleo combustível		2.398,18	2.568,34	2.704,34

Fonte: resultados da pesquisa

Tabela D4 – Indicadores nos diferentes cortes temporais para o cenário eficiência energética das ferrovias (C5) no período 2030-2050

Agregados	Indicadores	Unidade	Cenário 5		
			2030	2040	2050
Indicadores Gerais	Custos de Transporte	R\$ bilhões	22,54	24,24	25,60
	Custos de Transporte	R\$/t	143,25	143,81	144,22
	Emissões de CO ₂	milhões de toneladas	10,92	11,76	12,42
	Emissões de CO ₂	kg de CO ₂ /t de soja	69,39	69,77	70,00
	Perdas no Transporte	mil toneladas	1.404,91	1.493,24	1.563,85
	Perdas no Transporte	% da produção	0,89%	0,89%	0,88%
	Demanda de Caminhões	mil veículos	80,02	87,91	94,10
	Razão de Transporte/Produção	un.	1,25	1,24	1,22
Demanda (Intensidade de Transporte)	Rodoviário	bilhões t.km	85,64	94,41	101,24
	Ferrovário		22,37	22,42	22,46
	Hidroviário		15,73	15,10	14,97
	Marítimo		1.813,07	1.941,71	2.044,54
Distância Média de Transporte Interno	Rodoviário	km	544,16	560,15	570,41
	Ferrovário		839,29	838,33	837,57
	Hidroviário		1.217,16	1.168,59	1.159,05
Demanda de Combustível	Diesel	mil metros cúbicos	1.270,64	1.385,78	1.475,85
	Óleo combustível		2.398,18	2.568,34	2.704,34

Fonte: resultados da pesquisa

Tabela D5 – Indicadores nos diferentes cortes temporais para o cenário de *modal-shift*: novas ferrovias (C6) no período 2030-2050

Agregados	Indicadores	Unidade	Cenário 6		
			2030	2040	2050
Indicadores Gerais	Custos de Transporte	R\$ bilhões	21,15	22,69	23,91
	Custos de Transporte	R\$/t	134,40	134,59	134,72
	Emissões de CO ₂	milhões de toneladas	10,31	11,05	11,64
	Emissões de CO ₂	kg de CO ₂ /t de soja	65,51	65,55	65,56
	Perdas no Transporte	mil toneladas	1.460,86	1.562,17	1.642,76
	Perdas no Transporte	% da produção	0,93%	0,93%	0,93%
	Demanda de Caminhões	mil veículos	60,00	64,50	68,11
	Razão de Transporte/Produção	un.	1,34	1,33	1,33
Demanda (Intensidade de Transporte)	Rodoviário	bilhões t.km	57,50	61,77	65,20
	Ferroviano		39,36	42,05	44,20
	Hidroviário		16,54	17,90	18,92
	Marítimo		1.813,59	1.942,23	2.044,89
Distância Média de Transporte Interno	Rodoviário	km	365,35	366,51	367,34
	Ferroviano		915,18	921,41	926,39
	Hidroviário		1.676,50	1.717,50	1.752,68
Demanda de Combustível	Diesel	mil metros cúbicos	1.035,36	1.111,01	1.171,40
	Óleo combustível		2.398,86	2.569,01	2.704,81

Fonte: resultados da pesquisa

Tabela D6 – Indicadores nos diferentes cortes temporais para o de modal-shift: expansão irrestrita de capacidade da infraestrutura existente e inclusão das novas ferrovias (C7) no período 2030-2050

Agregados	Indicadores	Unidade	Cenário 7		
			2030	2040	2050
Indicadores Gerais	Custos de Transporte	R\$ bilhões	20,56	22,01	23,17
	Custos de Transporte	R\$/t	130,63	130,60	130,57
	Emissões de CO ₂	milhões de toneladas	10,16	10,88	11,46
	Emissões de CO ₂	kg de CO ₂ /t de soja	64,55	64,55	64,55
	Perdas no Transporte	mil toneladas	1.582,57	1.694,93	1.784,76
	Perdas no Transporte	% da produção	1,01%	1,01%	1,01%
	Demanda de Caminhões	mil veículos	48,24	51,67	54,40
	Razão de Transporte/Produção	un.	1,56	1,56	1,56
Demanda (Intensidade de Transporte)	Rodoviário	bilhões t.km	47,82	51,21	53,93
	Ferroviano		50,22	53,86	56,71
	Hidroviário		15,80	16,78	17,63
	Marítimo		1.813,59	1.942,29	2.045,17
Distância Média de Transporte Interno	Rodoviário	km	303,87	303,84	303,84
	Ferroviano		710,23	710,20	709,59
	Hidroviário		893,51	893,10	893,40
Demanda de Combustível	Diesel	mil metros cúbicos	977,48	1.047,06	1.102,49
	Óleo combustível		2.398,86	2.569,10	2.705,18

Fonte: resultados da pesquisa

Tabela D7 – Indicadores nos diferentes cortes temporais para o cenário de substituição de navios para Capesize (C8) no período 2030-2050

Agregados	Indicadores	Unidade	Cenário 8		
			2030	2040	2050
Indicadores Gerais	Custos de Transporte	R\$ bilhões	19,40	20,86	22,04
	Custos de Transporte	R\$/t	123,26	123,78	124,17
	Emissões de CO ₂	milhões de toneladas	8,86	9,55	10,09
	Emissões de CO ₂	kg de CO ₂ /t de soja	56,29	56,64	56,86
	Perdas no Transporte	mil toneladas	1.404,91	1.493,24	1.563,85
	Perdas no Transporte	% da produção	0,89%	0,89%	0,88%
	Demanda de Caminhões	mil veículos	80,02	87,91	94,10
	Razão de Transporte/Produção	un.	1,25	1,24	1,22
Demanda (Intensidade de Transporte)	Rodoviário	bilhões t.km	85,64	94,41	101,24
	Ferroviano		22,37	22,42	22,46
	Hidroviário		15,73	15,10	14,97
	Marítimo		1.813,07	1.941,71	2.044,54
Distância Média de Transporte Interno	Rodoviário	km	544,16	560,15	570,41
	Ferroviano		839,29	838,33	837,57
	Hidroviário		1.217,16	1.168,59	1.159,05
Demanda de Combustível	Diesel	mil metros cúbicos	1.294,87	1.410,07	1.500,18
	Óleo combustível		1.727,87	1.850,47	1.948,46

Fonte: resultados da pesquisa

Tabela D8 – Indicadores nos diferentes cortes temporais para o do transporte melhorado (tempos de carregamento/descarregamento, eficiências energéticas, novas ferrovias, inclusão de capacidades irrestritas nas ferrovias e sem a substituição de navios) no período 2030-2050

