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

**Análise de eficiência dos projetos de investimento em infraestrutura multimodal
para o transporte de soja no Brasil**

Fernando Vinícius da Rocha

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

Piracicaba
2020

Fernando Vinícius da Rocha
Bacharel em Engenharia Agrônômica

**Análise de eficiência dos projetos de investimento em infraestrutura multimodal para o
transporte de soja no Brasil**

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
2020

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

Rocha, Fernando Vinícius da

Análise de eficiência dos projetos de investimento em infraestrutura multimodal para o transporte de soja no Brasil / Fernando Vinícius da Rocha.
- - versão revisada de acordo com a resolução CoPGr 6018 de 2011 - - Piracicaba, 2020.

199 p.

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

1. Infraestrutura de transporte 2. Investimento 3. Análise envoltória de dados 4. Desenvolvimento I. Título

DEDICATÓRIA

Dedico, da forma mais sincera, aos meus pais, Douglas e Regina, à minha esposa, Alessandra, à minha filha, Celina, e ao meu irmão, Gustavo.

AGRADECIMENTOS

Agradeço aos meus pais (Douglas e Regina) e ao meu irmão (Gustavo) pelo apoio para a concretização desse trabalho.

À Alessandra Pertile, minha esposa, pelo apoio, companheirismo e incentivo em todos os momentos dessa caminhada. À minha filha Celina, que completa as nossas vidas com momentos de muita alegria.

Agradeço ao professor José Vicente Caixeta Filho, meu orientador e chefe, pela possibilidade de realização do doutorado, dentre as muitas outras oportunidades que me concedeu. Agradeço pela confiança em mim depositada e pelo tempo dedicado às revisões e reuniões.

Ao Grupo de Pesquisa e Extensão em Logística Agroindustrial (ESALQ-LOG), do qual me orgulho em fazer parte. Agradeço pelo ambiente de profissionalismo, pelas muitas oportunidades e desafios. O meu agradecimento se estende à equipe do ESALQ-LOG que, de forma direta ou indireta, me ajudou na realização desse trabalho.

Aos professores Daisy Rebelatto, Carlos Xavier e Paulo Nocera pelos comentários e sugestões feitos no meu exame de qualificação, dando um norte melhor para a finalização deste trabalho.

Aos professores do Programa de Pós-Graduação em Economia Aplicada (PPGEA) da Escola Superior de Agricultura “Luiz de Queiroz” (ESALQ) e aos funcionários do Departamento de Economia, Administração e Sociologia (LES).

À ESALQ e à USP, pelo ambiente sério e desafiador e por esses anos de ensinamentos de alta qualidade.

SUMÁRIO

RESUMO.....	6
ABSTRACT.....	7
LISTA DE FIGURAS	8
LISTA DE TABELAS.....	10
LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS	11
1. INTRODUÇÃO	13
2. REFERENCIAL TEÓRICO.....	17
2.1. Infraestrutura de transporte, desenvolvimento socioeconômico e meio ambiente: uma análise bibliométrica e da rede de cocitação	17
2.2. Análise Envoltória de Dados: aplicações em temas correlatos	43
3. MATERIAL E MÉTODOS DE ANÁLISE.....	53
3.1. Etapa 1: Identificação dos impactos potenciais dos projetos de investimento em infraestrutura de transporte.....	53
3.2. Etapa 2: Análise da eficiência relativa dos projetos de investimento em infraestrutura de transporte.....	97
4. RESULTADOS E DISCUSSÃO	107
4.1. Etapa 1: Identificação dos impactos potenciais dos projetos de investimento em infraestrutura de transporte.....	107
4.2. Etapa 2: Análise de eficiência relativa dos projetos de investimento em infraestrutura de transporte.....	117
5. CONSIDERAÇÕES FINAIS.....	139
REFERÊNCIAS.....	143
APÊNDICES.....	159

RESUMO

Análise de eficiência dos projetos de investimento em infraestrutura multimodal para o transporte de soja no Brasil

A demanda por investimentos em infraestrutura de transporte é evidente no Brasil, especialmente no setor agroindustrial. É crescente também a preocupação com o desenvolvimento sustentável do território brasileiro, de forma a considerar impactos nas esferas econômica, ambiental e social. A relação entre essas três esferas de análise também é temática importante na literatura acadêmica, sendo muitas vezes abordada a partir do uso de metodologias de análise multicritérios. O presente trabalho analisa projetos de investimentos em infraestrutura multimodal de transporte para as movimentações de soja no Brasil – total de vinte e seis cenários analisados. Os impactos dos projetos foram simulados a partir da construção de um modelo de minimização de custos de transporte (*network equilibrium model*) aplicado para a cadeia da soja, considerando a movimentação entre as localidades produtoras e os mercados consumidores (mercado interno e mercado externo). O potencial de redução de custo, emissão de CO₂, perdas nas operações de transporte, área de influência das infraestruturas, dentre outros, são alguns dos resultados obtidos via aplicação desse modelo, os quais são discutidos ao longo da tese. Trechos do projeto da Ferrogrão são os com maiores potenciais de redução de custos e da emissão de dióxido de carbono da cadeia de transporte analisada. Um trecho do projeto de expansão da ferrovia Malha Norte e o trecho da Ferrovia Norte Sul no estados do sul do país são os que apresentam os menores níveis de perdas físicas ao longo das operações, ao passo que outros trechos da Ferrovia Norte-Sul apresentam os maiores impactos sociais. Parte desses indicadores, com a adição de algumas outras métricas, foram utilizados para a elaboração de uma análise de eficiência relativa entre os projetos estudados. Os projetos foram comparados via Análise Envolvória de Dados. Os resultados dessa análise mostram que os investimentos na viabilização de um trecho hidroviário com origem em Marabá (PA), o investimento conjunto em trechos da Ferrovia Norte-Sul e Ferrovia de Integração Centro-Oeste e os investimentos para expansão da Malha Norte são os projetos mais eficientes dentre todos os casos analisados. A discussão dos resultados sugere que estes devam ser tratados como prioridades no desenvolvimento de uma agenda de investimento em infraestrutura de transporte para a cadeia brasileira de produção e comercialização de soja. Cabe acrescentar que tal combinação de métodos de análise se mostra válida para a avaliação proposta, por agregar subsídios importantes à tomada de decisão de agentes públicos no Brasil e em outras localidades.

Palavras-chave: Infraestrutura de transporte, Investimento, Análise envoltória de dados, Desenvolvimento

ABSTRACT

Efficiency analysis applied to multimodal infrastructure investment projects for soy transportation in Brazil

The demand for investments in transport infrastructure is evident in Brazil, especially in the agro-industrial sector. There is also a growing concern with the sustainable development of the Brazilian territory, in order to consider impacts in the economic, environmental, and social fields. The relationship between these three concepts of analysis is also an essential issue in academic literature, in many cases, based on the application of multicriteria analysis methodologies. This work aims to analyze investment projects in multimodal transport infrastructure for soybean haul in Brazil - a total of 26 selected projects. The projects' impacts were simulated based on a model for minimizing transport costs in the soy transportation chain (network equilibrium model), considering the operations between producing locations and consumer markets (domestic and foreign clients). The potential for cost reduction, CO₂ emissions, physical losses in transport operations, area of influence of the new infrastructure, among others, are some of the results obtained through the application of this model, which we discuss throughout the thesis. Stretches of the Ferrogrão project have the highest potential for cost reduction and carbon dioxide emission reduction. The Malha Norte railroad expansion project and a section of the Ferrovia Norte Sul (FNS) project in the country's southern states have the lowest level of physical losses during the soybean transport operations. The Ferrovia Norte Sul has the most significant social impacts. Part of these indicators, with the addition of some other metrics, were used to develop an analysis of relative efficiency among the selected projects. We used Data Envelopment Analysis (DEA) to compare the investment plans. The result shows that the most efficient projects among all the cases are the investments in the viability of a waterway stretch from Marabá (Pará State) to Barcarena Port, the joint investments in stretches of the FNS and the Ferrovia de Integração Centro-Oeste (FICO), and the investments for the expansion of Malha Norte railway until Sinop (Mato Grosso State). The discussion of the results addresses that these three projects should be the priorities in the development of an investment infrastructure transport plan for the Brazilian soy production and marketing chain. We highlight that such a combination of analysis methods is valid for the proposed evaluation, as it adds crucial subsidies to the decision-making process of public agents in Brazil and abroad.

Keywords: Transportation infrastructure, Investment, Data envelopment analysis, Development

LISTA DE FIGURAS

Figura 1. Evolução anual das publicações por temática analisada.....	21
Figura 2. Análise da rede de citação dos artigos.....	24
Figura 3. Estrutura da rede com destaque para a formação dos agrupamentos.....	27
Figura 4. Sistema de transporte considerado no modelo de minimização dos custos de transporte.	55
Figura 5. Municípios produtores de soja no ano de 2017 (locais de origem de carga).....	66
Figura 6. Representatividade de cada porto nas exportações de soja no Brasil em 2017.	67
Figura 7. Portos considerados na análise.....	68
Figura 8. Municípios com plantas industriais (moageiras).....	69
Figura 9. Localização dos terminais de transbordo multimodais considerados na análise.	70
Figura 10. Terminal projetado considerado no cenário "C-FERROGRÃO-1".....	78
Figura 11. Terminais projetados considerados no cenário "C-FERROGRÃO-2".....	79
Figura 12. Terminais projetados considerados no cenário "C-FNS-1".....	80
Figura 13. Terminal projetado considerado no cenário "C-FNS-2".....	81
Figura 14. Terminal projetado considerado no cenário "C-H-MARABÁ".....	82
Figura 15. Terminais projetados considerados no cenário "C-FPARAENSE-1".....	83
Figura 16. Terminais projetados considerados no cenário "C-EMN-1".....	84
Figura 17. Terminais projetados considerados no cenário "C-EMN-3".....	85
Figura 18. Terminais considerados no cenário "C-FERROVIADOFRANGO".....	86
Figura 19. Terminal considerado no cenário "C-FIOL-1".....	87
Figura 20. Terminais considerados no cenário "C-FIOL-2".....	87
Figura 21. Terminais considerados no cenário "C-FIOL-3".....	88
Figura 22. Terminais considerados no cenário "C-FICO-1".....	89
Figura 23. Terminais considerados no cenário "C-FICO-2".....	89
Figura 24. Terminais considerados no cenário "C-FICO-3".....	90
Figura 25. Terminal considerado no cenário "C-FVILHENA".....	91
Figura 26. Terminais considerados no cenário "C-FDOURADOSPARANAGUÁ".....	92
Figura 27. Terminais considerados no cenário "C-FMSSANTOS".....	92
Figura 28. Terminais considerados no cenário "C-FPANTANAL".....	93
Figura 29. Terminal considerado no cenário "C-FPANORAMA".....	94
Figura 30. Terminais considerados no cenário "C-FNS-SUL".....	94
Figura 31. Terminais considerados no cenário "C-FNS-TOTAL".....	95
Figura 32. Custo ponderado do transporte de soja por município em "C-BASE".....	108
Figura 33. Custo médio de transporte estadual (Reais por tonelada) em "C-BASE".....	108
Figura 34. Redução no custo de transporte em território brasileiro nos cenários analisados (valores em milhões de Reais).....	110
Figura 35. Redução no custo de transporte total nos cenários analisados (valores em milhões de Reais).	111
Figura 36. Volume total de soja movimentado pelas infraestruturas projetadas (valores em toneladas).	111
Figura 37. Taxa de utilização da capacidade de movimentação atribuída aos projetos de infraestrutura analisados (valores em percentual).	112
Figura 38. Representatividade do transporte ferroviário e hidroviário na matriz de transporte de soja no Brasil (valores em porcentagem).....	113
Figura 39. Estimativa da emissão de gás carbônico nas operações de transporte de soja (valores toneladas de CO ₂).	114
Figura 40. Perdas físicas de soja durante as operações de transporte em território brasileiro (valores em toneladas).....	115

Figura 41. Número de municípios pertencentes à área de influência das infraestruturas (valores em número absoluto).....	115
Figura 42. Estimativa de impacto da infraestrutura no IDH dos municípios produtores de soja.	121
Figura 43. Área de influência do projeto de infraestrutura considerado no cenário “C-H-MARABÁ”.....	134
Figura 44. Área de influência do projeto de infraestrutura considerado no cenário “C-FNS-1”.....	135
Figura 45. Área de influência do projeto de infraestrutura considerado no cenário “C-FICO+FNS-1”.....	136
Figura 46. Área de influência do projeto de infraestrutura considerado no cenário “C-EMN-3”.....	137
Figura 47. Infraestruturas de transporte destacadas.	140

LISTA DE TABELAS

Tabela 1. Termos de busca utilizados na plataforma <i>Web of Science</i>	19
Tabela 2. Autores com maior número de artigos publicados.....	22
Tabela 3. Periódicos com maior número de artigos.	23
Tabela 4. Categorias do WoS com maior número de artigos.....	23
Tabela 5. Os dez artigos com maior número de citações.	25
Tabela 6. Os dez principais artigos de acordo com a análise de <i>PageRank</i>	25
Tabela 7. Resultado da análise de <i>cluster</i>	26
Tabela 8. Classificação proposta para os <i>clusters</i> (linhas de pesquisa e temáticas emergentes).	41
Tabela 9. Tipologia das variáveis utilizadas nos artigos (DEA).	51
Tabela 10. Produção (total e relativa) de soja por Unidade da Federação (UF) no ano de 2017. .	66
Tabela 11. Destinos da soja brasileira no mercado internacional em 2017.....	71
Tabela 12. Modelos de regressão utilizados nas estimativas dos valores do frete para o ano de 2017.	72
Tabela 13. Coeficientes de emissão e participação nas movimentações de soja das malhas ferroviárias.	75
Tabela 14. Síntese dos projetos de infraestrutura de transporte analisados em cada um dos cenários.	95
Tabela 15. Variáveis utilizadas nos modelos de eficiência analisados.	105
Tabela 16. Estimativas dos investimentos necessários para concretização dos projetos de investimento em infraestrutura de transporte.	118
Tabela 17. Estatística descritiva das variáveis.....	122
Tabela 18. Resultados do modelo <i>CCRoeco</i>	123
Tabela 19. Resultados do modelo <i>CCRoamb</i>	124
Tabela 20. Resultados do modelo <i>CCRosoc</i>	125
Tabela 21. Resultados do modelo <i>CCRo</i>	126
Tabela 22. Resultados do modelo <i>BCCoeco</i>	128
Tabela 23. Resultados do modelo <i>BCCoamb</i>	130
Tabela 24. Resultados do modelo <i>BCCosoc</i>	132
Tabela 25. Resultados do modelo <i>BCCo</i>	133

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

ABIOVE	Associação Brasileira das Indústrias de Óleos Vegetais
ANTAQ	Agência Nacional de Transportes Aquaviários
ANTT	Agência Nacional de Transportes Terrestres
BCC	Modelo de Análise Envoltória de Dados com retornos variáveis de escala
BRT	<i>Bus rapid transit</i>
CAPEX	<i>Capital expenditure</i>
CCR	Modelo de Análise Envoltória de Dados com retornos constantes de escala
CO ₂	Dióxido de carbono
CRS	<i>Constant Return to Scale</i>
DEA	Análise Envoltória de Dados (<i>Data Envelopment Analysis</i>)
DMU	Unidades de tomada de decisão (<i>Decision Making Units</i>)
EBITDA	Lucros antes de juros, impostos, depreciação e amortização
EPL	Empresa de Planejamento em Logística
ESALQ-LOG	Grupo de Pesquisa e Extensão em Logística Agroindustrial
FICO	Ferrovia de Integração Centro-Oeste
FIOL	Ferrovia de Integração Oeste-Leste
FNS	Ferrovia Norte-Sul
GAMS	<i>General Algebraic Modeling System (software)</i>
IBGE	Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística
IDH	Índice de Desenvolvimento Humano
IDHM	Índice de Desenvolvimento Humano Municipal
JCP	<i>Journal of Cleaner Production</i>
NO ₂	Dióxido de nitrogênio
OCDE	Organização para a Cooperação e Desenvolvimento Econômico
OD	Combinação origem-destino
OPEX	<i>Operational expenditure</i>
PAC	Programa de Aceleração do Crescimento
PAM	Produção Agrícola Municipal
PIL	Programa de Investimento em Logística
PIB	Produto interno bruto
PPI	Programa de Parcerias de Investimento
SECEX	Secretaria de Comércio Exterior

SIFRECA	Sistema de Informações de Frete
TKU	Toneladas por quilômetro útil
TRA	<i>Transportation Research Part A: Policy and Practice</i>
TRD	<i>Transportation Research Part D: Transport and Environment</i>
TRR	<i>Transportation Research Record</i>
UF	Unidade da Federação
VRS	<i>Variable Return to Scale</i>
WoS	<i>Web of Science</i>

1. INTRODUÇÃO

O investimento em infraestrutura é considerado passo importante para o desenvolvimento de países, Estados e municípios. As discussões sobre as infraestruturas do transporte de carga são recorrentes no Brasil. As más condições das estradas, a baixa disponibilidade de modais alternativos para a movimentação de produtos, o impacto dos custos de transporte nos diferentes setores da economia brasileira e o baixo investimento em infraestrutura no país estão entre os assuntos normalmente debatidos.

É fato que o Brasil não tem conseguido obter melhorias significativas na sua infraestrutura logística em comparação com outros países em desenvolvimento. O indicador do Banco Mundial (2018), que mede a qualidade e o desempenho das operações logísticas de uma série de países, considerando aspectos como o tempo de entrega, os embarques internacionais, a disponibilidade de infraestrutura, dentre outras variáveis, classifica o Brasil na 56^a posição, em um total de 160 países liderados pela Alemanha e Suécia (Banco Mundial, 2018).

Com essa problemática em evidência, diversos programas de investimento em infraestrutura foram criados ao longo do desenvolvimento brasileiro. Nesse leque de políticas, os mais recentes são o Programa de Aceleração do Crescimento (PAC), o Programa de Investimento em Logística (PIL) e o Programa de Parceria de Investimentos (PPI). Apesar de estarem associados a governos federais diferentes, tais projetos têm em comum o fato de objetivarem, com a condução das obras, a retomada da economia brasileira a partir da geração de empregos e o aumento da competitividade do país. Faz-se o uso, portanto, de investimentos em infraestrutura para promover a redução dos custos de transporte e o aumento do desenvolvimento socioeconômico.

A sucessão entre os programas não necessariamente segue uma linha contínua no que diz respeito à condução dos investimentos. Obras inacabadas, atrasos e acordos cancelados são exemplos comuns no cenário brasileiro. Além disso, diferenças importantes são observadas entre os planos de governo no que se diz respeito aos projetos considerados como prioridades. Diferentes rodovias, portos e infraestruturas ferroviárias já tiveram caráter prioritário distintos em programas e governos. Tal oscilação acaba por gerar incertezas quanto ao grau de efetividade das políticas públicas para o investimento em infraestrutura. Além disso, a escolha dos projetos prioritários para investimento, público ou com coparticipação da iniciativa privada, não necessariamente considera os impactos potenciais na redução dos custos de transporte, no desenvolvimento socioeconômico das regiões e no potencial de mitigação dos impactos ambientais.

A demanda por infraestrutura de transporte tem implicações diretas sobre questões ambientais. Tal preocupação tem direcionado uma série de autores no sentido de mensurar o

impacto no meio ambiente das infraestruturas, via mensuração de emissão de gases poluentes, poluição sonora, desmatamento, dentre outras formas de análise. Tendo em vista o desafio de reduzir o impacto da economia no meio ambiente, a efetividade das políticas de mitigação das emissões de gás carbônico, por exemplo, deve levar em consideração os efeitos das infraestruturas de transporte.

Sob a ótica do desenvolvimento social, equidade e acessibilidade na disponibilização das infraestruturas são variáveis frequentemente utilizadas nas análises. Para parte dos autores, especialmente os que trabalham com infraestruturas de centros urbanos, as políticas públicas para o desenvolvimento do transporte devem direcionar esforços para o atendimento de regiões menos favorecidas e para o estabelecimento de uma equidade entre as localidades diversas (favorecimento de localidades com menor grau de desenvolvimento, com alocação distributiva de recursos).

Vários autores são categóricos em afirmar que os benefícios econômicos, sociais e ambientais derivados de projetos de infraestrutura estão interconectados. O desafio para que se atinja o desenvolvimento sustentável é, portanto, inserir de forma balanceada questões dessas três esferas de análise como *drivers* para as mais diversas políticas públicas de investimento. Os formuladores dessas políticas, por sua vez, devem atender a interesses diversos (de Estados, municípios, setores específicos da economia, dentre outros) de redução de custos, além de atenderem às demandas relacionadas ao meio ambiente e ao desenvolvimento social. O uso dos recursos públicos na promoção dos investimentos e o grau de atuação do governo no desenvolvimento de parcerias com agentes privados são tidos como restrições, demandando uma escolha mais assertiva por parte dos tomadores de decisão.

A abordagem integrada desses diferentes aspectos pode trazer benefícios ao desenvolvimento de planos para o investimento em infraestrutura de transporte. Tal lógica tende a reduzir a pressão existente sobre a necessidade de novos investimentos, visto que se adiciona uma métrica de avaliação global para análise dos impactos, conferindo maior clareza ao processo de seleção dos projetos, além da inserção de uma maior taxa de eficiência na alocação de recursos públicos utilizados.

Autores diversos têm feito o uso de abordagens multicritério para a elaboração de uma metodologia que objetive o desenvolvimento sustentável de infraestruturas de transporte, a qual é baseada em fatores ambientais, financeiros, sociais e operacionais. Tais trabalhos, de forma geral, criam índices para comparar a sustentabilidade dos casos analisados, havendo diversas aplicações ao transporte de pessoas no ambiente urbano. Por outro lado, para o transporte de cargas, é menor a frequência do uso de aparatos metodológicos multidimensionais, dificultando uma avaliação ampla e integrada dos impactos potenciais.

Ao se analisar o caso brasileiro, o agronegócio é um setor da economia que demanda soluções de transporte de menor custo. Apesar da sua importância para a geração de divisas para a economia nacional, o menor valor agregado da produção faz com que o custo de movimentação tenha um impacto significativo no preço do produto. A cadeia de produção da soja é um dos destaques desse setor, sendo o Brasil caracterizado como grande produtor e exportador dessa oleaginosa.

Nesse conjunto de fatores, **esta tese tem o objetivo de analisar os principais projetos de investimento em infraestrutura de transporte multimodal, com o enfoque específico para a cadeia produtiva da soja.** Derivado da demanda evidente por soluções logísticas mais competitivas, diversos projetos têm sido propostos por órgãos do governo e entidades setoriais, os quais têm impactos econômicos, ambientais e sociais diversos. **O presente trabalho tem como objetivo geral analisar a eficiência relativa para as infraestruturas de transporte multimodal idealizadas para esse setor,** contribuindo para o aprofundamento da discussão dos impactos potenciais de cada um dos projetos e eventuais tomadas de decisão governamentais sobre a priorização dos investimentos. **A tese visa ainda ampliar as discussões que tratam da mensuração dos impactos econômicos, dos impactos ambientais e dos impactos sociais de projetos de infraestrutura para o transporte de cargas, trazendo sugestões de novas métricas de análise.**

São apresentados como objetivos secundários: (i) **analisar o potencial dos projetos de investimento em termos de redução de custo, área de influência, alteração de fluxos, taxa de utilização da infraestrutura projetada, perdas físicas da produção nas operações de transporte,** dentre outros indicadores; (ii) **discutir, sob a ótica dos Estados brasileiros e do governo federal, a relevância dos projetos;** (iii) **dar maior clareza aos impactos potenciais dos projetos,** de forma a ampliar o entendimento sobre as principais características de cada um deles; e (iv) **apresentar considerações sobre o uso combinado de duas metodologias de análise (modelos de minimização de custos de transporte e Análise Envoltória de Dados) para o cumprimento dos objetivos propostos.**

O trabalho é dividido em 5 capítulos, incluindo esta introdução. A estrutura da tese é resumida da seguinte forma:

- i. **Capítulo 1 – Introdução:** é feita uma contextualização do tema central desta tese, além da delimitação dos objetivos a serem alcançados pela pesquisa.
- ii. **Capítulo 2 – Referencial teórico:** levantamento e análise do arcabouço teórico. O capítulo é subdividido em duas partes. A primeira, a partir do uso de técnicas de análise bibliométrica, é relacionada exclusivamente aos trabalhos que tratam do desenvolvimento de infraestrutura de transporte e as respectivas análises dos

impactos econômico, ambiental e social. A segunda parte analisa aplicações de Análise Envoltória de Dados em temas correlatos ao discutido nesta tese.

- iii. **Capítulo 3 – Material e métodos de análise:** apresentação dos dados, delimitação dos projetos de investimento analisados e descrição dos métodos utilizados no desenvolvimento da pesquisa – modelo de minimização de custos de transporte (Etapa 1) e Análise Envoltória de Dados (Etapa 2).
- iv. **Capítulo 4 – Resultados e discussão:** discussão dos resultados obtidos nos dois métodos utilizados para a elaboração das análises. Consolidação da informações sobre os diversos impactos dos projetos de infraestrutura e sobre a análise de eficiência relativa.
- v. **Capítulo 5 – Considerações finais:** fechamento da discussão contemplando as principais conclusões das análises, além de recomendações para a elaboração de trabalhos futuros.

2. REFERENCIAL TEÓRICO

A relação existente entre o desenvolvimento econômico a partir da presença das infraestruturas de transporte é temática de interesse da literatura acadêmica. Interesse similar é observado no que tange aos impactos ambientais do setor de transporte. Para o caso brasileiro, a elevada dependência do modal rodoviário impõe, além de custos operacionais mais elevados, níveis maiores de emissão de gases poluentes na atmosfera. O desenvolvimento, portanto, de uma infraestrutura que priorize modais alternativos para a movimentação de carga e pessoas pode implicar impactos econômicos e ambientais positivos. Adicionalmente, tal tipo de investimento pode ser utilizado como mecanismo para impulsionar o desenvolvimento socioeconômico, demanda de parte das regiões brasileiras.

Para Tranfield et al. (2003), a revisão de literatura tem o objetivo de mapear e avaliar os trabalhos que já fazem parte da literatura acadêmica, possibilitando a identificação de potenciais direcionamentos para a elaboração de pesquisas futuras. Esse é o objetivo desta seção da tese, que é subdividida em duas partes. Na primeira é realizada uma revisão dos trabalhos que tratam da relação existente entre infraestrutura de transporte, desenvolvimento socioeconômico e meio ambiente. Foram utilizadas técnicas bibliométricas e de análise de rede para o estudo desse arcabouço teórico. A segunda parte do capítulo aborda, de forma exclusiva, trabalhos que utilizaram a Análise Envoltória de Dados como metodologia para a construção de uma análise de eficiência em temas correlatos ao aqui discutido.

2.1. Infraestrutura de transporte, desenvolvimento socioeconômico e meio ambiente: uma análise bibliométrica e da rede de cocitação

Como supracitado, a análise do arcabouço teórico dos trabalhos acadêmicos que tratam das relações existentes entre infraestrutura de transporte, desenvolvimento econômico, impactos sociais e impactos ambientais é apresentada nessa seção, que fará o uso de ferramentas de análise bibliométrica e de análise de rede (*network analysis*). Para Zupic e Cater (2015, p. 429), a análise bibliométrica consiste na adição de “métricas de objetividade da literatura científica, aumentando o rigor e reduzindo o viés do pesquisador em buscas na literatura”¹. Os autores afirmam que as técnicas de análise bibliométrica agregam conclusões de inúmeros autores da área pesquisada, consolidando uma análise mais abrangente da literatura acadêmica. Decorrente de tais benefícios, o uso dessas ferramentas na

¹ Trecho original: “Such methods introduce a measure of objectivity into the evaluation of scientific literature and hold the potential to increase rigor and mitigate researcher bias in reviews of scientific literature”.

condução de revisões de literatura tem sido mais frequente. Em trabalhos recentes, tal técnica foi aplicada para temas como a logística portuária e marítima (Davarzani et al., 2015), cadeia de suprimentos (Fahimnia et al., 2015), bem como para temáticas diversas das áreas de economia e administração.

De modo específico, os objetivos desta subseção da tese são: (i) consolidar uma revisão da literatura acadêmica que trata da problemática relacionada entre infraestrutura de transporte, desenvolvimento socioeconômico e meio ambiente; (ii) fazer o levantamento da evolução dessa linha de pesquisa na literatura acadêmica internacional; (iii) identificar e comparar os trabalhos considerados como pilares dessa vertente teórica; (iv) identificar os padrões (grupos) das pesquisas, de forma a listar temáticas relevantes para o desenvolvimento de trabalhos futuros. As técnicas e ferramentas de análise bibliométrica aqui utilizadas são brevemente apresentadas na sequência, antecedendo a discussão dos resultados obtidos.

2.1.1. Metodologia utilizada na análise do referencial teórico

A metodologia utilizada na condução dessa análise do referencial teórico tem como base o trabalho de Rowley e Slack (2004). Os autores adotaram quatro etapas distintas para a coleta e análise das informações: (i) definição dos termos de busca; (ii) pesquisa e refino dos resultados; (iii) análise das estatísticas gerais; e (iv) análise dos dados e informações obtidos. Fez-se o uso da base de dados do *Web of Science* (WoS), plataforma de trabalhos acadêmicos da *Thomson Reuters*. O acesso à coleção principal da base de dados do WoS permitiu a análise de uma série de trabalhos científicos de todas as áreas de conhecimento, sendo tal base adequada ao cumprimento dos objetivos aqui listados.

Os trabalhos analisados foram selecionados a partir da definição de um conjunto de palavras-chave, primeira etapa da pesquisa bibliográfica (Rowley e Slack, 2004). De modo a garantir que um número elevado de trabalhos da área de estudo de interesse fosse compreendido na busca realizada no WoS, combinações entre termos-chave foram inseridas na plataforma. Todas as combinações de termos apresentadas na Tabela 1 foram utilizadas na busca por trabalhos acadêmicos, as quais foram definidas a partir de uma análise de “tentativa e erro” nas buscas de teste.

Tabela 1. Termos de busca utilizados na plataforma *Web of Science*.

Palavras-chave	Temática pesquisada nos trabalhos
<i>infrastructure* invest* AND social develop*</i>	Infraestrutura e desenvolvimento social
<i>infrastructure* AND social develop*</i>	
<i>transport* infrastructure* Invest* AND social develop*</i>	Infraestrutura de transporte e desenvolvimento social
<i>transport* infrastructure* AND social develop*</i>	
<i>carbon AND transport* Infrastructure* investment*</i>	Infraestrutura de transporte e meio ambiente
<i>transport* infrastruc* AND green investment*</i>	
<i>carbon AND transport* Infrastructure*</i>	
<i>transport* infrastructure* invest* AND green investment*</i>	
<i>carbon AND infrastructure* investment*</i>	Infraestrutura e meio ambiente
<i>infrastructure* AND green investment*</i>	

Fonte: elaborado pelo autor.

A busca foi realizada de forma a compreender os trabalhos disponíveis sem a limitação do horizonte temporal, permitindo identificar o início do surgimento dos trabalhos relacionados à temática pesquisada na literatura acadêmica. A pesquisa cobriu toda a coleção de trabalhos do WoS, contemplando o período entre 1900 e 2018.

A partir da inserção dos termos de busca (Tabela 1), a plataforma retornou a seleção de 4.487 trabalhos², sendo um total de 3.070 classificados como artigos científicos (*articles*), os quais foram selecionados (início da segunda etapa, conforme Rowley e Slack (2004)). Os demais trabalhos não classificados como artigos científicos foram desconsiderados.

O refino da busca também foi realizado a partir da identificação das “Categorias do *Web of Science*” de maior relevância para a condução dessa análise. Na categorização disponível na plataforma, foram selecionadas 30 categorias, as quais têm maior proximidade com as áreas de economia e administração, dentre outras áreas correlatas. Nessa seleção foram escolhidas as seguintes categorias: *Agricultural Economics Policy, Agriculture Multidisciplinary, Area Studies, Business, Business Finance, Construction Building Technology, Economics, Energy Fuels, Civil Engineering, Environmental Engineering, Multidisciplinary Engineering, Environmental Sciences, Environmental Studies, Geography, Geosciences Multidisciplinary, Green Sustainable Science Technology, International Relations, Management, Operations Research Management Science, Planning Development, Political Science, Public Administration, Social Issues, Social Sciences Interdisciplinary, Social Sciences Mathematical Methods, Social Work, Sociology, Transportation, Transportation Science Technology* e *Urban Studies*. Com esse novo filtro, 2.291 trabalhos foram selecionados, sendo os demais descartados.

O primeiro registro dessa seleção de trabalhos é datado para o ano de 1991, sendo que até o ano de 2006 foi identificada uma quantidade média de 17 trabalhos publicados por ano. A partir de 2007, nota-se um aumento contínuo de trabalhos que relacionam infraestrutura com as áreas de meio

² A pesquisa no *Web of Science* foi realizada entre dias 20 e 25 de setembro de 2018.

ambiente e desenvolvimento socioeconômico. Um total de 385 trabalhos foram identificados para o ano de 2017 e 313 trabalhos para o ano de 2018³.

Com o objetivo de selecionar apenas os trabalhos diretamente relacionados ao escopo de análise proposto nesta tese, foi realizada uma nova rodada de seleção de artigos baseada na leitura dos títulos e dos resumos de cada um dos 2.291 trabalhos. Dessa nova etapa foram escolhidos 414 artigos. Estes, alinhados ao escopo desse estudo, configuram a base das análises (bibliométrica e da rede de citações) que serão apresentadas adiante. Cabe o destaque de que trabalhos relacionados ao desenvolvimento de outros tipos de infraestrutura que não sejam de transporte de cargas e/ou passageiros (tais como energia elétrica, moradias etc.) não estão contemplados na base de artigos selecionada. Além disso, salienta-se a tendência de aumento na frequência de trabalhos sobre o desenvolvimento de infraestruturas para a coleta, o transporte e o armazenamento de CO₂, os quais também foram descartados.

Após a seleção dos trabalhos, fez-se o *download* da base de dados do WoS. A manipulação desta se deu por meio da utilização do *software* BibExcel (Persson et al., 2009). A escolha deste programa se deu pela possibilidade de se trabalhar com grandes bases de dados, convertendo-as em uma linguagem compatível com o Excel e com *softwares* utilizados em análises bibliométricas. A análise de rede de citações, assim como a análise dos agrupamentos (*clusters*) formados entre os artigos, foi realizada com o *software* Gephi (Bastian et al., 2009), dadas as possibilidades disponíveis para análise e visualização das informações, além do fato de este já ter sido utilizado em uma série de trabalhos acadêmicos consultados.

2.1.2. Resultados da análise bibliométrica

A análise bibliométrica tem como base o conjunto final de 414 artigos selecionados da pesquisa realizada no WoS. O primeiro registro de artigo presente nesta seleção tem como data de publicação o ano de 1991. Até o ano de 2006, 2,18 foi o número médio de trabalhos publicados por ano. O segundo período característico ocorre entre 2007 e 2014, com número médio de *papers* publicados por ano superior a 15. Entre 2015 e 2018 tem-se o terceiro período, com um aumento ainda mais significativo das publicações anuais – média superior a 63 trabalhos. Tais informações sobre a evolução da quantidade de artigos publicados são apresentadas na Figura 1, a qual permite inferir sobre a evolução das relações “infraestrutura de transporte e meio ambiente” e “infraestrutura de transporte e desenvolvimento socioeconômico”.

³ Para o ano de 2018, a expectativa é que o número de artigos seja maior do que o apresentado, em decorrência do período em que as buscas foram realizadas no WoS.

Figura 1. Evolução anual das publicações por temática analisada.

Fonte: elaborado pelo autor baseado na consulta realizada à base de dados do WoS.

Pela Figura 1, nota-se que os trabalhos que tratam da relação existente entre o desenvolvimento da infraestrutura de transporte e o desenvolvimento econômico e social surgiram no início da década de 1990. A partir deste período, a literatura acadêmica ressalta os benefícios gerados pela maior disponibilidade de infraestrutura de transporte nas diferentes sociedades, sendo tal relação continuamente analisada. A tendência de aumento na frequência de publicações com essa temática é observada a partir do ano de 2010.

Por outro lado, trabalhos que abordam a relação entre o desenvolvimento do transporte e os respectivos impactos ambientais surgiram na segunda metade da década de 1990, ganhando espaço na literatura científica a partir de 2005. Trata-se de uma temática de pesquisa recente em comparação com a anterior, porém também com um significativo número de trabalhos publicados a partir de 2010.

Cabe também o destaque da tendência de aumento, a partir de 2010, que é observada no número de publicações que vinculam aspectos ambientais e socioeconômicos ao desenvolvimento das infraestruturas de transporte. Tal tendência de abordagem nos artigos científicos deve-se ao fato de essas três áreas de pesquisa estarem relacionadas entre si, sendo tratadas de forma conjunta pelos trabalhos científicos.

A análise da base de dados de artigos selecionados mostra que, dentre os autores com maior número de artigos publicados, David Banister lidera o *ranking* com quatro artigos: Banister (2011), Schwanen, Banister e Anable (2011), Banister (2018) e Cornet, Dudley e Banister (2018), todos eles relacionados à temática do meio ambiente. A Tabela 2 consolida a listagem dos seis autores com maior número de publicações.

Tabela 2. Autores com maior número de artigos publicados.

Autores	Número de artigos publicados
Banister, D.	4
Creutzig, F.	3
Cui, S. H.	3
Ramaswami, A.	3
Taylor, M.A.P.	3
Zhang, Y.	3

Fonte: elaborado pelo autor.

No tocante à filiação dos autores dos trabalhos analisados, a Universidade da Califórnia e a Universidade de Londres são as instituições que aparecem com o maior número de trabalhos publicados – 14 trabalhos cada. Na sequência, a Universidade de *Oxford* aparece com 10 artigos. Estados Unidos (85 artigos), China (71) e Inglaterra (53) são os países com maior presença e autores nessa literatura acadêmica analisada.

A análise bibliométrica permite também considerações importantes sobre os periódicos de maior relevância. Dentre os *journals* com maior número de trabalhos publicados, o destaque é o *Journal of Cleaner Production*, com 21 artigos. Na sequência aparecem: *Sustainability*, *Transportation Research Part D: Transport and Environment*, *Transportation Research Record* e *Transportation Research Part A: Policy And Practice*, conforme informações apresentadas na Tabela 3. Destaca-se o fato de terem sido identificados na base de artigos selecionada um total de 220 revistas. Desse total, 70% dos periódicos publicaram apenas um artigo, indicando uma pluralidade elevada de fonte de trabalhos.

Tabela 3. Periódicos com maior número de artigos.

Periódico	Número de artigos	Representatividade em relação ao total
<i>Journal of Cleaner Production</i> (JCP)	21	5%
<i>Sustainability</i>	16	4%
<i>Transportation Research Part D: Transport and Environment</i> (TRD)	13	3%
<i>Transportation Research Record</i> (TRR)	13	3%
<i>Transportation Research Part A: Policy And Practice</i> (TRA)	12	3%

Fonte: elaborado pelo autor.

Dentre as trinta categorias escolhidas nas etapas de refino da busca pelos trabalhos, grande representatividade é observada para: *Environmental Sciences*, *Economics*, *Environmental Studies* e *Transportation*. Essas são as áreas de pesquisa da plataforma como o maior número de artigos da área analisada, conforme informações da Tabela 4.

Tabela 4. Categorias do WoS com maior número de artigos.

Categoria do WoS	Número de artigos	Representatividade em relação ao total de artigos (%)
<i>Environmental Sciences</i>	96	23%
<i>Economics</i>	91	22%
<i>Environmental Studies</i>	91	22%
<i>Transportation</i>	90	22%
<i>Transportation Science Technology</i>	57	14%

Fonte: elaborado pelo autor.

Por fim, indicadores sobre as agências de financiamento podem ser relevantes para autores que venham a desenvolver trabalhos futuros relacionados a essa temática. Dados do WoS indicam que a *National Natural Science Foundation of China* é a instituição que financiou o maior número de trabalhos da base de dados analisada – um total de 28 artigos. Na sequência aparecem: *Engineering and Physical Sciences Research Council* (total de 9 artigos), *National Science Foundation* (9 artigos), *Economic and Social Research Council* (5 artigos), *Fundamental Research Funds for the Central Universities* (5 artigos) e a União Européia (4 artigos).

2.1.3. Resultados da análise da rede de cocitação

A análise da rede de citações (*network analysis*) foi realizada a partir da utilização do *software* Gephi. Fez-se o uso dessa técnica de pesquisa para identificar a base intelectual dos trabalhos que compõem o grupo de artigos selecionados, bem como identificar os principais autores, conclusões e

temas de fronteira. Para Ding e Cronin (2011), a análise de citações dentro da base de artigos selecionada é um indicador da popularidade dos trabalhos para a temática pesquisada.

O primeiro resultado dessa análise é apresentado na Figura 2. Essa figura mostra a relação social existente entre os autores desse campo de pesquisa (Chen, 2010), sendo a rede criada inicialmente de modo aleatório pelo *software* Gephi, mas com a posterior utilização do algoritmo “*Force Atlas 2*”. Nessa estrutura, os trabalhos com maior importância para a rede (maiores grau de ligação e conectividade com outros *papers*) são dispostos na região central, sendo aqueles de menor relevância localizados nas regiões periféricas.

Foram incorporados nesta análise de rede 349 trabalhos. Os demais 65 foram considerados *outliers* por estarem isolados da rede (sem citarem ou serem citados por algum outro trabalho), que é composta por 349 trabalhos e 1.811 arestas (ligações existentes entre os trabalhos). Na Figura 2, o tamanho dos nós representa o número de citações que o artigo possui dentro da rede. Quanto maior o tamanho do nó, maior a popularidade do trabalho (Ding e Cronin, 2011). Sun e Cui (2018), Waisman, Guivarch e Lecocq (2013) e Schwanenm, Banister e Anable (2011) se destacam como os *papers* com maior número de citações dessa base de artigos, sendo identificados por “1”, “2” e “3”, respectivamente, na Figura 2. A Tabela 5 apresenta os dez trabalhos com maior número de citações.

Figura 2. Análise da rede de citação dos artigos.

Fonte: elaborado pelo autor.

Tabela 5. Os dez artigos com maior número de citações.

Artigo	Número de citações
Sun e Cui (2018)	36
Waisman, Guivarch e Lecocq (2013)	33
Schwanenm, Banister e Anable (2011)	32
Mattauch, Ridgway e Creutzig (2016)	28
Xia, Nesbitt, Daley, Najnin, Litman e Tiwari (2016)	25
Sierra, Yepes e Pellicer (2018)	24
Vogt-Schilb e Hallegatte (2018)	23
Zheng, Zhang, Davis, Ciais, Hong, Li, Liu, Tong, Li e He (2018)	22
Pye e Daly (2015)	21
Zhang, Fujimori, Dai e Hanaoka (2018)	20

Fonte: elaborado pelo autor.

Além da frequência das citações, a análise do prestígio do artigo é medida pelo número de vezes em que o este é citado por trabalhos com elevado número de citações (Ding e Cronin, 2011). Para essa análise, o indicador denominado *PageRank* foi utilizado, o qual foi introduzido por Brin e Page (1998). Zhu et al. (2017) é o trabalho com maior *PageRank* da rede gerada, seguido por Zheng et al. (2018) e Xu, Grant-Muller e Gao (2017). Na Tabela 6 são apresentados os dez principais artigos sobre a ótica de análise desse indicador. Dentre os dez com maior número de citações (vide Tabela 5), Zheng et al. (2018), Sun e Cui (2018), Vogt-Schilb e Hallegatte (2018), Xia et al. (2016) e Waisman et al. (2013) aparecem relacionados dentre os dez trabalhos com maior *PageRank*.

Tabela 6. Os dez principais artigos de acordo com a análise de *PageRank*.

Artigo	<i>PageRank</i>	Número de citações
Zhu, Liu, Tian, Wang e Zhang (2017)	0,0481	7
Zheng, Zhang, Davis, Ciais, Hong, Li, Liu, Tong, Li e He (2018)	0,0342	22
Xu, Grant-Muller e Gao (2017)	0,0206	19
Yuan, Li, Guo, Zhao e Skibniewski (2018)	0,0176	13
Sun e Cui (2018)	0,0165	36
Vogt-Schilb e Hallegatte (2018)	0,0165	23
Xia, Nesbitt, Daley, Najnin, Litman e Tiwari (2016)	0,0162	25
Waisman, Guivarch e Lecocq (2013)	0,0150	33
Xie, Fang e Liu (2017)	0,0142	18
Zhang, Wang e Zheng (2018)	0,0141	12

Fonte: elaborado pelo autor.

De modo a agrupar os artigos que compartilham das mesmas características foi realizada a análise de *cluster*. Cada agrupamento é visto como um conjunto de trabalhos bem interconectados entre si, mas com leve grau de conexão com trabalhos de outro *cluster* (Davarzani et al., 2016). Esse tipo de

análise, segundo Davarzani et al. (2016), permite a identificação de padrões de tópicos de pesquisa e de colaborações, dado que a conexão entre os artigos tende a ser maior quanto maior a similaridade, por exemplo, de temas e métodos de análise. Como resultado, foram gerados dez agrupamentos, sendo o menor formado por 3 e o maior por 72 artigos. O grau médio de modularidade (índice de separabilidade entre o grupos) é 0,538, sendo o detalhamento do total de trabalhos presentes em cada *cluster* apresentado na Tabela 7. Cabe acrescentar que, no *software* Gephi, o algoritmo utilizado nesse tipo de análise é o proposto por Blondel et al. (2008).

Tabela 7. Resultado da análise de *cluster*.

<i>Cluster</i>	Total de trabalhos	Total de trabalhos (%)
1	44	12,6%
2	59	16,9%
3	45	12,9%
4	72	20,6%
5	36	10,3%
6	17	4,9%
7	7	2,0%
8	45	12,9%
9	21	6,0%
10	3	0,9%

Fonte: elaborado pelo autor.

A Figura 3 ilustra a organização dos agrupamentos na rede, porém com o uso do algoritmo de disposição “*Fruchterman Reingold*”. Neste: (i) quanto mais ao centro, maior a importância do nó para a rede formada; e (ii) quanto maior o tamanho do nó, maior é o índice *PageRank* do artigo. Nota-se maior dimensão e concentração de *clusters* como o 1, o 2 e o 4, além da maior dispersão atribuída aos trabalhos dos agrupamentos 3 e 5.

De forma a explorar as principais características de cada um dos grupos formados, foram selecionados os cinco artigos com maior índice *PageRank*. Tais trabalhos (listados no APÊNDICE A com as informações desse indicador) foram analisados com o objetivo de identificar os principais focos de pesquisa e temáticas emergentes. A escolha dos cinco principais trabalhos representou 33,7% da soma total do *PageRank* atribuído aos trabalhos do *cluster* 1. Essa proporção é de 28,5% no segundo grupo, 39,4% no terceiro, 30,8% no quarto, 65,5% no quinto, 70,1% no sexto, 80,8% no sétimo, 33,6% no oitavo, 41,4% no nono e 100,0% no décimo. Tais números demonstram a representatividade da análise dos cinco trabalhos como forma de se obter as principais considerações para cada um dos agrupamentos.

Figura 3. Estrutura da rede com destaque para a formação dos agrupamentos.
Fonte: elaborado pelo autor.

2.1.3.1. Cluster 1

De um total de 44 trabalhos, os artigos com melhor avaliação *PageRank* no *Cluster 1* são: Sun e Cui (2018), Wang, Xue, Zhao e Wang (2018), Snieska e Simkunaite (2009), Rovolis e Spence (2002) e Olsson (2009).

Com aplicações para localidades chinesas, Sun e Cui (2018) fazem análises dos benefícios sociais, econômicos e ambientais trazidos pela existência de infraestruturas de transporte público. Os autores são categóricos em afirmar que esses benefícios estão interconectados, o que demanda uma análise conjunta das três esferas. O estudo utilizou o produto interno bruto (PIB), receita fiscal, nível de consumo, nível de investimento em ativos fixos, lucratividade da indústria, nível de investimento estrangeiro e o turismo como variáveis econômicas. Como variáveis para medição dos impactos sociais tem-se os níveis de renda, de emprego, de urbanização, de matrículas escolares e saúde dos habitantes. Por fim, os autores consideram o ruído, nível de CO₂, nível de NO₂, nível de partículas no ar e a qualidade do ar como variáveis ambientais. A partir de uma análise de índices criados e dados em painel, eles demonstram a maior dimensão dos impactos econômicos atrelados aos investimentos em

infraestrutura de transporte público. Na sequência, os impactos ambientais também apresentam significativa relevância, ao passo que os impactos sociais tiveram um impacto reduzido.

Wang et al. (2018) também mostram que os impactos de infraestruturas de transporte têm dimensões econômicas, ambientais e sociais. Os autores ressaltam a complexidade dos impactos gerados por esse tipo de infraestrutura na economia, além de destacarem o estudo integrado dos diferentes impactos potenciais como tendência futura para pesquisas.

Snieska e Simkunaite (2009) focam na avaliação dos impactos socioeconômicos gerados por investimentos de infraestrutura, dentre eles os de transporte. Analisando o caso de países bálticos, os autores mostram relação direta entre a quantidade de rodovias pavimentadas e o PIB regional para a Lituânia, Letônia e Estônia. Snieska e Simkunaite (2009) ainda pontuam que a falta de uma metodologia única na literatura acadêmica dificulta a avaliação dos impactos sociais e econômicos decorrentes do desenvolvimento de novas infraestruturas.

O trabalho de Rovoli e Spence (2002) analisa o investimento público grego em infraestrutura, de modo a medir os eventuais impactos na economia. A conclusão dos autores evidencia a existência de impactos positivos no desempenho dos agentes privados. Adicionalmente, Rovoli e Spence (2002) mostram que os investimentos públicos em infraestrutura de transporte, classificados pelos autores como infraestrutura produtiva, têm uma relação de complementariedade com o investimento privado nas localidades analisadas.

Olsson (2009), na mesma linha dos autores citados acima, mostra que a existência de uma infraestrutura de transporte inadequada restringe o desenvolvimento socioeconômico. Tal relação é mais evidente em países em desenvolvimento, os quais são caracterizados por ligações rodoviárias de pior qualidade e/ou inexistentes. O autor analisa a existência de impactos diretos (tempo de viagem, custos com combustível e manutenção de veículos, sazonalidade no transporte e atrasos) e indiretos (alterações no investimento regional, produtividade, nível de emprego, acessibilidade aos mercados, renda, dentre outros) decorrentes dos investimentos em uma rodovia na Filipinas.