Agregados	Indicadores	Unidade	Cenário 9		
			2030	2040	2050
Indicadores Gerais	Custos de Transporte	R\$ bilhões	18,87	20,20	21,27
	Custos de Transporte	R\$/t	119,89	119,87	119,85
	Emissões de CO ₂	milhões de toneladas	9,69	10,37	10,92
	Emissões de CO ₂	kg de CO ₂ /t de soja	61,55	61,53	61,52
	Perdas no Transporte	mil toneladas	1.490,58	1.596,79	1.681,86
	Perdas no Transporte	% da produção	0,95%	0,95%	0,95%
	Demanda de Caminhões	mil veículos	55,02	58,77	61,74
	Razão de Transporte/Produção	un.	1,38	1,38	1,38
Demanda (Intensidade de Transporte)	Rodoviário	bilhões t.km	69,16	73,82	77,51
	Ferroviano		28,86	31,15	33,02
	Hidroviário		13,16	14,03	14,73
	Marítimo		1.813,59	1.942,29	2.045,17
Distância Média de Transporte Interno	Rodoviário	km	439,44	438,01	436,70
	Ferroviano		644,50	647,20	649,36
	Hidroviário		868,65	869,00	869,27
Demanda de Combustível	Diesel	mil metros cúbicos	796,49	852,08	896,24
	Óleo combustível		2.398,86	2.569,10	2.705,18

Fonte: resultados da pesquisa

Tabela D9 – Indicadores nos diferentes cortes temporais para o do transporte melhorado (tempos de carregamento/descarregamento, eficiências energéticas, novas ferrovias, inclusão de capacidades irrestritas nas ferrovias e com a substituição de navios para Capesizes) no período 2030-2050

Agregados	Indicadores	Unidade	Cenário 10		
			2030	2040	2050
Indicadores Gerais	Custos de Transporte	R\$ bilhões	15,63	16,73	17,62
	Custos de Transporte	R\$/t	99,31	99,29	99,27
	Emissões de CO ₂	milhões de toneladas	7,56	8,09	8,52
	Emissões de CO ₂	kg de CO ₂ /t de soja	48,04	48,03	48,01
	Perdas no Transporte	mil toneladas	1.490,58	1.596,79	1.681,86
	Perdas no Transporte	% da produção	0,95%	0,95%	0,95%
	Demanda de Caminhões	mil veículos	55,02	58,77	61,74
	Razão de Transporte/Produção	un.	1,38	1,38	1,38
Demanda (Intensidade de Transporte)	Rodoviário	bilhões t.km	69,16	73,82	77,51
	Ferroviário		28,86	31,15	33,02
	Hidroviário		13,16	14,03	14,73
	Marítimo		1.813,59	1.942,29	2.045,17
Distância Média de Transporte Interno	Rodoviário	km	436,84	435,18	433,62
	Ferroviário		685,70	689,51	692,91
	Hidroviário		778,40	779,07	779,83
Demanda de Combustível	Diesel	mil metros cúbicos	796,49	852,08	896,24
	Óleo combustível		1.728,36	1.851,02	1.949,06

Fonte: resultados da pesquisa

APÊNDICE E: Terminais hidroviários e ferroviários utilizados

Tabela E1 – Lista dos terminais ferroviários, hidroviários e portos considerados no modelo

Terminais Ferroviários	
Água Boa (MT)	Maringá (PR)
Alto Araguaia (MT)	Palmeirante (TO)
Araguari (MG)	Pirapora (MG)
Barreiras (BA)	Ponta Grossa (PR)
Cacequi (RS)	Porto Franco (MA)
Cascavel (PR)	Porto Nacional (TO)
Chapadão do Sul (MS)	Rio Verde (GO)
Cruz Alta (RS)	Rolândia (PR)
Figueirópolis (TO)	Rondonópolis (MT)
Guarapuava (PR)	Santa Luzia (MG)
Ijuí (RS)	Santo Ângelo (RS)
Itiquira (MT)	São Simão (GO)
Júlio de Castilhos (RS)	Sinop (MT)
Londrina (PR)	Tupanciretã (RS)
Lucas do Rio Verde (MT)	Uberaba (MG)
Marialva (PR)	Pederneiras (SP)
Terminais Hidroviários	
Itaituba (PA)	Porto Velho (RO)
Porto Alegre (RS)	São Simão (GO)
Portos	
Belém (PA)	Santarém (PA)
Manaus (AM)	Santos (SP)
Paranaguá (PR)	São Francisco do Sul (SC)
Rio Grande (RS)	São Luís (MA)
Salvador (BA)	Vitória (ES)

APÊNDICE F: Centroides considerados no conjunto de origem no modelo

Abelardo Luz (SC), Açailândia (MA), Afonso Cunha (MA), Agronômica (SC), Água Azul do Norte (PA), Água Doce (SC), Alfenas (MG), Alta Floresta (MT), Altamira (PA), Alto Alegre (RR), Alto Alegre dos Parecis (RO), Alto Garças (MT), Alto Piquiri (PR), Amarinópolis (GO), Anadia (AL), André da Rocha (RS), Araçatuba (SP), Araranguá (SC), Araucária (PR), Arroio Grande (RS), Assaí (PR), Astorga (PR), Atibaia (SP), Baixa Grande do Ribeiro (PI), Baldim (MG), Bambuí (MG), Barra do Garças (MT), Barracão (RS), Barretos (SP), Batatais (SP), Bela Vista de Goiás (GO), Belterra (PA), Birigui (SP), Boa Hora (PI), Bom Despacho (MG), Bom Jesus (PI), Bom Sucesso (MG), Bonfim (RR), Bonito (MS), Botucatu (SP), Brasília (DF), Brasnorte (MT), Brejo (MA), Brejo Grande do Araguaia (PA), Brotas (SP), Buriticupu (MA), Buritizeiro (MG), Cáceres (MT), Cachoeira do Sul (RS), Camaquã (RS), Cambará (PR), Campinas do Sul (RS), Campo Belo do Sul (SC), Campo Erê (SC), Campo Novo do Parecis (MT), Campos Lindos (TO), Campos Novos (SC), Candelária (RS), Canguçu (RS), Capanema (PR), Capão Bonito (SP), Capinópolis (MG), Capivari do Sul (RS), Carandaí (MG), Cardoso (SP), Carolina (MA), Carrancas (MG), Casa Branca (SP), Cascavel (PR), Caseara (TO), Catalão (GO), Chapada dos Guimarães (MT), Chapada Gaúcha (MG), Chapadão do Sul (MS), Cláudio (MG), Conceição do Rio Verde (MG), Conchal (SP), Corinto (MG), Cornélio Procópio (PR), Coromandel (MG), Corrente (PI), Correntina (BA), Cristais (MG), Cristalina (GO), Cristiano Ottoni (MG), Cruz Alta (RS), Cruzeiro do Sul (RS), Cujubim (RO), Cumaru do Norte (PA), Darcinópolis (TO), Delfinópolis (MG), Dois Irmãos do Buriti (MS), Dom Pedrito (RS), Doutor Maurício Cardoso (RS), Doutor Pedrinho (SC), Doutor Ulysses (PR), Echaporã (SP), Faxinal (PR), Firminópolis (GO), Formiga (MG), Formosa do Rio Preto (BA), Frutal (MG), Goiatuba (GO), Governador Eugênio Barros (MA), Grajaú (MA), Guaiara (SP), Guarani das Missões (RS), Guarapuava (PR), Guiratinga (MT), Humaitá (AM), Ibaiti (PR), Ibiá (MG), Içara (SC), Independência (RS), Ipixuna do Pará (PA), Ipuiúna (MG), Irani (SC), Irati (PR), Itaberai (GO), Itapetininga (SP), Itapeva (SP), Itapicuru (BA), Itápolis (SP), Itatim (BA), Itiquira (MT), Ituporanga (SC), Ituverava (SP), Jaboticabal (SP), Jardinópolis (SP), José Bonifácio (SP), Jundiá (AL), Jussara (GO), Lagoa da Confusão (TO), Lapa (PR), Lençóis Paulista (SP), Limoeiro do Norte (CE), Londrina (PR), Macapá (AP), Madre de Deus de Minas (MG), Mafra (SC), Magalhães de Almeida (MA), Magda (SP), Malhada (BA), Mamborê (PR), Mangueirinha (PR), Manoel Ribas (PR), Maracaju (MS), Marialva (PR), Marilândia do Sul (PR), Minas do Leão (RS), Minduri (MG), Mirador (MA), Mogi Guaçu (SP), Moju (PA), Monte Castelo (SP), Monte Mor (SP), Montes Claros de Goiás (GO), Morada Nova de Minas (MG), Mucajá (RR), Muitos Capões (RS), Não-Me-Toque (RS), Naviraí (MS), Nhandeara (SP), Niquelândia (GO), Nonoai (RS), Nortelândia (MT), Nova Andradina (MS), Nova Crixás (GO), Nova Maringá (MT), Nova Palma (RS), Novo Mundo (MT), Novo Progresso (PA), Ouroeste (SP), Palma Sola (SC), Palmeira das Missões (RS), Palmital (SP), Paracatu (MG), Paragominas (PA), Paranaíba (MS), Paranapanema (SP), Paranatinga (MT), Parapuã (SP), Paraúna (GO), Parnarama (MA), Pato Branco (PR), Patos de Minas (MG), Paula Freitas (PR), Pederneiras (SP), Pedras Altas (RS), Peixe (TO), Pimenteiras do Oeste (RO), Piracicaba (SP), Piracuruca (PI), Pirai do Sul (PR), Pirassununga (SP), Pitanga (PR), Plácido de Castro (AC), Ponta Grossa (PR), Pontão (RS), Portão (RS), Porto Esperidião (MT), Porto Murtinho (MS), Porto Nacional (TO), Primavera do Leste (MT), Promissão (SP), Querência (MT), Querência do Norte (PR), Quirinópolis (GO), Quitandinha (PR), Rancharia (SP), Redenção (PA), Regeneração (PI), Renascença (PR), Ribas do Rio Pardo (MS), Rio Crespo (RO), Rio Negrinho (SC), Rio Verde (GO), Rosário Oeste (MT), Roseira (SP), Salto de Pirapora (SP), Sambaíba (MA), Santa Adélia (SP), Santa Cruz do Rio Pardo (SP), Santa Fé do Araguaia (TO), Santa Maria (RS), Santa Rita de Caldas (MG), Santa Rita do Novo Destino (GO), Santa Rosa do Tocantins (TO), Santa Vitória do Palmar (RS), Santana da Ponte Preta (SP), Santana do Araguaia (PA), Santo Augusto (RS), São Borja (RS), São Carlos (SP), São Félix do Araguaia (MT), São Francisco do Guaporé (RO), São Gabriel (RS), São Gabriel do Oeste (MS), São Gonçalo do Sapucaí (MG), São João d'Aliança (GO), São Jorge do Ivaí (PR), São José da Bela Vista (SP), São Luiz Gonzaga (RS), São Mateus do Sul (PR), São Miguel Arcanjo (SP), São Miguel do Guaporé (RO), São Miguel do Iguçu (PR), São Pedro da União (MG), Sebastião Leal (PI), Serra do Ramalho (BA), Sertãozinho (PR), Sidrolândia (MS), Silvânia (GO), Sinop (MT), Sítio d'Abadia (GO), Socorro (SP), Soledade (RS), Sorriso (MT), Sud Mennucci (SP), Tabocas do Brejo Velho (BA), Tangará da Serra (MT), Tanque do Piauí (PI), Taquara (RS), Tartarugalzinho (AP), Tasso Fragoso (MA), Tatuí (SP), Taubaté (SP), Teixeira Soares (PR), Theobroma (RO), Tibagi (PR), Toledo (PR), Três Corações (MG), Tubarão (SC), Tuneiras do Oeste (PR), Tupã (SP), Tupanciretã (RS), Uberaba (MG), Uberlândia (MG), Ubiratã (PR), Unai (MG), Urupês (SP), Veranópolis (RS), Viamão (RS), Vila Bela da Santíssima Trindade (MT), Vilhena (RO) e Wenceslau Braz (PR).