Por meio de uma análise multicritério, com questionários aplicados junto às firmas e aos residentes locais, dentre outros indicadores socioeconômicos, Olsson (2009) mostra que a existência dessa rodovia ligando as duas regiões analisadas aumentou o comércio, o investimento regional e a competição entre as firmas locais, além de incentivar a produção local que era originalmente restringida pela falta de acessibilidade. O autor ainda evidencia os impactos dessa rodovia na atividade pesqueira local, a qual era bastante limitada na situação anterior à concretização do investimento.

Em síntese, o *Cluster 1* é caracterizado por trabalhos que visam discorrer principalmente sobre os impactos, diretos e indiretos, potencialmente causados na esfera socioeconômica, decorrentes dos investimentos em infraestrutura de transporte. Relação positiva é observada entre a

disponibilidade de infraestrutura e melhorias no ambiente econômico das localidades nas quais a infraestrutura de transporte está localizada, a qual caracteriza os trabalhos desse agrupamento. Sugestões para trabalhos futuros indicam a necessidade de o desenvolvimento da infraestrutura de transporte se adequar às necessidades do desenvolvimento urbano e socioeconômico.

2.1.3.2. Cluster 2

Esse agrupamento é composto por 59 artigos e tem os seguintes trabalhos com maior índice do *PageRank*: Xia et al. (2016), Vermeiren et al. (2015), Sakib et al. (2018), Taylor (2008) e Vučković et al. (2018).

Xia et al. (2016) trazem em perspectiva a relação entre a exclusão social e a disponibilidade de infraestrutura de transporte. Os autores, utilizando uma abordagem multidimensional (a oferta e a demanda por transporte nas cidades), avaliam as diferenças na disponibilidade de infraestrutura de transporte em duas regiões da Austrália e o impacto potencial desta em indicadores como o Índice de Gini e a Curva de Lorenz. Xia et al. (2016) mostram que o acesso a moradias, influenciado pela renda, preço das casas e custos de transporte, está entre os fatores que mais contribuem para o aumento da desigualdade no acesso ao transporte. Os autores também apontam a existência de políticas públicas para o desenvolvimento do transporte urbano como opções para diminuir a ocupação de áreas periféricas das cidades e melhorar a acessibilidade ao transporte.

Vermeiren et al. (2015) trazem uma abordagem sobre o desenvolvimento do transporte urbano. O caso analisado pelos autores retrata a problemática da implantação de um sistema de ônibus de transporte rápido em Kampala (Uganda). Para os autores, benefícios diversos são trazidos pela implantação desse sistema, com impactos no aumento da acessibilidade e oportunidades para parte da população. Por outro lado, a implantação desse sistema não beneficia a parcela mais pobre da população por dois motivos: distância desses centros aos bairros e custo elevado da passagem. Os autores destacam o potencial de aumento na vulnerabilidade do acesso a oportunidades causado por esse sistema de transporte.

Para Sakib et al. (2018), o transporte é ponto crucial na busca pelo desenvolvimento sustentável. O desenvolvimento sustentável pelo transporte de passageiros e maior acessibilidade passa pelas seguintes áreas: infraestrutura, distância até os centros urbanos, disponibilidade de transporte público e multimodalidade. Sakib et al. (2018) analisam o transporte e acessibilidade em países do Mediterrâneo a partir do levantamento de uma série de indicadores tais como: número de berços nos portos da região, tamanho dos navios de passageiros, distância dos centros urbanos, disponibilidade de transporte público, dentre outros. Os resultados trazem um comparativo entre os portos utilizados

no transporte de passageiros, além de mostrarem que o transporte marítimo nessa localidade é de elevada importância para a manutenção da integração econômica regional.

Taylor (2008), também abordando aspectos do desenvolvimento da infraestrutura de transporte nos centros urbanos, desenvolve um método para a identificação de locais críticos na rede de transporte rodoviário no que diz respeito ao potencial de ocorrência de congestionamentos. Ao incluir na modelagem aspectos como a demanda por viagens, a capacidade e a geometria das ruas, o autor pontua que essa abordagem traria benefícios ao se estabelecer um ponto de vista mais preciso sobre a vulnerabilidade potencial de cada local. Para o autor, essa abordagem reduz a pressão existente sobre a necessidade de novos investimentos em infraestrutura de transporte, uma vez que permite a preparação prévia dos locais da rede viária urbana com maior vulnerabilidade.

Vučković et al. (2018), ao conduzirem a aplicação de questionários junto à população de algumas regiões da Sérvia, mostram como os investimentos em rodovias que ocorreram até o final da década de 1990 moldam a percepção da população local. Entre as principais conclusões, os autores evidenciam que: (i) a baixa qualidade da infraestrutura de transporte em uma das regiões analisadas atua contra o desenvolvimento do comércio e do turismo; (ii) existe uma expectativa positiva em relação aos benefícios na mobilidade urbana que potencialmente podem ser trazidos a partir da construção de uma ferrovia planejada na região.

Em resumo, esse *cluster* tem como característica principal a existência de artigos que retratam a relação existente entre o desenvolvimento de infraestruturas de transporte nos centros urbanos e os respectivos impactos sociais. No tocante a tendências futuras para pesquisas, Xia et al. (2016) indicam temáticas que retratem a distribuição igualitária da oferta de transporte entre a população, ao invés de meramente a oferta de infraestrutura em grande quantidade.

2.1.3.3. Cluster 3

No *Cluster 3*, dentre os 45 artigos que o compõem, há como trabalhos mais relevantes: Yuan et al. (2018), Zembri-Mary (2017), Zhou et al. (2017), Van Wee et al. (2007) e Sanchez-Ollero et al. (2014).

Yuan et al. (2018) têm como objeto de análise as parcerias público-privadas para o investimento em infraestrutura de transporte na China. No modelo criado os autores inserem o que eles chamam de Fatores de Risco Social⁴. Tais fatores são empregados para avaliar os riscos econômicos, ambientais e sociais dos projetos de parceria público-privada. Dentre as métricas incorporadas no modelo, têm-se o preço do projeto, os atrasos na construção, poluição sonora,

⁴ Trecho original: “*Social Risk Factors*”.

poluição da água, poluição do ar, congestionamento ocasionado, segurança e acidentes na construção, dentre outros.

Yuan et al. (2018) destacam que o desafio para que se atinja o desenvolvimento sustentável dos projetos é a inserção, de forma balanceada, das questões ambientais, aspectos econômicos e sociais. Para o caso analisado, citando o conceito *people-first PPP (public-private partnership)*, o nível de segurança das obras, os atrasos, o nível de falhas, a poluição das águas, a frequência dos reparos e o congestionamento das vias são os fatores que mais contribuem para uma análise que incorpora os fatores de risco sociais nos projetos de parceria público-privada de infraestrutura de transporte na China.

Zembri-Mary (2017) analisa a condução de projetos de infraestrutura na França, incorporando incerteza ao planejamento das obras. O autor conclui que os riscos ambientais, políticos e institucionais são levados em consideração na condução dos projetos de infraestrutura de transporte. Por outro lado, os problemas aparecem quando se analisa o risco da existência de custos adicionais na finalização da obra e a precisão das projeções de demanda pela infraestrutura. Abordagens com diferentes pontos de vista podem trazer benefícios ao desenvolvimento de políticas públicas para o investimento em infraestrutura de transporte (ZEMBRI-MARY, 2017).

No sentido de identificar variáveis para a tomada de decisão em obras de renovação da infraestrutura urbana (incluindo a infraestrutura de transporte), Zhou et al. (2017) listam as seguintes questões-chave: bem estar social, desenvolvimento econômico e imobiliário, locais públicos, compensações de demolição, infraestrutura, meio ambiente, aspectos políticos, *status* das obras e o comportamento de investimento das construtoras/incorporadoras. Para os autores, essas variáveis servem de base para tomada de decisão sobre os investimentos em obras de infraestrutura no meio urbano.

Já Van Wee et al. (2007) fazem o comparativo de métodos que incorporam impactos ambientais atrelados à atividade de transporte. Dentre as principais críticas aos métodos mencionados, têm-se: (i) o fato de muitos modelos não levarem em conta as características específicas de cada produto transportado; (ii) o fato de nem sempre os fatores de emissão serem corrigidos pelas distâncias; e (iii) o fato de a análise nem sempre considerar alternativas mais detalhadas sobre as emissões (impacto da velocidade da operação de transporte, por exemplo). Os autores sugerem que, em trabalhos futuros, outros indicadores além das emissões de gás carbônico e óxido nítrico deveriam ser incorporados nas análises, assim como a incorporação de horizontes temporais maiores.

Sanchez-Ollero et al. (2014) apresentam uma série de indicadores ao dissertarem sobre os benefícios econômicos (principalmente para o setor do turismo), de integração social e ambientais resultantes do desenvolvimento da malha ferroviária na Espanha. Custos de transporte, evolução do

número de viagens e tendência observada na economia local estão entre as principais métricas analisadas pelos autores. A conclusão do artigo ressalta a importância da manutenção das políticas de ampliação da malha ferroviária no país, apesar da tendência de redução no número de passageiros.

Pelos trabalhos listados, a característica principal dos *Cluster 3* é relacionada ao estabelecimento de novas métricas para serem incorporadas no planejamento de novas infraestruturas de transporte. Tais indicadores, bem como novas formas de abordagem da problemática, podem ser úteis aos tomadores de decisão na gestão dos programas de investimento em infraestrutura de transporte.

2.1.3.4. Cluster 4

O *Cluster 4* é o que apresenta o maior número de trabalhos (total de 75), tendo como principais: Xu et al. (2017), Waisman et al. (2013), Yang et al. (2016), York et al. (2017) e Zhang et al. (2018).

Xu et al. (2017) analisam os efeitos das políticas de administração do transporte em Pequim (China). Os autores corroboram com a ideia de que o desenvolvimento de um sistema de transporte sustentável tem impactos ambientais, sociais e econômicos. Para eles, as políticas públicas para gestão do transporte nas cidades deveriam considerar:

- i. No contexto ambiental: a promoção do uso da terra com impactos mínimos ao meio ambiente; a promoção do uso racional de energia não renovável; promoção do uso de material e combustível renovável; não produzir mais emissões de gases poluentes além da capacidade do ecossistema em neutralizá-los.
- ii. No âmbito social: não produzir mais ruído do que o aceitável para as comunidades próximas; promover a segurança para as pessoas e suas propriedades; estar em acordo com as necessidades humanas no que tange à saúde, ao conforto e à conveniência; promover acessibilidade à população.
- iii. No âmbito econômico: ter boa capacidade e relação custo-benefício; ser financeiramente bom para as gerações futuras; suportar ações para o desenvolvimento sustentável da economia.

Abordando os princípios de equidade, os autores afirmam que os projetos devem visar a maximização do benefício líquido para todas as regiões impactadas pelos mesmos, sendo as políticas públicas para o desenvolvimento do transporte direcionadas ao atendimento de regiões menos favorecidas até o estabelecimento de uma equidade entre as localidades. Xu et al. (2017) também

apontam para a necessidade de existirem análises amplas para a avaliação dos potenciais impactos das políticas para o desenvolvimento do transporte.

Waisman et al. (2013) trabalham com o desenvolvimento de modalidades de transporte de baixa emissão de gases poluentes. Os autores discutem as práticas existentes na literatura para a mitigação das emissões de CO₂, apontando que serão necessárias alterações estruturais nas modalidades de transporte disponíveis para a população. É desenvolvido um modelo de equilíbrio geral para analisar o impacto da precificação das emissões de CO₂ na economia. Focou-se na dinâmica do setor de transporte a partir da inclusão de variáveis como: a demanda no transporte de passageiros, a demanda no transporte de cargas e a existência de tecnologias associadas ao serviço de transporte.

Como resultados, Waisman et al. (2013) afirmam que o setor de transporte se mostra como o mais desafiador na busca pela redução dos níveis de emissão de gás carbônico, sendo pouco sensível à precificação. Em decorrência desse fato, os autores concluem que as melhores maneiras para mitigar as emissões de CO₂ no setor de transporte estão relacionadas a: (i) reorganização dos centros urbanos com o favorecimento de modalidades de transporte de baixa emissão; (ii) investimentos em infraestrutura de transporte de cargas com menor taxa de emissão de CO₂; e (iii) alterações na organização logística, de modo a se reduzir as distâncias percorridas na distribuição.

Yang et al. (2016) tratam sobre o desenvolvimento do transporte ferroviário urbano em Pequim (China) e os respectivos impactos na economia local. Os autores analisaram documentos de compra de propriedades entre 2004 e 2011 e estimaram um aumento de 11,1% no preço daquelas localizadas no entorno de estações ferroviárias construídas. O mesmo aumento não foi observado em áreas remotas da cidade, dado o baixo nível de investimento em infraestrutura nessas regiões. É evidenciada a necessidade de se estabelecer políticas mais claras de seleção de localidades para a construção das estações, as quais devem objetivar o desenvolvimento igualitário das regiões.

York et al. (2017) trabalham com a mensuração dos impactos na infraestrutura da Cidade do Cabo (África do Sul) decorrentes da transição para uma economia mais sustentável. Utilizando a modelagem de sistemas dinâmicos como método de pesquisa, os autores mostram que as intervenções que estimulam o transporte multimodal de carga são mais sustentáveis para a localidade analisada, dado o impacto potencial na redução das emissões de gases poluentes e do número de acidentes nas rodovias.

Zhang et al. (2018) elaboraram um modelo de equilíbrio geral que avalia o setor de transporte de passageiros e sua relação com as emissões de gases poluentes. Os autores concluem que o transporte com a utilização de carros, em cenários futuros, continuará a ser a principal fonte de emissão de gases do efeito estufa no transporte de passageiros, apesar da tendência de aumento na utilização de modos alternativos em algumas regiões do mundo. Nesse sentido, a imposição de tarifas de carbono

será uma medida importante, a qual influenciaria a escolha de tecnologia e combustível dos agentes no mercado, contribuindo diretamente para a redução das emissões de gases poluentes. São sugeridas, como temáticas para pesquisas futuras, análises que evidenciem os impactos das políticas públicas e padrões de transporte no potencial e no custo de mitigação das emissões.

A partir desse conjunto de trabalhos, o *Cluster 4* tem como característica central a presença de artigos que sugerem a adoção de análises multicritério para a identificação dos impactos do sistema de transporte no meio ambiente e na sociedade. Em comum, tais trabalhos destacam a necessidade do estabelecimento desse tipo de análise para o melhor direcionamento e condução das políticas públicas voltadas ao desenvolvimento da matriz de transporte nos países. Além disso, é presente nesses trabalhos a relação entre a ideia de precificação das emissões de CO₂ e o incentivo ao uso de modais de transporte com menores taxas de emissão.

2.1.3.5. Cluster 5

Formado por 36 artigos, Zhu et al. (2017), Zheng et al. (2018), Xie et al. (2017), Zhang et al. (2018) e Tong et al. (2016) são os principais trabalhos desse quinto agrupamento.

Abordando a relação entre o crescimento (urbano e industrial) e as emissões de CO₂ na China, Zhu et al. (2017) atentam para o aumento da emissão desse gás na atividade de construção civil. O setor industrial também é apontado como um dos principais setores em termos de emissão de dióxido de carbono, mas com um crescimento menor do que o observado para o setor de construção entre 1997 e 2012. Os autores mostram que o setor de produção de equipamentos de transporte foi um dos que mais contribuiu para o aumento das emissões chinesas desse poluente.

Temática similar é analisada no trabalho de Xie et al. (2017). Tendo como objeto de análise localidades chinesas, os autores, a partir de uma análise de dados em painel, avaliaram os efeitos das infraestruturas de transporte nas emissões urbanas de CO₂. É argumentado que a disponibilidade de uma infraestrutura de transporte acarreta crescimento econômico, aumento da acessibilidade e da população nas regiões urbanas, além de promover inovações tecnológicas (acessibilidade dos mercados). Tais consequências, por sua vez, têm impacto direto no nível de emissão dos municípios. Os modelos econométricos do trabalho mostram que, quanto maior a infraestrutura de transporte (rodovias) das cidades, maiores são as emissões de CO₂ (nas grandes e médias localidades; para pequenos municípios, não foram encontrados resultados estatisticamente significativos).

De forma complementar a Zhu et al. (2017), Xie et al. (2017) alegam que a efetividade das políticas de mitigação das emissões de CO₂ devem levar em consideração os efeitos das infraestruturas de transporte. Para os formuladores de políticas públicas, o planejamento dos investimentos devem

ser desenhados de forma a minimizar o potencial de emissão de gás carbônico das cidades. Especialmente para as grandes cidades, a infraestrutura de transporte deve priorizar investimentos em modalidades de transporte com baixo grau de emissão.

Zhang, Wang e Zheng (2018) mostram que, no processo de urbanização da China, o transporte rodoviário teve contribuição significativa para o aumento das emissões de CO₂ no país, seguido pelo transporte aéreo. Nos últimos anos, o aumento da participação do modal rodoviário no transporte de cargas do país contribuiu de forma decisiva para esse aumento nas emissões do setor. Também apresentando sugestões para políticas públicas, os autores apontam como relevantes: (i) o aumento dos investimentos em modais de transporte com menores índices de emissão, tais como o ferroviário e o hidroviário; (ii) a busca por novas tecnologias que sejam capazes de reduzir as emissões no setor de transporte chinês; e (iii) a busca pelo desenvolvimento de uma cadeia de suprimentos que reduza as distâncias percorridas no transporte.

Zheng et al. (2018) apresentam uma análise de decomposição das emissões de CO₂ para uma série de municípios chineses. Como conclusão principal, os autores mostram que o governo chinês tem impulsionado setores distintos da economia a partir de investimentos em diferentes tipos de infraestrutura. As cidades com maior intensidade em emissão de CO₂ são as consideradas mais problemáticas, o que pode indicar um desafio maior aos formuladores de políticas públicas, dada a tendência de se buscar investimentos que reduzam o potencial de emissão de gás carbônico.

Também com aplicações para a China, Tong et al. (2016) analisam as emissões de gases do efeito estufa ocasionados pelos setores de infraestrutura. A partir da geração de um *benchmarking* entre quatro cidades, eles concluem que o setor de transporte é responsável por até 8% das emissões de CO₂, sendo o setor industrial o com maior representatividade.

Uma característica comum para esses artigos do *Cluster 5* é relacionada ao fato de as análises serem feitas para localidades chinesas. Os trabalhos abordam a relação entre o recente desenvolvimento econômico na China - parte impulsionado pelos investimentos em infraestrutura - e a evolução das emissões de CO₂ no país. Muitas das considerações dos artigos apontam que a continuidade da urbanização nos próximos períodos deve ser afetada pelas políticas de mitigação das emissões de gases poluentes.

2.1.3.6. Cluster 6

Com 17 trabalhos, os principais artigos do *Cluster 6* são: Vogt-Schilb e Hallegatte (2017), Vogt-Schilb, Meunier e Hallegatte (2018), Taptich e Horvath (2015), Schütze et al. (2017) e Jakob et al. (2016).

Vogt-Schilb e Hallegatte (2017) trazem considerações sobre como os formuladores de políticas públicas podem delimitar ações para reduzir as emissões de CO₂. Os autores alegam que a receita trazida pela taxação das emissões do gás poderia financiar investimentos em infraestrutura e fundos sociais. Tal medida, por impor novos custos na economia, tende a ter oposição política, sendo indicado o estabelecimento de preços moderados nas fases iniciais dessa ação compensatória.

Fazendo menção ao caso brasileiro, Vogt-Schilb e Hallegatte (2017) afirmam que, em uma estratégia para 2030, investimentos em metrô, ferrovias e hidrovias poderiam contribuir significativamente para a descarbonização da atividade econômica do país. A partir de 2020, investimentos com esse enfoque serão críticos para que o país possa atingir suas metas de mitigação das emissões de CO₂. Além das questões levantadas, os autores elencam outros esforços para a mitigação das emissões, dentre elas a adoção de novas tecnologias no setor de transporte.

Vogt-Schilb, Meunier e Hallegatte (2018) mencionam a existência de opções para a redução das emissões de CO₂, associadas a diferentes custos de implantação e a diferentes níveis de mitigação das emissões. Analisando essa relação, os autores concluem que as soluções implementadas nem sempre alcançam o seu potencial máximo para a redução, mesmo com a precificação devida. O setor da construção civil, dentre os outros analisados, é aquele que apresenta o maior potencial de redução das emissões com a implementação de um sistema de precificação das emissões de dióxido de carbono. Nessa linha, os autores afirmam que, além do preço, o potencial de atingimento das metas de mitigação deve ser avaliado em cada setor, sendo mais eficiente, para o caso analisado no artigo, a cobrança de uma tarifa de US\$ 25,00 por tonelada de CO₂ no setor industrial.

Com uma aplicação para os setores de carne bovina, pescado e papel e celulose, Taptich e Horvath (2015) mostram o impacto da maior utilização do transporte ferroviário na redução das emissões de gases do efeito estufa nos Estados Unidos. Os autores ressaltam a influência da proximidade das infraestruturas de transporte na competitividade (econômica e ambiental) das cadeias analisadas, sendo que o aumento da capacidade operacional dos terminais ferroviários já existentes poderia proporcionar uma redução de até 70% nas emissões de CO₂ dos setores de carne bovina e pescado. Para o setor de papel e celulose os ganhos estimados ultrapassam 300%.

Trazendo uma abordagem macroeconômica, Schütze et al. (2017) concluem que o progresso tecnológico é fator necessário, porém não suficiente, para que haja efeitos positivos na economia, decorrentes da adoção de políticas climáticas. Combinado com o progresso técnico, programas de investimento e a adoção das expectativas adaptativas das empresas em relação aos investimentos por elas realizadas são necessários, dado que estes permitem transitar entre diferentes padrões de crescimento econômico sem deixar de lado a efetividade dessas políticas públicas fomentadas.

No artigo de Jakob et al. (2016), que também aborda as políticas de precificação das emissões de CO₂, os autores afirmam que a receita gerada a partir da precificação das emissões de CO₂ poderia promover o desenvolvimento socioeconômico por meio de investimento em infraestrutura de transporte, saneamento básico, energia, dentre outros. Segundo os autores, essa seria uma forma de reduzir a falta de acessibilidade em parte dos países do mundo, apesar de concluírem que em parte desses países (incluído o Brasil) essa receita não seria suficiente para pavimentar todas as rodovias que necessitam de obras. Essa abordagem indica caminhos para que o desenvolvimento sustentável possa influenciar no direcionamento de políticas públicas para o desenvolvimento de infraestruturas diversas em regiões mais remotas.

O *Cluster 6* tem como característica central a relação entre o desenvolvimento de infraestrutura e o potencial de mitigação das emissões de CO₂. Os trabalhos tratam também dos impactos da precificação das emissões de gás carbônico em uma série de setores da economia, gerando recursos para financiar o desenvolvimento socioeconômico a partir da condução de novos investimentos em infraestrutura (de transporte, saneamento básico, telecomunicações, entre outros).

2.1.3.7. Cluster 7

Dentre 7 artigos, os principais trabalhos do *Cluster 7* são: Schweikert et al. (2014), Pasha et al. (2016), Cui et al. (2010), Kumar e Imam (2013) e Cui et al. (2011).

Schweikert et al. (2014) apresentam em detalhes o Sistema de Suporte ao Planejamento de Infraestrutura⁵, desenvolvido a partir de um estudo de caso realizado no Colorado (Estados Unidos). O sistema considera aspectos climáticos, financeiros, de engenharia, de transporte e sociais para condução das análises, apresentado como principal resultado uma visão de longo prazo sobre os projetos de infraestrutura viária. Para os autores, ele possibilita a adoção de análises mais abrangentes, sendo um importante direcionador de políticas públicas para o investimento em rodovias.

No trabalho de Pasha et al. (2016), avalia-se, dentre outros fatores, o impacto da infraestrutura rodoviária na utilização do transporte público em algumas áreas do município de Calgary (Canadá). Relação direta é observada entre o uso mais frequente dos serviços de transporte público e a disponibilidade de metrô, estações de trens e rodovias.

Também com enfoque no transporte urbano, Cui et al. (2010) quantificam as emissões de carbono da criação de um sistema de transporte de ônibus denominado “*Bus Rapid Transit*” (BRT) em uma cidade chinesa. Os autores concluem que o sistema é capaz de reduzir as emissões de CO₂ em aproximadamente 25 mil toneladas do gás por ano. Complementar a este trabalho, Cui et al. (2011)

⁵ Trecho original: “*Infrastructure Planning Support System (IPSS)*”.

fazem o comparativo entre o BRT o sistema de ônibus convencional. Os autores concluem que o sistema rápido tem maior eficiência no consumo de energia em comparação ao sistema tradicional.

Baseado em uma análise dos trabalhos publicados na literatura científica, Kumar e Imam (2013) investigam os efeitos potencialmente causados pelas alterações climáticas na manutenção das infraestruturas já construídas. Os autores consolidam uma série de informações que indicam o impacto de poluentes diversos e alterações climáticas (temperatura, precipitação, umidade etc.) nas estruturas das obras. A rápida transformação do meio ambiente deve ter consequências diretamente observáveis nos ciclos de vida das infraestruturas já existentes, demandando atenção dos agentes responsáveis pela manutenção e desenvolvimento das mesmas.

Os trabalhos destacados no *Cluster 7* têm em comum o objeto de análise o transporte público urbano. Kumar e Imam (2013) é a única exceção. Os autores fazem análises que consideram os efeitos do desenvolvimento da infraestrutura de transporte urbano nas emissões de gases poluentes, além de trazerem considerações sobre os impactos das mudanças climáticas no desempenho das infraestruturas já existentes. Tais trabalhos não formam um agrupamento caracterizado por uma única ideia central, o que é exemplificado pela forma dispersa desse agrupamento (vide Figura 3).

2.1.3.8. Cluster 8

De um total de 45 artigos, do *Cluster 8* são destacados: Sierra et al. (2018), Yang et al. (2016), Yuan (2017), Ustaoglu et al. (2017) e Pardo-Bosch e Aguado (2016).

Sierra et al. (2018), ao analisarem trabalhos que inserem aspectos sociais na análise do desenvolvimento de infraestruturas, mostram que variáveis como mobilidade, segurança, saúde e desenvolvimento local estão entre as mais frequentes nos estudos com essa abordagem. Também considerando uma análise de multicritério, Yang et al. (2016) desenvolvem uma metodologia que objetiva o desenvolvimento sustentável da infraestrutura de transporte, baseada em fatores ambientais, financeiros, sociais e de transporte. Os autores fizeram o uso do modelo para selecionar, dentre quatro projetos chineses, aquele com melhor resultado para o desenvolvimento sustentável.

Em conjunto, Sierra et al. (2018), Yang et al. (2016) e Yuan (2017) convergem ao argumentar sobre a importância de os formuladores de políticas públicas utilizarem abordagens multicritério na priorização de projetos de infraestrutura, incorporando aspectos sociais e ambientais na tomada de decisão.

Ustaoglu et al. (2017) avaliam as tendências de mudanças no uso da terra decorrentes dos investimentos em infraestrutura de transporte. Em um caso aplicado para a região de Leipzig-Halle (Alemanha), os autores mostram que locais caracterizados pelo desenvolvimento mais concentrado

(em área) são ambientalmente mais eficientes e apresentam um melhor uso das opções de transporte, convergindo para melhores indicadores sociais.

Pardo-Bosch e Aguado (2016) discutem a criação do Índice de Sustentabilidade dos Projetos de Infraestrutura⁶, o qual considera os aspectos sociais, ambientais e econômicos das obras. Na construção desse índice foram incluídas métricas sobre o retorno do investimento, o impacto ambiental, as melhorias promovidas pelo projeto para a sociedade local, a criação de empregos, dentre outras. Os autores se utilizam do índice criado para avaliar projetos de áreas distintas, como a construção de estações de policiamento, rodovias, centros médicos, linhas de metrô, dentre outros. Para eles, a possibilidade de comparar o benefício global de projetos distintos se mostra importante para os atores públicos, dada a necessidade de priorização dos investimentos decorrentes de restrição de recursos.

Pluralidade maior é atribuída aos trabalhos do *Cluster 8*, o qual se mostra com baixo índice de concentração (Figura 3). Em comum, os cinco trabalhos anteriormente destacados abordam o desenvolvimento de metodologias multicritério para a tomada de decisão dos agentes públicos sobre a realização do investimento. Os trabalhos sugerem, para a academia e para os tomadores de decisão, que os estudos tenham uma tendência de considerar as diferentes esferas que podem ser impactadas pelos projetos, com o intuito de se promover o melhor uso dos recursos destinados aos investimentos em infraestrutura.

2.1.3.9. Cluster 9

O *Cluster 9* também se apresenta de forma dispersa na Figura 3, sendo composto por um total de 21 artigos. Os principais trabalhos são: Turok (2016), Silver (2015), Kennedy (2015), Mell (2018) e Wiesel et al. (2018).

Turok (2016) trabalha com o processo de urbanização na África, o qual o autor indica que, frente à tendência de se promover o desenvolvimento com base em variáveis econômicas, ambientais e sociais, deve passar por mudanças importantes nos próximos anos. Elencando as oportunidades existentes para o desenvolvimento urbano nesse continente, é ressaltada a necessidade de se promover novas políticas para o desenvolvimento local.

Analisando o desenvolvimento da África - nesse caso a África Subsaariana - Silver (2015) alega que é evidente a necessidade de os municípios africanos criarem programas de investimento para o desenvolvimento da infraestrutura urbana. Abordando a tendência de um desenvolvimento ambientalmente sustentável, o autor argumenta que o mercado de carbono é insuficiente para

⁶ Trecho original: “*Sustainability Index of Infrastructure Projects*”

promover o amplo desenvolvimento demandado por essa região. Para ele, o desenvolvimento urbano de baixo carbono é uma etapa seguinte ao desenvolvimento das infraestruturas básicas necessárias para se iniciar a revolução urbana nos países dessa região.

Kennedy (2015), trazendo uma análise sobre a realização de investimentos em grandes projetos de infraestrutura em quatro países do mundo, argumenta que a desigualdade social, os problemas de mobilidade e o aumento na pressão pela adoção de políticas mais liberais no desenvolvimento da infraestrutura impactam diretamente a condução das políticas públicas. De modo análogo, Mell (2018) disserta sobre a realização de investimentos em infraestrutura na Índia, destacando que a tendência observada nos investimentos em “infraestrutura verde” não se aplica para todas as localidades analisadas.

Wiesel et al. (2018) analisam a distribuição espacial dos investimentos em infraestrutura (de transporte e outras) na Austrália. Os autores apontam para uma abordagem mais distributiva dos recursos, tendendo a favorecer áreas com menor grau de desenvolvimento. Apesar disso, o artigo mostra que os bairros menos favorecidos tiveram níveis de investimento significativamente menores. O trabalho afirma que a distribuição igualitária dos investimentos é necessária e que ela não deve ser considerada apenas por uma métrica quantitativa, mas levar em consideração as necessidades reais da população regional.

Como característica central desse grupo de trabalhos é destacado o fato de os mesmos abordarem a influência de peculiaridades locais no desenvolvimento da infraestrutura. Atenção especial é dada às regiões menos desenvolvidas e à necessidade de se priorizar questões ambientais, econômicas e sociais na condução dos programas de investimento. Este *cluster*, como supracitado, apresenta uma distribuição bastante difusa dos trabalhos, o que remete ao escopo mais geral de análise em comparação aos demais trabalhos selecionados.

2.1.3.10. Cluster 10

Por fim, o *Cluster 10* é formado por apenas três artigos. Estes, considerados mais distantes da rede analisada pela Figura 3, tratam da relação de gastos públicos e o processo de urbanização na Polônia (Smutek, 2017), do processo de expansão da urbanização em Taipei (Taiwan) (Hsu et al., 2016) e da relação entre o crescimento regional na Carolina do Sul (Estados Unidos) (Salvino et al., 2018) e as infraestruturas de transporte público. Todos esses trabalhos trazem à tona questões relacionadas ao desenvolvimento urbano de diferentes localidades, sendo apontado por Hsu et al. (2016) que os investimentos em infraestrutura de transporte rápido (metrô, por exemplo) tendem a

incentivar o desenvolvimento mais concentrado dos centros urbanos, ao passo que o investimento em rodovias incentiva o desenvolvimento mais disperso.

2.1.4. Considerações finais sobre a análise da rede

Referenciada pela discussão anteriormente apresentada, a Tabela 8 sintetiza as principais características de cada um dos dez agrupamentos analisados. São destacadas a linha de pesquisa central e as principais temáticas emergentes.

Tabela 8. Classificação proposta para os *clusters* (linhas de pesquisa e temáticas emergentes).

Cluster	Linha de pesquisa principal	Temáticas emergentes
1	Relação entre o investimento em infraestrutura de transporte e os respectivos impactos socioeconômicos e ambientais	Adequação dos planos para o desenvolvimento da infraestrutura de transporte às demandas pelo desenvolvimento socioeconômico das regiões bem como demanda relacionadas ao meio ambiente
2	Infraestrutura de transporte nas cidades (centros urbanos) e aspectos socioeconômicos	Distribuição igualitária da oferta de transporte entre regiões
3	Estabelecimento de métricas e métodos multicritérios para avaliação dos impactos de infraestrutura de transporte	Criação e incorporação de outras métricas (de caráter social, econômico e ambiental) nos estudos, além do desenvolvimento de análises baseadas em metodologias multicritérios para os estabelecimentos dos projetos de investimento em infraestrutura de transporte
4	Desenvolvimento de políticas públicas para o sistema de transporte de cargas e passageiros, com o enfoque em modais de transporte com menor índice de emissão de gases poluentes	Estabelecimento de trabalhos que incluam vários aspectos na análise dos impactos potenciais dos sistemas de transporte, de forma a direcionar os formuladores de políticas públicas na busca pela redução da emissão de CO ₂ na operação de transporte (via precificação das emissões e maior utilização de modais alternativos)
5	Crescimento urbano e industrial na China e os respectivos impactos ambientais (aumento na emissão de gases poluentes)	Inclusão dos impactos ambientais do setor de transporte (urbano e de cargas) e respectivas infraestruturas nas políticas de desenvolvimento local e de mitigação das emissões de CO ₂
6	Políticas públicas para o desenvolvimento de infraestrutura com a mitigação das emissões de CO ₂ e os impactos da precificação do gás carbônico emitido em setores diversos da economia	Impactos ambientais dos investimentos em modais de transporte alternativos ao rodoviário e utilização da receita obtida com a precificação das emissões de gases poluentes para o desenvolvimento das políticas de investimento

7	Políticas públicas de investimento em infraestrutura de transporte nos centros urbanos (novas infraestruturas e manutenção das já existentes) e a utilização de modelos mais robustos (abrangentes) para avaliação dessas políticas	Impactos decorrentes das alterações climáticas no direcionamento e intensidade das manutenções da infraestrutura já existente e o desenvolvimento de metodologias mais abrangentes para o direcionamento das políticas públicas de investimento
8	Análise multicritério para o desenvolvimento sustentável dos projetos de infraestrutura	Estabelecimento de metodologias multicritérios para o desenvolvimento das políticas públicas de investimento em infraestrutura de transporte, de modo a promover o melhor uso dos recursos investidos
9	Os desafios impostos pela crescente necessidade de se considerar questões sociais, ambientais e econômicas no desenvolvimento da infraestrutura em locais menos desenvolvidos	Desafios para a atração de parceiros para o investimento em infraestrutura em países menos desenvolvidos (a exemplo de países africanos), dado a crescente tendência de inclusão de questões ambientais e sociais nos projetos
10	Gastos públicos em infraestrutura de transporte e os impactos no desenvolvimento da urbanização	Identificação de padrões do desenvolvimento da urbanização em decorrência das políticas de investimento em infraestrutura de transporte

Fonte: elaborado pelo autor.

Em resumo, aspectos do desenvolvimento socioeconômico são observados a partir do início da década de 1990 na literatura acadêmica, sendo esta relação constantemente abordada por autores ao longo do período analisado. Por outro lado, trabalhos focados nos impactos ambientais do desenvolvimento da infraestrutura de transporte surgem com maior intensidade a partir de 2005. Como visto, ambas as categorias de trabalhos ganharam importância nos últimos anos, tendo um aumento significativo no número de artigos publicados anualmente. Além disso, cabe acrescentar que há uma tendência recente de se analisar de forma conjunta as duas áreas nos estudos sobre o desenvolvimento desse tipo de infraestrutura. Essa tendência de união entre essas duas vertentes é observada como característica dos agrupamentos 3, 7 e 8, que têm como ponto focal de análise a elaboração de metodologias multicritério para a avaliação das políticas públicas de investimento em infraestrutura de transporte. Tais grupos apontam que trabalhos futuros devem focar no desenvolvimento de metodologias e métricas que incorporem, além dos aspectos econômicos, questões sobre o desenvolvimento social e o impacto ambiental decorrentes dos investimentos em infraestrutura de transporte.

Como contribuições práticas, tais agrupamentos direcionam a elaboração das políticas públicas para o investimento em infraestrutura para um caminho além do político e do econômico. Visando a promoção de uma melhor utilização dos recursos públicos (importante em épocas de

escassez), esse novo direcionamento para a seleção de projetos de investimento pode contribuir para a redução da desigualdade de acessibilidade existente entre as regiões do Brasil, além de elucidar questões sobre os impactos ambientais atrelados a matriz de transporte.

Com enfoque específico no desenvolvimento socioeconômico, os *clusters* 1 e 2 são formados por trabalhos que ressaltam impactos positivos do desenvolvimento da infraestrutura de transporte. Tais trabalhos corroboram com a ideia de que o desenvolvimento socioeconômico regional pode ser impulsionado pela maior disponibilidade de infraestruturas de transporte. Essa maior disponibilidade de infraestrutura, dentre outras formas, pode ser obtida a partir da utilização de recursos oriundos da implementação de políticas de precificação das emissões de CO₂, argumentação esta observada no *cluster* 6. Esses novos investimentos, conforme características do grupo número 4, devem ser pautados pelas metas de redução das emissões de CO₂, havendo uma tendência de priorização de investimentos em modais alternativos ao rodoviário.

Ainda no tocante às análises apresentadas, a literatura é densa em trabalhos que retratam o desenvolvimento urbano, principalmente em localidades com desenvolvimento recente. Tais questões são abordadas principalmente nos *clusters* 5, 7, 9 e 10, os quais destacam os aspectos sociais e ambientais que são demandados para as novas políticas públicas de desenvolvimento do setor de transporte.

Dadas as constatações apresentadas, essa análise da literatura acadêmica aponta que, dentre as temáticas emergentes, a que trata das relações entre infraestrutura de transporte e a elaboração de políticas públicas baseadas em aspectos mais abrangentes de análise é objeto de pesquisa relevante. Por fim, ainda relacionado ao grupo de artigos pertencentes à rede analisada na Figura 3, cabe acrescentar que apenas dois fizeram o uso da Análise Envoltória de Dados como aparato metodológico: Zhou, Chung e Zhang (2013) e Rogers e Weber (2011). Ambos os artigos pertencem ao *Cluster* 1 e serão detalhados na seção 2.2, que trata especificamente sobre trabalhos que fizeram o uso dessa técnica de análise.

2.2. Análise Envoltória de Dados: aplicações em temas correlatos

A Análise Envoltória de Dados (DEA) é uma técnica de análise de eficiência relativa, utilizada para se obter a performance das Unidades Tomadoras de Decisão (DMUs) e compará-las entre si. Essas unidades podem representar firmas, países, pessoas, projetos, dentre outras, sendo a DEA utilizada para avaliar o quão eficiente elas fazem o uso de seus recursos (*inputs*) para a geração de um conjunto de resultados (*outputs*).

Trata-se de uma técnica de análise não paramétrica baseada em programação linear, que utiliza múltiplas variáveis de entrada e de saída (Ray, 2004). As informações das DMUs são

utilizadas para a obtenção de uma fronteira composta pelas unidades tidas como eficientes, as quais servem como comparativo para as demais (não eficientes). A DEA permite analisar a contribuição relativa de cada *input* e *output* para o grau de eficiência dos casos analisados e trazer considerações sobre potenciais melhorias (Ray, 2004), apoiando decisões gerenciais de seleção de fornecedores e seleção de investimentos, por exemplo.

Conforme apresentado por Ray (2004) e Cooper, Seiford e Tone (2007), a DEA foi introduzida como técnica de análise em Charnes, Cooper e Rhodes (1978). O modelo apresentado foi denominado de CCR e é caracterizado por considerar retornos constantes de escala. Banker, Charnes e Cooper (1984) aprimoraram esse modelo inicial ao considerarem condições tecnológicas de retornos variáveis de escala - modelo BCC (Cooper et al., 2007). A partir desses, variações foram sendo desenvolvidas e incorporadas na literatura acadêmica, tais como os modelos aditivos, baseados em folga, dentre outros (Cooper et al., 2007).

A DEA é uma ferramenta que pode ser utilizada em diferentes contextos e para diferentes propósitos. Dentre as vantagens de aplicação dessa técnica de análise, Cooper, Seiford e Tone (2007) destacam: (i) a possibilidade de serem identificadas as fontes (e quantidades) das ineficiências dos *inputs* e *outputs* para cada unidade; e (ii) a possibilidade de serem identificadas as DMUs localizadas na fronteira de eficiência e realizar comparativos entre os casos analisados. Ramanathan (2003) afirma que a Análise Envoltória de Dados é caracterizada pela objetividade da análise, pelo fato de trazer as medidas de eficiência baseadas em dados numéricos - informações não subjetivas. Além disso, outro ponto positivo para a utilização dessa técnica é atrelada à possibilidade de serem incorporados múltiplos *inputs* e múltiplos *outputs* (Ramanathan, 2003). Por outro lado, uma relevante limitação do seu uso é associada ao fato de essa técnica ser não paramétrica, dificultando a realização de testes estatísticos robustos e de generalizações dos resultados (Ramanathan, 2003).

Como supracitado, as aplicações da Análise Envoltória de Dados percorrem diversas áreas do conhecimento, incluindo as áreas de transporte, infraestrutura, projetos e investimentos. Em um tema correlato ao objeto em estudo desta tese, Chen, Shen, Zhang, Li e Ren (2019) utilizam a DEA como metodologia para avaliação da eficiência de utilização de infraestruturas urbanas construídas em localidades chinesas. Diversas variáveis de entrada foram consideradas no modelo proposto, as quais são relacionadas às rodovias, ao consumo de água e de energia, comunicação, educação, saúde e ao meio ambiente. Como *outputs* foram considerados parâmetros diversos de dimensão econômica, ambiental e social.

Os autores concluem que é baixa a eficiência de utilização das infraestruturas urbanas da China, sendo essa subutilização significativa em todo território do país. Dentre as principais razões estão: baixo grau de manutenção, erros no planejamento da infraestrutura e a prática generalizada

de se construir a infraestrutura urbana antes da sua potencial utilização (decorrente do processo de urbanização adotado no país) (Chen et al., 2019).

Também com um estudo dirigido para províncias chinesas, Cheng e Lu (2017) analisam a eficiência dos investimentos em infraestrutura urbana. Os autores mostram que a DEA é uma ferramenta efetiva para avaliar a evolução da eficiência desse tipo de gasto. O estudo aponta para uma melhoria na eficiência dos investimentos em infraestrutura na China entre os anos de 2004 e 2014. Apesar disso, o desequilíbrio observado entre as regiões em termos de produtividade dos investimentos deve direcionar os formuladores de políticas públicas de forma que as decisões sejam tomadas levando em consideração particularidades econômicas locais. Os autores afirmam que é baixo o uso da DEA para a análise de eficiência dos investimentos em infraestrutura, apesar de a técnica ser perfeitamente aplicável para essa finalidade (Cheng e Lu, 2017).

Caulfield, Bailey e Mullarkey (2013) utilizam a Análise Envolvória de Dados para comparar diferentes opções de investimento em transporte público na cidade de Dublin (Irlanda). Foram considerados seis projetos em potencial. Os autores reafirmam a adequação dessa metodologia para a avaliação de alternativas de investimento público. O resultado da análise mostra que, na inclusão dos custos totais (construção, operação e manutenção) do projeto, a opção que trata da implementação de um sistema BRT (*Bus Rapid Transit*) é a mais eficiente dentre as demais consideradas.

Kyriacou, Muinelo-Gallo e Roca-Sagalés (2019) utilizam a DEA para analisar a eficiência dos investimentos em infraestrutura de transporte em 34 países entre os anos de 1996 e 2010. Os autores mostram que os países do centro europeu, a Nova Zelândia e o Japão são os mais eficientes. Rússia, Turquia e México ocupam o outro extremo do *ranking*.

A eficiência dos investimentos em infraestrutura de transporte é o objeto de análise de Li, Yang, Zhang e Cao (2016). Os autores analisam o impacto dos investimentos em infraestrutura na eficiência dos sistemas de transporte regionais da China. Com aplicação para a Índia, Saxena, Chotia e Rao (2018) avaliam a eficiência dos investimentos públicos em infraestrutura (transporte, saúde, telecomunicação, dentre outros setores) em 28 Estados.

No caso específico do transporte aeroviário, uma análise da eficiência relativa de 85 aeroportos regionais europeus é apresentada em Adler, Ülkü e Yazhemsky (2013). Os autores analisaram a eficiência dos aeroportos a partir de um modelo de fronteira ajustada⁷, com retornos variáveis de escala. No modelo, custo de mão-de-obra, outros custos operacionais e o comprimento da pista são as variáveis de entrada. Como parâmetros de saída têm-se: o número de passageiros, o tráfego aéreo comercial, o total de toneladas de carga movimentada e o total de receita não

⁷ Em inglês: “*Bound Adjusted Measure*”.

relacionada às movimentações aéreas. Os autores consideraram dados relativos ao período entre 2002 e 2009. Os resultados indicaram que os aeroportos analisados poderiam, em média, reduzir o custo operacional total em 46% e aumentar as receitas não relacionadas às operações aéreas em 27%. A baixa taxa de utilização da infraestrutura disponível é a razão principal da baixa eficiência desses aeroportos. Além disso, os aumentos dos custos de gestão e dos custos operacionais verificados durante o período analisado não foram acompanhados pela taxa de utilização dos aeroportos, o que contribui para a tal perda de eficiência.

Yoshida e Fujimoto (2004) utilizam a DEA para efetuar um comparativo entre aeroportos japoneses, considerando o comprimento total das pistas, o tamanho do terminal, número total de funcionários e o custo de acesso ao aeroporto como variáveis de entrada. Objeto de análise similar é verificado em Amoroso, Castelluccio e Maritano (2015), que avaliam a eficiência de um conjunto de pequenos aeroportos e de heliportos na Itália, fazendo uma comparação entre os dois tipos de infraestrutura. Esses autores fizeram o uso de um modelo com retornos variáveis de escala (modelo BCC), considerando parâmetros como área, total de passageiros e população residente nas proximidades. O estudo sugere que os aeroportos tidos como ineficientes devem ser transformados em heliportos, argumentando que o uso de helicópteros para viagens a locais de baixa acessibilidade é uma alternativa de transporte interessante (Amoroso et al., 2015).

Carlucci, Cirà e Coccorese (2018) analisam, para o período entre 2006 e 2016, a eficiência de aeroportos regionais italianos. Os autores mostram que o tamanho do aeroporto, a presença de empresas *low-cost* e o tráfego total de cargas são variáveis com impactos mais significativos na eficiência dos aeroportos italianos. É argumentado que a privatização e a desregulamentação podem aumentar a eficiência e a sustentabilidade dessas infraestruturas.

Barros e Peypoch (2009) avaliam o desempenho operacional de companhias aéreas da Europa. O estudo considerou dados de 2000 a 2005, sendo as variáveis receita operacional por passageiro por quilômetro e EBITDA as principais saídas do modelo. O número de funcionários, o número de aeronaves e o custo operacional são os *inputs*. Os autores destacam que há uma tendência de aumento na eficiência das empresas para o período analisado, além de ressaltarem a contribuição teórica do trabalho via aplicação da Análise Envoltória de Dados.

Doomernik (2015), em aplicação similar, analisa o desempenho de sistemas ferroviários de alta velocidade. O autor faz o comparativo entre quatro sistemas de transporte da Ásia e quatro da Europa, entre os anos de 2007 e 2012. O estudo considerou variáveis como a capacidade da frota e a extensão da rede ferroviária (comprimento total) como *inputs* do modelo. Os *outputs* foram: tempo total de viagem e número de passageiros. Os resultados mostram que, para o período analisado, as companhias asiáticas apresentaram um aumento médio de 26,9% na produtividade,

ao passo que não foram observados incrementos desse indicador nas companhias do continente europeu. Os resultados também evidenciam a maior eficiência operacional das companhias asiáticas em relação às europeias.

O sistema de transporte ferroviário é analisado por Eboli, Fu e Mazzulla (2016). Os autores trazem uma abordagem que denominaram de DEA-SERVQUAL, a qual utiliza, como dados para o modelo de análise de eficiência, informações obtidas via aplicação da escala SERVQUAL - instrumento de mensuração da qualidade percebida pelos usuários. A contribuição dos autores é relacionada à aplicação das duas metodologias de forma conjunta para a realização do *benchmark*.

Como aplicação para a realidade brasileira, Marchetti e Wanke (2017) analisam a performance de operadores ferroviários, considerando dados de 2010 a 2014. O número de vagões em circulação e o número de funcionários são as variáveis de *input* do modelo DEA, ao passo que o volume total movimentado (em TKU) é o principal *output*. Os autores mostram que as operações com infraestrutura compartilhada não têm, necessariamente, níveis de eficiência maiores do que as operações caracterizadas pelo monopólio da via.

A análise de eficiência de empresas ferroviárias é também verificada em: (i) Merkert, Smith e Nash (2010), que tem como objeto de estudo 43 instituições da Suécia, Alemanha e Inglaterra; e (ii) Vasco Correa (2012), que faz um comparativo da eficiência de empresas de transporte ferroviário e rodoviário na Colômbia.

Fancello, Uccheddu e Fadda (2014) analisam a performance de diferentes sistemas de transporte rodoviário urbano. Com dados de oito localidades da Itália, os autores reforçam a possibilidade de uso da DEA como ferramenta de auxílio aos formuladores de políticas públicas. Dados de extensão do sistema de transporte, número total de ônibus disponíveis e total de passageiros são exemplos dos indicadores utilizados no estudo.