APÊNDICE G: Consumidores domésticos e internacionais considerados

Tabela G1 – Lista dos municípios consumidores de soja (moageiras) considerados no modelo

Alto Araguaia (MT)	Goiatuba (GO)	Ponta Grossa (PR)
Anápolis (GO)	Guarani das Missões (RS)	Ponta Porã (MS)
Araguari (MG)	Guarapuava (PR)	Porto Alegre do Norte (MT)
Araucária (PR)	Ijuí (RS)	Porto Franco (MA)
Barreiras (BA)	Ipameri (GO)	Porto Nacional (TO)
Bebedouro (SP)	Iraquara (BA)	Primavera do Leste (MT)
Cachoeira do Sul (RS)	Itacoatiara (AM)	Rio Grande (RS)
Cafelândia (PR)	Itumbiara (GO)	Rio Verde (GO)
Camaquã (RS)	Jataí (GO)	Rondonópolis (MT)
Cambé (PR)	Joaçaba (SC)	Santa Rosa (RS)
Campo Grande (MS)	Lucas do Rio Verde (MT)	São Joaquim da Barra (SP)
Campo Mourão (PR)	Luís Eduardo Magalhães (BA)	São Luiz Gonzaga (RS)
Campo Novo do Parecis (MT)	Luziânia (GO)	São Simão (GO)
Canoas (RS)	Marau (RS)	Sorriso (MT)
Cascavel (PR)	Marechal Cândido Rondon (PR)	Tapejara (RS)
Céu Azul (PR)	Maringá (PR)	Teresina (PI)
Cornélio Procópio (PR)	Montenegro (RS)	Toledo (PR)
Cruz Alta (RS)	Muitos Capões (RS)	Três Lagoas (MS)
Cuiabá (MT)	Nova Bassano (RS)	Uberlândia (MG)
Dois Vizinhos (PR)	Nova Mutum (MT)	Uruçuí (PI)
Dourados (MS)	Orlândia (SP)	Veranópolis (RS)
Encantado (RS)	Oswaldo Cruz (SP)	Videira (SC)
Erechim (RS)	Paranaguá (PR)	Vilhena (RO)
Fortaleza (CE)	Passo Fundo (RS)	
Girúá (RS)	Pires do Rio (GO)	

A demanda de importação de soja da Ásia foi agregada no centroide da China e a demanda de importação da Europa foi agregada no centroide da Holanda.

APÊNDICE F: Código da programação matemática na linguagem GAMS do modelo de *green logistics* da soja

Exemplo de codificação de um dos modelos utilizados.

\$Title Soybean Green Logistics Multiperiod Model – Multiobjective Optimization – by Péra, TG

\$INLINECOM /* */

\$OFFLISTING

\$OFFSYMXREF OFFSYMLIST

\$ONEMPTY

\$ONECHO > entrada.txt

```

set=o      rng=sets!a2:a5000   RDIM=1
set=d      rng=sets!b2:b5000   RDIM=1
set=t      rng=sets!c2:c500    RDIM=1
set=c      rng=sets!d2:d50     RDIM=1
set=r      rng=sets!e2:e500    RDIM=1
set=b      rng=sets!f2:f500    RDIM=1
set=p      rng=sets!g2:g500    RDIM=1
set=COMB1  rng=sets!i2:j100000 RDIM=2
set=COMB2  rng=sets!l2:m100000 RDIM=2
set=COMB3  rng=sets!o2:p100000 RDIM=2
set=COMB4  rng=sets!r2:s100000 RDIM=2
set=COMB5  rng=sets!x2:y100000 RDIM=2
set=hidrofgrao rng=sets!aa2:ab10000 RDIM=2
par=CTRD   rng=custood!a2:c100000 RDIM=2
par=CTRE   rng=custoop!a2:c50000 RDIM=2
par=CTRF   rng=custoor!a2:c50000 RDIM=2
par=CTRB   rng=custoob!a2:c50000 RDIM=2
par=CF     rng=custorp!a2:c50000 RDIM=2
par=CB     rng=custobp!a2:c50000 RDIM=2
par=CMAR   rng=custopc!a2:c50000 RDIM=2
par=OFERTA rng=ofe!a1:e5000 RDIM=1 CDIM=1
par=DEMANDA rng=dem!a1:e5000 RDIM=1 CDIM=1
par=RAILCAP rng=caprail!a1:e5000 RDIM=1 CDIM=1
par=BARGECAP rng=capbarga!a1:e5000 RDIM=1 CDIM=1
par=PORTCAP rng=capport!a1:e5000 RDIM=1 CDIM=1
par=DEMANDAINT rng=demint!a1:e5000 RDIM=1 CDIM=1
par=DTRD   rng=distod!a2:c50000 RDIM=2
par=DTRE   rng=distop!a2:c50000 RDIM=2
par=DTRF   rng=distor!a2:c50000 RDIM=2
par=DTRB   rng=distob!a2:c50000 RDIM=2
par=DF     rng=distrp!a2:c50000 RDIM=2
par=DB     rng=distbp!a2:c50000 RDIM=2
par=DMAR   rng=distpc!a2:c50000 RDIM=2
par=FROTARD rng=fratfod!a2:c50000 RDIM=2
par=FROTARE rng=fratfop!a2:c50000 RDIM=2
par=FROTARF rng=fatfrotor!a2:c50000 RDIM=2
par=FROTARB rng=fatfrotaob!a2:c50000 RDIM=2
par=DEMPORT rng=demport!a1:e50000 RDIM=1 CDIM=1
$OFFECHO

```

SETS

o origem

d destino
 t tempo
 c pais de destino
 r terminal ferroviario
 b terminal hidroviario
 p porto
 COMB1(r,p) rotas multimodais factiveis entre terminal r e o porto p
 COMB2(o,r) rotas multimodais factiveis entre origem o e o terminal r
 COMB3(b,p) rotas multimodais factiveis entre terminal r e o porto p
 COMB4(o,b) rotas multimodais factiveis entre origem o e o terminal b
 COMB5(o,p) rotas rodoviaras factiveis entre origem o e o porto p
 hidrofgra(r,p) rota hidroviaria da ferrograo;

PARAMETER

CTRD(o,d) custo de transporte rodoviario entre origem o e destino d domestico
 CTRE(o,p) custo de transporte rodoviario entre origem o e porto p para exportacao
 CTRF(o,r) custo de transporte rodoviario entre origem o e terminal ferroviario r
 CTRB(o,b) custo de transporte rodoviario entre origem o e terminal hidroviario b
 CF(r,p) custo de transporte ferroviario entre terminal ferroviario r e porto p
 CB(b,p) custo de transporte hidroviario entre terminal hidroviario b e o porto p
 CMAR(p,c) custo de transporte maritimo entre o porto p e o pais consumidor c
 OFERTA(o,t) oferta do na regio o para o periodo t
 DEMANDA(d,t) demanda do na regio d para o periodo t
 DEMPORT(p,t) demanda mínima dos portos p no periodo t
 RAILCAP(r,t) capacidade dos terminais ferroviarios r no periodo t
 BARGECAP(b,t) capacidade dos terminais hidroviarios b no periodo t
 PORTCAP(p,t) capacidade dos portos p no periodo t
 DEMANDAIN(T)(c,t) demanda internacional do pais c do produto p no periodo t
 DTRD(o,d) distancia do transporte rodoviario entre origem o e destino d domestico
 DTRE(o,p) distancia do transporte rodoviario entre origem o e porto p para exportacao
 DTRF(o,r) distancia do transporte rodoviario entre origem o e terminal ferroviario r
 DTRB(o,b) distancia do transporte rodoviario entre origem o e terminal hidroviario b
 DF(r,p) distancia do transporte ferroviario entre terminal ferroviario r e porto p
 DB(b,p) distancia do transporte hidroviario entre terminal hidroviario b e o porto p
 DMAR(p,c) distancia do transporte maritimo entre o porto p e o pais consumidor c
 FROTARD(o,d) constante calculada de frota (razao entre tempo de ciclo e tempo total ponderado pela cap do veiculo) da rota od
 FROTARE(o,p) constante calculada de frota (razao entre tempo de ciclo e tempo total ponderado pela cap do veiculo) da rota op
 FROTARF(o,r) constante calculada de frota (razao entre tempo de ciclo e tempo total ponderado pela cap do veiculo) da rota or
 FROTARB(o,b) constante calculada de frota (razao entre tempo de ciclo e tempo total ponderado pela cap do veiculo) da rota ob;

*perdas por tipo de transporte, em decimal de porcentagem

SCALAR roadlosses /0.00631/;
 SCALAR raillosses /0.00170/;
 SCALAR bargelosses /0.00170/;
 SCALAR railterminallosses /0.0025/;
 SCALAR bargeterminallosses /0.0025/;
 SCALAR portterminallosses /0.0025/;

*eficiencia do transporte trem e barcaça, em tku por litro (ponderacao entre eficiencia km/l e TU)

SCALAR raileff /184.608/;
 *SCALAR raileff /153.84/ valor original;
 SCALAR bargeeff /769.23/;
 *SCALAR maritimееff /1049.31/ eficiencia do Capesize;
 SCALAR maritimееff /756.02/ ;

*eficiencia do transporte do caminhao, em (km por litro)

*SCALAR truckeff /3.00/ valor melhorado;

SCALAR truckeff /2.05/;

*capacidade do caminhao, em toneladas

SCALAR truckcapacity /37/;

*fatores de emissão por litro de combustivel (kg por litro)

SCALAR truckemissionsfact /2.603/;

SCALAR railemissionsfact /2.603/;

SCALAR bargeemissionsfact /3.107/

SCALAR maritimemissionsfact /3.17 /;

\$CALL GDXXRW.EXE dados.xlsx @entrada.txt

\$GDXIN dados.gdx

\$LOAD o d t c r b p COMB1 COMB2 COMB3 COMB4 COMB5 CTRD CTRE CTRF CTRB CF CB CMAR

OFERTA DEMANDA RAILCAP BARGECAP PORTCAP DEMANDAINIT DTRD DTRE DTRF DTRB DF

DB DMAR FROTARD FROTARE FROTARF FROTARB DEMPORT hidrofgrao

\$GDXIN

VARIABLES

*funcoes objetivo

fcost funcao objetivo custo total do sistema

flosses funcao objetivo perda total do sistema

femissions funcao objetivo emissao total do sistema

*variaveis de fluxos de transporte

truckdomestic(o,d,t) fluxo de transporte por caminhao entre origem o e destino d no periodo t

truckrail(o,r,t) fluxo de transporte por caminhao entre origem o e terminal r no periodo t

truckbargo(o,b,t) fluxo de transporte por caminhao entre origem o e terminal b no periodo t

truckexp(o,p,t) fluxo de transporte por caminhao entre origem o e porto p no periodo t

bargo(b,p,t) fluxo de transporte por barcaça do terminal b para o porto p no periodo t

rail(r,p,t) fluxo de transporte por trem do terminal r para o porto p no periodo t

maritime(p,c,t) fluxo de transporte maritimo do porto p para o pais c no periodo t

*variaveis de quantificacao de perdas

losstruckdomestic(o,d,t) perda no fluxo de transporte por caminhao entre origem o e destino d no periodo t

losstruckrail(o,r,t) perda no fluxo de transporte por caminhao entre origem o e terminal r no periodo t

losstruckbargo(o,b,t) perda no fluxo de transporte por caminhao entre origem o e terminal b no periodo t

losstruckexp(o,p,t) perda no fluxo de transporte por caminhao entre origem o e porto p no periodo t

lossbargo(b,p,t) perda no fluxo de transporte por barcaça do terminal b para o porto p no periodo t

lossrail(r,p,t) perda no fluxo de transporte por trem do terminal r para o porto p no periodo t

lossbargeterminal(b,t) perda no terminal hidroviario b no periodo t

lossrailterminal(r,t) perda no terminal ferroviario r no periodo t

lossportterminal(p,t) perda no terminal portuario p no periodo t

*variaveis de indicadores de interesse

costperperiod(t) custo logistico por periodo

lossesperiod(t) perda por periodo

tkutruck(t) tku de caminhões

tkurail(t) tku de trens

tkubargo(t) tku de barcaças

tkumaritime(t) tku de navios

emissionsperiod(t) emissões de co2 por periodo

qdiesel(t) quantidade de combustivel diesel consumido no sistema (litros)

qcomboil(t) quantidade de oleo combustivel consumo nos navios (litros)

qtruck(t) quantidade de caminhões (unidades)

bargefgrao(t);

POSITIVE VARIABLES truckdomestic, truckrail, truckbarge, truckexp, barge, rail, maritime;