Análise similar é feita em Hajduk (2018), com aplicação para cidades polonesas. O autor utilizou o gasto público com transporte como variável de entrada no modelo DEA, ao passo que os *output* estão relacionados à extensão das rodovias pavimentadas, das linhas de ônibus públicos e das ciclovias. O resultado mostrou que, em termos médios, a eficiência do transporte urbano é igual a 51,1%, sendo destacado no texto que um número significativo de localidades não utiliza recursos de maneira adequada.

Álvarez e Blázquez (2014), por sua vez, analisam a influência dos investimentos públicos em rodovias na produtividade dos agentes privados. Os autores fazem o uso de um modelo DEA para obter a produtividade de fatores privados (mão-de-obra e capital), resultado utilizado na segunda parte do trabalho, que faz o uso de técnicas econométricas (dados em painel) para a análise

da influência dos investimentos públicos. Os autores mostram que esse tipo de investimento contribui para o aumento da produtividade dos agentes privados na Espanha. Outros trabalhos relacionados ao modal de transporte rodoviário utilizaram a DEA para avaliação da eficiência das manutenções em pontes (Ozbek, de la Garza e Triantis, 2010) e da eficiência de rodovias em relação à segurança (Shah e Ahmad, 2019), bem como para modelar a receita das operações de transporte do setor, as emissões de CO₂ e as mortes no trânsito, resultado utilizado em cálculos relacionados aos *tradeoffs* entre essas três dimensões de análise (Rogers e Weber, 2011).

Pina e Torres (2001) fazem um comparativo da eficiência do oferecimento do serviço de transporte urbano, sob a gestão de empresas públicas e de empresas privadas. A análise foi aplicada para diferentes localidades da Espanha e mostra grau maior de eficiência para as localidades em que o transporte público é gerido por agentes públicos. Em temática similar, Swami e Parida (2015) utilizam a Análise Envolvória de Dados para obterem medidas de eficiência e de performance das estações de metrô do transporte público em Deli (Índia).

Infraestrutura portuária é o objeto de estudo de Díaz-Hernández, Martínez-Budría e Salazar-González (2014). O trabalho analisa a eficiência de 27 agentes de administração portuária da Espanha entre os anos de 2000 e de 2007. Castellano et al. (2019), por sua vez, analisam a eficiência portuária sob a ótica de investimentos em tecnologia de informação e comunicação. Os autores evidenciam que a adoção de sistemas de comunicação mais modernos aumentou a eficiência de portos italianos, incorporando à discussão dos resultados questões relacionadas às vantagens da realização de investimentos dessa natureza. É apresentada uma matriz que relaciona a eficiência e o grau de investimento nos portos, classificando os mesmos em termos de recomendações de ações para aumento de performance.

Cullinane, Wang, Song e Ji (2006) analisam o setor portuário, medindo a eficiência de terminais de contêineres. Os autores demonstram que as localidades com maior nível de eficiência estão associadas à maior escala operacional e à maior participação dos agentes privados. A movimentação total de contêineres foi a variável utilizada como *output* do modelo. Quanto aos *inputs*, foram utilizados: área do terminal, tamanho do berço de atracação, número de transportadores de contêineres, número de equipamentos de carregamento dos navios (pórticos) e número de equipamentos para a movimentação de contêineres nos pátios do porto.

Terminais de contêineres no Brasil são analisados por Guimarães, Leal Junior e Garcia (2014), sob a ótica da performance ambiental. Os resultados mostram que quatro terminais portuários estão localizados na fronteira de eficiência. Como práticas gerenciais decorrentes dos resultados, os autores afirmam que a melhoria na eficiência ambiental dos terminais deve ser obtida através: (i) do uso mais acentuado de energia oriunda de fontes renováveis; (ii) de investimentos

para melhoria da eficiência dos equipamentos; (iii) do reuso da água; e (iv) do treinamento de funcionários para a realização de uma operação portuária ambientalmente mais eficiente.

Wanke e Barros (2015) fazem uma análise, via DEA, focada na performance de portos brasileiros, mostrando que a eficiência é maior nos casos em que as operações portuárias ocorrem por meio de parceria público-privadas. A medição da performance de portos marítimos também é objeto de análise de Jiang e Li (2009), Bray, Caggiani e Ottomanelli (2015), Kutin, Nguyen e Vallée (2017) e Simões e Marques (2010).

Hilmola, Lorentz e Rhoades (2015) avaliam a eficiência de 14 diferentes opções de transporte de carga entre as localidades de Helsinki (Finlândia) e Tallinn (Estônia). Tempo de entrega, emissão de gás carbônico, consumo de diesel e custo total são as variáveis de *input* consideradas no modelo DEA, ao passo que a quantidade transportada é o *output*. Os resultados encontrados mostram que, em se tratando de um cenário futuro em que exista maior pressão pela redução das emissões de CO₂ e que se tenha um aumento no preço dos combustíveis utilizados no transporte de cargas, o aumento da utilização de contêiner torna a operação de transporte da rota analisada mais eficiente, apesar de trazer desafios relacionados ao maior tempo de entrega. Além disso, os autores apontam a construção de um túnel ferroviário entre as duas localidades (projeto discutido como alternativa futura) como tendo eficiência superior às demais alternativas de transporte consideradas na análise.

Melo et al. (2018) analisam a eficiência dos corredores de transporte de soja no Brasil e nos Estados Unidos utilizando a Análise Envolvória de Dados. Os resultados mostram que, para o caso brasileiro, as rotas para o transporte de soja mais eficientes estão localizadas na região sul do país. É evidenciado que os corredores mais eficientes estão associados a rotas rodoviárias de distâncias curtas e ao uso de ferrovias e de hidrovias para o transporte de longas distâncias.

Aplicações diversas da DEA também são verificadas em análises que retratam a eficiência ambiental de países, empresas, dentre outras unidades. Jalali Sepehr, Haeri e Ghousi (2019), por exemplo, utilizam a técnica como ferramenta para analisar a eficiência energética de 132 países entre os anos de 2007 e 2014. Jia e Liu (2012) dissertam sobre a eficiência energética e ambiental da economia chinesa – análise com dados entre 2004 e 2010, provenientes de 30 províncias.

Zhou, Chung e Zhang (2013) fazem uma análise de eficiência das emissões de CO₂ específica para o setor de transporte, comparando diferentes localidades chinesas entre 2003 e 2009. Os autores mostram que a performance ambiental tem aumentado de forma lenta a partir de 2006, destacando um resultado mais positivo para a China oriental. De forma similar, com enfoque no território chinês, Li et al. (2013) analisam a eficiência ambiental de diferentes regiões do país, ao passo que Tian, Tang, Che e Wu (2020) e Xie, Zhou e Chen (2019) tratam o assunto da

sustentabilidade nas operações de transporte – ambos também fazendo o uso da Análise Envoltória de Dados.

Su e Rogers (2012) usam a DEA para comparar a eficiência econômica e ambiental do sistema de transporte de países da OCDE. Dash e Balachandra (2016), para localidades da Índia, elaboram um modelo de eficiência para comparar a sustentabilidade urbana de um conjunto de municípios. Os autores trabalharam com quatro tipos de modelos, segregando a eficiência energética do sistema residencial e dos sistemas de mobilidade. Os resultados dos modelos de eficiência focados na mobilidade da população local mostram que os municípios são quase sempre ineficientes (baixo grau de sustentabilidade).

Como visto, a utilização da DEA como técnica de análise de eficiência de infraestruturas de transporte passa pela análise de infraestruturas portuárias, aeroportuárias, ferroviárias e rodoviárias. Parte dos trabalhos utilizam esse mecanismo analítico combinado com outros arcabouços metodológicos (modelos econométricos, por exemplo). Não foram listados, porém, trabalhos que combinam o uso da DEA com modelos de minimização dos custos de transporte, combinação de aparatos metodológicos que será utilizada no desenvolvimento desta tese.

Consideração relevante diz respeito à tipologia das variáveis utilizadas nos artigos apresentados. Pelo levantamento sumarizado na Tabela 9, as métricas (*inputs* e *outputs*) utilizadas com maior frequência nos modelos de Análise Envoltória de Dados tratam da extensão ocupada pela infraestrutura analisada (17,5% do total de variáveis identificadas nos trabalhos) e do total de movimentação de carga (16,6%). Além disso, mão-de-obra, consumo de energia, emissão de gases poluentes e total de investimento realizado também são classes de variáveis frequentes. Juntos, parâmetros com essas cinco classificações somam mais 50% do número total de métricas utilizadas nos trabalhos levantados.

Nos artigos relacionados à análise de investimentos em infraestruturas de transporte, o valor total do investimento realizado e a área (ou extensão) ocupada pela infraestrutura se destacam como as principais variáveis. O número de funcionários e o consumo de determinados insumos (combustível e energia elétrica, por exemplo) são métricas recorrentes na análise da performance de infraestruturas. Para ambos os casos, o total de carga e de passageiros movimentados, índices de qualidade, a receita total gerada no setor e as emissões de gases do efeito estufa estão entre os principais tipos de resultados. Especificamente para os trabalhos que estudam a questão ambiental, a emissão de gases poluentes e geração de resíduos são os principais *outputs* do modelo de eficiência, sendo o consumo de energia e de combustível listados como principais *inputs*.

Tabela 9. Tipologia das variáveis utilizadas nos artigos (DEA).

Classificação	Frequência relativa (%)	Frequência acumulada (%)	Principais variáveis encontradas nos artigos
Extensão/quantidade de infraestruturas ou ativos	17,5%	17,5%	Extensão das vias, número de berços de atracação e total de veículos utilizados
Movimentação total (carga/passageiro)	16,6%	34,1%	Movimentação de cargas e de passageiros em geral
Mão-de-obra	7,0%	41,1%	Número de funcionários e total de empregos
Consumo de energia	5,0%	46,0%	Consumo de energia (renovável e não renovável)
Emissão de gases poluentes	5,0%	51,0%	Emissão de CO ₂ e emissão de gases poluentes
Investimentos realizados	5,0%	56,0%	Capital investido, investimento público em infraestrutura e estoque de capital
Área (armazém, aeroporto, porto, estacionamento etc.)	4,0%	59,9%	Área do aeroporto, área de armazéns e área destinada à infraestruturas de transporte
Custo	3,3%	63,2%	Custo operacional, custo por passageiro e custo total
Produto Interno Bruto (PIB)	3,3%	66,6%	PIB operacional, PIB por passageiro e PIB total
Consumo de combustível	3,0%	69,5%	Consumo de combustível
Financeiro	3,0%	72,5%	Receita líquida total, receita do transporte rodoviário, dentre outros tipos de receitas
Tempo	3,0%	75,5%	Tempo de entrega, tempo de viagem e tempo para carregamento
Outras classificações	24,5%	100,0%	Acidentes, custo de manutenção, poluição, educação, população, qualidade etc.

Fonte: elaborado pelo autor.

A sumarização do objetivo geral e das métricas (*inputs* e *outputs*) utilizadas nas aplicações de Análise de Envoltória de Dados dos trabalhos discutidos são apresentados no APÊNDICE B. Tal identificação das variáveis visou subsidiar a escolha dos parâmetros que serão utilizados nos modelos de análise de eficiência desenvolvidos nesta tese.

3. MATERIAL E MÉTODOS DE ANÁLISE

Esta seção detalhará o procedimento metodológico utilizado para a realização da análise de eficiência relativa dos projetos de investimento em infraestrutura de transporte multimodal para o setor de transporte de soja no Brasil. O atingimento dos objetivos propostos ocorre a partir do uso combinado de dois métodos de análise, sendo esse capítulo dividido em duas partes para melhor apresentação dos mesmos.

A primeira parte (Etapa 1) aborda a metodologia utilizada para a identificação dos impactos em custos de transporte, fluxos de carga, área de influência, dentre outros indicadores, dos projetos de infraestrutura analisados. Foi utilizado como método para mensuração desses eventuais impactos um modelo de minimização de custos de transporte de soja no território brasileiro. Parte dos resultados obtidos com essa análise são utilizados na Etapa 2. A segunda parte do capítulo trata exclusivamente da estrutura matemática e definição dos dados do modelo de Análise Envoltória de Dados utilizado para a medir a eficiência relativa dos projetos e compará-los entre si.

3.1. Etapa 1: Identificação dos impactos potenciais dos projetos de investimento em infraestrutura de transporte

Em linhas gerais, a Etapa 1 do trabalho visa identificar, dentre outros indicadores, os fluxos, custos, áreas de influência, nível de perdas de produto e nível de emissão de CO₂ nas operações de transporte, a partir da utilização das infraestruturas multimodais do transporte de cargas projetadas. A partir da estruturação e uso de um modelo de programação linear para a minimização dos custos de transporte (*network equilibrium model*), serão estimados os impactos dos projetos de infraestrutura sob a ótica de um planejamento estratégico nacional das movimentações brasileiras de soja. Essa técnica de análise foi utilizada em trabalhos que tratam, por exemplo, do transporte de carga e suas relações com investimentos em infraestrutura (Branco, 2007; Silva Neto, 2018), impactos ambientais (Pinheiro, 2012; Ávila, 2016) e perdas (Pera, 2017).

É pertinente acrescentar que com essa abordagem, via modelagem matemática de otimização, leva-se em consideração a premissa de que todo o fluxo de transporte de soja é definido a partir de um processo de minimização de custo a nível Brasil – custo total da cadeia. Cabe ressaltar que existem agentes diversos operando nesse mercado brasileiro, os quais apresentam estratégias distintas na contratação e definição dos seus fluxos logísticos.

Na sequência são apresentados o modelo matemático de otimização para minimização dos custos de transporte, os dados utilizados e a caracterização dos projetos estudados por esse trabalho.

3.1.1. Modelo matemático para otimização dos fluxos de transporte de soja no Brasil

Como supracitado, o modelo de programação linear que será apresentado a seguir visa obter a configuração ótima de fluxos do transporte de soja no Brasil, com mínimo custo possível. A partir dessa estrutura matemática, cenários com a existência das infraestruturas projetadas analisam o impacto potencial destas na configuração de fluxos de transporte da oleaginosa no país.

Foram considerados sete tipos de operações de transporte para fins de modelagem, sendo:

- i. Transporte rodoviário de carga da origem (município produtor) aos portos exportadores;
- ii. Transporte rodoviário de carga da origem (município produtor) aos terminais de transbordo hidroviários e ferroviários atualmente existentes e que são utilizados nas movimentações de soja no Brasil;
- iii. Transporte rodoviário de carga da origem (município produtor) às indústrias moageiras de soja (mercado interno, caracterizado pelas fábricas de produção de óleo e de farelo de soja);
- iv. Transporte rodoviário de carga da origem (município produtor) aos terminais de transbordo pertencentes aos projetos de infraestrutura analisados;
- v. Transporte ferroviário e transporte hidroviário de carga dos terminais de transbordo atualmente existentes aos portos;
- vi. Transporte marítimo de soja dos portos brasileiros até o destino final no mercado internacional (países que importam soja do Brasil); e
- vii. Transporte ferroviário e transporte hidroviário de carga dos terminais de transbordo dos projetos considerados na análise para os portos.

A Figura 4 mostra a representação gráfica do sistema de transporte considerado no modelo de minimização de custos de transporte.

Figura 4. Sistema de transporte considerado no modelo de minimização dos custos de transporte.
 Fonte: elaborado pelo autor.

Os fluxos de carga com destino às indústrias do mercado interno são todos realizados via transporte rodoviário. Tal premissa é condizente com a realidade do transporte soja no Brasil, em que as operações ferroviárias e hidroviárias são utilizadas nos fluxos de carga para exportação.

Os índices do modelo matemático de otimização estão definidos conforme apresentado a seguir.

- i : pontos de origem de carga (municípios brasileiros produtores de soja);
- j : terminais de transbordo multimodal (modais ferroviário e hidroviário) atualmente existentes;
- k : portos exportadores;
- m : mercado externo (destino das exportações de soja);
- q : mercado interno (indústrias moageiras de soja no Brasil); e
- inv : terminais de transbordo multimodal dos projetos de investimento em infraestrutura de transporte.

O modelo ainda apresenta dois conjuntos de subíndices, os quais visam restringir as possibilidades de fluxos das movimentações multimodais, de acordo com as características de transporte atrelados às infraestruturas. Tais informações, para as infraestruturas existentes, foram

obtidas nas estatísticas oficiais do transporte ferroviário (ANTT, 2019) e do transporte hidroviário (ANTAQ, 2019). Os subíndices são definidos como:

- $tporto(jk)$: fluxos de transporte possíveis entre os terminais de transbordo multimodal existentes e os portos exportadores; e
- $invtpor(invtk)$: fluxos de transporte possíveis entre os terminais de transbordo multimodal dos projetos e os portos exportadores.

Os parâmetros do modelo matemático são definidos da seguinte forma:

- A_i : produção de soja nos municípios i , em toneladas;
- B_j : capacidade de transporte dos terminais de transbordo multimodal existentes j , em toneladas;
- C_k : capacidade de exportação dos portos k , em toneladas;
- E_m : demanda de carga do mercado externo m , em toneladas;
- MI_q : demanda de carga do mercado interno q , em toneladas;
- $CAPINV_{invtk}$: capacidade de transporte dos terminais de transbordo multimodal dos projetos de investimento em infraestrutura de transporte $invtk$, em toneladas;
- F_{ij} : frete rodoviário entre as cidades produtoras i e os terminais de transbordo multimodais j , em Reais por tonelada;
- G_{ik} : frete rodoviário entre as cidades produtoras i e os portos k , em Reais por tonelada;
- S_{iq} : frete rodoviário entre as cidades produtoras i e o mercado interno q , em Reais por tonelada;
- O_{jk} : frete multimodal entre os terminais de transbordo existentes j e os portos k , em Reais por tonelada;
- N_{km} : frete marítimo entre os portos k e o mercado externo m , em Reais por tonelada;
- $FRODOINV_{iinvtk}$: frete rodoviário entre as cidades produtoras i e os terminais intermodais dos projetos de investimento $invtk$, em Reais por tonelada;
- $FMULTINV_{iinvtk}$: frete multimodal entre os terminais intermodais dos projetos de investimento $invtk$ e os portos k , em Reais por tonelada;
- $DISTF_{ij}$: distância rodoviária entre os pontos de origem de carga i e os terminais de transbordo multimodal j , em quilômetros;

- $DISTG_{ik}$: distância rodoviária entre os pontos de origem de carga i e os terminais portuários k , em quilômetros;
- $DISTS_{iq}$: distância rodoviária entre os pontos de origem de carga i e os destinos do mercado interno q , em quilômetros;
- $DISTFRODOINV_{iinv}$: distância rodoviária entre os pontos de origem de carga i e os terminais de transbordo projetados inv , em quilômetros;
- $EMISMULTATUA_{jk}$: coeficiente de emissão de CO_2 do transporte multimodal nas infraestruturas existentes entre os terminais de transbordo j e os terminais portuários k , em quilogramas do gás por tonelada de carga transportada;
- $EMISMULTINV_{invtk}$: coeficiente de emissão de CO_2 do transporte multimodal nas infraestruturas projetadas entre os terminais de transbordo inv e os terminais portuários k , em quilogramas do gás por tonelada de carga transportada;
- $EMISSAORODO$: coeficiente de emissão de CO_2 do transporte rodoviário, em quilogramas do gás por quilômetro da rota e tonelada de carga transportada;
- $PERDAMULTATUA_{jk}$: coeficiente de perdas físicas de soja na operação de transporte multimodal nas infraestruturas existentes entre os terminais de transbordo j e os terminais portuários k , em porcentagem;
- $PERDAMULTINV_{invtk}$: coeficiente de perdas físicas de soja na operação de transporte multimodal nas infraestruturas projetadas entre os terminais de transbordo inv e os terminais portuários k , em porcentagem;
- $CPTRD$: coeficiente de perdas físicas de soja na operação de transporte rodoviário direto para os fluxos de exportação, em porcentagem; e
- $CPTI$: coeficiente de perdas físicas de soja na operação de transporte rodoviário para abastecimento das indústrias moageiras (mercado interno), em porcentagem.

As variáveis de decisão do modelo matemático de otimização são:

- X_{ij} : quantidade de carga transportada entre as origens i e os terminais de transbordo multimodais j , em toneladas;
- Y_{ik} : quantidade de carga transportada entre as origens i e os portos k , em toneladas;
- T_{iq} : quantidade de carga transportada entre as origens i e os municípios com indústrias moageiras q , em toneladas;

- W_{jk} : quantidade de carga transportada entre os terminais de transbordo multimodais j e os portos k , em toneladas;
- U_{km} : quantidade de carga transportada entre os portos k e o destino final m , em toneladas;
- $QRODOINV_{iinv}$: quantidade de carga transportada entre as origens i e os terminais de transbordo projetados inv , em toneladas; e
- $QMULTINV_{invk}$: quantidade de carga transportada entre os terminais de transbordo projetados inv e os portos k , em toneladas.

Todas as variáveis são definidas como não negativas no modelo matemático, devendo assim assumir valores maiores ou iguais a zero.

A função objetivo do modelo matemático visa a minimização do custo total do transporte de soja no Brasil (R) e é apresentada na equação (1).

$$R = TRPONTA_{ij} + TRPORTO_{ik} + TMPORTO_{jk} + TDESTINO_{km} + TRMOAGEIRAS_{iq} + TRPORTO2_{iinv} + TMPORTO2_{invk} \quad (1)$$

Na função objetivo (R), $TRPONTA_{ij}$ diz respeito ao custo de transporte, em Reais, entre as origens de carga e os terminais de transbordo atualmente existentes (operação conhecida como transporte rodoviário de ponta), conforme definição apresentada na equação (2).

$$TRPONTA_{ij} = \sum_{ij} (F_{ij} \times X_{ij}) \quad (2)$$

$TRPORTO_{ik}$ representa a parcela de custo associada ao transporte rodoviário de carga entre os locais de origem e os portos (transporte rodoviário direto), em Reais. A definição dessa parcela é apresentada na equação (3).

$$TRPORTO_{ik} = \sum_{ik} (G_{ik} \times Y_{ik}) \quad (3)$$

$TMPORTO_{jk}$ é a parcela do custo total, em Reais, relativa aos fluxos de transporte multimodal (ferroviário e hidroviário) entre os terminais de transbordo atualmente existentes e os portos, conforme definido na equação (4).

$$TMPORTO_{jk} = \sum_{jk} (O_{jk} \times W_{jk}) \quad (4)$$

$TDESTINO_{km}$ é a parcela relativa ao transporte marítimo realizado entre os portos brasileiros e os portos do destino final da carga exportada (mercado externo). Essa parcela, portanto, representa os custos do transporte internacional de cargas, conforme definição apresentada na equação (5).

$$TDESTINO_{km} = \sum_{km} (N_{km} \times U_{km}) \quad (5)$$

Os fluxos de transporte das movimentações para o abastecimento da demanda do mercado interno são representados por $TRMOAGEIRAS_{iq}$. Essa parcela do custo total representa as movimentações, via modal rodoviário, que ocorrem entre os pontos de origem de carga e as indústrias moageiras de soja. A definição é apresentada na equação (6).

$$TRMOAGEIRAS_{iq} = \sum_{iq} (S_{iq} \times T_{iq}) \quad (6)$$

Os fluxos de transporte entre os locais de origem e os novos terminais de transbordo correspondentes aos projetos de investimentos em infraestrutura considerados são apresentados na equação (7). Nesta, $TRPONTA2_{iinv}$ é a parcela de custo, em Reais, associada ao transporte rodoviário entre essas duas localidades.

$$TRPONTA2_{iinv} = \sum_{iinv} (QRODOINV_{iinv} \times FRODOINV_{iinv}) \quad (7)$$

Também referente aos terminais de transbordo projetados, $TMPORTO2_{invtk}$ é a parcela de custo, em Reais, associada às movimentações multimodais (transporte ferroviário e transporte hidroviário) ocorridas entre esses locais e os portos, conforme definição apresentada na equação (8).

$$TMPORTO2_{invtk} = \sum_{invtk} (QMULTINV_{invtk} \times FMULTINV_{invtk}) \quad (8)$$

A função objetivo R está sujeita ao conjunto de restrições apresentado na sequência.

A expressão matemática (9) define a restrição de oferta de carga no modelo matemático. Tem-se que todo o volume de carga produzido nos locais de origem deve ser movimentado por pelo menos um dos fluxos de transporte rodoviário disponíveis, que correspondem ao transporte até os portos, terminais de transbordo existentes, terminais de transbordo projetados ou mercado interno. De forma ilustrativa, se determinado local i produz 100 toneladas de soja, todo esse volume deve ser movimentado para algum dos destinos supracitados. Tal restrição garante que a produção de cada origem seja transportada em sua totalidade.

$$\sum_k Y_{ik} + \sum_j X_{ij} + \sum_q T_{iq} + \sum_{inv} QRODOINV_{iinv} = A_i \quad \forall (i) \quad (9)$$

Em (10) tem-se como restrição incorporada ao modelo a demanda por carga no mercado interno brasileiro. A partir do uso dessa expressão matemática, toda a demanda de carga das indústrias moageiras da localidade q deve ser atendida pela soma dos fluxos rodoviários provenientes dos locais de origem i . Por exemplo, se a demanda de carga de uma indústria moageira q for igual a 100, exatamente esse volume de carga tem que chegar, vindo de um ou mais locais de produção i .

$$\sum_i T_{iq} = MI_q \quad \forall (q) \quad (10)$$

A mesma lógica é tida para com a demanda existente no mercado internacional m . Nesses fluxos de exportação, toda a demanda de carga deve ser atendida pela soma dos fluxos de transporte de carga originados nos terminais portuários k . Essa restrição é apresentada pela expressão matemática (11).

$$\sum_k U_{km} = E_m \quad \forall (m) \quad (11)$$

A expressão matemática (12) estabelece um limite de capacidade nas movimentações portuárias. A partir dela, tem-se que todo o volume de carga oriundo de i e j , somados, não devem ser maiores do que a capacidade operacional de movimentação estabelecida para cada porto (C_k). Destaca-se que não foi incluído nessa restrição o volume de carga oriundo de projetos de

infraestrutura (*inv**t*), de forma que o modelo indique qual deva ser o adicional de capacidade portuária necessário quando os projetos de investimento forem considerados disponíveis para as movimentações de soja.

$$\sum_i Y_{ik} + \sum_j W_{jk} \leq C_k \quad \forall(k) \quad (12)$$

Em (13) é estabelecido um limite operacional para as movimentações de grãos dos terminais intermodais atualmente existentes *j*. Ou seja, o somatório das movimentações rodoviárias originadas nas origens de carga *i* destinadas aos terminais intermodais não pode ser maior do que a capacidade de movimentação do terminal multimodal *j*.

$$\sum_i X_{ij} \leq B_j \quad \forall(j) \quad (13)$$

Também relacionada aos terminais de transbordo existentes, a equação (14) estabelece o balanceamento de carga no modelo matemático. A partir dessa expressão, fica definido que toda a quantidade de carga que adentrar ao terminal de transbordo *j* (independente do ponto de origem *i*) deve seguir para algum destino *k* (terminal portuário).

$$\sum_i X_{ij} - \sum_k W_{jk} = 0 \quad \forall(j) \quad (14)$$

A mesma ideia é sintetizada pela expressão (15), porém relacionada aos terminais portuários *k*. É definido que toda quantidade de carga que chega ao porto *k* vindo diretamente dos locais de origem *i*, dos terminais de transbordo atualmente existentes *j* e dos terminais de transbordo projetados *inv**t* deve ser igual à quantidade de carga que sai do porto *k* para algum destino internacional *m*. Tem-se, portanto, a obtenção de um equilíbrio de carga nos terminais portuários.

$$\sum_i Y_{ik} + \sum_j W_{jk} + \sum_{inv\,t} QMULTINV_{invtk} - \sum_m U_{km} = 0 \quad \forall(k) \quad (15)$$

Foi inserido no modelo ainda uma restrição (16) relacionada às movimentações de carga que adentram ao porto de Vitória, no Espírito Santo ($k = \text{Vitória (ES)}$). Com essa expressão fica condicionado que toda carga que for exportada por Vitória deve chegar a esse terminal portuário com a utilização do modal ferroviário, indicando que tal porto não recebe soja pelo modal rodoviário.

$$\sum_i Y_{ik} = 0 \quad \text{para } k = \text{Vitória} \quad (16)$$

No tocante aos terminais de transbordo projetados inv , tem-se que os mesmos devem respeitar o limite máximo de capacidade operacional estabelecido. A expressão (17) insere essa característica no modelo matemático de otimização.

$$\sum_i QRODOINV_{iinv} \leq CAPINV_{inv} \quad \forall(inv) \quad (17)$$

Também objetivando o balanceamento das cargas no sistema de transporte, equação (18) indica que toda carga que adentra aos terminais de transbordo projetados inv deve seguir para os portos k a eles conectados pelas respectivas infraestruturas de transporte ferroviário e hidroviário.

$$\sum_i QRODOINV_{iinv} - \sum_k QMULTINV_{invk} = 0 \quad \forall(inv) \quad (18)$$

Na estrutura de cálculo, CO_2 representa a emissão total de CO_2 no sistema de transporte estruturado, em toneladas equivalentes do gás. Nesse cálculo são contempladas as emissões totais do transporte rodoviário (ETR) e do transporte multimodal (ETM) de carga, conforme equação (19).

$$CO_2 = \frac{ETR + ETM}{1000} \quad (19)$$

Em ETR tem-se a soma das emissões de dióxido de carbono ocorridas no transporte rodoviário de cargas, em quilogramas de CO_2 - vide equação (20). Para cada um dos fluxos rodoviários inseridos no modelo, o cálculo da emissão de CO_2 se dá por meio da multiplicação do

coeficiente de emissão do gás atribuído a esse modal de transporte (*EMISSAORODO*, em quilogramas de CO₂ por quilômetro da rota e tonelada de carga transportada) pela distância rodoviária percorrida e pela quantidade de soja transportada.

$$\begin{aligned}
 ETR = & \left(\sum_{ij} DISTF_{ij} \times X_{ij} \right) \times EMISSAORODO \\
 & + \left(\sum_{ik} DISTG_{ik} \times Y_{ik} \right) \times EMISSAORODO \\
 & + \left(\sum_{iq} DISTS_{iq} \times T_{iq} \right) \times EMISSAORODO \\
 & + \left(\sum_{iinv} QRODOINV_{iinv} \times DISTRODOINV_{iinv} \right) \\
 & \times EMISSAORODO
 \end{aligned} \tag{20}$$

Por sua vez, o cálculo de *ETM* se dá pela soma das emissões de CO₂, em quilogramas do poluente, dos fluxos multimodais do transporte de carga (infraestruturas atuais e infraestruturas projetadas). O valor é obtido a partir da multiplicação entre a quantidade transportada e o coeficiente de emissão (expresso na unidade de quilogramas de CO₂ por tonelada de carga transportada), conforme equação (21).

$$\begin{aligned}
 ETM = & \left(\sum_{invtk} QMULTINV_{invtk} \times EMISMULTINV_{invtk} \right) \\
 & + \left(\sum_{jk} W_{jk} \times EMISMULTATUA_{jk} \right)
 \end{aligned} \tag{21}$$

O cálculo das perdas de grãos ao longo da cadeia logística é feita por *PERDA*, que sintetiza a soma dos volumes de carga perdida no: (i) transporte rodoviário direto até os portos (*PTRD*); (ii) transporte multimodal até os portos (*PTM*); e (iii) transporte rodoviário direto até as indústrias do mercado interno (*PTI*). A expressão (22) sintetiza essa fórmula de cálculo, cujo valor final é obtido em toneladas.

$$PERDA = PTRD + PTM + PTI \quad (22)$$

$PTRD$ é obtido a partir da multiplicação das quantidades transportadas até os portos via transporte rodoviário direto e o coeficiente de perdas $CPTRD$ (expresso em porcentagem), conforme demonstrado na expressão matemática (23).

$$PTRD = \sum_{ik} Y_{ik} \times CPTRD \quad (23)$$

PTM é obtido a partir da multiplicação das quantidades transportadas até os portos via operações multimodais do transporte de carga e o respectivo coeficiente de perdas das soluções multimodais do transporte de grãos (em percentual) – equação (24).

$$PTM = \sum_{jk} W_{jk} * PERDAMULTATUA_{jk} + \sum_{invtk} QMULTINV_{invtk} * PERDAMULTINV_{invtk} \quad (24)$$

PTI é obtido a partir da multiplicação das quantidades transportadas para as indústrias e o coeficiente de perdas $CPTI$ (em porcentagem), conforme define a equação (25).

$$PTI = \sum_{iq} T_{iq} \times CPTI \quad (25)$$

A expressão (26) tem o objetivo de apresentar o custo de transporte da soja brasileira por tonelada movimentada ($RMED$). O valor de $RMED$ é obtido a partir da divisão do custo total, em Reais, pela soma das quantidades produzidas pelos locais de origem (em toneladas).

$$RMED = \frac{R}{A_i} \quad \forall(i) \quad (26)$$

Em *CO2SOJA* tem-se o cálculo das emissões totais em toneladas de CO₂ por tonelada de soja transportada no sistema. O cálculo se dá pela divisão entre a emissão total $CO2$ e a quantidade total de soja produzida nas localidades i – vide equação (27).

$$CO2SOJA = \frac{CO2}{A_i} \quad \forall(i) \quad (27)$$

Por fim, na equação (28), *CUSTOBR* calcula o custo de transporte total da soja no Brasil, porém sem levar em consideração os custos do transporte marítimo. Nesse caso, são obtidas informações sobre o custo de transporte no território brasileiro, em Reais por tonelada de carga transportada.

$$CUSTOBR = \frac{\left(\begin{array}{l} TRPONTA_{ij} \\ + TRPORTO_{ik} \\ + TMPORTO_{jk} \\ + TRMOAGEIRAS_{iq} \\ + TRPORTO2_{invtk} \\ + TMPORTO2_{invtk} \end{array} \right)}{A_i} \quad (28)$$

3.1.2. Especificação dos dados utilizados no modelo de minimização de custos de transporte

3.1.2.1. Produção de soja no Brasil

Dados da produção de soja brasileira para o ano de 2017 foram obtidos junto à base de dados do IBGE (2017). Os dados do PAM - Produção Agrícola Municipal (IBGE, 2017) mostram que nesse ano 2.274 municípios brasileiros produziram um total de 114,6 milhões de toneladas de soja. Desse total, 26,6% foi produzido no Estado do Mato Grosso, 16,6% no Paraná e 16,4% no Rio Grande do Sul. A Tabela 10 apresenta dados da produção estadual de soja para o período considerado.

Tabela 10. Produção (total e relativa) de soja por Unidade da Federação (UF) no ano de 2017.

UF	Produção (toneladas)	Produção relativa (%)
MT	30.479.870	26,6%
PR	19.073.706	16,6%
RS	18.744.186	16,4%
GO	11.372.539	9,9%
MS	9.101.890	7,9%
MG	5.318.554	4,6%
BA	5.143.899	4,5%
SP	3.260.981	2,8%
SC	2.447.350	2,1%
TO	2.410.207	2,1%
Outros estados	7.245.986	6,3%

Fonte: IBGE (2017).

Em termos de distribuição espacial da produção, 123 municípios foram responsáveis por colher 50% de toda a safra nacional nesse ano. O Mato Grosso apresentou 119 municípios com alguma produção dessa oleaginosa, ao passo que Paraná e Rio Grande do Sul consolidaram suas produções em 380 e 424 municípios, respectivamente. Os 2.274 municípios produtores, considerados neste trabalho como locais de origem de carga, têm sua localização geográfica destacada na Figura 5.

Figura 5. Municípios produtores de soja no ano de 2017 (locais de origem de carga).

Fonte: elaborado pelo autor, baseado em dados do IBGE (2017).

3.1.2.2. Portos exportadores de soja no Brasil

Durante o ano de 2017, dados da SECEX (2019) indicam que 14 portos foram tidos como locais de embarque da soja brasileira para o mercado internacional. De forma conjunta, estes portos exportaram um total de 68,15 milhões de toneladas dessa oleaginosa.

O Porto de Santos (SP) se consolidou com o maior volume embarcado (16,64 milhões de toneladas de soja, aproximadamente 24% do total), seguido pelo Porto de Rio Grande (12,59 milhões de toneladas), conforme ilustra a Figura 6. Na sequência, os terminais portuários de Paranaguá e São Luís aparecem com aproximadamente 17 e 9% do volume total embarcado nos portos brasileiros.

Figura 6. Representatividade de cada porto nas exportações de soja no Brasil em 2017.
Fonte: elaborado pelo autor, baseado em dados da SECEX (2019).

A distribuição geográfica desses portos no território brasileiro é apresentada na Figura 7. Esses 14 portos foram considerados como locais de exportação da soja brasileira no modelo de minimização dos custos de transporte analisado por este trabalho.

Figura 7. Portos considerados na análise.

Fonte: elaborado pelo autor, baseado em dados da SECEX (2019).

3.1.2.3. Mercado interno da soja no Brasil

O consumo de soja no mercado interno brasileiro (indústrias moageira), para fins de análise, é equivalente à diferença entre o volume total de soja produzido no país em 2017 e o volume exportado nesse mesmo ano (aproximadamente 46,5 milhões de toneladas). Não foi considerada a formação de estoque de passagem nesse modelo de análise proposto. Os municípios com a presença de fábricas estão ilustrados na Figura 8 (ABIOVE, 2019). A definição da demanda por carga em cada município foi baseada em dados dessa mesma fonte, porém foi realizada uma estimativa da capacidade fabril instalada nos municípios a partir dos dados de processamento e do número de indústrias de cada Estado brasileiro.

Tomando o exemplo do Mato Grosso, dados da ABIOVE (2019) mostram que a capacidade de processamento de soja nesse Estado em 2017 foi de 41.859 toneladas por dia (21,94% de toda a capacidade de processamento existente no Brasil). Esse volume foi linearmente dividido entre as 11 unidades fabris listadas na ABIOVE – capacidade média de processamento de 3.805,35 toneladas por dia. Três unidades estão localizadas no município de Rondonópolis (MT), o qual possui uma demanda de carga equivalente a 5,98% de toda a carga destinada para atender à demanda do mercado interno.

Tal estrutura de cálculo estimou, em termos percentuais, a demanda de carga em cada um dos municípios que possuem plantas industriais que demandam soja no mercado interno brasileiro. A multiplicação dessa demanda em percentual pelo volume de carga total que não é exportado contabiliza a demanda de carga existente em cada ponto retratado na Figura 8.

Figura 8. Municípios com plantas industriais (moageiras).
Fonte: elaborado pelo autor, baseado em dados da ABIOVE (2019).

3.1.2.4. Terminais de transbordo multimodal utilizados nas movimentações de soja no Brasil

A localização, os destinos e os volumes movimentados de soja em cada terminal de transbordo (ferroviário e hidroviário) foram obtidos via consulta às estatísticas da ANTT (2019) e ANTAQ (2019). Em 2017 foram movimentadas 24,31 milhões de toneladas dessa oleaginosa pelo modal ferroviário e 8,72 milhões de toneladas pelo modal hidroviário – o volume total movimentado por fluxos de transporte multimodais foi equivalente a 33 milhões de toneladas de soja.

Dentre os terminais de transbordo com maior volume embarcado estão: (i) o terminal ferroviário de Rondonópolis (MT), com 5,34 milhões de toneladas; (ii) o terminal hidroviário de Porto Velho (RO), com 3,72 milhões de toneladas; e (iii) o terminal ferroviário de Araguari (MG), com 3,68 milhões de toneladas. No modelo matemático, os valores efetivamente movimentados pelos terminais no ano de 2017 serão considerados como capacidades operacionais, impondo um limite no volume movimentado por essas infraestruturas. A distribuição geográfica dos terminais de transbordo considerados no modelo matemático é apresentada na Figura 9.

Figura 9. Localização dos terminais de transbordo multimodais considerados na análise.
 Fonte: elaborado pelo autor, baseado em dados da ANTT (2019) e da ANTAQ (2019).

3.1.2.5. Mercado externo para a soja brasileira (países importadores)

As informações sobre o destino internacional da soja brasileira exportada foram obtidas junto à base de dados da SECEX (2019). Tais informações são relativas ao ano de 2017, as quais evidenciam que aproximadamente 91,19% das exportações da oleaginosa tiveram o continente asiático como destino, o que representa mais de 60 milhões de toneladas. Na sequência, o continente europeu aparece como o segundo maior consumidor da soja brasileira - 8,18% de todo o volume exportado.

Para cada continente de destino foi definido um país representativo, o qual será tratado como local de entrada da soja brasileira no mercado internacional (aqui denominado de “centroide”). A premissa para a definição do centroide foi a de escolher o país com maior volume importado dentre os países importadores de cada continente. Dessa forma, para fins de estruturação do modelo de minimização dos custos de transporte da cadeia analisada, as movimentações logísticas internacionais tiveram como destinos em potencial cinco localidades. Os países definidos como centroides e a representatividade de cada um dos continentes nas exportações de soja do Brasil estão dispostos na Tabela 11.

Tabela 11. Destinos da soja brasileira no mercado internacional em 2017.

Continente	Centroide	Quantidade
África	Egito	0,26%
América do Norte, Central e Caribe	México	0,33%
América do Sul	Colômbia	0,04%
Ásia	China	91,19%
Europa	Espanha	8,18%

Fonte: elaborado pelo autor, com base em dados da SECEX (2019).

3.1.2.6. Frete rodoviário do transporte de soja no Brasil

Os valores de frete utilizados nas análises do modelo de minimização dos custos de transporte foram obtidos a partir da base de dados do Sistema de Informações de Frete (SIFRECA, 2019). Os dados (total 4.650 informações) fazem referência aos valores médios de frete de soja praticados no mercado brasileiro no ano de 2017. O valor do frete, a distância rodoviária e os locais de origem e destino são as informações obtidas junto a esse sistema de informações.

Foram estruturados dez modelos de regressão distintos, como forma de conferir maior representatividade dos fluxos de transporte nas análises oriundas do processo de modelagem. A diferença entre os modelos ocorre nos destinos das rotas, agregando maior grau de aproximação com a realidade da precificação do transporte rodoviário de soja para os diversos corredores de transporte no Brasil. Foram construídos modelos de estimativa dos valores do frete para:

- i. Fluxos de transporte rodoviário com destino aos portos de Ilhéus (BA) e Salvador (BA);
- ii. Fluxos de transporte rodoviário com destino ao porto de Imbituba (SC);
- iii. Fluxos de transporte rodoviário com destino aos portos de São Francisco do Sul (SC) e Itajaí (SC);
- iv. Fluxos de transporte rodoviário com destino ao porto de São Luís (MA);
- v. Fluxos de transporte rodoviário com destino aos portos de Barcarena (PA), Santana (AP), Santarém (PA) e Manaus (AM);
- vi. Fluxos de transporte rodoviário com destino ao porto de Santos (SP);
- vii. Fluxos de transporte rodoviário com destino ao porto de Rio Grande (RS);
- viii. Fluxos de transporte rodoviário com destino ao porto de Paranaguá (PR);
- ix. Fluxos de transporte rodoviário com destino aos locais de mercado interno e terminais de transbordo das regiões Centro-Oeste, Norte e Nordeste; e
- x. Fluxos de transporte rodoviário com destino aos locais de mercado interno e terminais de transbordo das regiões Sul e Sudeste.

As equações dos modelos de regressão estão apresentadas na Tabela 12, onde $FRETE_{od}$ representa o frete rodoviário para o transporte de soja, em Reais por tonelada de soja transportada, com origem o e destino d ; e $dist_{od}$ é a distância rodoviária, em quilômetros, entre a origem o e o destino d . Para os dez modelos, a obtenção dos parâmetros via regressão linear do logaritmo das variáveis apresentou coeficientes de determinação que variaram entre 78% e 96%.

Tabela 12. Modelos de regressão utilizados nas estimativas dos valores do frete para o ano de 2017.

Destinos dos fluxos do transporte rodoviário	Equações
Ilhéus (BA) e Salvador (BA)	$FRETE_{od} = e^{1,244364} \times dist_{od}^{0,554749}$
Imbituba (SC)	$FRETE_{od} = e^{-1,074333} \times dist_{od}^{0,863907}$
São Francisco do Sul (SC) e Itajaí (SC)	$FRETE_{od} = e^{0,245022} \times dist_{od}^{0,685391}$
São Luís (MA)	$FRETE_{od} = e^{0,036917} \times dist_{od}^{0,720903}$
Barcarena (PA), Santana (AP), Santarém (PA) e Manaus (AM)	$FRETE_{od} = e^{0,269824} \times dist_{od}^{0,696901}$
Santos (SP)	$FRETE_{od} = e^{0,527901} \times dist_{od}^{0,662814}$
Rio Grande (RS)	$FRETE_{od} = e^{0,466156} \times dist_{od}^{0,621228}$
Paranaguá (PR)	$FRETE_{od} = e^{0,208221} \times dist_{od}^{0,696499}$
Mercado interno e terminais de transbordo do Centro-Oeste, Norte e Nordeste	$FRETE_{od} = e^{0,623855} \times dist_{od}^{0,637077}$
Mercado interno e terminais de transbordo do Sul e Sudeste	$FRETE_{od} = e^{0,058311} \times dist_{od}^{0,703094}$

Fonte: elaborado pelo autor, baseado em dados do SIFRECA (2019).

3.1.2.7. Frete multimodal do transporte de soja no Brasil

As estimativas dos valores de frete ferroviário e hidroviário são baseadas nos valores estimados para os fretes rodoviários, obtidos a partir do uso da equação (29). Esse modelo de regressão linear foi obtido a partir de um conjunto de valores de fretes rodoviários para os portos brasileiros exportadores de soja no ano de 2017 (SIFRECA, 2019) – coeficiente de determinação da versão linear do modelo igual a 88,47%. Os fretes são estimados para a mesma combinação origem-destino (OD) entre os terminais de transbordo e os portos.

$$FRETE_{od} = e^{-0,072183367} \times dist_{od}^{0,733679018} \quad (29)$$

onde:

- $FRETE_{od}$: o frete rodoviário para o transporte de soja, em Reais por tonelada de soja transportada, com origem o e destino d ; e
- $dist_{od}$: é a distância rodoviária, em quilômetros, entre a origem o e o destino d .

Baseado nos valores calculados pela equação (29), os valores de referência para os fretes ferroviários e hidroviários são obtidos por meio de descontos no valor do frete rodoviário para a mesma combinação entre localidades de origem e destino. Tais percentuais de desconto foram obtidos a partir de dados do ESALQ-LOG. Dessa forma:

- O frete ferroviário corresponde a 70% do valor do frete rodoviário ($FRETE_{od}$) calculado pela expressão matemática (29), para uma mesma combinação de localidades de origem e destino; e
- O frete hidroviário corresponde a 40% do valor do frete rodoviário ($FRETE_{od}$) calculado pela expressão matemática (29), para uma mesma combinação de localidades de origem e destino.

3.1.2.8. Distâncias

Todas as distâncias rodoviárias utilizadas nos cálculos foram obtidas a partir da utilização do *software* MAPTITUDE (*Caliper Corporation*). O valor da distância foi obtido em quilômetros para todas as combinações OD existentes. As distâncias ferroviárias e hidroviárias foram obtidas a partir de consultas em fontes oficiais (ANTT, 2019 e ANTAQ, 2019), bem como foram obtidas a partir de medições com a utilização do *software* Google Earth.

Por fim, as distâncias marítimas entre os portos brasileiros e os centroides do mercado externo foram obtidas com base em consultas ao portal *Sea Distance*⁸. Os valores foram obtidos em milhas para serem utilizados no cálculo dos fretes marítimos, conforme detalhamento apresentado na sequência.

3.1.2.9. Frete marítimo do transporte internacional da soja brasileira

Os fretes marítimos para o transporte de soja entre os portos brasileiros e os destinos do mercado internacional foram estimados com base em dados do ESALQ-LOG (2019). Baseado em

⁸ Link para acesso ao portal: <https://sea-distances.org/>

dados de frete marítimo de soja com fluxos originados em portos brasileiros, foi estruturado o modelo de regressão linear apresentado em (30).

$$FRETE_{od} = 0,0014 \times DIST_{od} + 15,648 \quad (30)$$

onde:

- o : é o porto de origem do frete marítimo;
- d : é o destino no mercado internacional (centroide);
- $FRETE_{od}$: é o frete, em Dólares (US\$) por tonelada de soja transportada; e
- $DIST_{od}$: é a distância marítima percorrida pelo navio, em milhas náuticas.

O coeficiente de determinação do modelo de regressão é de 88,19%. O valor do frete marítimo foi padronizado para Reais por tonelada, baseado na cotação média do dólar para o ano de 2017 - R\$ 3,19 por dólar, de acordo com dados do BCB (2019).

3.1.2.10. Emissão de CO₂ nas operações de transporte de soja

Dado que um dos objetivos das análises é identificar o impacto dos projetos de infraestrutura multimodal nas emissões de dióxido de carbono, foram utilizados dados sobre as emissões desse gás nas atividades logísticas de transporte. O cálculo da emissão de CO₂ nos fluxos de transporte rodoviário tem os seguintes parâmetros como premissas:

- FED_{CO_2} : Fator de emissão de CO₂ igual a 2,603 kg do gás por litro de diesel consumido na operação de transporte (Ben (2018) *apud* Programa Brasileiro GHG *protocol* (2019));
- RM : Rendimento do consumo de combustível igual 0,526315 litros por quilômetro percorrido no transporte - equivalente a 1,9 quilômetros por litro (ANTT, 2020). Tal valor é utilizado nos cálculos da Política Nacional de Pisos Mínimos do Transporte Rodoviário de Cargas no ano de 2019 para um veículo de 7 eixos que movimenta granel sólido, o qual é representativo para as movimentações de soja no Brasil; e
- Cap : Capacidade nominal de transporte do veículo igual a 35 toneladas (ANTT, 2020).

A equação (31) mostra a fórmula resultante para o cálculo do coeficiente de emissão em quilogramas de dióxido de carbono por tonelada transportada e quilômetro percorrido (FE_{CO_2} , em $kgCO_2/t.km$).

$$FE_{CO_2} = FED_{CO_2} \times \left(\frac{RM}{Cap} \right) = 2,607 \times \left(\frac{0,526315}{35} \right) = 0,03914 \quad (31)$$

Dessa forma, tem-se que o coeficiente de emissão utilizado para análise das emissões de CO_2 nos fluxos de transporte rodoviário é de $0,03914 \text{ kgCO}_2/t.km$.