EQUATIONS

custototal	funcao objetivo custos logisticos
emissionstotal	funcao objetivo emissoes
losstotal	funcao objetivo perdas
supply(o,t)	restricao de oferta da regioao o e periodo t
truckdomesticloss(o,d,t)	quantificacao das perdas do fluxo de caminhoes da origem para os destinos d
truckrailloss(o,r,t)	quantificacao das perdas do fluxo de caminhoes da origem para os terminais ferroviarios r
truckbarge loss(o,b,t)	quantificacao das perdas do fluxo de caminhoes da origem para os terminais hidroviarios b
truckexp loss(o,p,t)	quantificacao das perdas do fluxo de caminhoes da origem para os terminais ferroviarios r
barge loss(b,p,t)	quantificacao das perdas do fluxo de barcas dos terminais hidroviarios b para os portos p
rail loss(r,p,t)	quantificacao das perdas do fluxo de trem dos terminais ferroviarios r para os portos p
terminalbarge loss(b,t)	quantificacao das perdas no terminal hidroviario b no periodo t
terminalrail loss(r,t)	quantificacao das perdas no terminal ferroviario r no periodo t
terminalport loss(p,t)	quantificacao das perdas no terminal portuario p no periodo t
demand(d,t)	restricao de demanda da regioao domestica d e periodo t
caprail(r,t)	restricao de capacidade do terminal ferroviario r no periodo t
capbarge(b,t)	restricao de capacidade do terminal hidroviario b no periodo t
capport(p,t)	restricao de capacidade dos portos p no periodo t
intdem(c,t)	restricao de demanda internacional do pais c no periodo t
neteq1(r,t)	restricao de equilibrio dos nos dos terminais ferroviarios r no periodo t
neteq2(b,t)	restricao de equilibrio dos nos dos terminais hidroviarios b no periodo t
neteq3(p,t)	restricao de equilibrio dos nos dos portos p no periodo t
indcostperiod(t)	quantificador do indicador de custo logistico por periodo t
indlossesperiod(t)	quantificador do indicador de perdas por periodo t
indemissionsperiod(t)	quantificador das emissoes por periodo t
indtkutruck(t)	quantificado de tku de caminhoes
indtkurail(t)	quantificador de tku de trens
indtkubarge(t)	quantificador de tku de barcas
indtkumaritime(t)	quantificador de tku de navio
indqdiesel(t)	quantificador da demanda de diesel no sistema
indqcomboil(t)	quantificador da demanda de oleo combustivel dos navios
indqtruck(t)	quantificador da de caminhoes
bargeeffgrao(t)	;

$$\begin{aligned}
 \text{custototal} & \dots \text{fcost} = E = \text{SUM}((o,d,t), \text{CTRD}(o,d) * \text{truckdomestic}(o,d,t)) + \text{SUM}((o,r,t), \\
 & \text{CTRF}(o,r) * \text{truckrail}(o,r,t) \$\text{COMB2}(o,r)) \\
 & \quad + \text{SUM}((o,b,t), \text{CTRB}(o,b) * \text{truckbarge}(o,b,t) \$\text{COMB4}(o,b)) + \text{SUM}((o,p,t), \\
 & \text{CTRE}(o,p) * \text{truckexp}(o,p,t) \$\text{COMB5}(o,p)) \\
 & \quad + \text{SUM}((b,p,t), \text{CB}(b,p) * \text{barge}(b,p,t) \$\text{COMB3}(b,p)) + \text{SUM}((r,p,t), \\
 & \text{CF}(r,p) * \text{rail}(r,p,t) \$\text{COMB1}(r,p)) \\
 & \quad + \text{SUM}((p,c,t), \text{CMAR}(p,c) * \text{maritime}(p,c,t)) + \text{soybeanprice} * \text{flosses}; \\
 \text{emissionstotal} & \dots \text{femissions} = E = \text{truckemissionsfact} * \text{SUM}(t, \text{tkutruck}(t) / (\text{truckeff} * \text{truckcapacity})) + \\
 & \text{railemissionsfact} * \text{SUM}(t, \text{tkurail}(t) / \text{raileff}) \\
 & \quad + \text{bargeemissionsfact} * \text{SUM}(t, \text{tkubarge}(t) / \text{bargeeff}) + \text{maritimemissionsfact} * \text{SUM}(t, \\
 & \text{tkumaritime}(t) / \text{maritimeeff}); \\
 \text{losstotal} & \dots \text{flosses} = E = \text{SUM}((o,d,t), \text{losstruckdomestic}(o,d,t)) + \text{SUM}((o,r,t), \\
 & \text{losstruckrail}(o,r,t) \$\text{COMB2}(o,r)) \\
 & \quad + \text{SUM}((o,b,t), \text{losstruckbarge}(o,b,t) \$\text{COMB4}(o,b)) + \text{SUM}((o,p,t), \text{losstruckexp}(o,p,t)) \\
 & \quad + \text{SUM}((b,p,t), \text{lossbarge}(b,p,t) \$\text{COMB3}(b,p)) + \text{SUM}((r,p,t), \text{lossrail}(r,p,t) \$\text{COMB1}(r,p)) \\
 & \quad + \text{SUM}((b,t), \text{lossbargeterminal}(b,t)) + \text{SUM}((r,t), \text{lossrailterminal}(r,t)) + \text{SUM}((p,t), \\
 & \text{lossportterminal}(p,t)); \\
 \text{supply}(o,t) & \dots \text{SUM}(d, \text{truckdomestic}(o,d,t)) + \text{SUM}(r, \text{truckrail}(o,r,t) \$\text{COMB2}(o,r))
 \end{aligned}$$