Para as movimentações via modal ferroviário, o coeficiente de emissão utilizado na análise foi obtido a partir da média ponderada dos fatores de emissão para o transporte de carga em trens de cada uma das malhas ferroviárias brasileiras (ANTT, 2012) pela representatividade de malha nas movimentações de soja no ano de 2017 em TKU (ANTT, 2019). Os coeficientes e a representatividade de cada malha ferroviária considerada estão apresentados na Tabela 13.

Tabela 13. Coeficientes de emissão e participação nas movimentações de soja das malhas ferroviárias.

Malha ferroviária	Coeficiente de emissão ($kgCO_2/t.km$)	Participação nas movimentações ferroviárias de soja em TKU
ALLMN - AMÉRICA LATINA LOGÍSTICA MALHA NORTE	0,0225	36,7188%
ALLMO - AMÉRICA LATINA LOGÍSTICA MALHA OESTE	0,0267	0,0000%
ALLMP - AMÉRICA LATINA LOGÍSTICA MALHA PAULISTA	0,0291	0,0003%
ALLMS - AMÉRICA LATINA LOGÍSTICA MALHA SUL	0,0218	18,1638%
EFC - ESTRADA DE FERRO CARAJÁS	0,0049	0,0000%
EFVM - ESTRADA DE FERRO VITÓRIA A MINAS	0,0077	0,0000%
FCA - FERROVIA CENTRO-ATLÂNTICA	0,0202	28,1813%
FERROESTE - ESTRADA DE FERRO PARANÁ-OESTE	0,0266	0,5644%
FTC - FERROVIA TEREZA CRISTINA	0,0179	0,0000%
FNS - FERROVIA NORTE-SUL	0,0101	14,8438%
MRS - MRS LOGÍSTICA	0,0122	1,5276%
TNLSA - TRANSNORDESTINA LOGÍSTICA	0,0364	0,0000%

Fonte: elaborado pelo autor, baseado em dados de ANTT (2012) e ANTT (2019).

A partir da ponderação, o indicador obtido como fator de emissão de CO₂ nas movimentações ferroviárias é de 0,01975 quilogramas de dióxido de carbono por quilômetro percorrido e por tonelada de soja transportada. Tem-se, nesse indicador, uma melhor representatividade das emissões desse poluente nas movimentações ferroviárias do grão no Brasil em 2017.

Por fim, 0,00790 kgCO₂/t.km é o coeficiente de emissão utilizado para cálculo das movimentações do transporte hidroviário (DEFRA (2018) *apud* Programa Brasileiro *GHG protocol* (2019)). Trata-se de um indicador estabelecido para o transporte hidroviário de embarcações graneleiras.

3.1.2.11. Perdas físicas de soja nas operações logísticas

Os coeficientes de perdas físicas de carga (soja) nas operações logísticas foram obtidos através do trabalho de Pera (2017). Pera (2017) calcula que:

- i. O indicador de perda para o transporte rodoviário de cargas em vias de boa qualidade é de 0,132%;
- ii. O indicador de perda para o transporte ferroviário de cargas é de 0,170%;
- iii. O indicador de perda para o transporte hidroviário de cargas é de 0,170%;
- iv. O indicador de perda para os terminais portuários é de 0,250%;
- v. O indicador de perda para os terminais de transbordo ferroviários é de 0,250%;
- vi. O indicador de perda para os terminais de transbordo hidroviários é de 0,250%.

Baseado nesses indicadores, Pera (2017) define que o índice de perda para o transporte rodoviário de carga para as indústrias no mercado interno é de 0,132% do total de carga transportado. Nos fluxos de exportação com a utilização exclusiva do modal rodoviário, o índice de perdas é de 0,382%, por incluir as perdas da operação de transporte e do terminal portuário.

O mesmo autor ainda mostra que fluxos de exportação com utilização do transporte rodoviário e ferroviário tem índice de perdas igual a 0,800%. Esse indicador é obtido por serem consideradas as perdas do transporte rodoviário, dos terminais ferroviários, do transporte ferroviário e dos terminais portuários. A mesma lógica e indicador se aplicam aos fluxos de exportação rodo-hidroviários.

Baseado nas informações apresentadas, cabe a definição de um índice de perdas para:

- Fluxos de transporte sentido exportação que fazem o uso do modal rodoviário, modal ferroviário e modal hidroviário. Nesse caso, ao se considerar as perdas do

transporte rodoviário, do terminal ferroviário, do transporte ferroviário, do terminal hidroviário, do transporte hidroviário e do terminal portuário (total de seis etapas logísticas), tem-se o valor de 1,216% para o índice de perdas.

- Fluxos de transporte sentido exportação que fazem o uso do modal rodoviário, modal hidroviário e modal rodoviário novamente (duas pontas rodoviárias). Nesse caso, ao se considerar as perdas do transporte rodoviário, do terminal hidroviário, do transporte hidroviário, da segunda etapa do transporte rodoviário e do terminal portuário (total de cinco etapas logísticas), tem-se o valor de 0,931% para o índice de perdas.

3.1.3. Projetos de infraestrutura de transporte multimodal considerados na análise

De forma anterior à apresentação dos projetos de infraestruturas de transporte que serão analisados, cabe adicionar que o modelo matemático de otimização dos fluxos de transporte foi utilizado para se obter uma estimativa do cenário atual de movimentação de soja no Brasil. Essa análise inicial é identificada por “C-BASE” (cenário base), em que foram consideradas apenas as infraestruturas existentes e utilizadas no transporte dessa oleaginosa (considerando informações relativas ao ano de 2017). Tais resultados serviram como comparativos para as análises relacionadas a cada um dos projetos de infraestrutura (identificação dos impactos potenciais).

Foram construídos 26 cenários para análise dos projetos de investimento em infraestrutura multimodal de transporte. Cada projeto de infraestrutura é composto por uma série de terminais de transbordo, conforme característica do investimento. A escolha dos projetos se deu a partir da consulta aos documentos dos últimos planos de investimento em infraestrutura do Governo Federal brasileiro (PAC, PIL e PPI), bem como informações oriundas da Empresa de Planejamento em Logística (EPL), da VALEC e do ESALQ-LOG.

Para fins de organização desse trabalho, cada projeto (ou variações do projeto) será tratado como um cenário de análise distinto. Para alguns casos, quando a infraestrutura analisada por determinado projeto depende de outra obra para tornar as movimentações efetivas, o cenário contemplará a realização em conjunto dos dois projetos de investimentos. Por exemplo, esse é o caso de parte dos cenários que analisam as obras da Ferrovia de Integração Centro-Oeste, cujo potencial de movimentação está atrelado à concretização das obras na Ferrovia Norte-Sul, conforme será detalhado.

Dessa forma, ao avaliar o potencial de movimentação de carga de determinado projeto, o respectivo cenário considera a existência da(s) nova(s) infraestrutura(s) como possibilidade

adicional de movimentação ao que já foi contemplado no cenário “C-BASE”. A capacidade de movimentação dos terminais de transbordo projetados é, para fins de modelagem, equivalente a 5,34 milhões de toneladas⁹ – mesmo valor de capacidade operacional de transporte considerado para o Terminal de Transbordo de Rondonópolis (terminal com maior movimentação de soja no ano 2017).

Tomando como exemplo o cenário “C-FERROGRÃO-1”, o objetivo é analisar a movimentação potencial a partir da instalação do projeto da ferrovia denominada Ferrogrão. Trata-se de um projeto ferroviário em que a nova infraestrutura irá possibilitar o transporte de carga por ferrovia entre os municípios de Sinop (MT) e Itaituba (PA). O projeto foi inicialmente fomentado pela iniciativa privada, sendo incluído no Programa de Investimento em Logística (PIL). A extensão desse trecho analisado é de 933 quilômetros de extensão (PPI, 2019), sendo a localização geográfica do terminal ferroviário (em Sinop (MT)) apresentada na Figura 10.

Figura 10. Terminal projetado considerado no cenário "C-FERROGRÃO-1".

Fonte: elaborado pelo autor.

A solução logística considerada nesse projeto de infraestrutura consiste na movimentação de cargas com o uso interligado do transporte ferroviário e do transporte hidroviário. As movimentações de soja sentido exportação seguiriam via modal rodoviário até o terminal de transbordo ferroviário de Sinop (MT). A partir desse local a produção segue para Itaituba (PA),

⁹ Essa capacidade de transporte adotada no modelo matemático de minimização dos custos de transporte é referente a cada um dos terminais pertencentes ao projeto de infraestrutura analisado.

onde é embarcada no modal hidroviário. A carga tem como possíveis destinos finais: (i) o Porto de Santarém (PA); (ii) o Porto de Barcarena (PA); e (iii) o Porto de Santana (AP).

“C-FERROGRÃO-2” analisa a movimentação potencial a partir da instalação da Ferrogrão, porém com o trajeto ferroviário ligando os municípios de Lucas do Rio Verde (MT) e Itaituba (PA). De forma incremental ao cenário anterior, esse cenário conta com uma extensão ferroviária de 1.081 quilômetros - os 933 quilômetros da Ferrogrão considerados no cenário anterior, adicionados a um trajeto mais ao sul de 148 quilômetros, entre Sinop (MT) e Lucas do Rio Verde (MT). Os terminais ferroviários considerados nesse cenário estão apresentados na Figura 11, sendo os destinos portuários dessa solução logística os mesmos anteriormente listados.

Figura 11. Terminais projetados considerados no cenário "C-FERROGRÃO-2".

Fonte: elaborado pelo autor.

O cenário “C-FNS-1” objetiva analisar a movimentação potencial a partir da instalação do trecho entre Porto Nacional (TO) e Estrela d’Oeste (SP), da Ferrovia Norte-Sul (FNS). Esse trecho foi concedido pelo Governo Federal brasileiro em março de 2019, cumprindo parte dos objetivos dos Programa de Parcerias de Investimento (PPI, 2019). Trata-se de um trecho ferroviário de 1.537 quilômetros de extensão. Para fins de modelagem dessa infraestrutura, foram considerados 7 terminais de transbordo para a operação ferroviária: Estrela d’Oeste (SP), São Simão (GO), Santa Helena de Goiás (GO), Anápolis (GO), Uruaçu (GO), Gurupi (TO) e Porto Nacional (TO). A localização geográfica dos terminais é apresentada na Figura 12.

Figura 12. Terminais projetados considerados no cenário "C-FNS-1".

Fonte: elaborado pelo autor.

Todos os terminais considerados na análise fazem o transporte de soja via modal ferroviário até os portos de Santos (SP) e de São Luís (MA). De acordo com informações do PPI (2019), o trecho entre Porto Nacional (TO) e Anápolis (GO) já se encontra disponível para a realização das operações de transporte. Por sua vez, o trecho mais ao sul (até Estrela d'Oeste (SP)) encontra-se com 95% das obras finalizadas. Cabe acrescentar que a construção da Ferrovia Norte-Sul foi iniciada no final da década de 1980, com projetos de ampliação sendo elaborados pelo Governo Federal a partir do ano de 2006 (VALEC, 2019).

Em "C-FNS-2" o objetivo é analisar a movimentação potencial a partir da instalação de um trecho ferroviário entre o terminal de transbordo de Açailândia (MA) e o Porto de Barcarena (PA). O trecho ferroviário aqui considerado, derivação do projeto da Ferrovia Norte-Sul, tem 477 quilômetros de extensão (VALEC, 2019). A localização geográfica do terminal é ilustrada pela Figura 13.

Figura 13. Terminal projetado considerado no cenário "C-FNS-2".

Fonte: elaborado pelo autor.

O cenário “C-H-MARABÁ” tem o objetivo de analisar a movimentação potencial a partir da viabilização de uma hidrovia que liga os municípios de Marabá (PA) e Barcarena (PA). Esse trecho hidroviário faz parte da Hidrovia do Tocantins – Araguaia (DNIT, 2020), com uma distância estimada de 460 quilômetros. A idealização das obras nesse trecho são parte do Plano Nacional de Integração Hidroviária (ANTAQ, 2013). No modelo matemático estruturado, todo o fluxo de carga que utiliza essa solução multimodal tem como destino final o Porto de Barcarena (PA). A localização geográfica do terminal hidroviário de Marabá (PA) é ilustrada pela Figura 14.

Figura 14. Terminal projetado considerado no cenário "C-H-MARABÁ".

Fonte: elaborado pelo autor.

“C-FPARAENSE-1” é o cenário que objetiva analisar o potencial de movimentação atrelado à instalação do projeto da Ferrovia Paraense. Tal infraestrutura vem sendo idealizada pelo governo estadual do Pará, devendo ser utilizada para a movimentações de minério de ferro e grãos agrícolas, dentre outras cargas. Neste, dois terminais de transbordo ferroviários são considerados para fins de modelagem: o terminal ferroviário de Marabá (PA) e o terminal ferroviário de Santana do Araguaia (PA). Em seu trajeto total, a Ferrovia Paraense objetiva ligar o município de Santana do Araguaia (PA) ao complexo portuário de Barcarena (PA), viabilizando maiores movimentações de carga pelos portos da região Norte do Brasil. A localização geográfica dos terminais ferroviários de Marabá (PA) e de Santana do Araguaia (PA) são apresentados na Figura 15.

Figura 15. Terminais projetados considerados no cenário "C-FPARAENSE-1".

Fonte: elaborado pelo autor.

Derivado do cenário anterior, “C-FPARAENSE-2” objetiva analisar o potencial de movimentação atrelado à utilização em conjunto do trecho sul do projeto da Ferrovia Paraense e do trecho hidroviário entre Marabá (PA) e Barcarena (PA). Nessa solução de transporte multimodal serão consideradas como opções de transporte até Barcarena (PA): (i) a utilização do transporte hidroviário entre Marabá (PA) e Barcarena (PA); e (ii) a utilização do transporte ferroviário (via terminal ferroviário de Santana do Araguaia (PA)) combinado com o transporte hidroviário de carga (via terminal de Marabá (PA)) até complexo portuário de Barcarena (PA). Trata-se, portanto, de um cenário intermediário entre o “C-FPARAENSE-1” e o “C-H-MARABÁ”.

“C-EMN-1” é o cenário que analisa o potencial de movimentação atrelado ao projeto de expansão da malha ferroviária denominada de Malha Norte. Tal projeto tem o objetivo de realizar a construção de um ramal ferroviário que ligará o município de Rondonópolis (MT) aos municípios de Cuiabá (MT) e Sorriso (MT) – trecho ferroviário com aproximadamente 535 quilômetros de extensão. Trata-se de um prolongamento da malha ferroviária atualmente existente no Estado do Mato Grosso, aumentando o potencial de captação de carga nessa localidade. As movimentações dessa ferrovia são todas direcionadas ao Porto de Santos (SP). A Figura 16 ilustra a localização geográfica dos municípios onde estão previstos para serem construídos os terminais de transbordo considerados nesse cenário.

Figura 16. Terminais projetados considerados no cenário "C-EMN-1".

Fonte: elaborado pelo autor.

“C-EMN-2” objetiva analisar o potencial de movimentação atrelado ao projeto de expansão da Malha Norte. De forma diferente do considerado anteriormente, nesse cenário será considerado o prolongamento da infraestrutura ferroviária apenas até o município de Cuiabá (MT) - 186 quilômetros que ligariam o município de Rondonópolis (MT) à capital do Estado.

Outra variante do projeto de expansão da ferrovia no Mato Grosso é retratada em “C-EMN-3”. Esse cenário também objetiva analisar o potencial de movimentação atrelado ao projeto de expansão da Malha Norte. Porém, um trecho total de 617 quilômetros é considerado nessa análise, o qual contempla terminais de transbordo ferroviário nas seguintes localidades: Cuiabá (MT), Sorriso (MT) e Sinop (MT), conforme ilustra a Figura 17.

Figura 17. Terminais projetados considerados no cenário "C-EMN-3".

Fonte: elaborado pelo autor.

O cenário “C-FERROVIADOFRANGO” objetiva analisar o potencial de movimentação de carga do projeto denominado de Ferrovia do Frango. Tal projeto é parte do Corredor Ferroviário de Santa Catarina (VALEC, 2019), que cruza todo o estado catarinense. Os extremos do ramal ferroviário fazem a ligação entre Dionísio Cerqueira (SC) e o Porto de Itajaí (SC) – trecho total com aproximadamente 700 quilômetros de extensão. Foram considerados como localidades potenciais para os terminais de transbordo: Blumenau (SC), Chapecó (SC), Dionísio Cerqueira (SC), Herval d’Oeste (SC), Santa Cecília (SC) e São Miguel do Oeste (SC). Tais localidades estão destacadas na Figura 18.

Figura 18. Terminais considerados no cenário "C-FERROVIADOFRANGO".

Fonte: elaborado pelo autor.

A análise do potencial de movimentação de Ferrovia de Integração Oeste-Leste (FIOL) é inicialmente retratada em “C-FIOL-1”. A FIOL é um projeto ferroviário inicialmente previsto pelo Plano Nacional de Viação e que faz parte do grupo de projetos discutidos no Programa de Parceria em Investimentos (PPI, 2019). “C-FIOL-1” analisa o potencial de movimentação dessa infraestrutura ferroviária, em seu trajeto projetado entre os municípios de Caetité (BA) – vide Figura 19 – e Ilhéus (BA). Tal trecho tem aproximadamente 573 quilômetros de extensão ferroviária e viabiliza a movimentação de grãos e outros produtos até os terminais portuários localizados em Ilhéus (BA).

Figura 19. Terminal considerado no cenário "C-FIOL-1".

Fonte: elaborado pelo autor.

Em “C-FIOL-2”, de forma incremental, o objetivo é analisar o potencial de movimentação de um trecho ferroviário que conecta o Porto de Ilhéus (BA) ao município de Barreiras (BA), passando por Caetité (BA). Trata-se do ramal ferroviário projetado para a Ferrovia de Integração Oeste-Leste, com extensão total de aproximadamente 1.022 quilômetros. A Figura 20 destaca a localização dos terminais de transbordo considerados para análise nesse cenário.

Figura 20. Terminais considerados no cenário "C-FIOL-2".

Fonte: elaborado pelo autor.

“C-FIOL-3” analisa o potencial de movimentação de carga da FIOL, porém considerando também a existência de um terminal de transbordo ferroviário no município de Figueirópolis (TO) – vide Figura 21. O traçado total dessa ferrovia tem aproximadamente 1.527 quilômetros.

Figura 21. Terminais considerados no cenário "C-FIOL-3".

Fonte: elaborado pelo autor.

Três cenários simulam o potencial de movimentação da Ferrovia de Integração Centro-Oeste (FICO). No projeto original, a FICO é parte da Ferrovia Transcontinental, projetada inicialmente para ligar o litoral do Rio de Janeiro ao Estado do Acre (VALEC, 2019). Trata-se de uma infraestrutura inicialmente idealizada para se ter uma ligação ferroviária entre os oceanos Atlântico (no Brasil) e Pacífico (no Peru) (VALEC, 2019).

Especificamente no cenário “C-FICO-1”, a análise irá considerar a existência de dois novos terminais de transbordo: o de Água Boa (MT) e o de Mara Rosa (GO), conforme apresentado na Figura 22. As movimentações ferroviárias ocorrem por meio de uma integração com a Ferrovia Norte-Sul, sendo as cargas transportadas até o Porto de São Luís (MA).

Figura 22. Terminais considerados no cenário "C-FICO-1".

Fonte: elaborado pelo autor.

“C-FICO-2” analisa o potencial de movimentação da Ferrovia de Integração Centro-Oeste (FICO), porém com terminais ferroviários localizados em: Lucas do Rio Verde (MT), Água Boa (MT) e Mara Rosa (GO) - Figura 23. As movimentações ferroviárias, da mesma forma como no cenário anterior, ocorrem por meio de uma integração com a Ferrovia Norte-Sul, sendo as cargas transportadas até o Porto de São Luís (MA).

Figura 23. Terminais considerados no cenário "C-FICO-2".

Fonte: elaborado pelo autor.

“C-FICO-3” também simula o potencial de movimentação da Ferrovia de Integração Centro-Oeste (FICO), porém com o trecho ferroviário fazendo a ligação do município de Vilhena (RO) ao entroncamento com a Ferrovia Norte-Sul, para movimentações até o Porto de São Luís (MA). Portanto, quatro terminais de transbordo são considerados para a FICO nesse cenário: Vilhena (RO), Lucas do Rio Verde (MT), Água Boa (MT) e Mara Rosa (GO), conforme ilustra a Figura 24.

Figura 24. Terminais considerados no cenário "C-FICO-3".

Fonte: elaborado pelo autor.

O cenário “C-FICO+FNS-1”, por sua vez, analisa o potencial de movimentação a partir da existência, em conjunto, das infraestruturas consideradas nos cenários “C-FICO-1” e “C-FNS-1”. O objetivo é mensurar o potencial impacto de uma ligação efetiva entre a Ferrovia Norte-Sul e a Ferrovia de Integração Centro-Oeste. Para todos os terminais de transbordo considerados, os fluxos de exportação podem ocorrer via Porto de Santos (SP) e Porto de São Luís (MA).

De forma similar, “C-FICO+FNS-2” trata do potencial de movimentação a partir da existência, em conjunto, das infraestruturas consideradas nos cenários “C-FICO-2” e “C-FNS-1” – fluxos para os portos de Santos (SP) e de São Luís (MA).

O cenário “C-FVILHENA” analisa o potencial de movimentação do projeto de ligação ferroviária entre Vilhena (RO) e Porto Velho (RO). Esse trecho é parte do projeto da Ferrovia Transcontinental (VALEC, 2019) e permite, nas movimentações de soja, a utilização interligada dos modais rodoviário, ferroviário e hidroviário. Com a presença dessa infraestrutura, os grãos se direcionam ao terminal ferroviário de Vilhena (RO) (vide Figura 25) para serem movimentados até

Porto Velho (RO) e depois, via hidrovia, até os portos exportadores. O trecho ferroviário aqui analisado tem aproximadamente 800 quilômetros de extensão.

Figura 25. Terminal considerado no cenário "C-FVILHENA".

Fonte: elaborado pelo autor.

No cenário “C-FDOURADOSPARANAGUÁ” é analisado o potencial de movimentação do projeto de ligação ferroviária entre Dourados (MS) e o Porto de Paranaguá (PR). Trata-se de um projeto de ligação ferroviária com aproximadamente 1.148 quilômetros de extensão, que cruza o Estado do Paraná. Para fins de modelagem dessa infraestrutura, os terminais de transbordo considerados são: Guarapuava (PR), Cascavel (PR), Guaíra (PR) e Dourados (MS). A localização geográfica desses municípios é apresentada na Figura 26.

Figura 26. Terminais considerados no cenário "C-FDOURADOSPARANAGUÁ".

Fonte: elaborado pelo autor.

Em “C-FMSSANTOS” o analisado é o potencial de movimentação do projeto de ligação ferroviária entre Corumbá (MS) e o Porto de Santos (SP). O trecho total é de aproximadamente 1.600 quilômetros de ferrovia e cruza o Estado de São Paulo até acessar a Baixada Santista pela utilização da atual infraestrutura da Malha Paulista. Quatro terminais de transbordo são analisados nesse cenário: Corumbá (MS), Miranda (MS), Aquidauana (MS) e Campo Grande (MS), conforme ilustrado pela Figura 27.

Figura 27. Terminais considerados no cenário "C-FMSSANTOS".

Fonte: elaborado pelo autor.

No cenário “C-FPANTANAL” é analisado o potencial de movimentação do projeto intitulado de Ferrovia do Pantanal (VALEC, 2019). A partir dos terminais ferroviários de Porto Murtinho (MS), Maracaju (MS) e Dourados (MS) (conforme apresentado na Figura 28), a carga é transportada até os portos de Santos (SP) e de Paranaguá (PR).

Figura 28. Terminais considerados no cenário "C-FPANTANAL".

Fonte: elaborado pelo autor.

“C-FPANORAMA” analisa o potencial de movimentação atrelado a existência de um terminal de transbordo ferroviário no município de Panorama (SP) – localização geográfica apresentada na Figura 29. Com essa infraestrutura, cujo projeto é apresentado pela VALEC (2019), a carga é transportada até o Porto de Santos (SP) via modal ferroviário.

Figura 29. Terminal considerado no cenário "C-FPANORAMA".

Fonte: elaborado pelo autor.

“C-FNS-SUL” analisa o potencial de movimentação atrelado à parte sul do projeto da Ferrovia Norte-Sul. Nesse trecho, terminais de transbordo são projetados para serem construídos em Santa Catarina (município de Chapecó) e no Rio Grande do Sul (municípios de Frederico Westphalen e Palmeira das Missões). Esses terminais, apresentados na Figura 30, serão utilizados para o transporte de carga até o Porto de Rio Grande.

Figura 30. Terminais considerados no cenário "C-FNS-SUL".

Fonte: elaborado pelo autor.

Em “C-FNS-TOTAL” é analisado o potencial de movimentação atrelado à existência completa do projeto da Ferrovia Norte-Sul, ligando a região Norte à região Sul do Brasil. Trata-se de um cenário que considera, de forma conjunta, as soluções logísticas multimodais atreladas aos cenários “C-FNS-1”, “C-FNS-2” e “C-FNS-SUL”. Além disso, é considerada ainda a existência de um terminal de transbordo no município de Cascavel (PR), possibilitando fluxos ao Porto de Paranaguá (PR). A Figura 31 ilustra a localização geográfica dos terminais de transbordo ferroviário considerados para análise desse cenário.

Figura 31. Terminais considerados no cenário "C-FNS-TOTAL".

Fonte: elaborado pelo autor.

A síntese das principais informações de cada um dos cenários propostos para análise é apresentada na Tabela 14.

Tabela 14. Síntese dos projetos de infraestrutura de transporte analisados em cada um dos cenários.

Cenário	Projeto(s) de infraestrutura multimodal analisado(s) pelo cenário
C-EMN-1	<u>Malha Norte (expansão)</u> , com trecho ferroviário entre Sorriso (MT) e Rondonópolis (MT)
C-EMN-2	<u>Malha Norte (expansão)</u> , com trecho ferroviário entre Cuiabá (MT) e Rondonópolis (MT)
C-EMN-3	<u>Malha Norte (expansão)</u> , com trecho ferroviário entre Sinop (MT) e Rondonópolis (MT)
C-FDOURADOSPARANAGUÁ	<u>Ferrovia Dourados-Paranaguá</u> , com trecho ferroviário que possibilita o transporte entre Dourados (MS) e o Porto de Paranaguá

C-FERROGRÃO-1	<u>Ferrogrão</u> , com trecho ferroviário entre Sinop (MT) e Itaituba (PA)
C-FERROGRÃO-2	<u>Ferrogrão</u> , com trecho ferroviário entre Lucas do Rio Verde (MT) e Itaituba (PA)
C-FERROVIADOFRANGO	<u>Ferrovia do Frango</u> , com trecho ferroviário entre Dionísio Cerqueira (SC) e Itajaí (SC)
C-FICO+FNS-1	<u>Ferrovia de Integração Centro-Oeste</u> , com trecho ferroviário entre Água Boa (MT) e Mara Rosa (GO) + <u>Ferrovia Norte-Sul</u> , com trecho ferroviário entre Estrela d'Oeste (SP) e Porto Nacional (TO)
C-FICO+FNS-2	<u>Ferrovia de Integração Centro-Oeste</u> , com trecho ferroviário entre Lucas do Rio Verde (MT) e Mara Rosa (GO) + <u>Ferrovia Norte-Sul</u> , com trecho ferroviário entre Estrela d'Oeste (SP) e Porto Nacional (TO)
C-FICO-1	<u>Ferrovia de Integração Centro-Oeste</u> , com trecho ferroviário entre Água Boa (MT) e Mara Rosa (GO)
C-FICO-2	<u>Ferrovia de Integração Centro-Oeste</u> , com trecho ferroviário entre Lucas do Rio Verde (MT) e Mara Rosa (GO)
C-FICO-3	<u>Ferrovia de Integração Centro-Oeste</u> , com trecho ferroviário entre Vilhena (RO) e Mara Rosa (GO)
C-FIOL-1	<u>Ferrovia de Integração Oeste-Leste</u> , com trecho ferroviário entre Caetité (BA) e Ilhéus (BA)
C-FIOL-2	<u>Ferrovia de Integração Oeste-Leste</u> , com trecho ferroviário entre Barreiras (BA) e Ilhéus (BA)
C-FIOL-3	<u>Ferrovia de Integração Oeste-Leste</u> , com trecho ferroviário entre Figueirópolis (TO) e Ilhéus (BA)
C-FMSSANTOS	<u>Ferrovia Mato Grosso do Sul-Santos</u> , com trecho ferroviário entre Corumbá (MS) e a Malha Paulista (transporte até o Porto de Santos)
C-FNS-1	<u>Ferrovia Norte-Sul</u> , com trecho ferroviário entre Estrela d'Oeste (SP) e Porto Nacional (TO)
C-FNS-2	<u>Ferrovia Norte-Sul</u> , com trecho entre Açailândia (MA) e Barcarena (PA)
C-FNS-SUL	<u>Ferrovia Norte-Sul</u> , com trecho ferroviário entre Chapecó (SC) e Rio Grande (RS)
C-FNS-TOTAL	<u>Ferrovia Norte-Sul</u> , com trecho ferroviário entre Estrela d'Oeste (SP) e Porto Nacional (TO) + trecho entre Açailândia (MA) e Barcarena (PA) + trecho ferroviário entre Chapecó (SC) e Rio Grande (RS)
C-FPANORAMA	<u>Ferrovia de Panorama</u> , com viabilização do trecho ferroviário entre Panorama (SP) e a Malha Paulista (transporte até o Porto de Santos)

C-FPANTANAL	<u>Ferrovia do Pantanal</u> , com trecho ferroviário entre Porto Murtinho (MS) e a Malha Paulista (transporte até o Porto de Santos)
C-FPARAENSE-1	<u>Ferrovia Paranaense</u> , com trecho ferroviário entre Santana do Araguaia (PA) e Barcarena (PA)
C-FPARAENSE-2	<u>Ferrovia Paranaense</u> , com trecho ferroviário entre Santana do Araguaia e Marabá (PA) + <u>Hidrovia do Tocantins-Araguaia</u> , com trecho hidroviário entre Marabá (PA) e Barcarena (PA)
C-FVILHENA	<u>Ferrovia Transcontinental</u> (segmento), com trecho ferroviário entre Vilhena (RO) e Porto Velho (RO)
C-H-MARABÁ	<u>Hidrovia do Tocantins-Araguaia</u> , com trecho hidroviário entre Marabá (PA) e Barcarena (PA)

Fonte: elaborado pelo autor.

3.1.4. Processamento do modelo matemático de minimização dos custos de transporte

A programação (*script* disponibilizado no APÊNDICE C) e o processamento do modelo matemático foram realizados com o uso do *software General Algebraic Modeling System* (GAMS) – solver CPLEX. O modelo apresentou, no cenário “C-BASE”, 475.532 variáveis subdivididas em 13 blocos, 2.636 equações subdivididas em 16 blocos e 3.268 iterações. O tempo total de execução do modelo foi de 16,546 segundos¹⁰.

3.2. Etapa 2: Análise da eficiência relativa dos projetos de investimento em infraestrutura de transporte

Essa etapa da tese visa apresentar o modelo de Análise Envoltória de Dados utilizado na análise da eficiência relativa dos projetos de infraestrutura. Buscam-se medidas de desempenho dos projetos a partir da mensuração da produtividade, obtida pela razão entre os múltiplos resultados (*output* virtual) e os múltiplos insumos utilizados (*input* virtual) (Ray, 2004). Conforme já mencionado, os primeiros modelos de DEA foram introduzidos na literatura acadêmica por Charnes, Cooper e Rhodes (1978) e Banker, Charnes e Cooper (1984) – modelos CCR e BCC, respectivamente (Ray, 2004).

¹⁰ Todas as análises dessa tese (modelo de minimização dos custos de transporte e modelos de Análise Envoltória de Dados) foram realizadas a partir do uso de um computador com processador Intel® Core i5-7200U, sistema operacional de 64 bits e 8 GB de memória RAM.

De forma a atingir os objetivos de análise estipulados, foram construídos modelos com variáveis que mensuram os impactos econômicos, impactos sociais e impactos ambientais de cada cenário de investimento em infraestrutura multimodal considerado nesse estudo. Os resultados estão relacionados, portanto, a medidas de eficiência da sustentabilidade dessas obras, que são obtidas a partir da comparação entre as vinte e seis unidades analisadas.

O modelo CCR e o modelo BCC foram os escolhidos, ambos com orientação ao *output*. Eles foram utilizados em parte dos artigos listados no referencial teórico, para análises de eficiência de terminais portuários (Cullinane et al., 2006; Guimarães et al., 2014; Kutin et al., 2017), aeroportos e companhias aéreas (Amoroso et al., 2015; Barros & Peypoch, 2009; Carlucci et al., 2018), sistemas de transporte urbano (Fancello, Uccheddu, & Fadda, 2013; Hajduk, 2018; Pina & Torres, 2001) e operadores ferroviários (Marchetti & Wanke, 2017), por exemplo.

A escolha pela orientação ao *output* se deu pela característica de maior inflexibilidade da variável de *input* que será considerada nos modelos (Ramanathan, 2003), a qual trata do investimento monetário necessário para a concretização dos projetos de infraestrutura, conforme será demonstrado na sequência. Dado essa estrutura matemática, as mudanças necessárias para que as *Decision Making Units* (DMUs) atinjam a fronteira de eficiência estão relacionadas com alterações que promovam melhorias nos seus resultados (aumentos dos *outputs*).

O modelo CCR, que considera retornos constantes de escala (*Constant Returns to Scale*, CRS), é representado pelas expressões matemáticas (32), (33), (34), (35) e (36). Essa forma matemática é denominada de forma dos multiplicadores, em que a função objetivo é sujeita a um conjunto de quatro restrições (Zhu, 2009), conforme apresentado a seguir.

$$\min \sum_{i=1}^m v_i x_{i0} + v \quad (32)$$

Sujeito a:

$$\sum_{i=1}^m v_i x_{ij} - \sum_{r=1}^s \mu_r y_{rj} + v \geq 0 \quad (33)$$

$$\sum_{i=1}^s \mu_r y_{r0} = 1 \quad (34)$$

$$\mu_r, v_i \geq 0(\epsilon) \quad (35)$$

$$v = 0 \quad (36)$$

sendo que:

- O subíndice 0 representa a DMU que está sob perspectiva de análise;
- i representa os *inputs* (número total igual a m);
- r representa os *outputs* (número total igual a s);
- j representa as DMUs consideradas na análise;
- v_i é variável de decisão da programação matemática, que representa o peso do *input* i ;
- x_{i0} representa o *input* i da DMU em análise (0);
- x_{ij} representa o *input* i da DMU j ;
- μ_r representa o peso do *output* r , sendo também variável de decisão do modelo matemático;
- y_{r0} representa o *output* r da DMU em análise (0);
- y_{rj} representa o *output* r da DMU j ;
- $\sum_{i=1}^m v_i x_{ij}$ representa o *input* virtual; e
- $\sum_{r=1}^s \mu_r y_{rj}$ representa o *output* virtual.

A expressão matemática (34) é chamada de restrição de normalização (Zhu, 2009) e faz com que o somatório dos *outputs* seja igual a 1. A DMU é tida como eficiente se a expressão (32), que minimiza o somatório dos *inputs*, retornar valor igual a 1. Nesse caso, tem-se a situação em que a unidade analisada é localizada na fronteira de eficiência (lugar geométrico das unidades eficientes).

No modelo BCC é medida exclusivamente a eficiência técnica das unidades analisadas, dada a característica de retornos variáveis de escala (*Variable Return to Scale* - VRS). A forma dos multiplicadores desse modelo consta das expressões matemáticas (37), (38), (39), (40) e (41), de acordo com Zhu (2009). A única diferença em relação à formulação do modelo CCR é que, no BCC, a variável v é irrestrita (Zhu, 2009).

$$\min \sum_{i=1}^m v_i x_{i0} + v \quad (37)$$

sujeito a:

$$\sum_{i=1}^m v_i x_{ij} - \sum_{r=1}^s \mu_r y_{rj} + v \geq 0 \quad (38)$$

$$\sum_{i=1}^s \mu_r y_{r0} = 1 \quad (39)$$

$$\mu_r, v_i \geq 0(\varepsilon) \quad (40)$$

$$v \text{ é irrestrito} \quad (41)$$

Oito variantes de modelos são propostos para análise, de forma a captar as informações relativas às eficiências econômica, ambiental e social de cada cenário. Os modelos analisados são:

- i. Modelo de análise de eficiência econômica dos projetos com retornos constantes de escala (*CCRoeco*);
- ii. Modelo de análise de eficiência econômica dos projetos com retornos variáveis de escala (*BCCoeco*);
- iii. Modelo de análise de eficiência ambiental dos projetos com retornos constantes de escala (*CCRoamb*);
- iv. Modelo de análise de eficiência ambiental dos projetos com retornos variáveis de escala (*BCCoamb*);
- v. Modelo de análise de eficiência social dos projetos com retornos constantes de escala (*CCRosoc*);
- vi. Modelo de análise de eficiência social dos projetos com retornos variáveis de escala (*BCCosoc*);
- vii. Modelo de análise de eficiência econômica, ambiental e social dos projetos com retornos constantes de escala (*CCRo*); e
- viii. Modelo de análise de eficiência econômica, ambiental e social dos projetos com retornos variáveis de escala (*BCCo*).

Os cenários definidos na seção 3.1.3 são as DMUs consideradas nos modelos de eficiência - total de vinte e seis unidades. As DMUs são tidas como unidades homogêneas pelo fato de representarem projetos de investimento em infraestrutura de transporte para a cadeia da soja no Brasil. Tal característica de homogeneidade é um dos requisitos para a escolha das unidades a serem analisadas (Ramanathan, 2003). Ramanathan (2003) também define que o número de DMUs deve ser pelo menos igual a três vezes a soma do número de *inputs* e *outputs*. Por essa definição, a soma do número de variáveis do modelo não deve ser superior ao número oito.

No total, foram consideradas oito variáveis para a construção dos modelos de análise de eficiência. Comum a todas as derivações, foi considerada uma variável de *input* que trata de uma

estimativa do investimento monetário necessário para a concretização dos projetos de investimento (variável Custo estimado para o investimento). Tais informações foram obtidas na literatura, com base em consultas a planos e expectativas de investimento relacionados aos projetos, além da obtenção de valores estimados com base na extensão da obra. Variáveis com a característica de retratar o custo do investimento e gastos com infraestrutura foram utilizadas em Hilmola, Lorentz e Rhoades (2015), Yuan et al. (2018), Carlucci, Cirà e Coccoresse (2018), Castellano et al. (2019), Caulfield, Bailey e Mullarkey (2013), Hajduk (2018) e Kyriacou, Muinel-Gallo e Roca-Sagalés (2019), conforme análise do referencial teórico apresentada na seção 2.2.

Cabe acrescentar que a característica dessa variável de entrada é determinante na escolha da orientação dos modelos de análise, conforme já mencionado. O montante monetário a ser alocado nas obras de infraestrutura é característico de cada projeto, sendo baixo o grau de flexibilidade dessa variável (o controle não é totalmente dependente da performance da gestão do projeto).

No tocante às variáveis de saída do modelo de eficiência (*outputs*), as métricas relativas à esfera econômica dizem respeito a indicadores de impactos econômicos do projeto para a cadeia de soja no Brasil. De forma diferente, a maior parte dos trabalhos encontrados na literatura utilizam variáveis macro e microeconômicas ao retratar a esfera econômica, tais como PIB, produtividade dos agentes econômicos, nível de consumo, nível de preço, dentre outras. Neste trabalho, as variáveis dessa dimensão de análise retratam basicamente o potencial de economia em custos de transporte e o grau de utilização das infraestruturas estudadas. Essas variáveis são:

- i. Diferença no custo total: retrata a economia estimada no custo de transporte total da cadeia de transporte de soja em comparação com a atual situação brasileira. Os valores da variável foram obtidos por meio da comparação dos resultados dos cenários propostos com o resultado de “C-BASE”. Os mesmos serão apresentados na discussão dos resultados do modelo de minimização dos custos de transporte (seção 4.1).
- ii. Carga movimentada pela infraestrutura: faz referência ao total de carga movimentada pela infraestrutura projetada (análise do potencial de captação de carga). A mesma será obtida via análise dos resultados do modelo de minimização de custos de transporte (apresentação ao longo da seção 4.1). Diversos trabalhos utilizam variáveis com característica similar, tais como Adler, Ülkü e Yazhensky (2013), Carlucci, Cirà e Coccoresse (2018), Doomernik (2015), Fancello, Ucheddu e Fadda (2014), Marchetti e Wanke (2017), Cullinane, Wang, Song e Ji (2006),

Hilmola, Lorentz e Rhoades (2015), Díaz-Hernández, Martínez-Budría e Salazar-González (2014) e Merkert, Smith e Nash (2010).

- iii. Taxa de utilização da capacidade de movimentação: diz respeito ao grau de utilização da infraestrutura projetada (vide seção 4.1). Se nos resultados do modelo de minimização de custo a infraestrutura utilizou toda a capacidade operacional considerada para análise do cenário, o valor dessa variável será igual a 100%. Na literatura acadêmica, Chen et al. (2019) fazem o uso de uma variável que trata do grau de utilização de infraestruturas urbanas na China.

Os três *outputs* classificados como de dimensão econômica têm valores diretamente proporcionais à eficiência dos projetos, visto que: (i) quanto maior a economia em custos estimada decorrente da implementação de novas possibilidades para o transporte de carga, melhor tende a ser a classificação do projeto como eficiente; (ii) quanto maior o volume de carga captável pela infraestrutura, maior a importância do projeto para a cadeia de transporte de soja no Brasil e mais ela deve contribuir para a redução dos custos da cadeia produtiva; e (iii) quanto maior o grau de utilização da infraestrutura, melhores tendem a ser as características financeiras do investimento realizado.

Relativamente às variáveis de impacto ambiental, foram consideradas no modelo de análise de eficiência:

- i. Emissão de CO₂: trata-se de estimativa da emissão total de dióxido de carbono nas operações de transporte de soja em território brasileiro. Tal informação também será obtida via análise do modelo de minimização dos custos de transporte, sendo os valores expressos em toneladas do gás (apresentação ao longo da seção 4.1). Dados dessa natureza são amplamente utilizados em trabalhos correlatos a esse, tais como Sun e Cui (2018), Tong et al. (2016), Zheng et al. (2018), Zhang, Wang e Zheng (2018), Xie et al. (2017), Xie et al. (2017), Zhu et al. (2017), Chen, Shen, Zhang, Li e Ren (2019), Jalali Sepehr, Haeri e Ghousi (2019), Li, Yang, Zhang e Cao (2016), Yuan et al. (2018), York et al. (2017), Zhang et al. (2018) e Hilmola, Lorentz e Rhoades (2015).
- ii. Perdas físicas: retrata a quantidade de soja perdida, em toneladas, nas operações de transporte ocorridas em território brasileiro (vide resultados do modelo de minimização de custos de transporte). No caso dessa variável, a opção por incorporá-la na análise com métrica relativa aos impactos ambientais não foi anteriormente verificada na literatura acadêmica que trata da análise de

investimentos em infraestrutura, apesar da pertinência do assunto para estudos relacionados com cadeias agroindustriais.

As duas variáveis de caráter ambiental são tratadas como *outputs* indesejáveis nos modelos de eficiência relativa. Ou seja, quanto maiores os valores atribuídos a elas, maior a ineficiência da DMU analisada (relação inversa com a eficiência). Tal característica demanda tratamento diferenciado para essas duas variáveis, sendo adotadas as seguintes estratégias na construção dos modelos de eficiência: (i) uso dessas duas variáveis como *inputs* dos modelos de eficiência econômica, ambiental e social (*CCRo* e *BCCo*); e (ii) transformação da variável, sendo utilizado o inverso da mesma como *output* dos modelos de eficiência ambiental (*CCRoamb* e *BCCoamb*). Halkos e Petrou (2019) fazem um levantamento da forma de abordagem dos *outputs* indesejáveis em diversos trabalhos que utilizaram a técnica de Análise Envoltória de Dados. Ambas as abordagens acima descritas foram sintetizadas como frequentes nos artigos que lidam com variáveis com essa característica (Halkos & Petrou, 2019), o que definiu as estratégias de uso apresentadas.

Por fim, o impacto social dos projetos de infraestrutura é atrelado a duas formas de percepção que a sociedade em geral pode ter sobre os benefícios tidos a partir da concretização dos investimentos. Na literatura, o uso de variáveis de caráter social é verificado em Sierra et al. (2018) e Pardo-Bosch e Aguado (2016), por exemplo. Duas são as variáveis utilizadas nesse trabalho:

- i. Área de influência: diz respeito ao número de municípios que compõem a área de influência direta do projeto de infraestrutura de transporte. Tal indicador reflete o número de cidades que transportaram carga para os terminais de transbordo do projeto. A variável tem característica de *output* desejável - quanto maior o número de localidades pertencentes à área de influência do projeto, maior a abrangência geográfica do investimento. Os resultados dessa variável também serão apresentados ao longo da discussão do item 4.1.
- ii. Impacto no IDH: trata-se de um índice que estima o impacto potencial das infraestruturas no Índice de Desenvolvimento Humano dos municípios produtores de soja no Brasil. Os valores dessa variável foram obtidos com base em: (i) análise comparativa dos custos médios de transporte dos municípios produtores de soja, entre os cenários analisados e o “C-BASE” (resultados que serão discutidos ao longo da seção 4.1 dessa tese); (ii) o impacto potencial da redução do custo médio de transporte no Índice de Desenvolvimento Humano dos municípios, obtido a partir da estruturação de um modelo econométrico de regressão linear múltipla; e (iii) o tamanho da população residente nos municípios

- dados do IBGE (2019a). O índice retrata os benefícios potenciais no IDHM de cada uma das localidades produtoras de soja do Brasil no ano 2017, sendo ponderado pela população residente nas cidades. O cálculo ocorre a partir das expressões matemáticas (42) e (43).

$$\Delta idhm_{mc} = \begin{cases} (CM_{mc_{base}} - CM_{mc}) \times w & , CM_{mc_{base}} > CM_{mc} \\ 0 & , CM_{mc_{base}} \leq CM_{mc} \end{cases} \quad (42)$$

$$\Delta br_c = \sum_m \frac{\Delta idhm_{mc} \times pop_m}{POPT} \quad (43)$$

onde:

- m é o município produtor de soja;
- c é o cenário referente ao projeto de infraestrutura analisado;
- c_{base} se refere aos resultados obtidos no cenário “C-BASE”;
- CM_{mc} é o custo médio municipal do transporte de soja do município m no cenário c , em Reais por tonelada;
- $CM_{mc_{base}}$ é o custo médio municipal do transporte de soja do município m no cenário “C-BASE”, em Reais por tonelada;
- w é o fator de ajuste no Índice de Desenvolvimento Humano Municipal em decorrência de alterações no custo de transporte;
- $\Delta idhm_{mc}$ é a alteração, em percentual, no IDH do município m no cenário c ;
- pop_m é a população residente no município m ;
- $POPT$ é a população total residente nos municípios produtores de soja; e
- Δbr_c representa a estimativa do impacto da infraestrutura do cenário c no IDH dos municípios produtores de soja (ponderação pela população).

O valor de w é resultado de um modelo econométrico de regressão múltipla desenvolvido para essa tese, com a metodologia e resultados sintetizados no Apêndice D. Em suma, os resultados do modelo mostram que uma redução de R\$ 1,00 por tonelada no custo médio de transporte de soja do município acarreta em um aumento de 0,01283% no Índice de Desenvolvimento Humano Municipal dessa localidade. De forma a exemplificar, se o custo médio de transporte de um município reduz em determinado cenário R\$ 10,00 por tonelada em comparação ao cenário “C-BASE”, o impacto social estimado da infraestrutura analisada é de um aumento de 0,1283% no IDHM. Esse cálculo é feito para todos os municípios produtores de soja no Brasil (vide equação

(42)), sendo a população o ponderador adotado para a construção do índice Δbr_c - valores apresentados na seção 4.2.1.

A Tabela 15 sintetiza as variáveis utilizadas nos modelos de Análise Envoltória de Dados propostos. *CCRo* e *BCCo* são os únicos modelos que utilizam todas as métricas descritas, dado o escopo mais amplo de análise.

Tabela 15. Variáveis utilizadas nos modelos de eficiência analisados.

Variável	Eficiência Econômica (<i>CCRoeco</i> e <i>BCCoeco</i>)	Eficiência Ambiental (<i>CCRoamb</i> e <i>BCCoamb</i>)	Eficiência Social (<i>CCRosoc</i> e <i>BCCosoc</i>)	Eficiência Econômica, Ambiental e Social (<i>CCRo</i> e <i>BCCo</i>)
Custo estimado para o investimento	<i>Input</i>	<i>Input</i>	<i>Input</i>	<i>Input</i>
Diferença nos custos totais	<i>Output</i>			<i>Output</i>
Carga movimentada pela infraestrutura	<i>Output</i>			<i>Output</i>
Taxa de utilização da capacidade de movimentação	<i>Output</i>			<i>Output</i>
Emissão de CO ₂		<i>Output</i> indesejável		<i>Output</i> indesejável
Perdas físicas		<i>Output</i> indesejável		<i>Output</i> indesejável
Área de influência			<i>Output</i>	<i>Output</i>
Impacto no IDH			<i>Output</i>	<i>Output</i>

Fonte: elaborado pelo autor.

A análise visa identificar, portanto, os projetos de investimento localizados na fronteira de eficiência. Para os casos em que houver mais de uma unidade eficiente, o desempate ocorrerá pelo uso do método do Índice Composto (Leta et al., 2005) – fronteira invertida. Por esse método é obtida a eficiência invertida das DMUs, em que os *inputs* são considerados *outputs* (e vice-versa). Busca-se identificar as unidades mais distantes da nova fronteira gerada, que é composta, tecnicamente, pelos piores casos. A partir desse resultado é calculado o Índice Composto (IC) pela equação (44), o qual é normalizado e utilizado como critério de classificação das unidades eficientes no modelo padrão. Em (44) *IC* representa o Índice Composto, *Ef_{pad}* o resultado do modelo de eficiência padrão e *Ef_{inv}* o resultado do modelo de eficiência da fronteira invertida.

$$IC = 0,5 \times Ef_{pad} + 0,5 \times (1 - Ef_{inv}) \quad (44)$$

Cabe acrescentar que a DEA foi aplicada por meio do uso do *software* R, via *Package* ‘*Benchmarking*’ (Bogetoft e Lars, 2019). O *script* é disponibilizado no APÊNDICE E e os dados de saída (tabelas dos resultados) no APÊNDICE F.