$+ \text{SUM}(b, \text{truckbargeloss}(o,b,t)\$COMB4(o,b)) + \text{SUM}(p, \text{truckexp}(o,p,t)\$COMB5(o,p)) = E =$
 OFERTA(o,t);
 truckdomesticloss(o,d,t) .. losstruckdomestic(o,d,t) =E= roadlosses*truckdomestic(o,d,t);
 truckrailloss(o,r,t) .. losstruckrail(o,r,t)\\$COMB2(o,r) =E= roadlosses*truckrail(o,r,t)\\$COMB2(o,r);
 truckbargeloss(o,b,t) .. losstruckbargeloss(o,b,t)\\$COMB4(o,b) =E= roadlosses*truckbargeloss(o,b,t)\\$COMB4(o,b);
 truckexploss(o,p,t) .. losstruckexp(o,p,t) =E= roadlosses*truckexp(o,p,t)\\$COMB5(o,p);
 bargeloss(b,p,t) .. lossbargeloss(b,p,t)\\$COMB3(b,p) =E= bargelosses*bargeloss(b,p,t)\\$COMB3(b,p);
 railloss(r,p,t) .. lossrail(r,p,t)\\$COMB1(r,p) =E= raillosses*rail(r,p,t)\\$COMB1(r,p);
 terminalbargeloss(b,t) .. lossbargeterminal(b,t) =E= bargeterminallosses*SUM(o,
 truckbargeloss(o,b,t)\\$COMB4(o,b)-losstruckbargeloss(o,b,t)\\$COMB4(o,b));
 terminalrailloss(r,t) .. lossrailterminal(r,t) =E= railterminallosses*SUM(o, truckrail(o,r,t)\\$COMB2(o,r)-
 losstruckrail(o,r,t)\\$COMB2(o,r));
 terminalportloss(p,t) .. lossportterminal(p,t) =E= portterminallosses*(SUM(o,
 truckexp(o,p,t)\\$COMB5(o,p)-losstruckexp(o,p,t)\\$COMB5(o,p))
 + SUM(r, rail(r,p,t)\\$COMB1(r,p)-lossrail(r,p,t)\\$COMB1(r,p)) + SUM(b,
 bargeloss(b,p,t)\\$COMB3(b,p)-lossbargeloss(b,p,t)\\$COMB3(b,p)));
 demand(d,t) .. SUM(o, truckdomestic(o,d,t)-losstruckdomestic(o,d,t)) =G= DEMANDA(d,t);
 caprail(r,t) .. SUM(o, truckrail(o,r,t)\\$COMB2(o,r)-losstruckrail(o,r,t)\\$COMB2(o,r)) =L= RAILCAP(r,t);
 capbargeloss(b,t) .. SUM(o, truckbargeloss(o,b,t)\\$COMB4(o,b)-losstruckbargeloss(o,b,t)\\$COMB4(o,b)) =L=
 BARGECAP(b,t);
 capport(p,t) .. SUM(o, truckexp(o,p,t)\\$COMB5(o,p)-losstruckexp(o,p,t)\\$COMB5(o,p)) + SUM(r,
 rail(r,p,t)\\$COMB1(r,p)-lossrail(r,p,t)\\$COMB1(r,p))
 + SUM(b, bargeloss(b,p,t)\\$COMB3(b,p)-lossbargeloss(b,p,t)\\$COMB3(b,p)) =L=
 PORTCAP(p,t);
 neteq1(r,t) .. SUM(o, truckrail(o,r,t)\\$COMB2(o,r)-losstruckrail(o,r,t)\\$COMB2(o,r)) =E= SUM(p,
 rail(r,p,t)\\$COMB1(r,p)) + lossrailterminal(r,t) ;
 neteq2(b,t) .. SUM(o, truckbargeloss(o,b,t)\\$COMB4(o,b)-losstruckbargeloss(o,b,t)\\$COMB4(o,b)) =E= SUM(p,
 bargeloss(b,p,t)\\$COMB3(b,p)) + lossbargeterminal(b,t);
 neteq3(p,t) .. SUM(o, truckexp(o,p,t)\\$COMB5(o,p)-losstruckexp(o,p,t)) + SUM(r,
 rail(r,p,t)\\$COMB1(r,p)-lossrail(r,p,t)\\$COMB1(r,p))
 + SUM(b, bargeloss(b,p,t)\\$COMB3(b,p)-lossbargeloss(b,p,t)\\$COMB3(b,p)) =E= SUM(c,
 maritime(p,c,t)) + lossportterminal(p,t);
 intdem(c,t) .. SUM(p, maritime(p,c,t)) =G= 0.98*DEMANDAINT(c,t);
 indcostperiod(t) .. costperperiod(t) =E= SUM((o,d), CTRD(o,d)*truckdomestic(o,d,t)) + SUM((o,r),
 CTRF(o,r)*truckrail(o,r,t)\\$COMB2(o,r))
 + SUM((o,b), CTRB(o,b)*truckbargeloss(o,b,t)\\$COMB4(o,b)) + SUM((o,p),
 CTRE(o,p)*truckexp(o,p,t)\\$COMB5(o,p))
 + SUM((b,p), CB(b,p)*bargeloss(b,p,t)\\$COMB3(b,p)) + SUM((r,p),
 CF(r,p)*rail(r,p,t)\\$COMB1(r,p))
 + SUM((p,c), CMAR(p,c)*maritime(p,c,t)) + soybeanprice*lossesperiod(t);
 indlossesperiod(t) .. lossesperiod(t) =E= SUM((o,d), losstruckdomestic(o,d,t)) + SUM((o,r),
 losstruckrail(o,r,t)\\$COMB2(o,r))
 + SUM((o,b), losstruckbargeloss(o,b,t)\\$COMB4(o,b)) + SUM((o,p), losstruckexp(o,p,t))
 + SUM((b,p), lossbargeloss(b,p,t)\\$COMB3(b,p)) + SUM((r,p), lossrail(r,p,t)\\$COMB1(r,p))
 + SUM((b), lossbargeterminal(b,t)) + SUM((r), lossrailterminal(r,t)) + SUM((p),
 lossportterminal(p,t));
 indtkuttruck(t) .. tkuttruck(t) =E= SUM((o,d), DTRD(o,d)*truckdomestic(o,d,t)) + SUM((o,r),
 DTRF(o,r)*truckrail(o,r,t)\\$COMB2(o,r)) + SUM((o,b), DTRB(o,b)*truckbargeloss(o,b,t)\\$COMB4(o,b)) +
 SUM((o,p), DTRE(o,p)*truckexp(o,p,t)\\$COMB5(o,p));
 indtkurail(t) .. tkurail(t) =E= SUM((r,p), DF(r,p)*rail(r,p,t)\\$COMB1(r,p));
 indtkubargeloss(t) .. tkubargeloss(t) =E= SUM((b,p), DB(b,p)*bargeloss(b,p,t)\\$COMB3(b,p)) + 1132*bargefgrao(t)
 ;
 indtkumaritime(t) .. tkumaritime(t) =E= SUM((p,c), DMAR(p,c)*maritime(p,c,t));
 indemissionsperiod(t) .. emissionsperiod(t) =E= truckemissionsfact*tkuttruck(t)/(truckeff*truckcapacity) +
 railemissionsfact*(tkurail(t)/raileff)
 + bargeemissionsfact*(tkubargeloss(t)/bargeeff) +
 maritimemissionsfact*tkumaritime(t)/maritimeeff;
 indqdiesel(t) .. qdiesel(t) =E= tkuttruck(t)/(truckeff*truckcapacity) + tkurail(t)/raileff +
 tkubargeloss(t)/bargeeff;
 indqcomboil(t) .. qcomboil(t) =E= tkumaritime(t)/maritimeeff;

```

indqtruck(t) .. qtruck(t) =E= SUM((o,d), FROTARD(o,d)*truckdomestic(o,d,t)) + SUM((o,r),
FROTARF(o,r)*truckrail(o,r,t)$COMB2(o,r))
                + SUM((o,b), FROTARB(o,b)*truckbarga(o,b,t)$COMB4(o,b)) + SUM((o,p),
FROTARE(o,p)*truckexp(o,p,t)$COMB5(o,p));
bargeffgrao(t) .. bargefgrao(t) =E= SUM((r,p), rail(r,p,t)$hidrofgrao(r,p));

```

```

MODEL greenlogistics /ALL/;
solve greenlogistics minimizing fcost using LP;
DISPLAY fcost.L, flosses.L, femissions.L, costperperiod.L, lossesperiod.L, emissionsperiod.L, tkutruck.L,
tkurail.L, tkubarge.L, tkumaritime.L;
execute_unload "indicadores.gdx" costperperiod.L lossesperiod.L, emissionsperiod.L, tkutruck.L, tkurail.L,
tkubarge.L, tkumaritime.L, qdiesel.L, qcomboil.L, qtruck.L,
                truckdomestic.l, truckrail.l, truckbarga.l, truckexp.l, barge.l, rail.l, maritime.l;