4. RESULTADOS E DISCUSSÃO

Nesse capítulo da tese será feita a discussão dos resultados obtidos nas duas etapas de análise anteriormente detalhadas. No item 4.1 serão apresentadas as considerações relativas à Etapa 1, cuja análise é baseada no modelo de minimização dos custos de transporte. Serão discutidos os principais impactos decorrentes da eventual existência das infraestruturas estudadas, dando enfoque maior para as informações que serão utilizadas como parâmetros na Análise Envoltória de Dados (Etapa 2, cujo resultado é tratado no item 4.2).

4.1. Etapa 1: Identificação dos impactos potenciais dos projetos de investimento em infraestrutura de transporte

Com o objetivo de simular a realidade brasileira para o ano de 2017 e servir de comparativo para a discussão que será apresentada sobre os projetos de infraestrutura, os resultados de “C-BASE” indicam que o custo médio de transporte da soja brasileira é de R\$ 155,80 por tonelada do grão. Esse custo engloba todas as operações em território brasileiro e o transporte marítimo. Ao desconsiderar os custos das movimentações em águas internacionais, tem-se o valor de R\$ 98,38 por tonelada como estimativa do custo médio.

Os municípios de Aripuanã (MT), Nova Ubiratã (MT) e Feliz Natal (MT) são as três localidades com maior custo médio de transporte do Brasil, ambas localizadas na região centro-norte do Estado do Mato Grosso. Essa Unidade da Federação é a que concentra os municípios com maiores custos de transporte no país. O custo ponderado para cada uma das localidades produtoras é ilustrado na Figura 32, sendo os pontos coloridos em tons avermelhados aqueles com as cifras mais elevadas.

Figura 32. Custo ponderado do transporte de soja por município em "C-BASE".
Fonte: elaborado pelo autor, baseado em resultados da pesquisa.

Traçando um comparativo entre os Estados brasileiros, o Mato Grosso é aquele com segundo maior custo médio de transporte em território nacional – R\$ 156,99 por tonelada de soja produzida. Paraná e Rio Grande do Sul, também relevantes na produção dessa oleaginosa, aparecem na décima sexta e décima sétima posições, respectivamente. Rondônia é a Unidade da Federação com o maior custo, de acordo com as estimativas resultantes do modelo matemático (vide Figura 33).

Figura 33. Custo médio de transporte estadual (Reais por tonelada) em "C-BASE".
Fonte: elaborado pelo autor, baseado em resultados da pesquisa.

Os resultados mostram que a emissão total de CO₂ existente nas operações do transporte de soja em território nacional (desconsiderando o transporte marítimo) é de aproximadamente 2,74 milhões de toneladas do gás, o que equivale a 23,91 quilogramas por tonelada de soja produzida no país. Além disso, 433,00 mil toneladas é a estimativa da quantidade do grão perdida ao longo das etapas do transporte de carga, o equivalente a 0,3778% da produção nacional.

A configuração ótima dos fluxos mostra que a matriz de transporte de soja no Brasil tem o modal rodoviário como responsável por 80,72% das movimentações totais do produto no país, cabendo o restante ao transporte multimodal. A modalidade de transporte ferroviária foi responsável por 14,87% das movimentações e a hidroviária por 4,41%. Os terminais de transbordo movimentaram, de forma conjunta, 26,73 milhões de toneladas. Rondonópolis (MT), Araguari (MG), Itaituba (PA), Maringá (PR) e Porto Velho (RO) foram os terminais com maiores embarques – 5,34, 3,68, 3,13, 2,52 e 2,09 milhões de toneladas de soja, respectivamente.

O comparativo com dados reais do ano de 2017 indica que a movimentação multimodal obtida como resultado em “C-BASE” correspondeu, em volume, a aproximadamente 80% das movimentações verificadas nos dados da ANTT (2019) e da ANTAQ (2019). Tem-se que alguns terminais de transbordo não tiveram sua capacidade operacional totalmente utilizada no modelo de minimização de custos de transporte. A adoção de diferentes estratégias comerciais e o elevado número de agentes transacionando no mercado brasileiro de soja são as principais justificativas para essa diferença encontrada.

A agregação por município das originações de soja, portanto, é considerada uma das causas dessa diferença entre os resultados do processo de modelagem e a realidade observada para o ano de 2017. Heady (1963 *apud* Caixeta Filho e Macaulay, 1994) mostra que o aumento do número de pontos de origem de carga (considerando, por exemplo, de forma individualizada os volumes e estratégias comerciais de cada agente atuante no mercado brasileiro) poderia acarretar em uma melhor aproximação com a realidade observada para o período em análise. Apesar disso, julga-se como efetivo a utilização dos resultados de “C-BASE” como representativo da realidade do transporte de soja no Brasil em 2017, sendo a diferença verificada inicialmente esperada no processo de formulação do modelo matemático. A adoção de municípios como nível de agregação da análise gera resultados bastante pertinentes para o estudo do comportamento dos fluxos de transporte.

Adentrando nas análises dos projetos de infraestrutura, a Figura 34 consolida os resultados relativos ao potencial de redução de custo de transporte de soja em território brasileiro. “C-FERROGRÃO-2” é o projeto com maior potencial, dentre os analisados. Os resultados do modelo apontam para uma redução de custos da ordem de R\$ 1,08 bilhão por ano caso essa

infraestrutura de transporte estivesse operando em 2017. “C-FERROGRÃO-1” também é caracterizado por um ganho econômico significativo – R\$ 715,22 milhões de economia em custos de transporte.

Na sequência aparecem os projetos relacionados às infraestruturas da Ferrovia de Integração Centro-Oeste abordados em “C-FICO+FNS-2” e “C-FICO-3”. As estimativas apontam para economias da ordem de R\$ 520,59 e R\$ 460,45 milhões, respectivamente. “C-FPARAENSE-2”, “C-FVILHENA” e “C-EMN-3” também aparecem bem classificados

Em comum, tais projetos de infraestrutura estão associados ao provimento de soluções logísticas de transporte mais competitivas para localidades produtoras localizadas no centro-norte do país. Conforme visto, os resultados obtidos em “C-BASE” mostram que essas localidades são as que apresentam os maiores custos.

Figura 34. Redução no custo de transporte em território brasileiro nos cenários analisados (valores em milhões de Reais).

Fonte: elaborado pelo autor, baseado em resultados da pesquisa.

Levando em consideração o custo total da cadeia de transporte, incluindo o transporte marítimo, os dois cenários que avaliam o projeto da Ferrogrão são os que apresentam maior potencial de ganho econômico. As estimativas apontam para uma redução de R\$ 1,07 bilhão no cenário “C-FERROGRÃO-2” e de R\$ 707,81 milhões em “C-FERROGRÃO-1”, conforme Figura 35. De forma similar, “C-FICO+FNS-2” e “C-FICO-3” aparecem em terceiro e quarto lugares, sendo “C-FIOL-1”, “C-FPANORAMA” e “C-FNS-2” caracterizados como os projetos de menor potencial para redução dos custos de transporte da cadeia nacional de produção de soja.

Figura 35. Redução no custo de transporte total nos cenários analisados (valores em milhões de Reais).

Fonte: elaborado pelo autor, baseado em resultados da pesquisa.

Pertinente ao potencial de movimentação de carga nas infraestruturas analisadas, o comparativo entre os cenários é apresentado na Figura 36.

Figura 36. Volume total de soja movimentado pelas infraestruturas projetadas (valores em toneladas).

Fonte: elaborado pelo autor, baseado em resultados da pesquisa.

Com valores expressos em toneladas de soja, “C-FNS-TOTAL”, “C-FICO+FNS-2” e “C-FICO+FNS-1” apresentaram os maiores volumes de captação de carga dentre todos os cenários. Ao considerar dados relativos ao ano de 2017, o potencial de movimentação de carga dessas infraestruturas é superior a 11 milhões de toneladas de grãos (maior valor igual a 17,48 milhões). Por outro lado, “C-FNS-2”, “C-FIOL-1” e “C-FMSSANTOS” foram os projetos que captaram os menores volumes de carga – total inferior a 3 milhões de toneladas.

Cabe adicionar que volume de carga captável pelas infraestruturas é dependente da competitividade (localização dos terminais de transbordo, valor do frete etc.) e da capacidade operacional máxima considerada como parâmetro no modelo matemático, que é função do número de terminais de transbordo do projeto. Ao se considerar a taxa de utilização da capacidade de movimentação instalada, “C-FNS-TOTAL”, “C-FICO+FNS-2” e “C-FICO+FNS-1” utilizaram 25,18%, 27,66% e 24,74% da sua capacidade, respectivamente (vide Figura 37). A totalidade da capacidade de movimentação considerada no processo de modelagem, por sua vez, é utilizada em “C-FPARAENSE-2”, “C-FERROGRÃO-2”, “C-EMN-2”, “C-FERROGRÃO-1”, “C-FVILHENA” e “C-H-MARABÁ”, indicando aderência dessas infraestruturas à demanda regional por soluções logísticas.

Figura 37. Taxa de utilização da capacidade de movimentação atribuída aos projetos de infraestrutura analisados (valores em percentual).

Fonte: elaborado pelo autor, baseado em resultados da pesquisa.

A representatividade das modalidades de transporte ferroviário e hidroviário nas movimentações de soja do Brasil é outro indicador passível de análise a partir dos resultados do modelo de minimização dos custos de transporte. Menor dependência do modal rodoviário é verificada em “C-FERROGRÃO-2”, com 73,29% do total de carga sendo movimentado por caminhões. Na sequência, “C-FPARAENSE-2” e “C-FNS-TOTAL” são os projetos que promovem o maior uso de modais alternativos ao rodoviário no transporte da oleaginosa. O outro extremo desse *ranking* é ocupado por “C-EMN-2”, “C-FNS-SUL” e “C-EMN-1”, conforme informações apresentadas na Figura 38.

Figura 38. Representatividade do transporte ferroviário e hidroviário na matriz de transporte de soja no Brasil (valores em porcentagem).

Fonte: elaborado pelo autor, baseado em resultados da pesquisa.

No tocante aos potenciais impactos ambientais dos projetos de infraestrutura analisados, a Figura 39 consolida informações relativas às estimativas das emissões de CO₂ nas operações de transporte de soja no Brasil com base em dados do ano de 2017.

“C-FERROGRÃO-2”, “C-FERROGRÃO-1”, “C-FPARAENSE-2”, “C-EMN-3” e “C-FVILHENA” são os projetos que potencialmente mais contribuem para a redução do nível de emissão de CO₂ nas operações de transporte. As estimativas obtidas apontam para uma redução de 16,04%, 9,92%, 7,68%, 7,50% e 7,16%, respectivamente, em comparação com o nível de emissão observado no cenário “C-BASE” (de aproximadamente 2,74 milhões de toneladas de CO₂ em 2017). Tais resultados estão relacionados com a redução das distâncias rodoviárias e maior

utilização dos modais alternativos de transporte. No outro extremo desse *ranking*, “C-FNS-TOTAL”, “C-FERROVIADOFRANGO” e “C-FNS-SUL” apresentam níveis de emissão superiores ao estimado em “C-BASE”, conferindo a esses projetos os piores índices de emissão de gás carbônico.

Figura 39. Estimativa da emissão de gás carbônico nas operações de transporte de soja (valores toneladas de CO₂).

Fonte: elaborado pelo autor, baseado em resultados da pesquisa.

Em termos de cálculo das perdas físicas de soja nas operações de transporte em território brasileiro, os resultados obtidos mostram que “C-EMN-2” e “C-FNS-SUL” apresentam os melhores indicadores. Com 442,14 e 442,67 mil toneladas perdidas, respectivamente, a presença de tais infraestruturas no cenário atual brasileiro apontam para uma estimativa de perda que oscila entre 0,3851% e 0,3863% da produção nacional. Por outro lado, “C-FERROGRÃO-2” e “C-FPARAENSE-2” são os cenários com as maiores estimativas de perdas: 0,4301% e 0,4197% do total produzido no Brasil, respectivamente. Estas, conforme dados apresentados na Figura 38, são as infraestruturas que mais contribuem para o aumento da multimodalidade no transporte de soja, sendo esse fator decisivo no cálculo das perdas.

A Figura 40 consolida o comparativo dos projetos no que diz respeito à estimativa das perdas físicas ao longo das etapas do transporte de soja.

Figura 40. Perdas físicas de soja durante as operações de transporte em território brasileiro (valores em toneladas).

Fonte: elaborado pelo autor, baseado em resultados da pesquisa.

O número de municípios pertencentes à área de influência dos projetos é apresentado na Figura 41. São consideradas partes dessa área as localidades que enviaram carga para a infraestrutura analisada nos respectivos cenários.

Figura 41. Número de municípios pertencentes à área de influência das infraestruturas (valores em número absoluto).

Fonte: elaborado pelo autor, baseado em resultados da pesquisa.

Caracterizado por uma extensão maior da obra, “C-FNS-TOTAL” apresentou como resultado uma área de influência formada por 314 municípios brasileiros produtores de soja. Na sequência “C-FERROVIADOFRANGO” e “C-FICO+FNS-1” aparecem com 240 e 157 localidades. O outro extremo é composto por “C-FERROGRÃO-1”, “C-FICO-1” e “C-EMN-2”, respectivamente com 9, 17 e 19 municípios. Tais projetos estão associados a uma percepção mais regionalizada (maior concentração) sobre os benefícios do investimento em termos de movimentação de carga.

O modelo para minimização dos custos considera a totalidade do território brasileiro, de forma a trazer reflexões sobre um planejamento nacional à logística de transporte. Porém, a depender da localização, as infraestruturas projetadas têm impactos distintos entre os Estados. Mato Grosso, Paraná, Rio Grande do Sul, Goiás e Mato Grosso do Sul, de forma conjunta, produzem mais de 75% da soja brasileira (vide dados apresentados na Tabela 10). Além desses, o Pará é a UF com maior aumento relativo da produção de soja entre 2008 e 2017 – incremento superior a 700,00%, de acordo com dados do IBGE (2017). Tecnicamente, estes tendem a ser os Estados com maior grau de influência nas políticas públicas para investimento em infraestrutura para o transporte de soja no Brasil, cabendo destaques relacionados aos projetos que trazem maiores reduções de custos para cada um deles.

Para os produtores de soja mato-grossenses, a Ferrogrão é o projeto de investimento com maior potencial para a redução dos custos de transporte. Os resultados mostram que “C-FERROGRÃO-2” e “C-FERROGRÃO-1” são os cenários que mais reduzem o custo médio do Mato Grosso – decréscimos de 19,6% e 12,4%, respectivamente. Na sequência aparecem “C-FICO+FNS-2” e “C-FICO-3”, elucidando importante benefício econômico associado ao projeto da Ferrovia de Integração Oeste-Leste para esse Estado.

O projeto da FICO também é relevante para o Mato Grosso do Sul. O cenário “C-FICO-3” aparece como aquele com maior potencial para a redução dos custos de transporte (em torno de 5,38%). Na sequência, 4,69% é a redução de custo verificada em “C-FPANTANAL” e 4,58% a verificada nos cenários “C-FPARAENSE-2” e “C-FICO-2”.

Goiás tem no projeto da Ferrovia do Pantanal o melhor cenário para a redução do custo médio de transporte. Diminuição em 11,97% no custo estadual é estimada em “C-FPANTANAL”. “C-FERROVIADOFRANGO” e “C-FDOURADOSPARANAGUÁ” são os projetos que aparecem na sequência. Nesses três cenários, não foi verificado o envio da soja goiana para os terminais de transbordo considerados nas análises dos projetos. No entanto, a estimativa de redução dos custos de transporte tem origem na liberação de capacidade em fluxos de transporte que eram cativas de outras regiões brasileiras (mercado interno e Porto de Santos, por exemplo).

Em se tratando da região Sul do país, “C-FDOURADOSPARANAGUÁ” é o projeto mais favorável para a redução do custo médio de transporte no Paraná. As estimativas mostram que se a Ferrovia Dourados-Paranaguá estivesse em operação, o Estado teria uma redução de 3,80% no custo anual do transporte da cadeia produtiva.

Para o Rio Grande do Sul, os maiores benefícios econômicos estão relacionados aos cenários “C-EMN-3”, “C-FICO-3” e “C-FICO+FNS-2”. Em nenhum dos três as infraestruturas projetadas receberam a soja de produtores rio-grandenses. De forma similar ao observado para Goiás, o benefício econômico para o setor no Estado mais ao Sul do Brasil é derivado da liberação de capacidade de transporte nas regiões próximas, fruto da intensificação das movimentações das demais Unidades da Federação para outros destinos. Cabe destacar que no Rio Grande do Sul as distâncias percorridas no transporte são menores, em comparação com grande parte dos demais Estados brasileiros, o que implica custos de transporte inferiores.

No Pará, importante fronteira agrícola dessa cadeia produtiva, os cenários com maior potencial de diminuição de custos estão relacionados à Ferrovia Paraense e à Hidrovia de Marabá. “C-FPARAENSE-2”, “C-H-MARABÁ” e “C-FPARAENSE-1” são os projetos que mais contribuem com a economia de custos no Estado – reduções estimadas de 16,49%, 9,91% e 8,79%, respectivamente.

4.2. Etapa 2: Análise de eficiência relativa dos projetos de investimento em infraestrutura de transporte

Conforme apresentado, é baixo o grau de convergência das demandas estaduais por investimentos em infraestrutura de transporte de soja no Brasil. Cada Estado, considerando exclusivamente o potencial de redução do custo médio de transporte, tem preferências que não necessariamente são as mesmas das localidades vizinhas. Aos tomadores de decisão da esfera federal, a ampliação do escopo da análise considerando elementos diversos de impactos econômicos, ambientais e sociais agrega novos argumentos no direcionamento da priorização dos investimentos para essa cadeia produtiva, conforme discussão dos resultados que será apresentada nesta parte da tese. Serão então apresentados os dados utilizados nos modelos de Análise Envoltória de Dados (*inputs* e *outputs*) propostos (detalhamento apresentado na Tabela 15), bem como discutidos os principais resultados obtidos.

4.2.1. Estatísticas descritivas das variáveis

Conforme definido no capítulo de metodologia (item 3.2), foram propostos quatro variantes para a análise de eficiência relativa dos cenários de investimento projetados. Uma que trata exclusivamente da eficiência econômica das infraestruturas, uma que trata apenas da eficiência ambiental, outra que é relacionada ao aspecto social, além de uma quarta variação que agrega informações das três dimensões de análise (modelo de eficiência econômica, ambiental e social) – vide Tabela 15. Este último é a proposta de análise central desta tese, sob a ótica do Governo Federal brasileiro como tomador de decisão sobre a priorização dos investimentos para a cadeia produtiva estudada.

Sem ainda discriminar os modelos, foram utilizadas oito variáveis. Parte das variáveis foram obtidas via modelo de minimização de custos de transporte, com a apresentação dos valores realizada anteriormente, na seção 4.1. É o caso das variáveis diferença nos custos totais (dados dos cenários apresentados na Figura 35), carga movimentada pela infraestrutura (Figura 36), taxa de utilização da capacidade de movimentação (Figura 37), emissão de CO₂ (Figura 39), perdas físicas (Figura 40) e área de influência (Figura 41).

Em custo estimado para o investimento, tem-se os valores apresentados na Tabela 16, assim como a fonte de obtenção das informações/estimativas. Essa variável trata do montante de investimento monetário necessário para que sejam realizadas as obras de implementação das infraestruturas analisadas. Os valores utilizados no modelo de análise de eficiência estão representados em milhões de Reais.

Tabela 16. Estimativas dos investimentos necessários para concretização dos projetos de investimento em infraestrutura de transporte.

Cenário	Custo estimado (R\$ milhões)	Fonte(s) de obtenção da informação
C-EMN-1	6.000,00	Informação da proposta de investimento na expansão da Malha Norte (Grupo Cultivar, 2018).
C-EMN-2	2.088,89	Estimativa baseada nas informações utilizadas em “C-EMN-1”, com correção proporcional à distância do trecho ferroviário.
C-EMN-3	6.928,99	Estimativa baseada nas informações utilizadas em “C-EMN-1”, com correção proporcional à distância do trecho ferroviário.

C-FDOURADOSPARANAGUÁ	10.000,00	Informação de propostas de investimento ferroviário no Paraná (Gazeta do Povo, 2019).
C-FERROGRÃO-1	16.600,00	Programa de Parcerias de Investimento (2020).
C-FERROGRÃO-2	19.233,23	Estimativa baseada nas informações utilizadas em “C-FERROGRÃO-1”, com correção proporcional à distância do trecho ferroviário.
C-FERROVIADOFRANGO	14.500,00	Informação de propostas de investimento ferroviário em Santa Catarina (Portal O Município, 2018).
C-FICO+FNS-1	5.530,00	Calculado com base nas informações dos cenários “C-FICO-1” e “C-FNS-1”.
C-FICO+FNS-2	9.239,08	Calculado com base nas informações dos cenários “C-FICO-1” e “C-FNS-1”.
C-FICO-1	2.730,00	Programa de Parcerias de Investimento (2020).
C-FICO-2	6.439,08	Estimativa baseada nas informações utilizadas em “C-FICO-1”, com correção proporcional à distância do trecho ferroviário.
C-FICO-3	11.055,79	Estimativa baseada nas informações utilizadas em “C-FICO-1”, com correção proporcional à distância do trecho ferroviário.
C-FIOL-1	3.250,00	Programa de Parcerias de Investimento (2020).
C-FIOL-2	6.400,00	Programa de Parcerias de Investimento (2020).
C-FIOL-3	9.917,63	Estimativa baseada nas informações utilizadas “C-FIOL-1” e “C-FIOL-2”, com correção proporcional à distância do trecho ferroviário.
C-FMSSANTOS	3.929,14	Estimativa baseada nos custos por quilômetro do cenário “C-FNS-1”, com estimativa de distância da obra obtida via <i>software</i> MAPITUDE.
C-FNS-1	2.800,00	Ministério da Infraestrutura (2019).
C-FNS-2	3.700,00	VALEC (2020).
C-FNS-SUL	8.700,00	Governo do Estado do Rio Grande do Sul (2015).

C-FNS-TOTAL	15.200,00	Calculado com base nas informações dos cenários “C-FNS-1”, “C-FNS-2” e “C-FNS-SUL”.
C-FPANORAMA	964,34	Estimativa baseada nos custos por quilômetro do cenário “C-FNS-1”, com estimativa de distância da obra obtida via <i>software</i> MAPTITUDE.
C-FPANTANAL	4.043,97	Estimativa baseada nos custos por quilômetro do cenário “C-FICO-1”, com estimativa de distância da obra obtida via <i>software</i> MAPTITUDE.
C-FPARAENSE-1	14.000,00	Informação sobre o investimento apresentadas em uma matéria elaborada pelo Portal G1 (2017).
C-FPARAENSE-2	6.460,91	Estimativa baseada nas informações utilizadas em “C-FPARAENSE-1” e em “C-H-MARABÁ”, com correção proporcional à distância do trecho ferroviário.
C-FVILHENA	5.802,32	Estimativa baseada nos custos por quilômetro do cenário “C-FICO-1”, com estimativa de distância da obra obtida via <i>software</i> MAPTITUDE.
C-H-MARABÁ	560,00	Informação sobre o investimento apresentadas em uma matéria elaborada pelo Portal G1 (2017).

Fonte: elaborado pelo autor.

A variável impacto no IDH tem seus valores apresentados na Figura 42. As informações foram calculadas por meio das expressões matemáticas (42) e (43). Os resultados mostram que dois projetos atrelados ao desenvolvimento da Ferrovia Norte-Sul são os que apresentam maiores benefícios sociais sob a ótica desse índice – “C-FNS-TOTAL” e “C-FICO+FNS-2”. Por esse indicador, a concretização das obras previstas no cenário “C-FNS-TOTAL” traria um aumento médio de 0,0522% no Índice de Desenvolvimento Humano Municipal das localidades produtoras de soja no Brasil. Para “C-FICO+FNS-2”, 0,0491% é o aumento estimado para o IDH. Na sequência “C-FERROGRÃO-2” aparece na terceira colocação desse *ranking* (0,0425%). O outro extremo é formado pelos cenários “C-FMSSANTOS” e “C-FPANORAMA”, com investimentos trazendo os menores incrementos médios estimados para o IDHM (0,0135% e 0,0161%, respectivamente).

Figura 42. Estimativa de impacto da infraestrutura no IDH dos municípios produtores de soja.
Fonte: elaborado pelo autor.

A Tabela 17 agrega informações de todas as variáveis utilizadas nos modelos de eficiência, consolidando as principais estatísticas descritivas das mesmas.

Tabela 17. Estatística descritiva das variáveis.

Variável	Tipologia	Média	Desvio padrão	Primeiro quartil	Mediana	Terceiro quartil
Custo estimado para o investimento (milhões de Reais)	<i>input</i>	7.541,28	5.040,36	3.757,28	6.419,54	9.979,41
Diferença nos custos totais (milhões de Reais)	<i>output</i>	302,78	214,31	184,49	214,17	374,37
Carga movimentada pela infraestrutura (toneladas)	<i>output</i>	7.260.116,54	3.799.152,24	4.549.879,26	5.691.006,74	9.918.413,06
Taxa de utilização da capacidade de movimentação (%)	<i>output</i>	53,94%	29,24%	28,43%	49,83%	70,93%
Emissão de CO ₂ (toneladas)	<i>output</i> indesejável	2.625.036,52	114.611,83	2.562.094,12	2.631.642,28	2.671.504,07
Perdas Físicas (toneladas)	<i>output</i> indesejável	453.917,69	12.118,31	445.562,74	450.392,10	457.193,00
Área de Influência (número de municípios)	<i>output</i>	74,35	77,67	24,25	35,00	130,75
Impacto no IDH (%)	<i>output</i>	0,0266%	0,0102%	0,0195%	0,0241%	0,0299%

Fonte: elaborado pelo autor.

4.2.2. A eficiência dos projetos de investimento em infraestrutura de transporte

A discussão dos resultados da análise de eficiência dos projetos de infraestrutura é iniciada pelos modelos com característica de retornos constantes de escala (CCR).

A execução de *CCRoeco* resultou em uma eficiência média dos projetos igual a 16,91%. Nesse modelo de dimensão econômica, “C-H-MARABÁ” é o único projeto localizado na fronteira de eficiência, não havendo folgas na análise do resultado – ou seja, a DMU é um eficiente verdadeiro. Fato relevante para esse resultado diz respeito à variável de *input* do modelo (custo estimado para o investimento). No projeto para a viabilização da hidrovía de Marabá (PA), tem-se

um custo significativamente menor do que o custo atrelado aos demais casos comparados, o que o beneficia em um modelo com retornos constantes de escala.

Na sequência do *ranking* aparecem “C-FPANORAMA” e “C-FNS-1”, com *scores* de eficiência iguais a 36,57% e 34,82%, respectivamente. Nesses casos, para que os projetos atinjam a eficiência econômica, são demandados aumentos equiproporcionais nos *outputs* que ultrapassam 60% dos níveis estabelecidos na análise. Nota-se, portanto, uma distância significativa desses e dos demais projetos ineficientes em relação à fronteira. O outro extremo da lista é ocupado pela DMU “C-FPARAENSE-1” (eficiência econômica igual a 4,21%).

A Tabela 18 sintetiza as informações relativas ao *score* de eficiência econômica do modelo *CCRoeco*.

Tabela 18. Resultados do modelo *CCRoeco*.

<i>Ranking</i>	DMU	Eficiência
1º	C-H-MARABÁ	100,00%
2º	C-FPANORAMA	36,57%
3º	C-FNS-1	34,82%
4º	C-EMN-2	26,81%
5º	C-FICO+FNS-1	22,54%
6º	C-FPARAENSE-2	17,34%
7º	C-FICO+FNS-2	16,76%
8º	C-EMN-1	13,73%
9º	C-FICO-1	13,54%
10º	C-FVILHENA	13,47%
11º	C-FICO-2	13,06%
12º	C-EMN-3	13,04%
13º	C-FNS-TOTAL	12,06%
14º	C-FERROGRÃO-2	11,55%
15º	C-FPANTANAL	11,47%
16º	C-FDOURADOSPARANAGUÁ	10,61%
17º	C-FICO-3	10,05%
18º	C-FIOL-1	9,39%
19º	C-FERROGRÃO-1	8,80%
20º	C-FNS-2	8,10%
21º	C-FMSSANTOS	7,85%
22º	C-FIOL-2	6,95%
23º	C-FNS-SUL	6,94%
24º	C-FIOL-3	5,21%
25º	C-FERROVIADOFRANGO	4,89%
26º	C-FPARAENSE-1	4,21%
<i>Média da eficiência</i>		<i>16,91%</i>

Fonte: elaborado pelo autor.

No modelo *CCRoamb*, a eficiência ambiental também é verificada apenas para o projeto da hidrovia de Marabá (PA) – “C-H-MARABÁ” (também sem folgas na análise dos resultados). Com retornos constantes de escala, tal projeto novamente se destaca de forma bastante significativa dos demais casos analisados, muito em função do menor investimento necessário para sua viabilização. O segundo colocado é o projeto “C-FPANORAMA”, com 58,47%. Nesse caso, o atingimento da fronteira de eficiência é possível a partir de um aumento equiproporcional de 41,53% nos *outputs*.

As duas DMUs referentes ao projeto da Ferrogrão (“C-FERROGRÃO-1” e “C-FERROGRÃO-2”) e uma da Ferrovia Norte Sul (“C-FNS-TOTAL”) ocupam as últimas posições nessa classificação da eficiência ambiental. A eficiência média desse modelo também é baixa (15,33%), conforme demonstram os dados apresentados na Tabela 19.

Tabela 19. Resultados do modelo *CCRoamb*.

<i>Ranking</i>	DMU	Eficiência
1º	C-H-MARABÁ	100,00%
2º	C-FPANORAMA	58,47%
3º	C-EMN-2	27,28%
4º	C-FICO-1	20,68%
5º	C-FNS-1	19,92%
6º	C-FIOL-1	17,43%
7º	C-FNS-2	15,36%
8º	C-FMSSANTOS	14,40%
9º	C-FPANTANAL	13,83%
10º	C-FICO+FNS-1	10,07%
11º	C-FVILHENA	9,84%
12º	C-EMN-1	9,48%
13º	C-FPARAENSE-2	8,89%
14º	C-FIOL-2	8,75%
15º	C-FICO-2	8,74%
16º	C-EMN-3	8,27%
17º	C-FNS-SUL	6,54%
18º	C-FICO+FNS-2	6,15%
19º	C-FIOL-3	5,62%
20º	C-FDOURADOSPARANAGUÁ	5,46%
21º	C-FICO-3	5,09%
22º	C-FPARAENSE-1	3,99%
23º	C-FERROVIADOFRANGO	3,86%
24º	C-FERROGRÃO-1	3,54%
25º	C-FNS-TOTAL	3,54%
26º	C-FERROGRÃO-2	3,28%
<i>Média da eficiência</i>		<i>15,33%</i>

Fonte: elaborado pelo autor.

Pertinente ao modelo de dimensão social, os resultados de *CCRosoc* também apontam “C-H-MARABÁ” como o único localizado na fronteira. A eficiência também é comprovada pela ausência de folgas, assim como nos modelos apresentados anteriormente. A média para a eficiência social das DMUs é de 17,90%, valor também considerado baixo. “C-FNS-1” aparece em segundo lugar nesse *ranking*, com 49,84% de eficiência. Com resultados piores, “C-FIOL-3”, “C-FPARAENSE-1” e “C-FERROGRÃO-1” ocupam as últimas posições da eficiência social dos projetos, com *scores* inferiores a 5%.

A Tabela 20 sintetiza os resultados desse modelo de eficiência social com retornos constantes de escala.

Tabela 20. Resultados do modelo *CCRosoc*.

<i>Ranking</i>	DMU	Eficiência
1º	C-H-MARABÁ	100,00%
2º	C-FNS-1	49,84%
3º	C-FPANORAMA	40,05%
4º	C-FICO+FNS-1	26,06%
5º	C-FNS-TOTAL	18,96%
6º	C-EMN-2	18,70%
7º	C-FICO-1	17,36%
8º	C-FIOL-1	16,33%
9º	C-FNS-SUL	15,30%
10º	C-FERROVIADOFRANGO	15,20%
11º	C-FPANTANAL	14,71%
12º	C-FICO+FNS-2	14,51%
13º	C-FPARAENSE-2	13,78%
14º	C-FDOURADOSPARANAGUÁ	13,04%
15º	C-FNS-2	11,59%
16º	C-FICO-2	10,99%
17º	C-EMN-3	10,36%
18º	C-EMN-1	10,13%
19º	C-FICO-3	8,73%
20º	C-FMSSANTOS	8,26%
21º	C-FIOL-2	7,29%
22º	C-FVILHENA	6,76%
23º	C-FERROGRÃO-2	5,30%
24º	C-FIOL-3	4,85%
25º	C-FPARAENSE-1	4,21%
26º	C-FERROGRÃO-1	3,11%
<i>Média da eficiência</i>		<i>17,90%</i>

Fonte: elaborado pelo autor.

Os resultados referentes ao modelo *CCRo* são apresentados na Tabela 21. Este, conforme definido anteriormente, é composto por variáveis das três esferas de análise: econômica, ambiental e social.

A execução do modelo resultou inicialmente em nove DMUs com 100% de eficiência, nenhuma sendo considerada como falso eficiente. A partir da aplicação do método de desempate (LETA et al., 2015), “C-FPARAENSE-2” é tido como o projeto mais eficiente, conforme resultados do Índice Composto Normalizado. Trata-se da unidade de análise mais distante da fronteira de eficiência invertida (*score* de 46,50%), a qual serve como *benchmark* para onze dos projetos de infraestrutura analisados – de acordo com os resultados do modelo de eficiência padrão.

Tabela 21. Resultados do modelo *CCRo*.

<i>Ranking</i>	DMU	Ef. Padrão	Ef. Invertida	Índice Composto	Índice Composto Normalizado
1º	C-FPARAENSE-2	100,00%	46,50%	76,75%	100,00%
2º	C-H-MARABÁ	100,00%	58,57%	70,71%	92,14%
3º	C-FICO+FNS-1	100,00%	60,83%	69,58%	90,67%
4º	C-FNS-1	100,00%	69,18%	65,41%	85,23%
5º	C-FICO+FNS-2	100,00%	73,83%	63,08%	82,19%
6º	C-EMN-1	85,98%	71,77%	57,11%	74,41%
7º	C-FNS-TOTAL	100,00%	87,88%	56,06%	73,04%
8º	C-FICO-3	91,53%	79,44%	56,05%	73,02%
9º	C-EMN-3	82,74%	74,31%	54,22%	70,64%
10º	C-FVILHENA	99,14%	92,36%	53,39%	69,56%
11º	C-FDOURADOSPARANAGUÁ	75,72%	70,28%	52,72%	68,69%
12º	C-FERROGRÃO-2	100,00%	98,70%	50,65%	66,00%
13º	C-EMN-2	100,00%	100,00%	50,00%	65,15%
14º	C-FERROGRÃO-1	100,00%	100,00%	50,00%	65,15%
15º	C-FPANTANAL	73,96%	74,25%	49,86%	64,96%
16º	C-FICO-2	77,31%	90,95%	43,18%	56,26%
17º	C-FERROVIADOFRANGO	81,08%	100,00%	40,54%	52,82%
18º	C-FIOL-1	71,61%	98,57%	36,52%	47,58%
19º	C-FNS-SUL	71,43%	100,00%	35,71%	46,53%
20º	C-FIOL-2	53,09%	84,07%	34,51%	44,96%
21º	C-FPANORAMA	66,06%	98,01%	34,02%	44,33%
22º	C-FICO-1	66,97%	100,00%	33,48%	43,63%
23º	C-FPARAENSE-1	63,07%	100,00%	31,54%	41,09%
24º	C-FNS-2	60,38%	100,00%	30,19%	39,33%
25º	C-FIOL-3	48,55%	100,00%	24,28%	31,63%
26º	C-FMSSANTOS	41,07%	100,00%	20,54%	26,76%
<i>Média da eficiência</i>		<i>81,14%</i>	<i>85,75%</i>	<i>47,70%</i>	<i>62,14%</i>

Fonte: elaborado pelo autor.

Nessa mesma ordenação, cuja média de eficiência foi de 62,14%, “C-H-MARABÁ” e “C-FICO+FNS-1” aparecem na segunda e terceira posições, com *scores* de eficiência superiores a 90%. Ambos tiveram eficiência de 100% no modelo padrão e estão também entre os mais distantes da forma invertida da fronteira.

Pelos resultados apresentados, “C-FPARAENSE-2” e “C-H-MARABÁ” se destacam dos demais projetos nos modelos de retornos constantes de escala. Ambos compartilham de área de influência similar nas movimentações de soja, as quais englobam basicamente os estados de Mato Grosso, Pará e Tocantins. Ressalta-se também que “C-FPARAENSE-2” é uma derivação da infraestrutura projetada em “C-H-MARABÁ”, composta pela utilização em conjunto das modalidades de transporte ferroviário e hidroviário.

Cabe consideração sobre o projeto idealizado em “C-FICO+FNS-1”. As movimentações dessa infraestrutura estão também associadas aos estados de Mato Grosso do Sul, Goiás, São Paulo e Minas Gerais (além dos estados mencionados para as DMUs anteriormente retratadas). De forma adicional à boa classificação dentre os eficientes, recorda-se o fato de que os investimentos previstos para a Ferrovia Norte Sul já se encontram em um *status* avançado – concessão já realizada. Tais fatos justificam a priorização desse empreendimento como parte das políticas públicas do Governo Federal brasileiro para a cadeia de transporte da soja, via viabilização do trecho da Ferrovia de Integração Centro-Oeste.

De forma a isolar os efeitos de escala dos projetos analisados, abaixo serão discutidos os resultados dos modelos com retornos variáveis de escala: *BCCoeco*, *BCCoamb*, *BCCosoc* e *BCCo*. Esses modelos tratam exclusivamente da eficiência técnica das DMUs.

O modelo de eficiência econômica *BCCoeco* inicialmente resultou em dez empates de unidades eficientes. Dessas, três foram consideradas como falsos eficientes por haver folgas na análise dos resultados – “C-EMN-2”, “C-FVILHENA” e “C-FERROGRÃO-1”.

Pelos cálculos da fronteira invertida, o resultado do Índice Composto Normalizado trata “C-H-MARABÁ” como a DMU mais eficiente. Essa unidade, além da eficiência no modelo padrão, é a mais distante da fronteira invertida, conforme mostra a Tabela 22. Na sequência, “C-EMN-2”, “C-FNS-1” e “C-FICO+FNS-1” aparecem na segunda, terceira e quarta posições. Ambos com eficiência padrão igual a 100%, porém o cenário atrelado ao investimento de expansão da Malha Norte é tido como falso eficiente no modelo padrão. No outro extremo do *ranking* aparece “C-FMSSANTOS”, com *score* de eficiência do IC normalizado inferior a 20%.

Tabela 22. Resultados do modelo *BCCoeco*.

<i>Ranking</i>	DMU	Ef. Padrão	Ef. Invertida	Índice Composto	Índice Composto Normalizado
1º	C-H-MARABÁ	100,00%	4,14%	97,93%	100,00%
2º	C-EMN-2	100,00%	18,33%	90,83%	92,75%
3º	C-FNS-1	100,00%	19,22%	90,39%	92,30%
4º	C-FICO+FNS-1	100,00%	37,03%	81,48%	83,21%
5º	C-FVILHENA	100,00%	40,65%	79,67%	81,36%
6º	C-FPARAENSE-2	100,00%	41,19%	79,41%	81,09%
7º	C-FPANORAMA	62,98%	16,99%	73,00%	74,54%
8º	C-EMN-1	82,77%	38,84%	71,97%	73,49%
9º	C-FICO+FNS-2	100,00%	60,68%	69,66%	71,13%
10º	C-EMN-3	80,84%	44,46%	68,19%	69,63%
11º	C-FICO-2	70,27%	43,98%	63,14%	64,48%
12º	C-FICO-3	80,44%	69,26%	55,59%	56,76%
13º	C-FPANTANAL	55,94%	45,48%	55,23%	56,40%
14º	C-FDOURADOSPARANAGUÁ	74,08%	66,95%	53,56%	54,70%
15º	C-FERROGRÃO-1	100,00%	100,00%	50,00%	51,06%
16º	C-FERROGRÃO-2	100,00%	100,00%	50,00%	51,06%
17º	C-FNS-TOTAL	100,00%	100,00%	50,00%	51,06%
18º	C-FICO-1	44,12%	45,48%	49,32%	50,36%
19º	C-FNS-SUL	46,65%	66,77%	39,94%	40,79%
20º	C-FIOL-2	44,66%	70,30%	37,18%	37,97%
21º	C-FIOL-1	54,47%	81,94%	36,27%	37,03%
22º	C-FNS-2	53,51%	100,00%	26,76%	27,32%
23º	C-FPARAENSE-1	52,65%	100,00%	26,33%	26,88%
24º	C-FIOL-3	40,05%	94,89%	22,58%	23,06%
25º	C-FERROVIADOFRANGO	43,92%	100,00%	21,96%	22,42%
26º	C-FMSSANTOS	36,04%	100,00%	18,02%	18,40%
<i>Média da eficiência</i>		<i>73,98%</i>	<i>61,79%</i>	<i>56,09%</i>	<i>57,28%</i>

Fonte: elaborado pelo autor.

Em suma, “C-H-MARABÁ”, “C-FNS-1” e “C-FICO+FNS-1” aparecem como as opções de investimento mais eficientes sob o ponto de vista econômico. “C-EMN-2” também é destacado entre os melhores a partir da aplicação do método de desempate adotado, mas é tido como falso eficiente no modelo de eficiência padrão.

No caso específico sobre o projeto para a viabilização do trecho hidroviário a partir do município de Marabá (PA), a eficiência econômica é verificada tanto em *CCRoeco* como em *BCCoeco*. A estimativa da economia potencial em custos de transporte de R\$ 271,49 milhões e a movimentação de 5,34 milhões de toneladas com 100% da capacidade de transporte instalada, além do menor custo associado ao investimento, fazem desse o melhor projeto sob a perspectiva econômica.

“C-FNS-1” e “C-FICO+FNS-1” também são destaques sob essa mesma ótica, sendo importante destacar novamente que o trecho da Ferrovia Norte Sul considerado em ambos os cenários já foi concedido à iniciativa privada, com investimentos mais próximos de serem concretizados. Dessa forma, a parte relativa ao projeto da Ferrovia de Integração Centro-Oeste também é vista como relevante na consolidação das políticas públicas de investimento em infraestrutura de transporte para a cadeia produtiva analisada.

A Tabela 23 consolida os resultados de *BCCoamb*. No modelo de eficiência padrão, seis DMUs são eficientes – “C-H-MARABÁ”, “C-FPANORAMA”, “C-EMN-1”, “C-EMN-2”, “C-EMN-3” e “C-FERROGRÃO-2”. Todas essas tidas como eficientes verdadeiros, dada a ausência de folgas. A média das eficiências nesse caso foi de 98,69%, sendo as últimas colocações desse *ranking* ocupadas por “C-FICO+FNS-1”, “C-FDOURADOSPARANAGUÁ” e “C-FNS-TOTAL”.

A partir dos cálculos para desempate dos projetos localizados na fronteira, destaque maior é dado para “C-H-MARABÁ”, “C-FPANORAMA” e “C-EMN-2”. Essas são as três DMUs com maior grau de eficiência ambiental no modelo com retornos variáveis de escala – as mais distantes da fronteira no modelo de eficiência invertida.

Tabela 23. Resultados do modelo *BCCoamb*.

<i>Ranking</i>	DMU	Ef. Padrão	Ef. Invertida	Índice Composto	Índice Composto Normalizado
1º	C-H-MARABÁ	100,00%	3,39%	98,31%	100,00%
2º	C-FPANORAMA	100,00%	6,14%	96,93%	98,60%
3º	C-EMN-2	100,00%	12,80%	93,60%	95,21%
4º	C-FICO-1	99,08%	16,84%	91,12%	92,69%
5º	C-FNS-1	98,35%	17,33%	90,51%	92,07%
6º	C-FIOL-1	99,39%	20,40%	89,50%	91,04%
7º	C-FNS-2	99,73%	23,19%	88,27%	89,79%
8º	C-FMSSANTOS	99,30%	24,73%	87,29%	88,79%
9º	C-FPANTANAL	98,10%	25,54%	86,28%	87,77%
10º	C-FVILHENA	98,77%	34,26%	82,25%	83,67%
11º	C-EMN-1	100,00%	35,64%	82,18%	83,60%
12º	C-FICO+FNS-1	97,80%	34,17%	81,81%	83,23%
13º	C-FICO-2	98,72%	38,71%	80,01%	81,38%
14º	C-EMN-3	100,00%	40,72%	79,64%	81,01%
15º	C-FIOL-2	98,33%	39,71%	79,31%	80,68%
16º	C-FICO+FNS-2	98,10%	54,86%	71,62%	72,85%
17º	C-FIOL-3	97,98%	61,17%	68,41%	69,59%
18º	C-FICO-3	98,07%	66,53%	65,77%	66,90%
19º	C-FDOURADOSPARANAGUÁ	95,85%	64,76%	65,54%	66,67%
20º	C-FPARAENSE-1	98,05%	85,15%	56,45%	57,42%
21º	C-FERROGRÃO-1	99,18%	94,31%	52,44%	53,34%
22º	C-FERROGRÃO-2	100,00%	100,00%	50,00%	50,86%
23º	C-FNS-SUL	99,88%	100,00%	49,94%	50,80%
24º	C-FPARAENSE-2	98,56%	100,00%	49,28%	50,13%
25º	C-FERROVIADOFRANGO	98,24%	100,00%	49,12%	49,97%
26º	C-FNS-TOTAL	94,39%	100,00%	47,20%	48,01%
<i>Média da eficiência</i>		<i>98,69%</i>	<i>50,01%</i>	<i>74,34%</i>	<i>75,62%</i>

Fonte: elaborado pelo autor.

Os resultados de *BCCoamb* mostram que as DMUs de maior destaque são as três com maior grau de eficiência ambiental em *CCRoamb* – “C-H-MARABÁ” é a única localizada na fronteira no modelo com retornos constantes de escala.

Em suma, a eficiência ambiental dos projetos de investimento para a cadeia da soja no Brasil tem relação direta com as movimentações originadas no Mato Grosso, Pará e Tocantins. Tais estados são considerados como sendo a fronteira agrícola da produção dessa oleaginosa, ambos parte da área de influência do projeto retratado em “C-H-MARABÁ”. Reforço nesse fato ocorre a partir das análises de *BCCoamb*, que mostram que a eficiência ambiental tem importante relação com as movimentações originadas no Mato Grosso e Mato Grosso do Sul – áreas de influência de “C-EMN-2” e “C-FPANORAMA”, respectivamente.

Adentrando na análise da eficiência social, o resultado da eficiência padrão do modelo *BCCosoc* trás um score médio de 69,26%, estando quatro DMUs localizadas na fronteira: “C-FICO+FNS-2”, “C-FNS-1”, “C-FNS-TOTAL” e “C-H-MARABÁ”. Dessas, pelo critério de desempate, “C-H-MARABÁ” e “C-FNS-1” se destacam na primeira e na segunda colocações (vide Tabela 24) como os projetos com melhor impacto social.

É importante relacionar que “C-H-MARABÁ” já havia se destacado como o único projeto eficiente sob o ponto de vista social em *CCRosoc*. Nesse mesmo modelo, “C-FNS-1” aparecia como a DMU mais próxima da fronteira, porém ineficiente.

Destaca-se o fato de que o trecho relativo à Ferrovia Norte Sul é relacionado a uma ampla área de influência (152 municípios), pertencente a várias Unidades da Federação. Esta também é característica do projeto hidroviário de Marabá (PA). Associado a isso, o potencial de redução de custos de ambos os projetos os classificam também como importantes no índice que mede o impacto médio no IDHM - 0,0296% para “C-FNS-1” e 0,0234% para “C-H-MARABÁ”. Tais fatores convergem para a posição de destaque desses projetos ao se analisar a dimensão social dos cenários.

Tabela 24. Resultados do modelo *BCCosoc*.

<i>Ranking</i>	DMU	Ef. Padrão	Ef. Invertida	Índice Composto	Índice Composto Normalizado
1º	C-H-MARABÁ	100,00%	3,33%	98,34%	100,00%
2º	C-FNS-1	100,00%	15,90%	92,05%	93,61%
3º	C-FICO+FNS-1	89,44%	30,90%	79,27%	80,61%
4º	C-FPANORAMA	65,61%	12,03%	76,79%	78,09%
5º	C-FICO+FNS-2	100,00%	48,04%	75,98%	77,27%
6º	C-FPARAENSE-2	86,99%	35,19%	75,90%	77,18%
7º	C-FIOL-1	70,66%	19,49%	75,59%	76,86%
8º	C-FPANTANAL	73,69%	23,77%	74,96%	76,23%
9º	C-FICO-1	66,36%	19,75%	73,31%	74,55%
10º	C-FICO-2	72,41%	36,58%	67,92%	69,07%
11º	C-EMN-2	58,43%	25,14%	66,64%	67,77%
12º	C-EMN-3	70,90%	39,24%	65,83%	66,94%
13º	C-EMN-1	64,23%	35,13%	64,55%	65,64%
14º	C-FICO-3	80,47%	58,35%	61,06%	62,10%
15º	C-FNS-TOTAL	100,00%	79,03%	60,49%	61,51%
16º	C-FNS-2	54,76%	34,16%	60,30%	61,32%
17º	C-FDOURADOSPARANAGUÁ	63,13%	57,39%	52,87%	53,77%
18º	C-FIOL-2	47,83%	48,05%	49,89%	50,74%
19º	C-FERROVIADOFRANGO	78,73%	86,07%	46,33%	47,11%
20º	C-FNS-SUL	63,30%	75,75%	43,78%	44,52%
21º	C-FERROGRÃO-2	81,55%	100,00%	40,77%	41,46%
22º	C-FVILHENA	42,06%	69,00%	36,53%	37,15%
23º	C-FIOL-3	40,63%	69,24%	35,69%	36,30%
24º	C-FPARAENSE-1	47,75%	82,42%	32,67%	33,22%
25º	C-FERROGRÃO-1	41,27%	100,00%	20,64%	20,99%
26º	C-FMSSANTOS	40,60%	100,00%	20,30%	20,64%
<i>Média da eficiência</i>		<i>69,26%</i>	<i>50,15%</i>	<i>59,56%</i>	<i>60,56%</i>

Fonte: elaborado pelo autor.

No modelo que considera as três esferas de análise (*BCCo*), o resultado da eficiência padrão culmina em um empate entre 16 DMUs. Dessas, três são consideradas como falsos eficientes pela análise das folgas nos resultados: “C-FICO-3”, “C-FNS-SUL” e “C-FVILHENA” – restando treze projetos eficientes.

Pelo critério de desempate, os dados do Índice Composto Normalizado retornam que “C-EMN-3” é a DMU com maior grau de eficiência. Esta é seguida por “C-EMN-1” e “C-H-MARABÁ”. Tais informações estão apresentadas na Tabela 25.

É destacado, portanto, que o projeto relacionado à expansão da ferrovia Malha Norte é o mais eficiente ao se considerar aspectos econômicos, ambientais e sociais, dentre os casos analisados. O projeto que prevê a expansão da malha ferroviária de Rondonópolis (MT) até Sinop (MT) – trecho analisado em “C-EMN-3” – é o que melhor atende, de forma conjunta, as três

dimensões envolvidas no estudo. A expansão até Sorriso (MT) também se mostra relevante, visto que “C-EMN-1” aparece em segundo lugar após o desempate das unidades eficientes.

“C-H-MARABÁ” aparece em terceiro lugar no *ranking* das unidades eficientes pelo modelo padrão, reforçando a relevância desse projeto no desenvolvimento de soluções de transporte mais competitivas para a cadeia brasileira de produção de soja. Além disso, esse projeto já havia sido destacado no modelo com retornos constantes de escala (*CCRo*).

Tabela 25. Resultados do modelo *BCCo*.

<i>Ranking</i>	DMU	Ef. Padrão	Ef. Invertida	Índice Composto	Índice Composto Normalizado
1º	C-EMN-3	100,00%	97,38%	51,31%	100,00%
2º	C-EMN-1	100,00%	97,56%	51,22%	99,83%
3º	C-H-MARABÁ	100,00%	98,37%	50,82%	99,04%
4º	C-FICO+FNS-1	100,00%	98,75%	50,63%	98,67%
5º	C-FICO-3	100,00%	99,16%	50,42%	98,26%
6º	C-FICO+FNS-2	100,00%	99,61%	50,19%	97,83%
7º	C-FNS-1	100,00%	99,90%	50,05%	97,55%
8º	C-EMN-2	100,00%	100,00%	50,00%	97,45%
9º	C-FERROGRÃO-1	100,00%	100,00%	50,00%	97,45%
10º	C-FERROGRÃO-2	100,00%	100,00%	50,00%	97,45%
11º	C-FERROVIADOFRANGO	100,00%	100,00%	50,00%	97,45%
12º	C-FNS-SUL	100,00%	100,00%	50,00%	97,45%
13º	C-FNS-TOTAL	100,00%	100,00%	50,00%	97,45%
14º	C-FPANORAMA	100,00%	100,00%	50,00%	97,45%
15º	C-FPARAENSE-2	100,00%	100,00%	50,00%	97,45%
16º	C-FVILHENA	100,00%	100,00%	50,00%	97,45%
17º	C-FIOL-1	99,44%	100,00%	49,72%	96,90%
18º	C-FICO-2	87,09%	99,58%	43,75%	85,27%
19º	C-FICO-1	84,76%	100,00%	42,38%	82,60%
20º	C-FNS-2	84,58%	100,00%	42,29%	82,42%
21º	C-FDOURADOSPARANAGUÁ	80,54%	100,00%	40,27%	78,48%
22º	C-FPANTANAL	80,37%	100,00%	40,18%	78,31%
23º	C-FPARAENSE-1	74,45%	100,00%	37,22%	72,55%
24º	C-FIOL-2	59,88%	99,82%	30,03%	58,52%
25º	C-FMSSANTOS	55,96%	100,00%	27,98%	54,53%
26º	C-FIOL-3	54,73%	100,00%	27,37%	53,33%
<i>Média da eficiência</i>		<i>90,84%</i>	<i>99,62%</i>	<i>45,61%</i>	<i>88,89%</i>

Fonte: elaborado pelo autor.

Em suma, os resultados mostram que a definição de uma política pública de investimentos em infraestrutura de transporte de soja, que considere questões econômicas, ambientais e sociais na tomada de decisão, deve priorizar os projetos relacionados à expansão da malha ferroviária denominada de Malha Norte e à hidrovía com origem em Marabá (PA). Além disso, a classificação

verificada para as DMUs “C-FICO+FNS-1”, “C-FICO+FNS-2” e “C-FNS-1” (quarta, sexta e sétima posições em *BCCo*) indica que a Ferrovia de Integração Centro-Oeste e a Ferrovia Norte-Sul também devem estar no conjunto de projetos multimodais prioritários para essa cadeia produtiva.

Dando sequência à ordenação de uma eventual priorização dos projetos, após as DMUs anteriormente citadas aparecem os cenários atrelados ao projeto da Ferrogrão, da Ferrovia do Frango, do terminal ferroviário de Panorama (SP) e da Ferrovia Paraense. Todavia, tais projetos também estão localizados na fronteira do modelo de eficiência invertida, conforme informações da Tabela 25.

4.2.3. Considerações adicionais sobre os projetos com maior grau de eficiência

De forma a consolidar a discussão das variantes da análise de eficiência, tem-se que o projeto de viabilização das movimentações de soja pela modalidade hidroviária a partir de Marabá (PA) é tido como eficiente em todos os modelos formulados. Dentre os cenários analisados, esse é o que apresenta o menor custo para sua viabilização e está entre os casos em que toda a capacidade de movimentação (premissa do modelo matemático de minimização de custos de transporte) é utilizada. Como já tratado, o potencial de economia anual em custos de transporte desse investimento ultrapassa R\$ 270,00 milhões, sendo a sua área de influência composta por municípios do Mato Grosso, Tocantins e Pará, conforme ilustra a Figura 43.

Figura 43. Área de influência do projeto de infraestrutura considerado no cenário “C-H-MARABÁ”.

Fonte: elaborado pelo autor, baseado em resultados da pesquisa.

As análises demonstram que esse projeto hidroviário é eficiente do ponto de vista econômico, ambiental e social, sendo indicado com uma das prioridades para o desenvolvimento de uma melhor infraestrutura logística para a cadeia brasileira de produção e comercialização de soja.

As condições de cenário consideradas em “C-FNS-1” mostram que esse trecho da Ferrovia Norte Sul também é relevante. Os investimentos se mostram com elevado grau de eficiência sobre ótica econômica e social (vide resultados dos modelos *BCCoeco* e *BCCosoc*, respectivamente). Fato adicional relevante é que esse projeto já é tratado como prioridade nas políticas públicas para investimento em infraestrutura no Brasil, sendo recentemente concedido à iniciativa privada para finalização das obras e início da operação. A área de influência desse projeto é composta por localidades das regiões Norte, Centro-Oeste e Sudeste, conforme evidenciado na Figura 44.

Figura 44. Área de influência do projeto de infraestrutura considerado no cenário “C-FNS-1”.
Fonte: elaborado pelo autor, baseado em resultados da pesquisa.

Vinculado a esse trecho da FNS, a Ferrovia de Integração Centro-Oeste também se mostra primordial. “C-FICO+FNS-1” tem importante grau de eficiência econômica (vide modelo *BCCoeco*), além da sua classificação verificada em *CCRo* – modelo que considera as esferas econômica, social e ambiental de forma integrada. Nesse cenário, cento e cinquenta e sete municípios enviaram 11,89 milhões de toneladas para os terminais de transbordo considerados (vide área de influência na Figura 45), acarretando em uma redução de custo potencial superior à R\$ 329,00 milhões.

Figura 45. Área de influência do projeto de infraestrutura considerado no cenário “C-FICO+FNS-1”.

Fonte: elaborado pelo autor, baseado em resultados da pesquisa.

Faz sentido, portanto, que o projeto da FICO também seja considerado como prioridade no desenvolvimento de uma infraestrutura logística para a cadeia da soja no Brasil.

Os resultados de *BCCo* apontam para a necessidade priorização das obras de expansão da Malha Norte. “C-EMN-3” e “C-EMN-1” aparecem como os melhores classificados sob a perspectiva de sustentabilidade adotada nas análises aqui discutidas. Na situação em que é prevista a expansão passando por Cuiabá (MT), Sorriso (MT) e Sinop (MT) – caso analisado em “C-EMN-3”, estima-se uma economia potencial em custos de transporte de soja da ordem de R\$ 368,21 milhões, com um potencial de captação de carga superior a 8,6 milhões de toneladas de soja e redução aproximada de 7,50% nas emissões atuais de CO₂ oriundas das operações de transporte. A área de influência desse projeto é composta principalmente por municípios da região central do Mato Grosso, conforme exposto na Figura 46.

Figura 46. Área de influência do projeto de infraestrutura considerado no cenário “C-EMN-3”.
 Fonte: elaborado pelo autor, baseado em resultados da pesquisa.

Para esses quatro projetos detalhados, cabe acrescentar que os mesmos estão atrelados ao estabelecimento de novas opções de transporte de carga para localidades produtoras das regiões Centro-Oeste e Norte, principalmente. Conforme visto na Figura 32, nelas estão localizados os municípios com os maiores custos de transporte do Brasil, o que reforça a efetividade da priorização desses cenários de investimento, como aquele que traga ganhos de competitividade à cadeia produtiva analisada.

5. CONSIDERAÇÕES FINAIS

As discussões apresentadas nesta tese mostram a possibilidade de utilização de abordagens mais amplas para a análise e definição das políticas públicas de investimento em infraestrutura de transporte de cargas no Brasil. Foi analisada, de forma específica, a cadeia de produção e comercialização de soja no país. A contribuição trazida por esse estudo pode ser resumizada em três aspectos.

De forma inicial, a análise da literatura acadêmica projeta tendência de aumento no uso de abordagens multicritério em trabalhos relacionados ao desenvolvimento de infraestruturas de transporte. Além dos impactos econômicos, estes métodos incorporam métricas relacionadas aos impactos ambientais e sociais derivados da presença de infraestruturas, com aplicações mais frequentes para centros urbanos (foco maior no transporte de passageiros). A exemplo de Yuan e al. (2018), Zhou et al. (2018) e Zembri-Mary (2017), uma série de autores apontam para a necessidade do uso e desenvolvimento de metodologias que incorporem esses diferentes aspectos nas análises, para a melhor tomada de decisão. Nesse caso, tais abordagens podem direcionar a elaboração das políticas públicas para o investimento em infraestrutura de transporte para um caminho além do político e do econômico, trazendo métricas claras para a melhor utilização dos recursos financeiros.

Metodologias distintas são utilizadas em estudos dessa natureza, os quais envolvem as infraestruturas de transporte sob a ótica de diferentes tipos de indicadores. A Análise Envoltória de Dados (DEA) é um dos métodos para esse tipo de aplicação. Esta tese fez o uso em conjunto da DEA com um modelo de programação linear para a minimização dos custos de transporte, combinação a qual se mostrou adequada para a consecução dos objetivos aqui estipulados.

A segunda contribuição desta tese é relacionada às discussões sobre os impactos potenciais de diversos projetos de infraestrutura multimodal para o transporte de soja no Brasil, possibilitando a comparação entre os casos analisados. Em uma breve síntese do comparativo apresentado, os cenários vinculados ao projeto da Ferrogrão são os mais benéficos em termos das reduções potenciais dos custos e das emissões de CO₂ das operações de transporte. Tal projeto, com trajeto destacado na Figura 47, é caracterizado também pela maior redução da dependência do modal rodoviário nas movimentações do grão. A utilização de toda a capacidade de transporte considerada no modelo é característica desse projeto, indicando um potencial maior para a utilização desta infraestrutura projetada.

A utilização de toda a capacidade de movimentação considerada no modelo também é verificada em cenários que tratam da Ferrovia Paraense, da ferrovia de Vilhena (RO), do projeto de expansão da Malha Norte e da hidrovía de Marabá (PA). Além disso, projetos vinculados à FNS e à

FICO são aqueles com os maiores volumes de soja captados pelos terminais de transbordo projetados, sendo a Ferrovia Norte Sul caracterizada pelos maiores benefícios sociais (área de influência e impacto médio no IDHM) dentre os casos analisados. Tais infraestruturas de transporte estão destacadas na Figura 47.

Figura 47. Infraestruturas de transporte destacadas.
Fonte: elaborado pelo autor, baseado em resultados da pesquisa.

A discussão apresentada abordou ainda o impacto dos projetos no custo de transporte de soja dos Estados brasileiros. Sob essa ótica, os projetos de maior destaque estão associados às movimentações de soja das regiões Centro-Oeste e Norte do país, locais atualmente caracterizados pelos maiores custos do transporte.

Por fim, a terceira contribuição da tese é relacionada à aplicação da Análise Envoltória de Dados para a obtenção da eficiência relativa dos projetos de infraestrutura propostos para a cadeia produtiva da soja brasileira. A comparação entre os cenários a partir da performance dos projetos é o objetivo central dessa tese.

A discussão dos resultados mostra elevado grau de eficiência econômica, técnica e ambiental no projeto analisado pelo cenário “C-H-MARABÁ”. Esse cenário se mostrou eficiente e relevante em

todas as variações propostas para o modelo de eficiência, indicando que o mesmo deve ter caráter prioritário no desenvolvimento das políticas públicas para o transporte de soja no Brasil. Ou seja, a viabilização do transporte hidroviário a partir de Marabá (PA) é projeto de destaque dentre os demais casos analisados.

Na sequência, importância significativa também é atribuída aos investimentos da Ferrovia Norte Sul (pelos resultados do cenário “C-FNS-1”) e da Ferrovia de Integração Centro-Oeste (vide resultados obtidos em “C-FICO+FNS-1”). A utilização em conjunto dessas duas infraestruturas ferroviária se mostrou eficiente do ponto de vista econômico e também na análise que agrega as três dimensões da sustentabilidade. Dada essa relevância, cabe destacar que esse trecho da FNS analisado foi recém concedido para a finalização das obras e operação por parte da iniciativa privada. Tal condição, por sua vez, evidencia a escolha pela obras da FICO (nesse cenário com o prolongamento até Água Boa (MT)) como também sendo prioridade na elaboração de políticas públicas para o investimento no setor de transporte.

Elevado grau de eficiência também é característica do projeto de expansão da malha ferroviária intitulada de Malha Norte. “C-EMN-3” e “C-EMN-1” são os cenários mais eficientes no modelo que insere variáveis econômicas, ambientais e sociais na análise (com retornos variáveis de escala). Tem-se, com esse resultado, que os investimentos para a ampliação dessa malha ferroviária também devem ser pautados dentre as prioridades do Governo brasileiro na elaboração das políticas de investimento.

Ressalta-se o fato de a maior parte dos projetos eficientes e com as melhores classificações ter relação direta com as movimentações de soja originadas nos Estados das regiões Centro-Oeste e Norte do país. Como discutido, tais localidades concentram os pontos de origem de carga com os maiores custos médios de transporte, sendo efetiva a necessidade de investimentos para maior equidade na oferta de soluções logísticas ao longo do território brasileiro.

Isso posto, cabe afirmar que os objetivos delimitados para esse trabalho ao longo do capítulo introdutório foram atingidos. As conclusões desenhadas para esse estudo certamente trazem considerações relevantes aos formuladores de políticas públicas para investimento em infraestrutura no Brasil – em termos de método e resultados.

Trabalhos futuros podem contribuir para o avanço dessa metodologia analítica com aplicações para o cenário brasileiro. A demanda por novas e melhores infraestruturas fazem com que projetos diversos sejam apresentados e discutidos para o país, havendo espaço para trabalhos que tragam métricas mais abrangentes para a análises destes. Além da cadeia de transporte da soja, outros mercados (agrícolas e industriais) podem ser analisados via técnicas multicritérios, trazendo informações relevantes para os tomadores de decisão.

Dúvidas diversas sobre os impactos ambientais e sociais das novas infraestruturas abrem um amplo caminho de análises correlatas. Nesse sentido, além das métricas aqui utilizadas, outras podem ser adicionadas ao escopo de análise de trabalhos futuros, tais como: desmatamento de cobertura florestal para a concretização das obras de determinado projeto, estimativa da emissão de outros gases poluentes na cadeia logística, potencial de captação de cargas alternativas, existência potencial de frete de retorno captável pela infraestrutura a ser implementada, tempo estimado de execução da obra, dentre outras.

Cabe acrescentar alguns fatores limitantes dessa pesquisa. O primeiro deles é relacionado ao fato de que os valores utilizados como o investimento monetário a ser realizado foram obtidos por meio de estimativas. Essa estratégia de análise foi adotada dada a falta de informações oficiais e concretas sobre o montante de recursos financeiros que deverá ser destinado à implementação das obras de infraestrutura. Além disso, a opção por investimento ou não em terminais de transbordo pode alterar de forma significativa o custo da obra. Como segundo ponto, não necessariamente os transbordos de carga considerados nas análises serão os que efetivamente serão construídos no desenvolvimento do projeto. Por fim, outras duas limitações destacadas são: (i) utilização de dados do ano de 2017 nas análises, sem considerar projeções de crescimento da produção agrícola nacional; e (ii) possibilidade de não ter sido considerado algum outro projeto de infraestrutura multimodal de transporte com interesse latente da cadeia produtiva da soja.

REFERÊNCIAS

- ABIOVE – ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DAS INDÚSTRIAS DE ÓLEOS VEGETAIS. Estatísticas. 2019. Disponível em: <https://abiove.org.br/estatisticas/>. Acesso em: 15 dez. 2018.
- ADLER, N.; ÜLKÜ, T.; YAZHEMSKY, E. Small regional airport sustainability: Lessons from benchmarking. *Journal of Air Transport Management*, v. 33, p. 22–31, 2013.
- ÁLVAREZ, I. C.; BLÁZQUEZ, R. The influence of the road network on private productivity measures using Data Envelopment Analysis: A case study from Spain. *Transportation Research Part A: Policy and Practice*, v. 65, p. 33–43, 2014.
- AMOROSO, S.; CASTELLUCCIO, F.; MARITANO, L. A DEA-based transport heliports' efficiencies evaluation. *Aircraft Engineering and Aerospace Technology*, v. 87, n. 2, p. 131–138, 2 mar. 2015.
- ANTAQ - AGÊNCIA NACIONAL DOS TRANSPORTES AQUAVIÁRIOS. Estatísticas. 2019. Disponível em: < <http://portal.antaq.gov.br/>>. Acesso em: 10 dez. 2018.
- ANTAQ - AGÊNCIA NACIONAL DOS TRANSPORTES AQUAVIÁRIOS. Plano Nacional de Integração Hidroviária. 2013. Disponível em: < <http://web.antaq.gov.br/portaltv3/PNIH.asp>> Acesso em: 08 abr. 2020.
- ANTT - AGÊNCIA NACIONAL DOS TRANSPORTES TERRESTRES. 1 Inventário Nacional de Emissões Atmosféricas do Transporte Ferroviário de Cargas. 2012. Disponível em: < http://www.antt.gov.br/backend/galeria/arquivos/inventario_ferrovuario_2012_final.pdf> Acesso em: 10 abr. 2019.
- ANTT - AGÊNCIA NACIONAL DOS TRANSPORTES TERRESTRES. Estatísticas. 2019. Disponível em: < <http://www.antt.gov.br/>>. Acesso em: 10 dez. 2019.
- ANTT - AGÊNCIA NACIONAL DOS TRANSPORTES TERRESTRES. Política Nacional de Pisos Mínimos do Transporte Rodoviário de Cargas - PORTARIA Nº 224. 2020. Disponível em: < https://anttlegis.antt.gov.br/action/UrlPublicasAction.php?acao=abrirAtoPublico&sgl_tipo=POR&num_ato=00000224&seq_ato=ATT&vlr_ano=2019&sgl_orgao=SUROC/ANTT/MI&cod_modulo=349&cod_menu=5846>. Acesso em: 10 jan. 2020.
- ÁVILA, Ednilson Sebastião de. Impactos de regulações ambientais sobre o transporte de cargas no Brasil: uma análise para o transporte de soja. 2016. Tese (Doutorado em Economia Aplicada) - Escola Superior de Agricultura Luiz de Queiroz, Universidade DE SÃO PAULO, PIRACICABA, 2016. DOI:10.11606/T.11.2016.TDE-07062016-163230. ACESSO EM: 2020-05-29.

- BANCO MUNDIAL. International LPI | Logistics Performance Index. 2018. Disponível em: <<https://lpi.worldbank.org/international>>. Acesso em: 11 out. 2018.
- BANISTER, D. Cities, mobility and climate change. *Journal of Transport Geography*, v. 19, n. 6, p. 1538–1546, 1 nov. 2011. Disponível em: <<https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0966692311001244?via%3Dihub>>. Acesso em: 22 out. 2018.
- BANISTER, David. Policy on Sustainable Transport in England: The Case of High Speed 2. *European Journal of Transport and Infrastructure Research*, [S.l.], v. 18, n. 3, june 2018. ISSN 1567-7141. Disponível em: <<https://journals.open.tudelft.nl/ejtir/article/view/3237>>. Acesso em: 29 mai. 2020. doi: <https://doi.org/10.18757/ejtir.2018.18.3.3237>.
- BANKER, R. D., CHARNES, A., & COOPER, W. W. (1984). Some models for estimating technical and scale inefficiencies in data envelopment analysis. *Management science*, 30(9), 1078-1092.
- BARROS, C. P.; PEYPOCH, N. An evaluation of European airlines' operational performance. *International Journal of Production Economics*, v. 122, n. 2, p. 525–533, 1 dez. 2009. Disponível em: <<https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0925527309001339?via%3Dihub>>. Acesso em: 9 mar. 2019.
- BASTIAN, M.; HEYMANN, S.; JACOMY, M. Gephi: An Open Source Software for Exploring and Manipulating Networks. 2009. Disponível em: <www.aiai.org>. Acesso em: 26 out. 2018.
- BCB – BANCO CENTRAL DO BRASIL. Cotação de moedas: Dólar. 2019. Disponível em: <https://www.bcb.gov.br/estabilidadefinanceira/cotacoesmoedas>. Acesso em: 15 dez. 2018.
- BLONDEL, V. D. et al. Fast unfolding of communities in large networks. 4 mar. 2008. Disponível em: <<http://arxiv.org/abs/0803.0476>>. Acesso em: 30 out. 2018.
- BOGETOFT, P.; MAINTAINER, L. O.; OTTO, L. Type Package Title Benchmark and Frontier Analysis Using DEA and SFA. [s.l: s.n.].
- BRANCO, José Eduardo Holler. Estimativa da demanda de carga captável pela Estrada de Ferro Norte-Sul. 2007. Dissertação (Mestrado em Economia Aplicada) - Escola Superior de Agricultura Luiz de Queiroz, Universidade de São Paulo, Piracicaba, 2007. doi:10.11606/D.11.2007.tde-12032008-170046. Acesso em: 2020-05-29.
- BRAY, S.; CAGGIANI, L.; OTTOMANELLI, M. Measuring transport systems efficiency under uncertainty by fuzzy sets theory based data envelopment analysis: Theoretical and practical comparison with traditional DEA model. In: *Transportation Research Procedia*, Anais...Elsevier, 2015.

- BRIN, S.; PAGE, L. The Anatomy of a Large-Scale Hypertextual Web Search Engine. 1998. Disponível em: <<http://ilpubs.stanford.edu:8090/361/>>. Acesso em: 26 out. 2018.
- CAIXETA FILHO, J. V.; MACAULAY, T. G. Interstate movements: an application of spatial equilibrium models. *Central European Journal for Operations Research and Economics*, v. 3, p. 203-213, 1994.
- CARLUCCI, F.; CIRÀ, A.; COCCORESE, P. Measuring and explaining airport efficiency and sustainability: Evidence from Italy. *Sustainability (Switzerland)*, v. 10, n. 2, 4 fev. 2018.
- CASTELLANO, R. et al. Do Digital and Communication Technologies Improve Smart Ports? A Fuzzy DEA Approach. *IEEE Transactions on Industrial Informatics*, v. 15, n. 10, p. 5674–5681, 1 out. 2019.
- CAULFIELD, B.; BAILEY, D.; MULLARKEY, S. Using data envelopment analysis as a public transport project appraisal tool. *Transport Policy*, v. 29, p. 74–85, set. 2013.
- CHARNES, A.; COOPER, W. W.; RHODES, E. (1978). Measuring the efficiency of decision making units. *European journal of operational research*, 2(6), 429-444.
- CHEN, C. Information visualization. *Wiley Interdisciplinary Reviews: Computational Statistics*, v. 2, n. 4, p. 387–403, 1 jul. 2010. Disponível em: <<http://doi.wiley.com/10.1002/wics.89>>. Acesso em: 30 out. 2018.
- CHEN, Y. et al. Sustainability based perspective on the utilization efficiency of urban infrastructure — A China study. *Habitat International*, v. 93, 1 nov. 2019.
- CHENG, M.; LU, Y. Investment efficiency of urban infrastructure systems: Empirical measurement and implications for China. *Habitat International*, v. 70, p. 91–102, 1 dez. 2017.
- COOPER, W. W.; SEIFORD, L. M.; TONE, K. Data envelopment analysis: A comprehensive text with models, applications, references and DEA-solver software: Second edition. [s.l.] Springer US, 2007.
- CORNET, Y.; DUDLEY, G.; BANISTER, D. High Speed Rail: Implications for carbon emissions and biodiversity. *Case Studies on Transport Policy*, v. 6, n. 3, p. 376–390, 1 set. 2018. Disponível em: <<https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S2213624X17302407>>. Acesso em: 22 out. 2018.
- CUI, S. et al. Carbon footprint analysis of the Bus Rapid Transit (BRT) system: a case study of Xiamen City. *International Journal of Sustainable Development & World Ecology*, v. 17, n. 4, p. 329–337, 2010. Disponível em: <<http://www.tandfonline.com/action/journalInformation?journalCode=tsdw20>>. Acesso em: 25 out. 2018.

- CUI, S. et al. HG accounting for public transport in Xiamen city, China. *Carbon Management G*, v. 2, n. 4, p. 383–395, 2011. Disponível em: <<http://www.tandfonline.com/action/journalInformation?journalCode=tcmt20>>. Acesso em: 25 out. 2018.
- CULLINANE, K. et al. The technical efficiency of container ports: Comparing data envelopment analysis and stochastic frontier analysis. *Transportation Research Part A: Policy and Practice*, v. 40, n. 4, p. 354–374, 1 maio 2006. Disponível em: <<https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0965856405001072?via%3Dihub>>. Acesso em: 9 mar. 2019.
- DASH, N.; BALACHANDRA, P. Modeling urban system sustainability as impacting energy system. *Journal of Environmental Accounting and Management*, v. 4, n. 2, p. 149–174, 2016.
- DAVARZANI, H. et al. Greening ports and maritime logistics: A review. *Transportation Research Part D: Transport and Environment*, v. 48, p. 473–487, 1 out. 2016. Disponível em: <<https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1361920915000991?via%3Dihub>>. Acesso em: 30 out. 2018.
- DÍAZ-HERNÁNDEZ, J. J.; MARTÍNEZ-BUDRÍA, E.; SALAZAR-GONZÁLEZ, J. J. Measuring cost efficiency in the presence of quasi-fixed inputs using dynamic data envelopment analysis: The case of port infrastructure. *Maritime Economics and Logistics*, v. 16, n. 2, p. 111–126, 2014.
- DING, Y.; CRONIN, B. Popular and/or prestigious? Measures of scholarly esteem. *Information Processing & Management*, v. 47, n. 1, p. 80–96, 1 jan. 2011. Disponível em: <<https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0306457310000087>>. Acesso em: 30 out. 2018.
- DNIT – DEPARTAMENTO NACIONAL DE INFRAESTRUTURA DE TRANSPORTES. Hidrovia do Tocantins - Araguaia. Disponível em: <<http://www.dnit.gov.br/modais-2/aquaviario/hidrovia-do-tocantins-araguaia>>. Acesso em: 6 maio. 2020.
- DOOMERNIK, J. E. Performance and efficiency of high-speed rail systems. In: *Transportation Research Procedia, Anais...Elsevier*, 2015.
- EBOLI, L.; FU, Y.; MAZZULLA, G. Multilevel Comprehensive Evaluation of the Railway Service Quality. In: *Procedia Engineering, Anais...Elsevier Ltd*, 2016.
- ESALQ-LOG – GRUPO DE PESQUISA E EXTENSÃO EM LOGÍSTICA AGROINDUSTRIAL. Informações sobre o frete marítimo para o transporte de soja no Brasil. 2019. Acesso em: 6 maio. 2020.

- FAHIMNIA, B.; SARKIS, J.; DAVARZANI, H. Green supply chain management: A review and bibliometric analysis. *International Journal of Production Economics*, v. 162, p. 101–114, 1 abr. 2015. Disponível em: <<https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0925527315000067?via%3Dihub#f0010>>. Acesso em: 30 out. 2018.
- FANCELLO, G.; UCCHEDDU, B.; FADDA, P. Data Envelopment Analysis (D.E.A.) for Urban Road System Performance Assessment. *Procedia - Social and Behavioral Sciences*, v. 111, p. 780–789, fev. 2014.
- GUIMARÃES, V. de A.; JUNIOR, I. C. L.; GARCIA, P. A. de A. Environmental Performance of Brazilian Container Terminals: A Data Envelopment Analysis Approach. *Procedia - Social and Behavioral Sciences*, v. 160, p. 178–187, dez. 2014.
- HAJDUK, S. Efficiency evaluation of urban transport using the DEA method. *Equilibrium*, v. 13, n. 1, p. 141–157, 31 mar. 2018.
- HALKOS, G.; PETROU, K. N. Treating undesirable outputs in DEA: A critical review. *Economic Analysis and Policy*, v. 62, p. 97–104, 1 jun. 2019.
- HILMOLA, O. P.; LORENTZ, H.; RHOADES, D. L. New environmental demands and the future of the Helsinki-Tallinn freight route. *Maritime Economics and Logistics*, v. 17, n. 2, p. 198–220, 28 jun. 2015.
- HSU, K.-C.; LAI, T.-Y.; LI, C.-N. Why is there an urban pattern toward sprawling development? *Proceedings of the Institution of Civil Engineers - Urban Design and Planning*, v. 169, n. 4, p. 200–208, 19 ago. 2016. Disponível em: <<http://www.icevirtuallibrary.com/doi/10.1680/udap.14.00035>>. Acesso em: 25 out. 2018.
- IBGE - INSTITUTO BRASILEIRO DE GEOGRAFIA E ESTATÍSTICA. Estatísticas: população. 2019a. Disponível em: <https://cidades.ibge.gov.br/>. Acesso em: 15 mar. 2019.
- IBGE - INSTITUTO BRASILEIRO DE GEOGRAFIA E ESTATÍSTICA. Índice de Desenvolvimento Humano. 2019b. Disponível em: <https://cidades.ibge.gov.br/brasil/sp/pesquisa/37/30255?tipo=ranking>. Acesso em: 15 mar. 2019.
- IBGE - INSTITUTO BRASILEIRO DE GEOGRAFIA E ESTATÍSTICA. Estatísticas: produto interno bruto municipal. 2019c. Disponível em: <https://cidades.ibge.gov.br/>. Acesso em: 15 mar. 2019.
- IBGE - INSTITUTO BRASILEIRO DE GEOGRAFIA E ESTATÍSTICA. Estatísticas: Índice de Gini. 2019d. Disponível em: <https://cidades.ibge.gov.br/>. Acesso em: 15 mar. 2019.

- IBGE - INSTITUTO BRASILEIRO DE GEOGRAFIA E ESTATÍSTICA. Pesquisa Agropecuária Municipal: Edição de 2017. 2017. Disponível em: <https://sidra.ibge.gov.br/>. Acesso em: 10 dez. 2018.
- JAKOB, M. et al. Carbon Pricing Revenues Could Close Infrastructure Access Gaps. *World Development*, v. 84, p. 254–265, 1 ago. 2016. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0305750X16000425>. Acesso em: 23 out. 2018.
- JALALI SEPEHR, M.; HAERI, A.; GHOSI, R. A cross-country evaluation of energy efficiency from the sustainable development perspective. *International Journal of Energy Sector Management*, v. 13, n. 4, p. 991–1019, 4 nov. 2019.
- JIA, Y. P.; LIU, R. Z. Study of the Energy and Environmental Efficiency of the Chinese economy based on a DEA Model. *Procedia Environmental Sciences*, v. 13, p. 2256–2263, 2012.
- JIANG, B.; LI, J. DEA-based performance measurement of seaports in northeast Asia: Radial and non-radial approach. *Asian Journal of Shipping and Logistics*, v. 25, n. 2, p. 219–236, 2009.
- KENNEDY, L. The politics and changing paradigm of megaproject development in metropolitan cities. *Habitat International*, v. 45, p. 163–168, 1 jan. 2015. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S019739751400109X>. Acesso em: 25 out. 2018.
- KUMAR, P.; IMAM, B. Footprints of air pollution and changing environment on the sustainability of built infrastructure. *Science of The Total Environment*, v. 444, p. 85–101, 1 fev. 2013. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0048969712014829>. Acesso em: 25 out. 2018.
- KUTIN, N.; NGUYEN, T. T.; VALLÉE, T. Relative Efficiencies of ASEAN Container Ports based on Data Envelopment Analysis. *Asian Journal of Shipping and Logistics*, v. 33, n. 2, p. 67–77, 1 jul. 2017.
- KYRIACOU, A. P.; MUINELO-GALLO, L.; ROCA-SAGALÉS, O. The efficiency of transport infrastructure investment and the role of government quality: An empirical analysis. *Transport Policy*, v. 74, p. 93–102, 1 fev. 2019.
- LETA, Fabiana Rodrigues et al. Métodos de melhora de ordenação em DEA aplicados à avaliação estática de tornos mecânicos. *Inv. Op., Lisboa*, v. 25, n. 2, p. 229–242, 2005. Disponível em http://www.scielo.mec.pt/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S0874-51612005000200004&lng=pt&nrm=iso. acessos em 29 maio 2020.

- LI, H. et al. Regional environmental efficiency evaluation in China: Analysis based on the Super-SBM model with undesirable outputs. *Mathematical and Computer Modelling*, v. 58, n. 5–6, p. 1018–1031, set. 2013.
- LI, T. et al. Evaluating the impact of transport investment on the efficiency of regional integrated transport systems in China. *Transport Policy*, v. 45, p. 66–76, 1 jan. 2016.
- MARCHETTI, D.; WANKE, P. Brazil's rail freight transport: Efficiency analysis using two-stage DEA and cluster-driven public policies. *Socio-Economic Planning Sciences*, v. 59, p. 26–42, 1 set. 2017.
- MATTAUCH, L.; RIDGWAY, M.; CREUTZIG, F. Happy or liberal? Making sense of behavior in transport policy design. *Transportation Research Part D: Transport and Environment*, v. 45, p. 64–83, 1 jun. 2016. Disponível em: <<https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S136192091500111X>>. Acesso em: 20 out. 2018.
- MELL, I. C. Greening Ahmedabad-creating a resilient Indian city using a green infrastructure approach to investment Greening Ahmedabad-creating a resilient Indian city using a green infrastructure approach to investment. *Landscape Research*, v. 43, n. 3, p. 289–314, 2018. Disponível em: <<http://www.tandfonline.com/action/journalInformation?journalCode=clar20>>. Acesso em: 25 out. 2018.
- MELO, I. C. et al. Benchmarking freight transportation corridors and routes with data envelopment analysis (DEA). *Benchmarking*, v. 25, n. 2, p. 713–742, 2018.
- MERKERT, R.; SMITH, A. S. J.; NASH, C. A. Benchmarking of train operating firms - A transaction cost efficiency analysis. *Transportation Planning and Technology*, v. 33, n. 1, p. 35–53, fev. 2010.
- OLSSON, J. Improved road accessibility and indirect development effects: evidence from rural Philippines. *Journal of Transport Geography*, v. 17, n. 6, p. 476–483, 1 nov. 2009. Disponível em: <<https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0966692308000884>>. Acesso em: 20 out. 2018.
- OZBEK, M. E.; DE LA GARZA, J. M.; TRIANTIS, K. Data and modeling issues faced during the efficiency measurement of road maintenance using data envelopment analysis. *Journal of Infrastructure Systems*, v. 16, n. 1, p. 21–30, mar. 2010.

- PARDO-BOSCH, F.; AGUADO, A. Sustainability as the key to prioritize investments in public infrastructures. *Environmental Impact Assessment Review*, v. 60, p. 40–51, 1 set. 2016. Disponível em: <<https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0195925515300494>>. Acesso em: 25 out. 2018.
- PASHA, M. et al. Effects of street pattern, traffic, road infrastructure, socioeconomic and demographic characteristics on public transit ridership. *KSCE Journal of Civil Engineering*, v. 20, n. 3, p. 1017–1022, 12 abr. 2016. Disponível em: <<http://link.springer.com/10.1007/s12205-016-0693-6>>. Acesso em: 25 out. 2018.
- PERA, Thiago Guilherme. Modelagem das perdas na agrologística de grãos no Brasil: uma aplicação de programação matemática. 2017. Dissertação (Mestrado em Engenharia de Sistemas Logísticos) - Escola Politécnica, Universidade de São Paulo, São Paulo, 2017. doi:10.11606/D.3.2017.tde-17072017-160658. Acesso em: 2020-05-29.
- PERSSON, O.; DANELL, R.; WIBORG SCHNEIDER, J. How to use Bibexcel for various types of bibliometric analysis. *Celebrating scholarly communication studies: A Festschrift for Olle Persson at his 60th Birthday*. 2009. Disponível em: <<http://umu.diva-portal.org/smash/record.jsf?pid=diva2%3A232746&dsid=832>>. Acesso em: 26 out. 2018.
- PINA, V.; TORRES, L. Analysis of the efficiency of local government services delivery. An application to urban public transport. *Transportation Research Part A: Policy and Practice*, v. 35, n. 10, p. 929–944, 1 dez. 2001. Disponível em: <<https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0965856400000331?via%3Dihub>>. Acesso em: 9 mar. 2019.
- PINHEIRO, Maria Andrade. Estimativa da redução das emissões gases de efeito estufa através da intermodalidade no setor sucroenergético: uma aplicação de programação linear. 2012. Tese (Doutorado em Economia Aplicada) - Escola Superior de Agricultura Luiz de Queiroz, Universidade de São Paulo, Piracicaba, 2012. doi:10.11606/T.11.2012.tde-31052012-085545. Acesso em: 2020-05-29.
- PPI – PROGRAMA DE PARCERIAS DE INVESTIMENTOS. Projetos. 2019. Disponível em: <<https://www.ppi.gov.br/>>. Acesso em: 08 abr. 2020.
- PROGRAMA BRASILEIRO GHG PROTOCOL. Ferramenta de Cálculo: Parâmetros utilizados. 2019. Disponível em: <<http://ghgprotocolbrasil.com.br>>.
- PYE, S.; DALY, H. Modelling sustainable urban travel in a whole systems energy model. *Applied Energy*, v. 159, p. 97–107, 1 dez. 2015. Disponível em: <<https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0306261915010636>>. Acesso em: 20 out. 2018.

- RAMANATHAN, R. An introduction to data envelopment analysis: a tool for performance measurement. [s.l.] Sage Publications, 2003.
- RAY, S. C. Data envelopment analysis: Theory and techniques for economics and operations research. [s.l.] Cambridge University Press, 2004.
- ROGERS, M. M.; WEBER, W. L. Evaluating CO2 emissions and fatalities tradeoffs in truck transport. *International Journal of Physical Distribution and Logistics Management*, v. 41, n. 8, p. 750–767, set. 2011.
- ROVOLIS, A.; SPENCE, N. Duality theory and cost function analysis in a regional context: the impact of public infrastructure capital in the Greek regions. *The Annals of Regional Science*, v. 36, n. 1, p. 55–78, 1 fev. 2002. Disponível em: <<http://link.springer.com/10.1007/s001680100068>>. Acesso em: 20 out. 2018.
- ROWLEY, J.; SLACK, F. Conducting a literature review. *Management Research News*, v. 27, n. 6, p. 31–39, 2004. Disponível em: <<https://doi.org/10.1108/01409170410784185>>. Acesso em: 30 out. 2018.
- SAKIB, N. et al. Addressing the Passenger Transport and Accessibility Enablers for Sustainable Development. *Sustainability*, v. 10, n. 4, p. 903, 21 mar. 2018. Disponível em: <<http://www.mdpi.com/2071-1050/10/4/903>>. Acesso em: 23 out. 2018.
- SALVINO, R. et al. Regional Growth and Transportation Infrastructure from Greenways to Public Transit. *Review of Business*, v. 38, n. 2, p. 74–86, 2018. Disponível em: <<http://eds.b.ebscohost.com/eds/detail/detail?vid=0&sid=2060a44a-419b-488f-b34c-ada4c38ef5bc%40pdv-sessionmgr05&bdata=JkF1dGhUeXBIPWlwLHN0aWlsc3NvLHVpZCZsYW5nPXB0LWJyJnNpdGU9ZWRzLWxpdmUmc2NvcGU9c2l0ZQ%3D%3D#AN=129631259&db=bth>>. Acesso em: 2 nov. 2018.
- SÁNCHEZ-OLLERO, J. L.; GARCÍA-POZO, A.; MARCHANTE-MERA, A. J. UNA APROXIMACIÓN AL IMPACTO SOCIOECONÓMICO DE LA ALTA VELOCIDAD FERROVIARIA EN ANDALUCÍA. *Boletín de la Asociación de Geógrafos Españoles*, v. 64, n. 64, p. 341–356, 2014.
- SAXENA, M.; CHOTIA, V.; RAO, N. V. M. Estimating the Efficiency of Public Infrastructure Investment: A State-wise Analysis. *Global Business Review*, v. 19, n. 4, p. 1037–1049, 1 ago. 2018.
- SCHÜTZE, F. et al. The Role of Sustainable Investment in Climate Policy. *Sustainability*, v. 9, n. 12, p. 2221, 1 dez. 2017. Disponível em: <<http://www.mdpi.com/2071-1050/9/12/2221>>. Acesso em: 23 out. 2018.

- SCHWANEN, T.; BANISTER, D.; ANABLE, J. Scientific research about climate change mitigation in transport: A critical review. *Transportation Research Part A: Policy and Practice*, v. 45, n. 10, p. 993–1006, 1 dez. 2011. Disponível em: <<https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0965856411001388?via%3Dihub>>. Acesso em: 18 out. 2018.
- SCHWEIKERT, A. et al. The infrastructure planning support system: Analyzing the impact of climate change on road infrastructure and development. *Transport Policy*, v. 35, p. 146–153, 1 set. 2014. Disponível em: <<https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0967070X14001188>>. Acesso em: 25 out. 2018.
- SECEX – SECRETARIA DE COMÉRCIO EXTERIOR. Estatísticas de exportação de soja em 2017. 2019. Disponível em: <http://aliceweb.mdic.gov.br/>. Acesso em: 10 dez. 2018.
- SHAH, S. A. R. et al. Relationship between road traffic features and accidents: An application of two-stage decision-making approach for transportation engineers. *Journal of Safety Research*, v. 69, p. 201–215, 1 jun. 2019.
- SIERRA, L. A.; YEPES, V.; PELLICER, E. A review of multi-criteria assessment of the social sustainability of infrastructures. *Journal of Cleaner Production*, v. 187, p. 496–513, 20 jun. 2018. Disponível em: <<https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0959652618306735>>. Acesso em: 20 out. 2018.
- SIFRECA – SISTEMA DE INFORMAÇÕES DE FRETES. Fretes rodoviários de soja no ano de 2017. 2019. Disponível em: <http://esalqlog.esalq.usp.br/sifreca/>. Acesso em: 10 dez. 2018.
- SILVA NETO, Samuel da. Impacto de investimentos em infraestrutura logística na cadeia de grãos no Brasil: uma aplicação de programação linear. 2018. Dissertação (Mestrado em Engenharia de Sistemas Logísticos) - Escola Politécnica, Universidade de São Paulo, São Paulo, 2018. doi:10.11606/D.3.2019.tde-06022019-153339. Acesso em: 2020-05-29.
- SILVER, J. The potentials of carbon markets for infrastructure investment in sub-Saharan urban Africa. *Current Opinion in Environmental Sustainability*, v. 13, p. 25–31, 1 abr. 2015. Disponível em: <<https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1877343514001201>>. Acesso em: 25 out. 2018.
- SIMÕES, P.; MARQUES, R. C. Influence of congestion efficiency on the european seaports performance: Does it matter? *Transport Reviews*, v. 30, n. 4, p. 517–539, jul. 2010.

- SMUTEK, J. Change of municipal finances due to suburbanization as a development challenge on the example of Poland. *Bulletin of Geography. Socio-Economic Series*, v. 37, p. 139–149, 2017. Disponível em: <<https://content.sciendo.com/view/journals/bog/37/37/article-p139.xml>>. Acesso em: 25 out. 2018.
- SNIESKA, V.; SIMKUNAITE, I. Socio-Economic Impact of Infrastructure Investments. *ECONOMICS OF ENGINEERING DECISIONS*, v. 63, n. 3, 2009. Disponível em: <<http://inzeiko.ktu.lt/index.php/EE/article/view/11638>>. Acesso em: 20 out. 2018.
- SU, J.; ROGERS, M. M. The role of economic variables and CO₂ emissions in examining the efficiency of national transportation systems. *International Journal of Sustainable Transportation*, v. 6, n. 1, p. 48–66, jan. 2012.
- SUN, Y.; CUI, Y. Evaluating the coordinated development of economic, social and environmental benefits of urban public transportation infrastructure: Case study of four Chinese autonomous municipalities. *Transport Policy*, v. 66, p. 116–126, 1 ago. 2018. Disponível em: <<https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0967070X1730656X>>. Acesso em: 20 out. 2018.
- SWAMI, M.; PARIDA, M. Comparative appraisal of metro stations in Delhi using data envelopment analysis in a multimodal context. *Journal of Public Transportation*, v. 18, n. 3, p. 29–51, 9 set. 2015.
- TAPTICH, M. N.; HORVATH, A. Freight on a Low-Carbon Diet: Accessibility, Freightsheds, and Commodities. *Environmental Science & Technology*, v. 49, n. 19, p. 11321–11328, 6 out. 2015. Disponível em: <<http://pubs.acs.org/doi/10.1021/acs.est.5b01697>>. Acesso em: 23 out. 2018.
- TAYLOR, M. A. P. Critical Transport Infrastructure in Urban Areas: Impacts of Traffic Incidents Assessed Using Accessibility-Based Network Vulnerability Analysis. *Growth and Change*, v. 39, n. 4, p. 593–616, 1 dez. 2008. Disponível em: <<http://doi.wiley.com/10.1111/j.1468-2257.2008.00448.x>>. Acesso em: 23 out. 2018.
- TIAN, N. et al. Measuring regional transport sustainability using super-efficiency SBM-DEA with weighting preference. *Journal of Cleaner Production*, v. 242, 1 jan. 2020.
- TONG, K. et al. Greenhouse gas emissions from key infrastructure sectors in larger and smaller Chinese cities: method development and benchmarking Greenhouse gas emissions from key infrastructure sectors in larger and smaller Chinese cities: method development and benchm. *Carbon Management*, v. 7, n. 1–2, p. 27–39, 2016. Disponível em: <<http://www.tandfonline.com/action/journalInformation?journalCode=tcmt20>>. Acesso em: 23 out. 2018.

- TRANFIELD, D.; DENYER, D.; SMART, P. Towards a Methodology for Developing Evidence-Informed Management Knowledge by Means of Systematic Review. 2013. British Journal of Management. [s.l.: s.n.]. Disponível em: <<https://www.cebma.org/wp-content/uploads/Tranfield-et-al-Towards-a-Methodology-for-Developing-Evidence-Informed-Management.pdf>>. Acesso em: 30 out. 2018.
- TUROK, I. Getting urbanization to work in Africa: the role of the urban land-infrastructure-finance nexus. *Area Development and Policy*, v. 1, n. 1, p. 30–47, 2016. Disponível em: <<http://rsa.tandfonline.com/action/journalInformation?journalCode=rard20>>. Acesso em: 25 out. 2018.
- USTAOGLU, E.; WILLIAMS, B.; PETROV, L. Scenario Analysis of Alternative Land Development Patterns for the Leipzig-Halle Region: Implications for Transport-Land-Use Sustainability. *Urban Planning*, v. 2, n. 1, p. 108, 5 abr. 2017. Disponível em: <<https://www.cogitatiopress.com/urbanplanning/article/view/838>>. Acesso em: 25 out. 2018.
- VALEC. Ferrovias da VALEC. 2019. Disponível em: <<https://www.valec.gov.br/ferrovias/acoes-e-programas/ferrovias-da-valec/>>. Acesso em: 08 abr. 2020.
- VAN WEE, B.; JANSE, P.; VAN DEN BRINK, R. Comparing energy use and environmental performance of land transport modes. *Transport Reviews*, v. 25, n. 1, p. 3–24, 2007. Disponível em: <<http://www.tandfonline.com/action/journalInformation?journalCode=ttrv20>>. Acesso em: 23 out. 2018.
- VASCO CORREA, C. A. Economic evaluation of current conditions of competition and efficiency of automotive and rail systems in Colombia. *Energy Policy*, v. 46, p. 78–87, jul. 2012.
- VERMEIREN, K. et al. Who could benefit from a bus rapid transit system in cities from developing countries? A case study from Kampala, Uganda. *Journal of Transport Geography*, v. 47, p. 13–22, 1 jul. 2015. Disponível em: <<https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0966692315001295>>. Acesso em: 23 out. 2018.
- VOGT-SCHILB, A.; HALLEGATTE, S. Climate Policies and Nationally Determined Contributions: Reconciling the Needed Ambition with the Political Economy IDB WORKING PAPER SERIES. [s.l.: s.n.]. Disponível em: <<https://publications.iadb.org/bitstream/handle/11319/8319/Climate-Policies-and-Nationally-Determined-Contributions-Reconciling-the-Needed-Ambition-with-the-Political-Economy.pdf?sequence=1&isAllowed=y>>. Acesso em: 23 out. 2018.