```

```

execute 'gdxxrw.exe indicadores.gdx var=costperperiod.L rng=custo!';
execute 'gdxxrw.exe indicadores.gdx var=emissionsperiod.L rng=emissoes!';
execute 'gdxxrw.exe indicadores.gdx var=lossesperiod.L rng=perdas!';
execute 'gdxxrw.exe indicadores.gdx var=tkutruck.L rng=rodotku!';
execute 'gdxxrw.exe indicadores.gdx var=tkurail.L rng=railtku!';
execute 'gdxxrw.exe indicadores.gdx var=tkubarge.L rng=bargetku!';
execute 'gdxxrw.exe indicadores.gdx var=tkumaritime.L rng=maritimetku!';
execute 'gdxxrw.exe indicadores.gdx var=qdiesel.L rng=qdiesel!';
execute 'gdxxrw.exe indicadores.gdx var=qcomboil.L rng=qcomboil!';
execute 'gdxxrw.exe indicadores.gdx var=qtruck.L rng=qtruck!';
execute 'gdxxrw.exe indicadores.gdx var=truckdomestic.L rng=caminhaodom! rdim=2 cdim=1';
execute 'gdxxrw.exe indicadores.gdx var=truckrail.L rng=caminhaofer! rdim=2 cdim=1';
execute 'gdxxrw.exe indicadores.gdx var=truckbarga.L rng=caminhaobar! rdim=2 cdim=1';
execute 'gdxxrw.exe indicadores.gdx var=truckexp.L rng=caminhaoexp! rdim=2 cdim=1';
execute 'gdxxrw.exe indicadores.gdx var=barge.L rng=barcaca! rdim=2 cdim=1';
execute 'gdxxrw.exe indicadores.gdx var=rail.L rng=trem! rdim=2 cdim=1';
execute 'gdxxrw.exe indicadores.gdx var=maritime.L rng=maritimo! rdim=2 cdim=1';

```

```

OPTIONS
limrow = 0
limcol = 0
solprint = off;

```

```

*****
*****
**Algoritmo de Pareto*****
*****
*****

```

```

*Algoritmo de geração da Fronteira de Pareto #1 fcost vs. femissions
*SET iterations / i1*i10 /;
*SCALAR epsilon;
*PARAMETER results(iterations,*), ranges(*);
*SOLVE greenlogistics using lp minimizing fcost;
*ranges('fcostmin') = fcost.l;
*ranges('femissionsmax') = femissions.l;
*SOLVE greenlogistics using lp minimizing femissions;
*ranges('fcostmax') = fcost.l;
*ranges('femissionsmin') = femissions.l;
*loop(iterations,

```

```

*epsilon = (ranges('femissionsmax') - ranges('femissionsmin'))*((ORD(iterations)-1)/(card(iterations)-1)) +
ranges('femissionsmin');
*femissions.up = epsilon;
*SOLVE greenlogistics using lp minimizing fcost;
*results(iterations,'fcost') = fcost.l;
* results(iterations,'femissions') = femissions.l;
* results(iterations,'epsilon') = epsilon;
*);

```

```

*Algoritmo de geração da Fronteira de Pareto #2 fcost vs. femissions
*SET iterations2 / i1*i10 /;
*SCALAR epsilon2;
*PARAMETER results2(iterations2,*), ranges2(*);
*SOLVE greenlogistics using lp minimizing femissions;
*ranges2('fcostmax') = fcost.l;
*ranges2('femissionsmin') = femissions.l;
*SOLVE greenlogistics using lp minimizing fcost;
*ranges2('fcostmin') = fcost.l;
*ranges2('femissionsmax') = femissions.l;
*loop(iterations2,
*epsilon2 = (ranges2('fcostmax') - ranges2('fcostmin'))*((ORD(iterations2)-1)/(card(iterations2)-1)) +
ranges2('fcostmin');
*fcost.up = epsilon2;
*SOLVE greenlogistics using lp minimizing femissions;
*results2(iterations2,'fcost') = fcost.l;
* results2(iterations2,'femissions') = femissions.l;
* results2(iterations2,'epsilon2') = epsilon2;
*);

```

```

*Algoritmo de geração da Fronteira de Pareto #3 fcost vs. flosses
*SET iterations3 / i1*i10 /;
*SCALAR epsilon3;
*PARAMETER results3(iterations3,*), ranges3(*);
*SOLVE greenlogistics using lp minimizing fcost;
*ranges3('fcostmin') = fcost.l;
*ranges3('flossesmax') = flosses.l;
*SOLVE greenlogistics using lp minimizing flosses;
*ranges3('fcostmax') = fcost.l;
*ranges3('flossesmin') = flosses.l;
*loop(iterations3,
*epsilon3 = (ranges3('flossesmax') - ranges3('flossesmin'))*((ORD(iterations3)-1)/(card(iterations3)-1)) +
ranges3('flossesmin');
*flosses.up = epsilon3;
*SOLVE greenlogistics using lp minimizing fcost;
* results3(iterations3,'fcost') = fcost.l;
* results3(iterations3,'femissions') = femissions.l;
* results3(iterations3,'flosses') = flosses.l;
* results3(iterations3,'epsilon3') = epsilon3;
*);

```

```

*Algoritmo de geração da Fronteira de Pareto #4 fcost vs. flosses
*SET iterations4 / i1*i10 /;
*SCALAR epsilon4;
*PARAMETER results4(iterations4,*), ranges4(*);
*SOLVE greenlogistics using lp minimizing flosses;
*ranges4('fcostmax') = fcost.l;
*ranges4('flossesmin') = flosses.l;
*SOLVE greenlogistics using lp minimizing fcost;
*ranges4('fcostmin') = fcost.l;

```

```
*ranges4('flossesmax') = flosses.l;  
*loop(iterations4,  
*epsilon4 = (ranges4('fcostmax') - ranges4('fcostmin'))*((ORD(iterations4)-1)/(card(iterations4)-1)) +  
ranges4('fcostmin');  
*fcost.up = epsilon4;  
*SOLVE greenlogistics using lp minimizing flosses;  
* results4(iterations4,'fcost') = fcost.l;  
* results4(iterations4,'femissions') = femissions.l;  
* results4(iterations4,'flosses') = flosses.l;  
* results4(iterations4,'epsilon4') = epsilon4;  
*);
```