- VOGT-SCHILB, A.; MEUNIER, G.; HALLEGATTE, S. When starting with the most expensive option makes sense: Optimal timing, cost and sectoral allocation of abatement investment. *Journal of Environmental Economics and Management*, v. 88, p. 210–233, 1 mar. 2018. Disponível em: <<https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0095069617308392>>. Acesso em: 20 out. 2018.
- VUČKOVIĆ, S. Đ. et al. The development of transport infrastructure and attitudes of the local population: a case study from the Republic of Serbia The development of transport infrastructure and attitudes of the local population: a case study from the Republic of Serbia. *Geografisk Tidsskrift-Danish Journal of Geography*, v. 118, n. 1, p. 101–113, 2018. Disponível em: <<http://www.tandfonline.com/action/journalInformation?journalCode=rdgs20>>. Acesso em: 23 out. 2018.
- WAISMAN, H.; GUIVARCH, C.; LECOCQ, F. The transportation sector and low-carbon growth pathways: modeling urban, infrastructure and spatial determinants of mobility. *Climate Policy*, v. 13, n. 1, p. 106–129, 2013. Disponível em: <<https://hal-enpc.archives-ouvertes.fr/hal-00799119>>. Acesso em: 20 out. 2018.
- WANG, L. et al. The Impacts of Transportation Infrastructure on Sustainable Development: Emerging Trends and Challenges. *International journal of environmental research and public health*, v. 15, n. 6, 5 jun. 2018. Disponível em: <<http://www.ncbi.nlm.nih.gov/pubmed/29874785>>. Acesso em: 20 out. 2018.
- WANKE, P. F.; BARROS, C. P. Public-private partnerships and scale efficiency in Brazilian ports: Evidence from two-stage DEA analysis. *Socio-Economic Planning Sciences*, v. 51, p. 13–22, 1 set. 2015.
- WIESEL, I.; LIU, F.; BUCKLE, C. Locational disadvantage and the spatial distribution of government expenditure on urban infrastructure and services in metropolitan Sydney (1988–2015). *Geographical Research*, v. 56, n. 3, p. 285–297, 1 ago. 2018. Disponível em: <<http://doi.wiley.com/10.1111/1745-5871.12245>>. Acesso em: 25 out. 2018.
- XIA, J. et al. A multi-dimensional view of transport-related social exclusion: A comparative study of Greater Perth and Sydney. *Transportation Research Part A: Policy and Practice*, v. 94, p. 205–221, 1 dez. 2016. Disponível em: <<https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0965856415300811>>. Acesso em: 20 out. 2018.
- XIE, J.; ZHOU, S.; CHEN, Y. Integrated data envelopment analysis methods for measuring technical, environmental, and eco-efficiencies. *Journal of Cleaner Production*, v. 238, 20 nov. 2019.

- XIE, R.; FANG, J.; LIU, C. The effects of transportation infrastructure on urban carbon emissions. *Applied Energy*, v. 196, p. 199–207, 15 jun. 2017. Disponível em: <<https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0306261917300223>>. Acesso em: 20 out. 2018.
- XU, M.; GRANT-MULLER, S.; GAO, Z. Implementation effects and integration evaluation of a selection of transport management measures in Beijing. *Case Studies on Transport Policy*, v. 5, n. 4, p. 604–614, 1 dez. 2017. Disponível em: <<https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S2213624X17302808>>. Acesso em: 20 out. 2018.
- YANG, C.H.; LEE, K.C.; CHEN, H.C. Incorporating carbon footprint with activity-based costing constraints into sustainable public transport infrastructure project decisions. *Journal of Cleaner Production*, v. 133, p. 1154–1166, 1 out. 2016. Disponível em: <<https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0959652616306825>>. Acesso em: 25 out. 2018.
- YORK, T. A. et al. Infrastructure implications of a green economy transition in the Western Cape Province of South Africa: A system dynamics modelling approach. *Development Southern Africa*, v. 34, n. 5, p. 529–547, 2017. Disponível em: <<http://www.tandfonline.com/action/journalInformation?journalCode=cbsa20>>. Acesso em: 23 out. 2018.
- YOSHIDA, Y.; FUJIMOTO, H. Japanese-airport benchmarking with the DEA and endogenous-weight TFP methods: testing the criticism of overinvestment in Japanese regional airports. *Transportation Research Part E: Logistics and Transportation Review*, v. 40, n. 6, p. 533–546, 1 nov. 2004. Disponível em: <<https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1366554504000547?via%3Dihub>>. Acesso em: 9 mar. 2019.
- YUAN, H. Achieving Sustainability in Railway Projects: Major Stakeholder Concerns. *Project Management Journal*, v. 48, n. 5, p. 115–132, 1 out. 2017. Disponível em: <<http://journals.sagepub.com/doi/10.1177/875697281704800508>>. Acesso em: 25 out. 2018.
- YUAN, J. et al. Social Risk Factors of Transportation PPP Projects in China: A Sustainable Development Perspective. *International journal of environmental research and public health*, v. 15, n. 7, 24 jun. 2018. Disponível em: <<http://www.ncbi.nlm.nih.gov/pubmed/29937535>>. Acesso em: 20 out. 2018.

- ZEMBRI-MARY, G. Planning transport infrastructures in an uncertain context. Analysis and limits to contemporary planning in France. *European Transport Research Review*, v. 9, n. 4, p. 51, 18 dez. 2017. Disponível em: <<http://link.springer.com/10.1007/s12544-017-0266-4>>. Acesso em: 23 out. 2018.
- ZHANG, R. et al. Contribution of the transport sector to climate change mitigation: Insights from a global passenger transport model coupled with a computable general equilibrium model. *Applied Energy*, v. 211, p. 76–88, 1 fev. 2018. Disponível em: <<https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0306261917315490>>. Acesso em: 20 out. 2018.
- ZHANG, S. et al. Decomposition Analysis of Energy-Related CO₂ Emissions and Decoupling Status in China's Logistics Industry. *Sustainability*, v. 10, n. 5, p. 1340, 25 abr. 2018. Disponível em: <<http://www.mdpi.com/2071-1050/10/5/1340>>. Acesso em: 20 out. 2018.
- ZHENG, B. et al. Infrastructure Shapes Differences in the Carbon Intensities of Chinese Cities. *Environmental Science & Technology*, v. 52, n. 10, p. 6032–6041, 15 maio 2018. Disponível em: <<http://pubs.acs.org/doi/10.1021/acs.est.7b05654>>. Acesso em: 20 out. 2018.
- ZHOU T, ZHOU Y, LIU G. Key Variables for Decision-Making on Urban Renewal in China: A Case Study of Chongqing. *Sustainability*. 2017; 9(3):370.
- ZHOU, G.; CHUNG, W.; ZHANG, Y. Measuring energy efficiency performance of China's transport sector: A data envelopment analysis approach. *Expert Systems with Applications*, v. 41, n. 2, p. 709–722, 2014.
- ZHU, J. Quantitative models for performance evaluation and benchmarking : data envelopment analysis with spreadsheets. [s.l.] Springer, 2009.
- ZHU, Z. et al. CO₂ emissions from the industrialization and urbanization processes in the manufacturing center Tianjin in China. *Journal of Cleaner Production*, v. 168, p. 867–875, 1 dez. 2017. Disponível em: <<https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0959652617319595>>. Acesso em: 20 out. 2018.
- ZUPIC, I.; CATER, T. √. Bibliometric Methods in Management and Organization. *Organizational Research Methods*, v. 18, n. 3, p. 429-472, 2015. Disponível em: <<http://journals.sagepub.com/doi/pdf/10.1177/1094428114562629>>. Acesso em: 30 out. 2018.

APÊNDICES

APÊNDICE A. Informações dos principais trabalhos analisados no capítulo de revisão bibliográfica (análise de *cluster*).

Tabela A1. Principais trabalhos de cada *cluster* (*PageRank* e posição no ranqueamento de todos os artigos analisados).

<i>Cluster</i>	<i>Artigo</i>	<i>PageRank</i>	<i>Ranking</i>
1	Sun e Cui (2018)	0,0165	5
	Wang, Xue, Zhao e Wang (2018)	0,0068	24
	Snieska e Simkunaite (2009)	0,0057	27
	Rovolis e Spence (2002)	0,0056	28
	Olsson (2009)	0,0055	31
2	Xia et al. (2016)	0,0162	7
	Vermeiren et al. (2015)	0,0076	21
	Sakib et al. (2018)	0,0068	23
	Taylor (2008)	0,0048	37
	Vuckovic et al. (2018)	0,0043	43
3	Yuan et al. (2018)	0,0176	4
	Zembri-Mary (2017)	0,0101	16
	Zhou et al. (2017)	0,0085	19
	Van Wee et al. (2007)	0,0047	39
	Sanchez-Ollero et al. (2014)	0,0042	47
4	Xu et al. (2017)	0,0206	3
	Waisman et al. (2013)	0,0150	8
	Yang et al. (2016)	0,0124	12
	York et al. (2017)	0,0106	14
	Zhang et al. (2018)	0,0105	15
5	Zhu et al. (2017)	0,0481	1
	Zheng et al. (2018)	0,0342	2
	Xie et al. (2017)	0,0142	9
	Zhang et al. (2018)	0,0141	10
	Tong et al. (2016)	0,0078	20
6	Vogt-Schilb e Hallegatte (2017)	0,0165	6
	Vogt-Schilb, Meunier e Hallegatte (2018)	0,0124	13
	Taptich e Horvath (2015)	0,0040	52
	Schutze et al. (2017)	0,0029	85
	Jakob et al. (2016)	0,0026	96
7	Schweikert et al. (2014)	0,0042	48
	Pasha et al. (2016)	0,0017	164
	Cui et al. (2010)	0,0015	190
	Kumar e Imam (2013)	0,0013	230
	Cui et al. (2011)	0,0012	248
8	Sierra et al. (2018)	0,0140	11
	Yang et al. (2016)	0,0074	22
	Yuan (2017)	0,0067	25
	Ustaoglu et al. (2017)	0,0059	26
	Pardo-Bosch e Aguado (2016)	0,0048	36
9	Turok (2016)	0,0043	46
	Wiese et al. (2015)	0,0034	69
	Silver (2015)	0,0023	115
	Kennedy (2018)	0,0023	121
	Mell (2018)	0,0022	126
10	Smutek (2017)	0,0023	116
	Salvino et al. (2018)	0,0013	239
	Hsu et al. (2016)	0,0010	295

Fonte: elaborado pelo autor.

APÊNDICE B. Informações dos principais trabalhos analisados no capítulo de revisão bibliográfica (publicações com temas correlatos que utilizaram a DEA).

Tabela B1. Trabalhos que utilizaram a DEA como ferramenta de mensuração de eficiência em temas correlatos (objetos de análise e variáveis utilizadas).

Referência	Objeto de análise	Variáveis	
		<i>Input(s)</i>	<i>Output(s)</i>
Adler, Ülkü e Yazhemsky (2013)	Análise de eficiência de 85 aeroportos regionais de 8 países europeus	Custo com pessoal, outros custos operacionais e extensão total da pista	Número total de passageiros, tráfego aéreo comercial total, toneladas de carga movimentada e receitas não relacionadas às movimentações aéreas
Álvarez e Blázquez (2014)	Influência do investimento público em rodovias na produtividade dos agentes privados na Espanha	Produto interno bruto	Número de empregos no setor privado e estoque de capital privado
Amoroso, Castelluccio e Maritano (2015)	Aeroportos e heliportos da Itália	Área do aeroporto, número de vagas no estacionamento, área total do terminal e área total destinada ao estacionamento das aeronaves	Número total de passageiros, população residente que consegue chegar no aeroporto em 90 minutos, movimentação total nos horários de pico e receita líquida total
Barros e Peypoch (2009)	Eficiência de companhias aéreas da Europa	Número de funcionários, número de aeronaves e custo operacional	Receita operacional por passageiro por quilômetro e EBITDA
Bray, Caggiani e Ottomanelli (2015)	Performance de portos	Quantidade de carga movimentada	Número total de guindastes, número de berços de movimentação de contêiner, número de rebocadores, área do terminal, tempo médio de atraso e número de funcionários do porto
Carlucci, Cirà e Coccoresse (2018)	Análise de eficiência de 34 aeroportos regionais na Itália	Custo total de mão de obra, capital investido e outras despesas	Total de carga movimentada, total de passageiros, total de aeronaves, receitas oriundas de atividades aéreas, receitas oriundas de atividades de movimentação e receitas oriundas de atividades comerciais
Castellano et al. (2019)	Eficiência dos portos a partir dos investimentos em tecnologia de comunicação	Investimento total realizado no porto, área do porto e número de funcionários do porto	Movimentação de grãos líquidos, movimentação de contêineres e movimentação de grãos líquidos
Caulfield, Bailey e Mullarkey (2013)	Eficiência das opções de investimento em transporte público	Custo de construção, operação e manutenção	Redução no tempo de viagem, redução estimada nas viagens com carros e número de passageiros
Chen, Shen, Zhang, Li e Ren (2019)	Eficiência de utilização de infraestruturas urbanas na China	Área pavimentada, consumo anual de água, consumo anual de eletricidade, consumo anual de petróleo, total de usuários de internet, número de agências postais, número de escolas primárias e secundárias, total de coleções nas bibliotecas públicas, número de leitos	PIB regional, receita pública total, número de empregos no setor de infraestrutura e emissão total de CO ₂

		nos hospitais e área coberta por vegetação	
Cheng e Lu (2017)	Eficiência dos investimentos em infraestrutura urbana na China	Área total de rodovias pavimentadas por habitante, suprimento total de água, consumo <i>per capita</i> de energia elétrica, taxa de penetração de gás, área per capita coberta por vegetação e número de bibliotecas e hospitais	PIB <i>per capita</i> , total de empregos no setor de infraestrutura e nível de urbanização
Cullinane, Wang, Song e Ji (2006)	Eficiência dos terminais portuários de contêineres	Área total do terminal, tamanho do berço de atracação, número de transportadores de contêineres, número de equipamentos de carregamento dos navios e número de equipamentos para a movimentação de contêineres nos pátios dos portos	Movimentação total de contêineres
Dash e Balachandra (2016)	Eficiência da sustentabilidade urbana de 36 municípios na Índia	Densidade populacional, total de população com carro, renda média da população local, total de passageiros por quilômetro e por habitante, índice de motorização, transporte público total, transporte privado total e índice de congestionamento	Índice <i>mobility energy intensity</i> , índice <i>transport energy intensity</i> , uso de energia no transporte público, uso de energia no transporte público por pessoa, uso de energia no transporte privado e uso de energia no transporte privado por pessoa, consumo de petróleo, consumo de diesel
Díaz-Hernández, Martínez-Budría e Salazar-González (2014)	Eficiência de 27 portos na Espanha entre 2000 e 2007	Área total, tamanho das docas, número de funcionários, consumo de energia, despesas com manutenção, gastos com transporte, dentre outros	Dados de movimentações de carga geral (em contêineres ou não), de carga granel sólida, de carga granel líquida e de passageiros
Doomernik (2015)	Eficiência de sistemas ferroviários de alta velocidade	Número de trens, comprimento da rede e número de assentos	Tempo de viagem e número de passageiros
Eboli, Fu e Mazzulla (2016)	Qualidade do serviço das ferrovias	-	Avaliação via metodologia SERVQUAL, com as dimensões: (i) tangibilidade; (ii) confiabilidade; (iii) responsividade; (iv) garantias; e (v) empatia. Todas as variáveis são consideradas como <i>outputs</i>
Fancello, Uccheddu e Fadda (2014)	Avaliação da performance de sistemas de transporte urbano	Número de veículos registrados na área metropolitana de extensão da rede, número de pontos de parada nas proximidades da prefeitura da cidade, gasto público por quilômetro da rede e número de ônibus por quilômetro da rede	Nível de serviço, tempo médio para a chegada à prefeitura, número de acidentes fatais por quilômetro da rede e número de passageiros transportados por quilômetro da rede

Guimarães, Junior e Garcia (2014)	Eficiência ambiental de terminais de contêineres no Brasil	Consumo total de energia, consumo total de energia não renovável, emissão de resíduos, consumo de equipamentos de escritório, emissão de CO ₂ , emissões totais de poluentes atmosféricos e consumo de água pelos funcionários	Movimentação total de contêineres
Hajduk (2018)	Avaliação da performance de sistemas de transporte urbano	Gasto públicos com transporte	Extensão das rodovias pavimentadas por habitante, extensão das linhas de ônibus por habitante e extensão das ciclovias por habitante
Hilmola, Lorentz e Rhoades (2015)	Eficiência de diferentes opções de transporte de carga entre as localidades de Helsinki (Finlândia) e Tallinn (Estônia)	Tempo de entrega, emissão de gás carbônico, consumo de diesel e custo total	Quantidade total transportada
Jalali Sepehr, Haeri e Ghousi (2019)	Eficiência energética de 132 países ao longo do tempo	PIB por unidade de energia consumida e consumo de energia renovável	PIB e emissão de CO ₂ por unidade do PIB
Jia e Liu (2012)	Eficiência energética e ambiental de províncias chinesas entre 2004 e 2010	Emissão de gases poluentes e consumo de energia	Produto interno bruto
Jiang e Li (2009)	Eficiência de portos marítimos na Ásia	PIB regional, comprimento dos berços de atracação, número de guindastes e importação/exportação regional	Movimentação portuária
Kutin, Nguyen e Vallée (2017)	Eficiência dos terminais portuários de contêineres na Ásia	Profundidade do berço de atracação, tamanho do pátio de contêiner, tamanho do cais, número de berços de atracação, número de equipamentos de movimentação de contêiner e número de caminhões utilizados na movimentação de contêiner	Movimentação total de contêiner
Kyriacou, Muinelo-Gallo e Roca-Sagalés (2019)	Análise de eficiência dos investimentos em infraestrutura de transporte de 34 países	Investimento total em infraestrutura de transporte	Índice de qualidade da infraestrutura de transporte
Li, Fang, Yang, Wang e Hong (2013)	Análise de eficiência ambiental de diferentes regiões na China	Estoque de capital regional, total de empregos na região e consumo de energia na região	Emissão de gases, geração de resíduos sólidos, geração de água de resíduo industrial e PIB
Li, Yang, Zhang e Cao (2016)	Impacto dos investimentos em infraestrutura de transporte na eficiência dos sistemas de transporte regionais da China	Número total de empregos, estoque de capital e total de energia consumida no sistema de transporte regional	Número total de passageiros, PIB do setor de transporte e emissão de CO ₂ no setor de transporte
Marchetti e Wanke (2017)	Análise de eficiência dos operadores ferroviários no Brasil	Número de vagões em circulação e número total de funcionários	Movimentação total de carga
Melo, Alves Junior, Perico, Guzman e Rebelatto (2018)	Eficiência dos corredores de transporte de soja no Brasil e nos Estados Unidos	Consumo de combustível e área plantada + extensão da rota (variável discricionária)	Colheita transportada, capacidade de estocagem na fazenda, índice de mortalidade na operação/modal de

			transporte do país, alienação de ativos na economia ¹¹ , emissões, armazenagem fora da fazenda
Merkert, Smith e Nash (2010)	Análise de eficiência de operadores ferroviários (43 empresas na Suécia, Alemanha e Inglaterra)	Gasto anual na operação, número total de funcionários, número de funcionários nas áreas administrativas e de gestão e número de funcionários nas áreas de operação	Movimentação ferroviária em toneladas por quilômetros e movimentação ferroviária por passageiro por quilômetro
Ozbek, de la Garza e Triantis (2010)	Eficiência da manutenção de pontes rodoviárias	Custo de manutenção da ponte, variável de efeito regional e soma da extensão total das pontes na região	Mudança nas condições da ponte
Pina e Torres (2001)	Eficiência do oferecimento de serviços de transporte urbano	Total de quilômetros por funcionário, total quilômetros por ano e por ônibus, total de quilômetros por ano e por habitante, população local, índice de acidentes e frequência de viagens	Rendimento no consumo de combustível, subsídio por passageiro, custo por quilômetro e custo por passageiro
Rogers e Weber (2011)	Análise dos <i>tradeoffs</i> entre a receita das operações do transporte rodoviário, as emissões de CO ₂ e as mortes no trânsito aplicada para os 50 Estados dos Estados Unidos, entre 2002 e 2007	Consumo total de combustível, total de empregos no setor, capital privado, gastos públicos em manutenção de rodovias e extensão total das rodovias	Receita do transporte rodoviário, número total de mortes no trânsito e emissão de CO ₂ nas operações de transporte
Saxena, Chotia e Rao (2018)	Eficiência dos investimentos públicos em infraestrutura na Índia	Investimento público estadual no setor analisado	Comprimento total de rodovias estaduais, comprimento total do trecho ferroviário no Estado, número de universidades e colégios, número de escolas, número de professores universitários, número de professores nas escolas, número de centros de saúde nas áreas rurais, número de hospitais públicos, número de leitos em hospitais públicos, percentual de área irrigada no Estado, número de telefones, percentual de vilas com energia elétrica, capacidade instalada para geração de energia elétrica e total de energia elétrica gerada

¹¹ Em inglês: “*disposal factor*”.

Shah e Ahmad (2019)	Eficiência de rodovias em relação ao número de acidentes	Número total de acidentes e número total de pessoas afetadas pelos acidentes	Total de veículos dividido pela capacidade de transporte da rodovia, veículos trafegados por quilômetro de rodovia e total de horas em viagem na rodovia
Simões e Marques (2010)	Eficiência da performance de 41 portos europeus	OPEX e CAPEX	Movimentação de carga geral, movimentação de contêineres, movimentação RORO, movimentação de grânéis sólidos, movimentação de grânéis líquidos e movimentação de passageiros
Su e Rogers (2012)	Avaliação da eficiência econômica e ambiental do setor de transporte em 41 países	Número de empregos no setor de transporte, consumo de combustível e emissão de CO ₂ no transporte	Valor adicionado a economia proveniente do setor de transporte e quantidade de carga transportada por quilômetro
Swami e Parida (2015)	Avaliação da eficiência das estações e linhas de metrô na Índia	Variáveis diversas relacionadas as operação das linhas e estações de metrô	Variáveis diversas relacionadas a interconectividade das estações, total de passageiros, dentre outras
Tian, Tang, Che e Wu (2020)	Avaliação da sustentabilidade no transporte	Comprimento total das rotas de transporte, densidade do transporte, capital investido, total de funcionários, gasto total com transporte, total de veículos, área total destinada ao transporte e consumo de combustíveis fósseis	Qualidade das rotas de transporte, percentual de veículos sem atraso, acessibilidade nas áreas rurais, velocidade dos veículos, nível educacional, acidentes de trânsito, nível de renda, capacidade de transporte de passageiros, capacidade de transporte de carga, total de passageiros por quilômetro, total de toneladas transportadas por quilômetro, emissões de carbono, emissão de gases poluentes e poluição sonora
Vasco Correa (2012)	Análise da eficiência das empresas de transporte rodoviário e ferroviário na Colômbia	Gasto total com combustível, gasto total com lubrificantes, gasto total com graxa, gasto total com filtros, gasto total com manutenção e gasto total com salários	Total de carga movimentada
Wanke e Barros (2015)	Análise da eficiência em portos brasileiros	Comprimento do cais, profundidade máxima do cais, número de berços de atracação, área de armazenagem, área total do pátio, largura do canal de acesso e profundidade do canal de acesso	Tempo total anual de carregamento de grânéis sólidos, tempo total anual de carregamento de contêiner, movimentação total de grânéis sólidos, movimentação total de contêineres, frequência de navios de grânéis sólidos e frequência de navios de contêiner

Xie, Zhou e Chen (2019)	Mensuração da eficiência técnica, ambiental e da ecoeficiência em sistemas de transporte rodoviário da China	Extensão total de rodovias, total de veículos civis, número total de empregos no setor de transporte e total de energia consumida pelo setor	Emissão de CO ₂ , total de passageiros por quilômetro e total de movimentação de carga por quilômetros de via
Yoshida e Fujimoto (2004)	Eficiência de 67 aeroportos (regionais e internacionais) no Japão	Comprimento total das pistas, tamanho do terminal, total de funcionários e custos de acesso ao aeroporto	Volume total de passageiros, movimentação de carga e movimentação de aeronaves
Zhou, Chung e Zhang (2013)	Performance das emissões de CO ₂ no setor de transporte da China	Emprego, consumo total de energia por fonte energética	Total de passageiros por quilômetro, quantidade de carga movimentada por quilômetro e emissão de CO ₂

Fonte: elaborado pelo autor.

APÊNDICE C.*Script (software GAMS) do modelo de minimização dos custos de transporte.*

```
*****
***** MODELO MATEMÁTICO: MINIMIZAÇÃO DO CUSTO DE TRANSPORTE *****
*****
*PRODUTO: SOJA
*TESE DE DOUTORADO: FERNANDO VINÍCIUS DA ROCHA
*PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ECONOMIA APLICADA | ESALQ/USP
*****
```

```
**** leitura dos dados do Excel
```

```
$ONECHO > PARAMETROS.TXT
```

```
set=i      rng=sets!A2:A2275      rdim=1
set=j      rng=sets!B2:B35        rdim=1
set=k      rng=sets!C2:C15        rdim=1
set=m      rng=sets!D2:D6         rdim=1
set=q      rng=sets!E2:E69        rdim=1
set=tporto rng=sets!G2:H49         rdim=2
set=invnt  rng=sets!J2:J94        rdim=1
set=invtpor rng=sets!L2:M143       rdim=2
par=A      rng=A!A2:B50000        rdim=1
par=B      rng=B!A2:B50000        rdim=1
par=C      rng=C!A2:B50000        rdim=1
par=MI     rng=MI!A2:B50000       rdim=1
par=CAPINV rng=CAPINV!A2:B30000   rdim=1
par=E      rng=E!A2:B80000        rdim=1
par=F      rng=F!A2:C77317        rdim=2
par=S      rng=S!A2:C154633       rdim=2
par=G      rng=G!A2:C31837        rdim=2
par=O      rng=O!A2:C49           rdim=2
par=N      rng=N!A2:C71           rdim=2
par=FRDOINV rng=FRDOINV!A2:C211483 rdim=2
par=FMULTINV rng=FMULTINV!A2:C143  rdim=2
par=DISTF   rng=DISTF!A2:C77317    rdim=2
par=DISTG   rng=DISTG!A2:C31837    rdim=2
par=DISTS   rng=DISTS!A2:C154633   rdim=2
par=DISTFRDOINV rng=DISTFRDOINV!A2:C211483 rdim=2
par=EMISMULTATUA rng=EMISMULTATUA!A2:C49 rdim=2
par=EMISMULTINV rng=EMISMULTINV!A2:C143 rdim=2
par=PERDAMULTATUA rng=PERDAMULTATUA!A2:C49 rdim=2
par=PERDAMULTINV rng=PERDAMULTINV!A2:C143 rdim=2
```

```
$OFFECHO
```

```
$CALL GDXRW.EXE arquivogams_FINAL.xlsx @PARAMETROS.TXT trace=3
$GDXIN arquivogams_FINAL.gdx
```

```
*****
*** definição dos conjuntos do modelo matemático
```

```
SETS
```

i pontos de origem de carga (municípios brasileiros produtores de soja)
j terminais de transbordo multimodal (modais rodoviário e ferroviário) atualmente existentes
k portos exportadores de soja
m mercado externo (destino das exportações de soja)

tporto(j,k) fluxos de transporte possíveis entre os terminais de transbordo multimodal existentes e os portos exportadores

q mercado interno (indústrias moageiras de soja no Brasil)

invt terminais de transbordo multimodal dos projetos de investimento em infraestrutura de transporte

invtpor(invt,k) fluxos de transporte possíveis entre os terminais de transbordo multimodal dos projetos e os portos exportadores

;

\$LOAD i j k m q tporto invt invtpor

DISPLAY i ;

DISPLAY j ;

DISPLAY k ;

DISPLAY m ;

DISPLAY q ;

DISPLAY tporto ;

DISPLAY invt ;

DISPLAY invtpor ;

SCALAR

EMISSAORODO coeficiente de emissão para o transporte rodoviário / 0.03914 /

CPTRD coeficiente de perdas de grãos nos fluxos de exportação via modal rodoviário direto / 0.00382 /

CPTI coeficiente de perdas de grãos nos fluxos de abastecimento das indústrias moageiras / 0.00132 /

;

DISPLAY EMISSAORODO ;

DISPLAY CPTRD ;

DISPLAY CPTI ;

**** definição dos parâmetros do modelo matemático

PARAMETERS

* parâmetros de oferta de produção

A(i) produção de soja nos municípios i em toneladas

* parâmetros de capacidade de transporte das soluções multimodais

B(j) capacidade de transporte dos terminais de transbordo multimodal existentes j em toneladas

* parâmetros de capacidade de transporte dos portos

C(k) capacidade de exportação dos portos k em toneladas

* parâmetros de demanda por carga

E(m) demanda de carga do mercado externo m em toneladas

MI(q) demanda de carga do mercado interno q em toneladas

* parâmetros de capacidade das soluções multimodais dos projetos de investimento em infraestrutura de transporte multimodal

CAPINV(invt) capacidade de transporte dos terminais de transbordo multimodal dos projetos de investimento em infraestrutura de transporte invt em toneladas

* valores de frete (rodoviário, multimodal e marítimo)

F(i,j) frete rodoviário entre as cidades produtoras i e os terminais de transbordo multimodais j em reais por tonelada.

G(i,k) frete rodoviário entre as cidades produtoras i e os portos k em reais por tonelada

S(i,q) frete rodoviário entre as cidades produtoras i e o mercado interno q em reais por tonelada

O(j,k) frete multimodal entre os terminais de transbordo existentes j e os portos k em reais por tonelada

$N(k,m)$ frete marítimo entre os portos k e o mercado externo m em reais por tonelada

$FRODOINV(i,inv)$ frete rodoviário entre as cidades produtoras i e os terminais intermodais dos projetos de investimento inv em reais por tonelada

$FMULTINV(inv,k)$ frete multimodal entre os terminais intermodais dos projetos de investimento inv e os portos k em reais por tonelada

* distâncias rodoviárias

$DISTF(i,j)$ distância rodoviária entre os pontos de origem de carga i e os terminais de transbordo multimodal j em quilômetros

$DISTG(i,k)$ distância rodoviária entre os pontos de origem de carga i e os terminais portuários k em quilômetros

$DISTS(i,q)$ distância rodoviária entre os pontos de origem de carga i e os destinos do mercado interno q em quilômetros

$DISTFRODOINV(i,inv)$ distância rodoviária entre os pontos de origem de carga i e os terminais de transbordo projetados inv em quilômetros

* coeficientes do transporte multimodal para o cálculo das emissões de CO₂

$EMISMULTATUA(j,k)$ coeficiente de emissão de CO₂ do transporte multimodal nas infraestruturas existentes entre os terminais de transbordo j e os terminais portuários k em quilogramas de CO₂ por tonelada de carga transportada

$EMISMULTINV(inv,k)$ coeficiente de emissão de CO₂ do transporte multimodal nas infraestruturas projetadas entre os terminais de transbordo inv e os terminais portuários k em quilogramas de CO₂ por tonelada de carga transportada

* coeficientes do transporte multimodal para o cálculo das perdas

$PERDAMULTATUA(j,k)$ coeficiente de perdas físicas de soja na operação de transporte multimodal nas infraestruturas existentes entre os terminais de transbordo j e os terminais portuários k em porcentagem

$PERDAMULTINV(inv,k)$ coeficiente de perdas físicas de soja na operação de transporte multimodal nas infraestruturas projetadas entre os terminais de transbordo inv e os terminais portuários k em porcentagem

;

\$LOAD A B C MI E F G S O N FRODOINV FMULTINV CAPINV DISTF DISTG DISTS DISTFRODOINV
EMISMULTATUA EMISMULTINV PERDAMULTATUA PERDAMULTINV
\$GDXIN

DISPLAY A ;
DISPLAY B ;
DISPLAY C ;
DISPLAY MI ;
DISPLAY CAPINV ;
DISPLAY E ;
DISPLAY F ;
DISPLAY G ;
DISPLAY S ;
DISPLAY O ;
DISPLAY N ;
DISPLAY FRODOINV ;
DISPLAY FMULTINV ;
DISPLAY DISTF ;
DISPLAY DISTG ;
DISPLAY DISTS ;
DISPLAY DISTFRODOINV ;
DISPLAY EMISMULTATUA ;
DISPLAY EMISMULTINV ;
DISPLAY PERDAMULTINV ;
DISPLAY PERDAMULTATUA ;

**** definição das variáveis do modelo matemático

VARIABLES

* variáveis de quantidade transportada entre os nós do modelo

$X(i,j)$ quantidade de carga transportada entre as origens i e os terminais de transbordo multimodais j em toneladas

Y(i,k) quantidade de carga transportada entre as origens i e os portos k em toneladas.
 T(i,q) quantidade de carga transportada entre as origens i e os municípios com moageiras q em toneladas
 W(j,k) quantidade de carga transportada entre os terminais de transbordo multimodais j e os portos k em toneladas
 U(k,m) quantidade de carga transportada entre os portos k e o destino final m em toneladas
 QRODOINV(i,inv) quantidade de carga transportada entre as origens i e os terminais de transbordo projetados invt em toneladas
 QMULTINV(inv,t,k) quantidade de carga transportada entre os terminais de transbordo projetados invt e os portos k em toneladas

* variáveis para cálculo do modelo

R custo total de transporte de grãos

RMED custo de transporte em reais por tonelada

CO2 emissão total de CO2

CO2SOJA emissão total de CO2 por tonelada de soja transportada

CUSTOBR custo de transporte de grãos até os portos brasileiros e até as indústrias (não inclusão do transporte marítimo)

PERDA perda de soja (física) no sistema logístico

;

* característica numérica das variáveis

POSITIVE VARIABLE X, Y, T, W, U, QRODOINV, QMULTINV ;

**** definição das equações do modelo matemático

EQUATIONS

* definindo as equações do modelo

CUSTO função objetivo do modelo matemático

CMEDIO custo médio de transporte em reais por tonelada

OF(i) equação de restrição de oferta de carga

PORTO(k) equação de restrição das capacidade portuárias de movimentação de carga

MOAG(q) equação de restrição de capacidade nas industrias moageiras

MEXT(m) equação de restrição de demanda do mercado externo

MULT(j) equação de restrição de capacidade dos terminais multimodais

BMULT(j) equação de balanceamento da movimentação nos terminais multimodais

BPORTO(k) equação de balanceamento da movimentação nos portos

TVITORIA(k) equação que iguala a zero as movimentações rodoviárias para o porto de Vitória (ES)

RINV(inv) equação de restrição de capacidade dos terminais projetados para investimento

BINV(inv) restrição de balanceamento de carga terminais para os terminais projetados para investimento

EMISSAOTOTAL emissão de CO2 total do transporte até os portos

EMISSAOPORTONELADADESOJA emissão de CO2 por tonelada de soja movimentada

CUSTOATEPORTO custo de transporte no Brasil (sem o transporte marítimo)

PERDATOTAL perdas nas operações de transporte em território brasileiro

;

* função objetivo do modelo matemático

CUSTO .. R =E= SUM((i,j),F(i,j)*X(i,j)) + SUM((i,k),G(i,k)*Y(i,k)) + SUM((j,k),tpor(j,k),O(j,k)*(W(j,k))) + SUM((k,m),N(k,m)*U(k,m)) + SUM((i,q),S(i,q)*T(i,q)) + SUM((i,inv),QRODOINV(i,inv)*FRODOINV(i,inv)) + SUM((inv,t,k),\$invtpor(inv,t,k),QMULTINV(inv,t,k)*FMULTINV(inv,t,k)) ;

* equação de restrição de oferta de carga do modelo matemático

OF(i) .. SUM(k,Y(i,k)) + SUM(j,X(i,j)) + SUM(q,T(i,q)) + SUM(inv,QRODOINV(i,inv)) =E= A(i) ;

* equação de restrição de demanda no mercado interno

MOAG(q) .. SUM (i,T(i,q)) =E= MI(q) ;

* equação de restrição de demanda no mercado externo

MEXT(M) .. SUM(k,U(k,m)) =E= E(m) ;

* equação de restrição de capacidade portuária

PORTO(k) .. SUM(i,Y(i,k)) + SUM(j\$tpor(j,k),W(j,k)) =L= C(k) ;

* equação de restrição de capacidade dos terminais intermodais

MULT(j) .. SUM(i,X(i,j)) =L= B(j) ;

* equação de balanceamento de carga nos terminais de transbordo

BMULT(j) .. SUM(i,X(i,j)) - SUM(k\$tpor(j,k),W(j,k)) =E= 0 ;

* equação de balanceamento de carga no porto

BPORTO(K) .. SUM(i,Y(i,k)) + SUM(j\$tpor(j,k),W(j,k)) + SUM(invt\$invtpor(invt,k),QMULTINV(invt,k)) - SUM(m,U(k,m)) =E= 0 ;

* equação de restrição do transporte ferroviário para o porto de Vitória (ES): toda a carga chega ao porto pela ferrovia

TVITORIA(k)\$ (ORD(k) EQ 8) .. SUM(i,Y(i,k)) =E= 0;

* equação de restrição de capacidade dos terminais intermodais projetados

RINVT(invt) .. SUM(i,QRODOINV(i,invt)) =L= CAPINV(invt) ;

* equação de balanceamento de carga nos terminais de transbordo projetados

BINVT(invt) .. SUM(i,QRODOINV(i,invt)) - SUM(k\$invtpor(invt,k),QMULTINV(invt,k)) =E= 0 ;

* equação para cálculo das emissões de CO2

EMISSAOTOTAL .. CO2 =E= (SUM((i,j),DISTF(i,j)*X(i,j))*EMISSAORODO + SUM((i,k),DISTG(i,k)*Y(i,k))*EMISSAORODO + SUM((i,q),DISTS(i,q)*T(i,q))*EMISSAORODO + SUM((i,invt),QRODOINV(i,invt)*DISTFRODOINV(i,invt))*EMISSAORODO + SUM((invt,k),QMULTINV(invt,k)*EMISMULTINV(invt,k)) + SUM((j,k),EMISMULTATUA(j,k)*W(j,k))) / 1000 ;

* equação para cálculo das perdas físicas na operação de transporte

PERDATOTAL .. PERDA =E= SUM((i,k),Y(i,k))*CPTRD + SUM((j,k),W(j,k))*PERDAMULTATUA(j,k) + SUM((invt,k),QMULTINV(invt,k))*PERDAMULTINV(invt,k) + SUM((i,q),T(i,q))*CPTI ;

* equação do custo de transporte médio do Brasil em R\$/tonelada

CMEDIO .. RMED =E= R / SUM(i, A(i));

* equação de cálculo das emissões por tonelada de soja transportada

EMISSAOPORTONELADADESOJA .. CO2SOJA =E= ((SUM((i,j),DISTF(i,j)*X(i,j))*EMISSAORODO + SUM((i,k),DISTG(i,k)*Y(i,k))*EMISSAORODO + SUM((i,q),DISTS(i,q)*T(i,q))*EMISSAORODO + SUM((i,invt),QRODOINV(i,invt)*DISTFRODOINV(i,invt))*EMISSAORODO + SUM((invt,k),QMULTINV(invt,k)*EMISMULTINV(invt,k)) + SUM((j,k),EMISMULTATUA(j,k)*W(j,k))) / 1000) / SUM(i, A(i)) ;

* equação de cálculo dos custo de transporte até os portos (sem o transporte marítimo)

CUSTOATEPORTO .. CUSTOBR =E= (SUM((i,j),F(i,j)*X(i,j)) + SUM((i,k),G(i,k)*Y(i,k)) + SUM((j,k)\$tpor(j,k),O(j,k)*(W(j,k))) + SUM((i,q),S(i,q)*T(i,q)) + SUM((i,invt),QRODOINV(i,invt)*FRODOINV(i,invt)) + SUM((invt,k)\$invtpor(invt,k),QMULTINV(invt,k)*FMULTINV(invt,k))) / SUM(i, A(i)) ;

MODEL CUSTO_TOTAL /ALL/ ;

SOLVE CUSTO_TOTAL USING MIP MINIMIZING R ;

DISPLAY U.L, Y.L, T.L, X.L, W.L, QMULTINV.L, QRODOINV.L, RMED.L, CO2.L, CO2SOJA.L, CUSTOBR.L, PERDA.L ;

*** exportando os resultados do modelo para o Excel

execute_unload "resultados1.gdx", X Y T U W QMULTINV QRODOINV RMED CUSTOBR CO2 PERDA

```

EXECUTE 'gdxxrw.exe resultados1.gdx O=C:\Users\ferna\Desktop\gams\Resultados.xlsx var=X
rng=X!A1:ZZ100000 rdim=2'
EXECUTE 'gdxxrw.exe resultados1.gdx O=C:\Users\ferna\Desktop\gams\Resultados.xlsx var=Y
rng=Y!A1:ZZ100000 rdim=2'
EXECUTE 'gdxxrw.exe resultados1.gdx O=C:\Users\ferna\Desktop\gams\Resultados.xlsx var=U
rng=U!A1:ZZ100000 rdim=2'
EXECUTE 'gdxxrw.exe resultados1.gdx O=C:\Users\ferna\Desktop\gams\Resultados.xlsx var=W
rng=W!A1:ZZ100000 rdim=2'
EXECUTE 'gdxxrw.exe resultados1.gdx O=C:\Users\ferna\Desktop\gams\Resultados.xlsx var=T
rng=T!A1:ZZ100000 rdim=2'
EXECUTE 'gdxxrw.exe resultados1.gdx O=C:\Users\ferna\Desktop\gams\Resultados.xlsx var=QMULITNV
rng=QMULITNV!A1:ZZ100000 rdim=2'
EXECUTE 'gdxxrw.exe resultados1.gdx O=C:\Users\ferna\Desktop\gams\Resultados.xlsx var=QRODOINV
rng=QRODOINV!A1:ZZ100000 rdim=2'
EXECUTE 'gdxxrw.exe resultados1.gdx O=C:\Users\ferna\Desktop\gams\Resultados.xlsx var=RMED
rng=RMED!A1:ZZ100000 rdim=0'
EXECUTE 'gdxxrw.exe resultados1.gdx O=C:\Users\ferna\Desktop\gams\Resultados.xlsx var=CUSTOBR
rng=CUSTOBR!A1:ZZ100000 rdim=0'
EXECUTE 'gdxxrw.exe resultados1.gdx O=C:\Users\ferna\Desktop\gams\Resultados.xlsx var=CO2
rng=CO2!A1:ZZ100000 rdim=0'
EXECUTE 'gdxxrw.exe resultados1.gdx O=C:\Users\ferna\Desktop\gams\Resultados.xlsx var=PERDA
rng=PERDA!A1:ZZ100000 rdim=0'
;

```

APÊNDICE D. Modelo econométrico (regressão múltipla) utilizado para a mensuração do impacto do custo médio do transporte de soja no Índice de Desenvolvimento Humano Municipal (IDHM) das localidades produtoras da oleaginosa.

Conforme apresentado na seção 3.2 da tese, uma das métricas de análise do impacto social dos projetos de investimento em infraestrutura de transporte utiliza informações relativas ao impacto do custo médio de transporte no Índice de Desenvolvimento Humano dos municípios produtores de soja. A análise desse impacto para posterior uso das informações nos modelos de Análise Envoltória de Dados foi realizada a partir do uso do modelo de regressão múltipla retratado pela expressão matemática (I).

$$\begin{aligned} \ln IDHM_i = & \beta_0 + \beta_1 CUSTO_i + \beta_2 PIBAGROPEC_i + \beta_3 PIBPERCAPTA_i + \beta_4 POP_i \\ & + \beta_5 GINI_i + \beta_6 CENTROOESTE_i + \beta_7 SUL_i + \beta_8 SUDESTE_i \\ & + \beta_9 NORTE_i + e \end{aligned} \quad (I)$$

Para o caso aqui analisado, i representa os municípios produtores de soja no Brasil no ano de 2017 (IBGE, 2018). A variável dependente é retratada como $\ln IDHM_i$, que mede o Índice de Desenvolvimento Humano Municipal (IDHM) das localidades produtoras de soja i . Os valores do IDHM foram obtidos junto a base de dados do IBGE (2019b) e fazem referência ao ano de 2010, sendo feita uma transformação dos dados via logaritmo neperiano ($\ln$). Cabe destacar que dos 2.276 municípios produtores de soja no ano de 2017, dois não foram considerados nessa análise em função de não estarem disponíveis informações sobre o IDHM dos mesmos. As localidades excluídas dessa análise foram: Mojuí dos Campos (PA) e Paraíso das Águas (MS).

Como variável explicativa do modelo de regressão linear múltipla, $CUSTO_i$ representa o custo médio de transporte de soja, em Reais por tonelada, do município i . Tal variável foi obtida por meio dos resultados do modelo de minimização de custos de transporte do cenário “C-BASE”, e representa o custo municipal do transporte de soja no ano de 2017 (vide discussão apresentada na seção 4.1).

As demais variáveis foram inseridas no modelo unicamente tendo a função de controle das equações (variáveis de controle), sendo descritas na sequência:

- i. A variável $PIBAGROPEC_i$ apresenta valores do Produto Interno Bruto relativo ao setor da agropecuária do município i . Os dados foram obtidos junto ao IBGE (2019c) e são relativos ao ano de 2016 (valores em mil Reais).
- ii. POP_i retrata a estimativa populacional dos municípios brasileiros para o ano de 2017, de acordo com dados do IBGE (2019a). Os dados são apresentados na unidade “número de habitantes”.
- iii. $PIBPERCAPTA_i$ diz respeito ao valor total do Produto Interno Bruto (PIB) por habitante do município i , em Reais. Tal variável foi obtida com base nas informações do PIB municipal do ano de 2016 (IBGE, 2019c) e da variável POP_i acima detalhada – divisão do PIB municipal pelo número de habitantes do município.
- iv. $GINI_i$ representa o Índice de Gini da Renda Domiciliar Per Capita. Os dados foram obtidos junto à base de dados do IBGE (2019d) e fazem referência ao ano de 2010.
- v. As variáveis $CENTROOESTE_i$, SUL_i , $SUDESTE_i$ e $NORTE_i$ são variáveis binárias que retratam a localização do município i nas regiões brasileiras. Em SUL_i , por exemplo, a variável tem valor

igual a 1 se i é localizado na região sul do país, caso contrário tem valor igual a zero. A mesma lógica se aplica as demais variáveis binárias.

Por fim, β_0 representa o intercepto e e o termo de erro da regressão.

A descrição das variáveis é apresentada na Tabela D1. Relação positiva é esperada entre $\ln IDHM_i$ e as variáveis $PIBAGROPEC_i$, $PIBPERCAPTA_i$ e POP_i , ao passo que relação é inversa é a expectativa inicial em relação a $CUSTO_i$ e $GINI_i$. O resumo das estatísticas descritivas de cada uma das variáveis é apresentado na Tabela D2.

Tabela D1. Descrição das variáveis do modelo de regressão múltipla.

Variável	Unidade de medida	Base de dados	Sinal esperado na análise dos resultados
$\ln IDHM_i$	Logaritmo neperiano do IDHM	IBGE (2019b)	Não se aplica
$CUSTO_i$	R\$/t	Modelo de minimização do custo de transporte (Resultados da Etapa 1)	-
$PIBAGROPEC_i$	R\$ 1.000,00	IBGE (2019c)	+
$PIBPERCAPTA_i$	R\$	IBGE (2019c)	+
POP_i	Número de habitantes	IBGE (2019a)	+
$GINI_i$	Índice	IBGE (2019d)	-
$CENTROOESTE_i$	Binária		Não se aplica
SUL_i	Binária		Não se aplica
$SUDESTE_i$	Binária		Não se aplica
$NORTE_i$	Binária		Não se aplica

Fonte: elaborado pelo autor.

Tabela D2. Estatísticas descritivas das variáveis.

Variável	Média	Desvio Padrão	Valor Máximo	Valor Mínimo	Número de Observações
$\ln IDHM_i$	- 0,36	0,08	- 0,19	- 0,72	2.272
$CUSTO_i$	78,09	54,73	257,07	5,35	2.272
$PIBAGROPEC_i$	90.193,43	121.232,91	1.402.282,11	1.359,17	2.272
$GINI_i$	0,49	0,07	0,79	0,31	2.272
POP_i	28.268,75	97.915,95	2.974.703,00	956,00	2.272
$PIBPERCAPTA_i$	29.390,45	21.440,62	305.524,66	5.133,23	2.272
$CENTROOESTE_i$			1,00	0,00	2.272
SUL_i			1,00	0,00	2.272
$SUDESTE_i$			1,00	0,00	2.272
$NORTE_i$			1,00	0,00	2.272

Fonte: elaborado pelo autor.

Os resultados do modelo de regressão estão apresentados na Tabela D3. O modelo é do tipo Mínimos Quadrados Generalizados (MQG), de forma a se corrigir os problemas heterocedasticidade encontrados via modelo de Mínimos Quadrados Ordinários (MQO). Além disso, o modelo de regressão não fere os pressupostos da ausência de multicolinearidade e de autocorrelação.

Tabela D3. Resultado do modelo de regressão (variável dependente: $\ln IDHM_i$).

Variável	Coefficiente	Erro Padrão	Estatística t	Valor-p
$CUSTO_i$	-0,0001283	0,0000257	-4,99	0,0000
$PIBAGROPEC_i$	3,19E-08	1,01E-08	3,16	0,0020
$PIBPERCAPTA_i$	5,64E-07	1,03E-07	5,46	0,0000
POP_i	1,70E-07	5,30E-08	3,21	0,0010
$GINI_i$	-0,1369102	0,0243216	-5,63	0,0000
$CENTROOESTE_i$	0,1502847	0,0084173	17,85	0,0000
SUL_i	0,1696501	0,0081333	20,86	0,0000
$SUDESTE_i$	0,1901036	0,0084935	22,38	0,0000
$NORTE_i$	0,0772463	0,0095707	8,07	0,0000
Constante	-0,4652085	0,0151561	-30,69	0,0000
R^2 ajustado	0,5171			
F	209,93			
Número de observações	2272			

Fonte: elaborado pelo autor.

A variável $CUSTO_i$ é significativa ao nível de 1% e seu sinal confirma a expectativa inicial no tocante ao comportamento desta. O coeficiente negativo evidencia que custos médios de transporte de soja maiores estão associados a menores valores para de Índice de Desenvolvimento Humano nos municípios produtores dessa oleaginosa. Pelo resultado obtido, uma redução de R\$ 1,00 por tonelada no custo médio de transporte de soja do município acarreta um aumento de 0,01283% no Índice de Desenvolvimento Humano dessa localidade. Para fins de exemplificação, se para determinada localidade a redução estimada no custo médio de transporte a partir da instalação de uma nova infraestrutura é de R\$ 50,00 por tonelada, 0,6415% é o impacto estimado no IDHM desse mesmo local. Tal resultado será a base para o cálculo de uma das variáveis utilizadas em parte dos modelos de eficiência, conforme detalhamento apresentado na seção 3.2.

No tocante às variáveis de controle:

- i. $PIBAGROPEC_i$: a um nível de significância de 1%, o resultado do modelo de regressão mostra que o aumento do Produto Interno Bruto relacionado ao setor da agropecuária tem impacto positivo na IDHM. Um aumento de R\$ 1.000.000,00 no PIB agropecuário de determinado município acarreta um aumento da ordem de 0,00319% no índice de desenvolvimento.
- ii. $PIBPERCAPTA_i$: a um nível de significância de 1%, o resultado do modelo econométrico mostra que um aumento na de R\$ 1.000,00 no PIB per capita dos municípios está relacionado a um aumento da ordem de 0,0564% no IDHM. Tal relação positiva entre essas variáveis corrobora com a expectativa inicial do modelo aqui analisado.
- iii. POP_i : para essa variável, os resultados mostram que populações maiores estão associadas à maiores níveis de IDHM nos municípios produtores de soja do Brasil. Com nível de significância de 1%, um aumento populacional de 1.000 habitantes gera um aumento de 0,017% no IDHM dessas localidades.
- iv. $GINI_i$: também em linha com a expectativa inicial, níveis menores do Índice de Gini estão associadas à locais com maior desenvolvimento humano (sinal negativo do coeficiente obtido). Nesse índice (que apresenta valores entre 0 e 1), uma redução de 0,1 está relacionada a um aumento de 1,3691% no IDH municipal (nível de significância de 1%).

Para as variáveis de localização do município:

- i. *CENTROOESTE_i*: o resultado mostra que os municípios localizados na região Centro-Oeste brasileira apresentam, em média, IDHM 16,2165% superior aos municípios localizados na região Nordeste (nível de significância de 1%).
- ii. *SUL_i*: com interpretação similar à variável anterior, os municípios localizados na região Sul apresentam IDHM 18,48902% superior aos localizados na região Nordeste (nível de significância de 1%).
- iii. *SUDESTE_i*: os municípios produtores de soja localizados na região Sudeste apresentam, em termos médios, IDHM 20,93749% superior às localidades da região Nordeste (nível de significância de 1%).
- iv. *NORTE_i*: a um nível de significância de 1%, os municípios produtores de soja da região Norte do Brasil apresentam níveis de IDHM 8,030812% superiores aos municípios produtores localizados na região Nordeste.

APÊNDICE E. *Script (software R) dos modelos de Análise Envoltória de Dados.*

```
# Script do modelo de Análise Envoltória de Dados (DEA)
## Tese de Doutorado - Fernando Vinícius da Rocha
### Programa de Pós-Graduação em Economia Aplicada (ESALQ/USP)
#### Análise de eficiência dos projetos de investimento em infraestrutura para o transporte de soja no Brasil

## Limpar a memória do R
rm(list=ls(all=TRUE))

## Instalação e ativação do pacote 'Benchmarking' e outros
#install.packages('Benchmarking')
#install.packages('xlsx')
library(Benchmarking)
library(xlsx)
library(readxl)

## Base de dados para construção do modelo de Análise de Eficiência
dados <- read_excel("C:/Users/ferna/Dropbox/Doutorado/Tese/Modelagem - Arquivos
  Consolidados/DEA/tese_modelos/Resultados (Final)/rev/dados-r.xlsx")
View(dados)
data <- dados
data

# Identificação das variáveis
# x1: Custo estimado para o investimento
# y1: Diferença nos custos totais
# y2: Carga movimentada pela infraestrutura
# y3: Taxa de utilização da capacidade de movimentação
# y4: Área de Influência (número de municípios)
# y5: Impacto no IDH
# y6: Emissão de CO2 em toneladas
# y7: Perdas Físicas em toneladas

#####
#####
##### MODELOS DE ANÁLISE DE EFICIÊNCIA
#####
#####
```

```
#####
#####
##### MODELOS DE ANÁLISE DE EFICIÊNCIA ECONÔMICA, AMBIENTAL E SOCIAL
#####

### MODELO 01 - Eficiência econômica, ambiental e social
##### DEA - Retornos constantes de escala (CCR), com orientação ao output

# Variáveis do modelo de eficiência econômica, ambiental e social

x <- with(dados, cbind(x1,y6,y7))
y <- with(dados, cbind(y1,y2,y3,y4,y5))

row.names(x) <- dados$Cenário
row.names(y) <- dados$Cenário

x
y

# DEA

CCRo <- dea(x,y, RTS="crs", ORIENTATION="out")
CCRo
eff(CCRo)
peers(CCRo)
peers(CCRo, NAMES=TRUE)
print(peers(CCRo, NAMES=TRUE), quote=FALSE)
lambda(CCRo, KEEPREF = TRUE)

summary(CCRo)

# Cálculo das folgas

sl01 <- slack(x,y,CCRo)
folga01 <- data.frame(sl01$sx,sl01$sy)
folga01
summary(sl01)

Resultados01 <- data.frame(eff(CCRo),lambda(CCRo, KEEPREF = TRUE),peers(CCRo),folga01)
Resultados01
```

```

write.xlsx(Resultados01,
  row.names = TRUE,
  file = 'C:/Users/ferna/Dropbox/Doutorado/Tese/Modelagem - Arquivos
Consolidados/DEA/tese_modelos/Resultados (Final)/rev/Resultados-CCRo.xlsx',
  sheetName = "CCRo")

#####
#####

### MODELO 02 - Eficiência econômica, ambiental e social
##### DEA - Retornos variáveis de escala (BCC), com orientação ao output

# DEA

BCCo <- dea(x,y, RTS="vrs", ORIENTATION="out")
BCCo
eff(BCCo)
peers(BCCo)
peers(BCCo, NAMES=TRUE)
print(peers(BCCo, NAMES=TRUE), quote=FALSE)
lambda(BCCo, KEEPREF = TRUE)

summary(BCCo)

# Cálculo das folgas

sl02 <- slack(x,y,BCCo)
folga02 <- data.frame(sl02$sx,sl02$sy)
folga02
summary(sl02)

Resultados02 <- data.frame(eff(BCCo),lambda(BCCo, KEEPREF = TRUE),peers(BCCo),folga02)
Resultados02

write.xlsx(Resultados02,
  row.names = TRUE,
  file = 'C:/Users/ferna/Dropbox/Doutorado/Tese/Modelagem - Arquivos
Consolidados/DEA/tese_modelos/Resultados (Final)/rev/Resultados-BCCo.xlsx',
  sheetName = "BCCo")

```

```
#####
#####
##### MODELOS DE ANÁLISE DE EFICIÊNCIA ECONÔMICA
#####
```

```
### MODELO 03 - Eficiência econômica
```

```
##### DEA - Retornos constantes de escala (CCR), com orientação ao output
```

```
# Variáveis do modelo de eficiência econômica
```

```
xeco <- with(dados, cbind(x1))
```

```
yeco <- with(dados, cbind(y1,y2,y3))
```

```
row.names(xeco) <- dados$Cenário
```

```
row.names(yeco) <- dados$Cenário
```

```
xeco
```

```
yeco
```

```
#DEA
```

```
CCRoeco <- dea(xeco,yeco, RTS="crs", ORIENTATION="out")
```

```
CCRoeco
```

```
eff(CCRoeco)
```

```
peers(CCRoeco)
```

```
peers(CCRoeco, NAMES=TRUE)
```

```
print(peers(CCRoeco, NAMES=TRUE), quote=FALSE)
```

```
lambda(CCRoeco, KEEPREF = TRUE)
```

```
summary(CCRoeco)
```

```
# Cálculo das folgas
```

```
sl03 <- slack(xeco,yeco,CCRoeco)
```

```
folga03 <- data.frame(sl03$sx,sl03$sy)
```

```
folga03
```

```
summary(sl03)
```

```
Resultados03 <- data.frame(eff(CCRoeco),lambda(CCRoeco, KEEPREF = TRUE),peers(CCRoeco),folga03)
```

```
Resultados03
```

```

write.xlsx(Resultados03,
           row.names = TRUE,
           file = 'C:/Users/ferna/Dropbox/Doutorado/Tese/Modelagem - Arquivos
Consolidados/DEA/tese_modelos/Resultados (Final)/rev/Resultados-CCRoeco.xlsx',
           sheetName = "CCRoeco")

#####

#####

### MODELO 04 - Eficiência econômica
##### DEA - Retornos variáveis de escala (BCC), com orientação ao output

BCCoeco <- dea(xeco,yeco, RTS="vrs", ORIENTATION="out")
BCCoeco
eff(BCCoeco)
peers(BCCoeco)
peers(BCCoeco, NAMES=TRUE)
print(peers(BCCoeco, NAMES=TRUE), quote=FALSE)
lambda(BCCoeco, KEEPREF = TRUE)

summary(BCCoeco)

# Cálculo das folgas

sl04 <- slack(xeco,yeco,BCCoeco)
folga04 <- data.frame(sl04$sx,sl04$sy)
folga04
summary(sl04)

Resultados04 <- data.frame(eff(BCCoeco),lambda(BCCoeco, KEEPREF = TRUE),peers(BCCoeco),folga04)
Resultados04

write.xlsx(Resultados04,
           row.names = TRUE,
           file = 'C:/Users/ferna/Dropbox/Doutorado/Tese/Modelagem - Arquivos
Consolidados/DEA/tese_modelos/Resultados (Final)/rev/Resultados-BCCoeco.xlsx',
           sheetName = "BCCoeco")

```

```
#####
#####
##### MODELOS DE ANÁLISE DE EFICIÊNCIA SOCIAL
#####
#####3

### MODELO 05 - Eficiência social
##### DEA - Retornos constantes de escala (CCR), com orientação ao output

# Variáveis do modelo de eficiência social

xsoc <- with(dados, cbind(x1))
ysoc <- with(dados, cbind(y4,y5))

row.names(xsoc) <- dados$Cenário
row.names(ysoc) <- dados$Cenário

xsoc
ysoc

# DEA

CCRosoc <- dea(xsoc,ysoc, RTS="crs", ORIENTATION="out")
CCRosoc
eff(CCRosoc)
peers(CCRosoc)
peers(CCRosoc, NAMES=TRUE)
print(peers(CCRosoc, NAMES=TRUE), quote=FALSE)
lambda(CCRosoc, KEEPREF = TRUE)

summary(CCRosoc)

# Cálculo das folgas

sl05 <- slack(xsoc,ysoc,CCRosoc)
folga05 <- data.frame(sl05$sx,sl05$sy)
folga05
summary(sl05)

Resultados05 <- data.frame(eff(CCRosoc),lambda(CCRosoc, KEEPREF = TRUE),peers(CCRosoc),folga05)
Resultados05
```

```

write.xlsx(Resultados05,
           row.names = TRUE,
           file = 'C:/Users/ferna/Dropbox/Doutorado/Tese/Modelagem - Arquivos
Consolidados/DEA/tese_modelos/Resultados (Final)/rev/Resultados-CCRosoc.xlsx',
           sheetName = "CCRosoc")

#####

### MODELO 06 - Eficiência social
##### DEA - Retornos variáveis de escala (BCC), com orientação ao output

BCCosoc <- dea(xsoc,ysoc, RTS="vrs", ORIENTATION="out")
BCCosoc
eff(BCCosoc)
peers(BCCosoc)
peers(BCCosoc, NAMES=TRUE)
print(peers(BCCosoc, NAMES=TRUE), quote=FALSE)
lambda(BCCosoc, KEEPREF = TRUE)

summary(BCCosoc)

# Cálculo das folgas

sl06 <- slack(xsoc,ysoc,BCCosoc)
folga06 <- data.frame(sl06$sx,sl06$sy)
folga06
summary(sl06)

Resultados06 <- data.frame(eff(BCCosoc),lambda(BCCosoc, KEEPREF = TRUE),peers(BCCosoc),folga06)
Resultados06

write.xlsx(Resultados06,
           row.names = TRUE,
           file = 'C:/Users/ferna/Dropbox/Doutorado/Tese/Modelagem - Arquivos
Consolidados/DEA/tese_modelos/Resultados (Final)/rev/Resultados-BCCosoc.xlsx',
           sheetName = "BCCosoc")

#####
#####

```



```
##### MODELOS DE ANÁLISE DE EFICIÊNCIA AMBIENTAL
#####

### MODELO 07 - Eficiência ambiental
##### DEA - Retornos constantes de escala (CCR), com orientação ao output

# Variáveis do modelo de eficiência ambiental

y6b <- 1/dados$y6
y7b <- 1/dados$y7

y6b
y7b

xamb <- with(dados, cbind(x1))
yamb <- with(dados, cbind(y6b,y7b))

row.names(xamb) <- dados$Cenário
row.names(yamb) <- dados$Cenário

xamb
yamb

# DEA

CCRoamb <- dea(xamb,yamb, RTS="crs", ORIENTATION="out")
CCRoamb
eff(CCRoamb)
peers(CCRoamb)
peers(CCRoamb, NAMES=TRUE)
print(peers(CCRoamb, NAMES=TRUE), quote=FALSE)
lambda(CCRoamb, KEEPREF = TRUE)

summary(CCRoamb)

# Cálculo das folgas

sl07 <- slack(xamb,yamb,CCRoamb)
folga07 <- data.frame(sl07$sx,sl07$sy)
folga07
summary(sl07)
```

```
Resultados07 <- data.frame(eff(CCRoamb),lambda(CCRoamb, KEEPREF = TRUE),peers(CCRoamb),folga07)
Resultados07
```

```
write.xlsx(Resultados07,
           row.names = TRUE,
           file = 'C:/Users/ferna/Dropbox/Doutorado/Tese/Modelagem - Arquivos
Consolidados/DEA/tese_modelos/Resultados (Final)/rev/Resultados-CCRoamb.xlsx',
           sheetName = "CCRoamb")
```

```
#####3
```

```
### MODELO 08 - Eficiência ambiental
```

```
##### DEA - Retornos variáveis de escala (BCC), com orientação ao output
```

```
BCCoamb <- dea(xamb,yamb, RTS="vrs", ORIENTATION="out")
```

```
BCCoamb
```

```
eff(BCCoamb)
```

```
peers(BCCoamb)
```

```
peers(BCCoamb, NAMES=TRUE)
```

```
print(peers(BCCoamb, NAMES=TRUE), quote=FALSE)
```

```
lambda(BCCoamb, KEEPREF = TRUE)
```

```
summary(BCCoamb)
```

```
# Cálculo das folgas
```

```
sl08 <- slack(xamb,yamb,BCCoamb)
```

```
folga08 <- data.frame(sl08$sx,sl08$sy)
```

```
folga08
```

```
summary(sl08)
```

```
Resultados08 <- data.frame(eff(BCCoamb),lambda(BCCoamb, KEEPREF = TRUE),peers(BCCoamb),folga08)
```

```
Resultados08
```

```
write.xlsx(Resultados08,
           row.names = TRUE,
           file = 'C:/Users/ferna/Dropbox/Doutorado/Tese/Modelagem - Arquivos
Consolidados/DEA/tese_modelos/Resultados (Final)/rev/Resultados-BCCoamb.xlsx',
           sheetName = "BCCoamb")
```

```
## Exportando os resultados consolidado das análises de eficiência para o excel
```

```
ResultadosEficiencia <-  
  data.frame(eff(CCRo),eff(BCCo),eff(CCRoeco),eff(BCCoeco),eff(CCRosoc),eff(BCCosoc),eff(CCRoamb),eff(B  
    CCoamb))  
ResultadosEficiencia  
  
write.xlsx(ResultadosEficiencia,  
  row.names = TRUE,  
  file = 'C:/Users/ferna/Dropbox/Doutorado/Tese/Modelagem - Arquivos  
Consolidados/DEA/tese_modelos/Resultados (Final)/rev/Resultados-Eficiência.xlsx',  
  sheetName = "Eficiência")
```

APÊNDICE F. Tabelas de resultados dos modelos de Análise Envoltória de Dados.

Tabela F1. Resultados obtidos (saídas do *software* R) em *CCRo*.

	eff.CCRo.	peer1	peer2	peer3	peer4	sx1	sx2	sx3	sy1	sy2	sy3	sy4	sy5
C-EMN-1	1,163015	6	9	24	26	0	174886,6	0	0	0	0	54,97743	3E-05
C-EMN-2	1	2	#N/D	#N/D	#N/D	0	0	0	0	0	0	0	0
C-EMN-3	1,208576	6	9	24	26	0	93888,46	0	0	0	0	67,6228	8,52E-06
C-FDOURADOSPARANAGUÁ	1,320667	8	9	20	24	0	171451,3	0	27,88739	0	0	0	4,7E-05
C-FERROGRÃO-1	1	5	#N/D	#N/D	#N/D	0	0	0	0	0	0	0	0
C-FERROGRÃO-2	1	6	#N/D	#N/D	#N/D	0	0	0	0	0	0	0	0
C-FERROVIADOFRANGO	1,233348	20	24	#N/D	#N/D	127,1582	195531,2	0	121,1662	8272659	0	0	0,000207
C-FICO+FNS-1	1	8	#N/D	#N/D	#N/D	0	0	0	0	0	0	0	0
C-FICO+FNS-2	1	9	#N/D	#N/D	#N/D	0	0	0	0	0	0	0	0
C-FICO-1	1,493242	9	26	#N/D	#N/D	0	79971,71	0	134,6109	2375513	0,31317	56,1754	0
C-FICO-2	1,293491	9	24	26	#N/D	0	112330,7	0	149,5241	825243,4	0	76,75683	0
C-FICO-3	1,092505	6	9	24	#N/D	0	182696,4	0	125,0167	1123074	0	55,2751	0
C-FIOL-1	1,396452	9	24	26	#N/D	0	131984	0	175,8363	4111962	0	40,14344	0
C-FIOL-2	1,883707	9	24	26	#N/D	0	213979,5	0	22,53968	2864248	0	37,26197	0
C-FIOL-3	2,059551	6	9	24	#N/D	0	247656,5	0	140,1288	1885153	0	23,12911	0
C-FMSSANTOS	2,434609	9	26	#N/D	#N/D	0	139789,3	0	26,98181	1756365	0,365422	37,01819	0
C-FNS-1	1	17	#N/D	#N/D	#N/D	0	0	0	0	0	0	0	0
C-FNS-2	1,656253	9	24	26	#N/D	0	212729,1	0	217,115	3391414	0	40,99193	0
C-FNS-SUL	1,400066	17	20	26	#N/D	0	293942,4	0	11,2004	3978872	0	0	0,00013
C-FNS-TOTAL	1	20	#N/D	#N/D	#N/D	0	0	0	0	0	0	0	0
C-FPANORAMA	1,51379	9	26	#N/D	#N/D	0	123372,1	0	115,5081	651594,3	0,004808	11,5474	0
C-FPANTANAL	1,352005	9	26	#N/D	#N/D	0	116685,3	0	71,82535	3119369	0,330265	55,59135	0
C-FPARAENSE-1	1,585456	6	9	20	24	0	363485,4	0	440,6087	1719244	0	0	0
C-FPARAENSE-2	1	24	#N/D	#N/D	#N/D	0	0	0	0	0	0	0	0
C-FVILHENA	1,008699	2	6	26	#N/D	0	0	0	80,75287	1407892	0	18,45267	0,000107
C-H-MARABÁ	1	26	#N/D	#N/D	#N/D	0	0	0	0	0	0	0	0

Fonte: dados de saída do *software* R.

Tabela F2. Resultados obtidos (saídas do *software* R) em *BCCo*.

	eff.BCCo.	peer1	peer2	peer3	peer4	peer5	sx1	sx2	sx3	sy1	sy2	sy3	sy4	sy5
C-EMN-1	1	1	#N/D	#N/D	#N/D	#N/D	0	0	0	0	0	0	0	0
C-EMN-2	1	2	#N/D	#N/D	#N/D	#N/D	0	0	0	0	0	0	0	0
C-EMN-3	1	3	#N/D	#N/D	#N/D	#N/D	0	0	0	0	0	0	0	0
C-FDOURADOSPARANAGUÁ	1,241603	1	2	6	20	24	0	62092,71	0	0	0	0	3,293783	3,51E-05
C-FERROGRÃO-1	1	5	#N/D	#N/D	#N/D	#N/D	0	0	0	0	0	0	0	0
C-FERROGRÃO-2	1	6	#N/D	#N/D	#N/D	#N/D	0	0	0	0	0	0	0	0
C-FERROVIADOFRANGO	1	7	#N/D	#N/D	#N/D	#N/D	0	0	0	0	0	0	0	0
C-FICO+FNS-1	1	8	#N/D	#N/D	#N/D	#N/D	0	0	0	0	0	0	0	0
C-FICO+FNS-2	1	9	#N/D	#N/D	#N/D	#N/D	0	0	0	0	0	0	0	0
C-FICO-1	1,179786	2	3	26	#N/D	#N/D	0	47995,42	0	119,272	2090836	0,482362	19,60375	0
C-FICO-2	1,148292	1	3	9	26	#N/D	0	24519,63	0	165,545	673927,7	0	39,7539	0
C-FICO-3	1	12	#N/D	#N/D	#N/D	#N/D	0,013447	0	0	0	4,535222	0	0,000213	0
C-FIOL-1	1,00561	2	3	17	26	#N/D	0	79423,76	0	131,092	3520818	0,290679	0	0
C-FIOL-2	1,670124	1	9	12	26	#N/D	0	72580,67	0	48,61528	2013721	0	1,007932	0
C-FIOL-3	1,827145	1	9	12	26	#N/D	1995,355	61977,9	0	44,85571	1368800	0	0	0
C-FMSSANTOS	1,787078	2	3	17	26	#N/D	0	89263,43	0	22,80615	1846970	0,48401	0	0
C-FNS-1	1	17	#N/D	#N/D	#N/D	#N/D	0	0	0	0	0	0	0	0
C-FNS-2	1,182382	1	2	3	17	#N/D	0	71047,94	0	152,818	3233006	0,193064	0	0
C-FNS-SUL	1	19	#N/D	#N/D	#N/D	#N/D	0,002214	0	0	0,000135	4,416056	9,12E-08	0	1E-10
C-FNS-TOTAL	1	20	#N/D	#N/D	#N/D	#N/D	0	0	0	0	0	0	0	0
C-FPANORAMA	1	21	#N/D	#N/D	#N/D	#N/D	0	0	0	0	0	0	0	0
C-FPANTANAL	1,244318	3	9	17	26	#N/D	0	75922,09	0	0	3763107	0,046503	79,11312	0
C-FPARAENSE-1	1,343246	1	9	12	26	#N/D	7727,939	18611,84	0	102,7039	948071,8	0	0	0
C-FPARAENSE-2	1	24	#N/D	#N/D	#N/D	#N/D	0	0	0	0	0	0	0	0
C-FVILHENA	1	6	26	#N/D	#N/D	#N/D	1543,485	0	0	16,94838	2128113	0	42,27022	0,000126
C-H-MARABÁ	1	26	#N/D	#N/D	#N/D	#N/D	0	0	0	0	0	0	0	0

Fonte: dados de saída do *software* R.

Tabela F3. Resultados obtidos (saídas do *software* R) em *BCCoamb*.

	eff.BCCoamb.	peer1	peer2	peer3	sx1	sy1	sy2
C-EMN-1	1	1	#N/D	#N/D	0	0	0
C-EMN-2	1	2	#N/D	#N/D	0	0	0
C-EMN-3	1	3	#N/D	#N/D	0	0	0
C-FDOURADOSPARANAGUÁ	1,043347	2	#N/D	#N/D	7911,11	8,46E-11	0
C-FERROGRÃO-1	1,008217	3	6	#N/D	5400,579	0	0
C-FERROGRÃO-2	1	6	#N/D	#N/D	0	0	0
C-FERROVIADOFRANGO	1,017912	2	#N/D	#N/D	12411,11	2,4E-08	0
C-FICO+FNS-1	1,022538	1	2	#N/D	874,6058	0	0
C-FICO+FNS-2	1,0194	3	6	#N/D	961,3101	0	0
C-FICO-1	1,009326	1	2	26	0	0	0
C-FICO-2	1,012919	1	3	#N/D	58,95905	0	0
C-FICO-3	1,019729	3	6	#N/D	4006,646	0	0
C-FIOL-1	1,006089	2	#N/D	#N/D	1161,11	4,86E-09	0
C-FIOL-2	1,017007	1	2	#N/D	3151,111	0	0
C-FIOL-3	1,020578	1	2	#N/D	5352,062	0	0
C-FMSSANTOS	1,007048	2	#N/D	#N/D	1840,25	5,17E-09	0
C-FNS-1	1,016777	1	2	26	0	0	0
C-FNS-2	1,002696	2	#N/D	#N/D	1611,11	5,6E-09	0
C-FNS-SUL	1,001192	2	#N/D	#N/D	6611,11	3,47E-08	0
C-FNS-TOTAL	1,059407	1	2	#N/D	12616,97	0	0
C-FPANORAMA	1	21	#N/D	#N/D	0	0	0
C-FPANTANAL	1,019394	2	#N/D	#N/D	1955,08	1,58E-09	0
C-FPARAENSE-1	1,019901	1	3	#N/D	7845,756	0	0
C-FPARAENSE-2	1,014628	6	26	#N/D	0	0	5,16E-08
C-FVILHENA	1,0125	3	6	26	0	0	0
C-H-MARABÁ	1	26	#N/D	#N/D	0	0	0

Fonte: dados de saída do *software* R.

Tabela F4. Resultados obtidos (saídas do *software* R) em *CCRamb*

	eff.CCRamb.	peer1	sx1	sy1	sy2
C-EMN-1	10,54934	26	0	3,66E-09	0
C-EMN-2	3,66506	26	0	3,82E-08	0
C-EMN-3	12,09111	26	0	0	3,09E-07
C-FDOURADOSPARANAGUÁ	18,30603	26	0	1,85E-07	0
C-FERROGRÃO-1	28,20975	26	0	0	5,09E-06
C-FERROGRÃO-2	30,46496	26	0	0	1,45E-05
C-FERROVIADOFRANGO	25,89665	26	0	8,77E-07	0
C-FICO+FNS-1	9,934956	26	0	3,71E-08	0
C-FICO+FNS-2	16,25387	26	0	0	1,2E-06
C-FICO-1	4,836748	26	0	4,17E-08	0
C-FICO-2	11,43813	26	0	0	1,05E-07
C-FICO-3	19,6535	26	0	0	5,77E-07
C-FIOL-1	5,737007	26	0	8,72E-08	0
C-FIOL-2	11,42717	26	0	8,36E-08	0
C-FIOL-3	17,78258	26	0	7,05E-08	0
C-FMSSANTOS	6,942456	26	0	1,08E-07	0
C-FNS-1	5,019373	26	0	2,52E-08	0
C-FNS-2	6,509335	26	0	1,04E-07	0
C-FNS-SUL	15,28277	26	0	6,89E-07	0
C-FNS-TOTAL	28,26093	26	0	2,44E-07	0
C-FPANORAMA	1,710192	26	0	2,94E-08	0
C-FPANTANAL	7,232948	26	0	8,53E-08	0
C-FPARAENSE-1	25,09196	26	0	0	6,34E-08
C-FPARAENSE-2	11,25319	26	0	0	2,24E-06
C-FVILHENA	10,16301	26	0	0	1,1E-06
C-H-MARABÁ	1	26	0	0	0

Fonte: dados de saída do *software* R.

Tabela F5. Resultados obtidos (saídas do *software* R) em *BCCosoc*

	eff.BCCosoc.	peer1	peer2	peer3	sx1	sy1	sy2
C-EMN-1	1,556968	9	26	#N/D	0	78,46728	0
C-EMN-2	1,711444	9	26	#N/D	0	43,456	0
C-EMN-3	1,410477	9	26	#N/D	0	89,52431	0
C-FDOURADOSPARANAGUÁ	1,583923	9	17	20	0	0	0
C-FERROGRÃO-1	2,422821	20	#N/D	#N/D	1400	292,1946	0
C-FERROGRÃO-2	1,226282	20	#N/D	#N/D	4033,23	277,2116	0
C-FERROVIADOFRANGO	1,270228	17	20	#N/D	0	0	0,00021
C-FICO+FNS-1	1,118098	9	17	20	0	0	0
C-FICO+FNS-2	1	9	#N/D	#N/D	0	0	0
C-FICO-1	1,506919	9	26	#N/D	0	56,63463	0
C-FICO-2	1,38101	9	26	#N/D	0	84,05248	0
C-FICO-3	1,242677	9	20	#N/D	0	140,0382	0
C-FIOL-1	1,415248	9	26	#N/D	0	40,64179	0
C-FIOL-2	2,090587	9	26	#N/D	0	45,02446	0
C-FIOL-3	2,461098	9	20	#N/D	0	71,60224	0
C-FMSSANTOS	2,462962	9	26	#N/D	0	37,3481	0
C-FNS-1	1	17	#N/D	#N/D	0	0	0
C-FNS-2	1,826275	9	26	#N/D	0	47,92152	0
C-FNS-SUL	1,579867	17	20	#N/D	0	0	0,000114
C-FNS-TOTAL	1	20	#N/D	#N/D	0	0	0
C-FPANORAMA	1,52422	9	26	#N/D	0	11,61227	0
C-FPANTANAL	1,357065	9	26	#N/D	0	55,76594	0
C-FPARAENSE-1	2,094106	9	20	#N/D	0	190,1332	0
C-FPARAENSE-2	1,1495	9	26	#N/D	0	7,290049	0
C-FVILHENA	2,377554	9	26	#N/D	0	50,52513	0
C-H-MARABÁ	1	26	#N/D	#N/D	0	0	0

Fonte: dados de saída do *software* R.

Tabela F6. Resultados obtidos (saídas do *software* R) em *CCRosoc*

	eff.CCRosoc.	peer1	sx1	sy1	sy2
C-EMN-1	9,869743	26	0	426,5673	0
C-EMN-2	5,346805	26	0	125,9505	0
C-EMN-3	9,652392	26	0	523,1076	0
C-FDOURADOSPARANAGUÁ	7,671026	26	0	0	0,002016
C-FERROGRÃO-1	32,17883	26	0	1518,605	0
C-FERROGRÃO-2	18,8705	26	0	1528,933	0
C-FERROVIADOFRANGO	6,581101	26	0	0	0,004505
C-FICO+FNS-1	3,836783	26	0	0	0,001085
C-FICO+FNS-2	6,893149	26	0	0	0,000471
C-FICO-1	5,760317	26	0	199,4496	0
C-FICO-2	9,095207	26	0	474,0196	0
C-FICO-3	11,45894	26	0	677,1799	0
C-FIOL-1	6,123569	26	0	151,9401	0
C-FIOL-2	13,72382	26	0	216,809	0
C-FIOL-3	20,59807	26	0	297,5868	0
C-FMSSANTOS	12,1061	26	0	149,5553	0
C-FNS-1	2,006579	26	0	0	0,000574
C-FNS-2	8,628852	26	0	195,9433	0
C-FNS-SUL	6,535714	26	0	0	0,002434
C-FNS-TOTAL	5,272975	26	0	0	0,003593
C-FPANORAMA	2,496681	26	0	17,66035	0
C-FPANTANAL	6,795911	26	0	243,4225	0
C-FPARAENSE-1	23,73663	26	0	504,3248	0
C-FPARAENSE-2	7,25544	26	0	0	0,000117
C-FVILHENA	14,79448	26	0	247,3819	0
C-H-MARABÁ	1	26	0	0	0

Fonte: dados de saída do *software* R.

Tabela F7. Resultados obtidos (saídas do *software* R) em *BCCoeco*.

	eff.BCCoeco.	peer1	peer2	peer3	peer4	sx1	sy1	sy2	sy3
C-EMN-1	1,208192	6	9	24	26	0	0	0	0
C-EMN-2	1	5	26	#N/D	#N/D	0	147,4297	1384062	0
C-EMN-3	1,236988	6	9	24	26	0	0	0	0
C-FDOURADOSPARANAGUÁ	1,349959	9	20	24	#N/D	0	45,32991	0	0
C-FERROGRÃO-1	1	6	24	#N/D	#N/D	0	230,8986	5341931	0
C-FERROGRÃO-2	1	6	#N/D	#N/D	#N/D	0	0	0	0
C-FERROVIADOFRANGO	2,27696	6	20	24	#N/D	0	63,66808	0	0
C-FICO+FNS-1	1	8	#N/D	#N/D	#N/D	0	0	0	0
C-FICO+FNS-2	1	9	#N/D	#N/D	#N/D	0	0	0	0
C-FICO-1	2,266548	8	24	26	#N/D	0	5,773955	0	0
C-FICO-2	1,423143	8	9	24	#N/D	0	97,61016	0	0
C-FICO-3	1,243168	6	9	20	24	0	0	0	0
C-FIOL-1	1,835873	2	25	#N/D	#N/D	0	112,6192	2435312	0
C-FIOL-2	2,239271	6	9	24	26	0	0	0	0
C-FIOL-3	2,497089	6	9	20	24	0	0	0	0
C-FMSSANTOS	2,775044	6	9	26	#N/D	0	0	0	0,424336
C-FNS-1	1	17	#N/D	#N/D	#N/D	0	0	0	0
C-FNS-2	1,86881	2	#N/D	#N/D	#N/D	0	208,3599	2842684	0
C-FNS-SUL	2,143513	6	9	20	24	0	0	0	0
C-FNS-TOTAL	1	20	#N/D	#N/D	#N/D	0	0	0	0
C-FPANORAMA	1,587806	5	24	26	#N/D	0	107,1012	365833,5	0
C-FPANTANAL	1,78768	6	9	26	#N/D	0	0	0	0,342953
C-FPARAENSE-1	1,899335	2	24	#N/D	#N/D	0	412,3937	678,7142	0
C-FPARAENSE-2	1	24	#N/D	#N/D	#N/D	0	0	0	0
C-FVILHENA	1	2	6	26	#N/D	0	11,79111	4745728	0
C-H-MARABÁ	1	26	#N/D	#N/D	#N/D	0	0	0	0

Fonte: dados de saída do *software* R.

Tabela F8. Resultados obtidos (saídas do *software* R) em *CCRoeo*.

	eff.CCRoeo.	peer1	sx1	sy1	sy2	sy3
C-EMN-1	7,281407	26	0	280,8159	0	5,357354
C-EMN-2	3,730161	26	0	420,3145	0	0
C-EMN-3	7,668068	26	0	397,7146	0	8,248543
C-FDOURADOSPARANAGUÁ	9,421965	26	0	2363,558	0	13,39302
C-FERROGRÃO-1	11,36991	26	0	0	97612798	18,27294
C-FERROGRÃO-2	8,65641	26	0	0	90985017	25,68864
C-FERROVIADOFRANGO	20,44116	26	0	3326,94	0	21,57773
C-FICO+FNS-1	4,435699	26	0	1221,574	0	8,777608
C-FICO+FNS-2	5,965332	26	0	1389,037	0	14,84835
C-FICO-1	7,384856	26	0	357,5008	0	2,437259
C-FICO-2	7,659425	26	0	1530,597	0	7,665581
C-FICO-3	9,948351	26	0	805,1335	0	14,80711
C-FIOL-1	10,65462	26	0	298,762	747,1627	0
C-FIOL-2	14,38051	26	0	170,2684	0	5,713755
C-FIOL-3	19,20136	26	0	805,771	0	11,80756
C-FMSSANTOS	12,73855	26	0	148,4697	0	5,262223
C-FNS-1	2,871855	26	0	798,7593	0	4,28577
C-FNS-2	12,34749	26	0	905,1242	848,4962	0
C-FNS-SUL	14,41482	26	0	1211,58	0	10,35647
C-FNS-TOTAL	8,290671	26	0	4403,276	0	25,05527
C-FPANORAMA	2,734153	26	0	168,6178	0	6,59E-05
C-FPANTANAL	8,719418	26	0	44,17752	0	4,813944
C-FPARAENSE-1	23,7432	26	0	1916,808	0	12,49921
C-FPARAENSE-2	5,76867	26	0	792,4421	0	5,76867
C-FVILHENA	7,425064	26	0	0	15685094	2,936222
C-H-MARABÁ	1	26	0	0	0	0

Fonte: dados de saída do *software* R.

Tabela F9. Resultados obtidos (saídas do *software* R) em *BCCo* (fronteira invertida).

	eff.BCCo.	peer1	peer2	peer3	peer4	peer5	peer6	sx1	sx2	sx3	sx4	sx5	sy1	sy2	sy3
C-EMN-1	1,025062	5	10	22	#N/D	#N/D	#N/D	12,44339	3228135	0,260075	0	1,67E-05	1249,937	0	0
C-EMN-2	1	2	#N/D	#N/D	#N/D	#N/D	#N/D	0	0	0	0	0	0	0	0
C-EMN-3	1,026908	5	6	22	25	#N/D	#N/D	0	3636889	0,004769	0	5,74E-05	748,2002	0	0
C-FDOURADOSPARANAGUÁ	1	4	#N/D	#N/D	#N/D	#N/D	#N/D	0	0	0	0	0	0	0	0
C-FERROGRÃO-1	1	5	#N/D	#N/D	#N/D	#N/D	#N/D	0	0	0	0	0	0	0	0
C-FERROGRÃO-2	1	6	#N/D	#N/D	#N/D	#N/D	#N/D	0	0	0	0	0	0	0	0
C-FERROVIADOFRANGO	1	7	#N/D	#N/D	#N/D	#N/D	#N/D	0	0	0	0	0	0	0	0
C-FICO+FNS-1	1,012666	6	16	20	#N/D	#N/D	#N/D	31,42748	2275128	0	11,04591	0	4166,705	16463,35	0
C-FICO+FNS-2	1,003911	6	16	20	#N/D	#N/D	#N/D	188,6837	4903594	0	0	0,000163	1003,685	106993,7	0
C-FICO-1	1	10	#N/D	#N/D	#N/D	#N/D	#N/D	0	0	0	0	0	0	0	0
C-FICO-2	1,004175	5	6	10	23	25	#N/D	0	3569666	0	0	8,76E-05	0	13741,49	0
C-FICO-3	1,00845	5	6	15	19	22	#N/D	62,67956	4779639	0	0	0,000165	0	0	0
C-FIOL-1	1	13	#N/D	#N/D	#N/D	#N/D	#N/D	0	0	0	0	0	0	0	0
C-FIOL-2	1,001816	7	15	16	21	22	25	0	0	0,056497	0	1,35E-05	0	0	0
C-FIOL-3	1	15	#N/D	#N/D	#N/D	#N/D	#N/D	0	0	0	0	0	0	0	0
C-FMSSANTOS	1	16	#N/D	#N/D	#N/D	#N/D	#N/D	0	0	0	0	0	0	0	0
C-FNS-1	1,001047	16	18	20	#N/D	#N/D	#N/D	0	1800432	0	37,31771	3,12E-05	4626,561	59127,56	0
C-FNS-2	1	18	#N/D	#N/D	#N/D	#N/D	#N/D	0	0	0	0	0	0	0	0
C-FNS-SUL	1	19	#N/D	#N/D	#N/D	#N/D	#N/D	0	0	0	0	0	0	0	0
C-FNS-TOTAL	1	20	#N/D	#N/D	#N/D	#N/D	#N/D	0	0	0	0	0	0	0	0
C-FPANORAMA	1	21	#N/D	#N/D	#N/D	#N/D	#N/D	0	0	0	0	0	0	0	0
C-FPANTANAL	1	22	#N/D	#N/D	#N/D	#N/D	#N/D	0	0	0	0	0	0	0	0
C-FPARAENSE-1	1	23	#N/D	#N/D	#N/D	#N/D	#N/D	0	0	0	0	0	0	0	0
C-FPARAENSE-2	1	24	#N/D	#N/D	#N/D	#N/D	#N/D	0	0	0	0	0	0	0	0
C-FVILHENA	1	25	#N/D	#N/D	#N/D	#N/D	#N/D	0	0	0	0	0	0	0	0
C-H-MARABÁ	1,016596	7	19	21	24	25	#N/D	0	0	0,222134	0	4,73E-05	4773,202	0	0

Fonte: dados de saída do *software* R.

Tabela F10. Resultados obtidos (saídas do *software* R) em *BCCosoc* (fronteira invertida).

	eff.BCCosoc.	peer1	peer2	sx1	sx2	sy1
C-EMN-1	2,846926	5	6	10,15961	0	0
C-EMN-2	3,977486	5	16	0,838777	0	0
C-EMN-3	2,548229	5	6	6,573172	0	0
C-FDOURADOSPARANAGUÁ	1,742581	5	6	126,4141	0	0
C-FERROGRÃO-1	1	5	#N/D	0	0	0
C-FERROGRÃO-2	1	6	#N/D	0	0	0
C-FERROVIADOFRANGO	1,161791	5	6	229,0384	0	0
C-FICO+FNS-1	3,23618	5	6	137,6638	0	0
C-FICO+FNS-2	2,081726	6	#N/D	116	6,57E-05	0
C-FICO-1	5,063205	5	16	4,931202	0	0
C-FICO-2	2,734075	5	6	7,985701	0	0
C-FICO-3	1,713909	5	6	18,26977	0	0
C-FIOL-1	5,131627	5	6	23,37966	0	0
C-FIOL-2	2,081226	5	16	22,37577	0	0
C-FIOL-3	1,444165	5	16	26,48381	0	0
C-FMSSANTOS	1	16	#N/D	0	0	0
C-FNS-1	6,290965	5	6	134,9078	0	0
C-FNS-2	2,927816	5	16	8,627968	0	0
C-FNS-SUL	1,320203	5	16	130,3493	0	0
C-FNS-TOTAL	1,265344	6	#N/D	284	9,62E-05	0
C-FPANORAMA	8,311425	5	16	16,5145	0	0
C-FPANTANAL	4,207322	5	6	16,6961	0	0
C-FPARAENSE-1	1,213343	5	6	30,91528	0	0
C-FPARAENSE-2	2,84138	5	6	73,98076	0	0
C-FVILHENA	1,449224	5	16	7,949635	0	0
C-H-MARABÁ	30,05513	5	6	50,15877	0	0

Fonte: dados de saída do *software* R.

Tabela F11. Resultados obtidos (saídas do *software* R) em *BCCoamb* (fronteira invertida).

	eff.BCCoamb.	peer1	peer2	sx1	sx2	sy1
C-EMN-1	2,805704	6	20	0	1,65E-07	0
C-EMN-2	7,81385	6	20	0	1,57E-07	0
C-EMN-3	2,455955	6	20	0	1,62E-07	0
C-FDOURADOSPARANAGUÁ	1,544107	6	20	0	3,97E-08	0
C-FERROGRÃO-1	1,060388	6	20	0	8,31E-08	0
C-FERROGRÃO-2	1	6	#N/D	0	0	0
C-FERROVIADOFRANGO	1	7	#N/D	0	0	0
C-FICO+FNS-1	2,92689	6	20	0	1E-07	0
C-FICO+FNS-2	1,822772	6	20	0	9,08E-08	0
C-FICO-1	5,938715	6	20	0	1,32E-07	0
C-FICO-2	2,583057	6	20	0	1,28E-07	0
C-FICO-3	1,502993	6	20	0	1,06E-07	0
C-FIOL-1	4,900846	6	20	0	1,33E-07	0
C-FIOL-2	2,518545	6	20	0	1,12E-07	0
C-FIOL-3	1,634911	6	20	0	1,05E-07	0
C-FMSSANTOS	4,044444	6	20	0	1,3E-07	0
C-FNS-1	5,771744	6	20	0	1,05E-07	0
C-FNS-2	4,312683	6	20	0	1,41E-07	0
C-FNS-SUL	1	19	#N/D	0	0	0
C-FNS-TOTAL	1	20	#N/D	0	0	0
C-FPANORAMA	16,29961	6	20	0	1,17E-07	0
C-FPANTANAL	3,915705	6	20	0	1,01E-07	0
C-FPARAENSE-1	1,174449	6	20	0	1,1E-07	0
C-FPARAENSE-2	1	24	#N/D	0	0	0
C-FVILHENA	2,918815	6	20	0	6,82E-08	0
C-H-MARABÁ	29,50061	6	20	0	1,23E-07	0

Fonte: dados de saída do *software* R.

Tabela F12. Resultados obtidos (saídas do *software* R) em *CCRoamb* (fronteira invertida).

	eff.CCRoamb.	peer1	sx1	sy1	sy2
C-EMN-1	10,54934	26	0	3,66E-09	0
C-EMN-2	3,66506	26	0	3,82E-08	0
C-EMN-3	12,09111	26	0	0	3,09E-07
C-FDOURADOSPARANAGUÁ	18,30603	26	0	1,85E-07	0
C-FERROGRÃO-1	28,20975	26	0	0	5,09E-06
C-FERROGRÃO-2	30,46496	26	0	0	1,45E-05
C-FERROVIADOFRANGO	25,89665	26	0	8,77E-07	0
C-FICO+FNS-1	9,934956	26	0	3,71E-08	0
C-FICO+FNS-2	16,25387	26	0	0	1,2E-06
C-FICO-1	4,836748	26	0	4,17E-08	0
C-FICO-2	11,43813	26	0	0	1,05E-07
C-FICO-3	19,6535	26	0	0	5,77E-07
C-FIOL-1	5,737007	26	0	8,72E-08	0
C-FIOL-2	11,42717	26	0	8,36E-08	0
C-FIOL-3	17,78258	26	0	7,05E-08	0
C-FMSSANTOS	6,942456	26	0	1,08E-07	0
C-FNS-1	5,019373	26	0	2,52E-08	0
C-FNS-2	6,509335	26	0	1,04E-07	0
C-FNS-SUL	15,28277	26	0	6,89E-07	0
C-FNS-TOTAL	28,26093	26	0	2,44E-07	0
C-FPANORAMA	1,710192	26	0	2,94E-08	0
C-FPANTANAL	7,232948	26	0	8,53E-08	0
C-FPARAENSE-1	25,09196	26	0	0	6,34E-08
C-FPARAENSE-2	11,25319	26	0	0	2,24E-06
C-FVILHENA	10,16301	26	0	0	1,1E-06
C-H-MARABÁ	1	26	0	0	0

Fonte: dados de saída do *software* R.

Tabela F13. Resultados obtidos (saídas do *software* R) em *BCCoeco* (fronteira invertida).

	eff.BCCoeco.	peer1	peer2	peer3	peer4	sx1	sx2	sx3	sy1
C-EMN-1	2,574948	6	7	#N/D	#N/D	0	307829,6	0,366313	0
C-EMN-2	5,454066	7	18	23	#N/D	0	0	0,601804	0
C-EMN-3	2,248998	6	7	#N/D	#N/D	0	956580,1	0,146246	0
C-FDOURADOSPARANAGUÁ	1,493607	6	7	#N/D	#N/D	0	2996861	0,190019	0
C-FERROGRÃO-1	1	5	#N/D	#N/D	#N/D	0	0	0	0
C-FERROGRÃO-2	1	6	#N/D	#N/D	#N/D	0	0	0	0
C-FERROVIADOFRANGO	1	7	#N/D	#N/D	#N/D	0	0	0	0
C-FICO+FNS-1	2,700194	6	7	20	#N/D	45,36107	0	0	0
C-FICO+FNS-2	1,647982	6	7	20	#N/D	167,2862	0	0	0
C-FICO-1	2,198606	7	16	18	23	0	0	0	0
C-FICO-2	2,273688	6	7	#N/D	#N/D	0	1136446	0,265889	0
C-FICO-3	1,443738	6	7	#N/D	#N/D	0	2624737	0,04138	0
C-FIOL-1	1,22042	5	18	#N/D	#N/D	34,74088	0	5,29E-07	0
C-FIOL-2	1,422464	5	16	18	23	0	0	0	0
C-FIOL-3	1,05384	7	16	23	#N/D	33,70937	0	0	0
C-FMSSANTOS	1	16	#N/D	#N/D	#N/D	0	0	0	0
C-FNS-1	5,203852	6	7	#N/D	#N/D	0	2475272	0,025802	0
C-FNS-2	1	18	#N/D	#N/D	#N/D	0	0	0	0
C-FNS-SUL	1,497678	7	16	23	#N/D	20,49241	0	0	0
C-FNS-TOTAL	1	20	#N/D	#N/D	#N/D	0	0	0	0
C-FPANORAMA	5,886126	5	18	23	#N/D	0	0	0,084383	0
C-FPANTANAL	2,198605	7	16	23	#N/D	53,10649	0	0	0
C-FPARAENSE-1	1	23	#N/D	#N/D	#N/D	0	0	0	0
C-FPARAENSE-2	2,427795	6	7	#N/D	#N/D	0	2935888	0,591266	0
C-FVILHENA	2,459801	5	18	23	#N/D	0	0	0,301135	0
C-H-MARABÁ	24,1303	5	18	23	#N/D	0	0	0,399414	0

Fonte: dados de saída do *software* R.

Tabela F14. Resultados obtidos (saídas do *software* R) em CCRo (fronteira invertida).

	eff.CCRo.	peer1	peer2	peer3	peer4	sx1	sx2	sx3	sx4	sx5	sy1	sy2	sy3
C-EMN-1	1,393384	2	5	10	16	0	2535348	0,09565	0	0	0	12148,47	0
C-EMN-2	1	2	#N/D	#N/D	#N/D	0	0	0	0	0	0	0	0
C-EMN-3	1,345737	5	10	16	#N/D	5,473284	3709497	0	0	7,45E-05	0	57074,09	0
C-FDOURADOSPARANAGUÁ	1,422822	5	7	16	23	0	3119817	0,089663	0	0	0	75123,25	0
C-FERROGRÃO-1	1	5	#N/D	#N/D	#N/D	0	0	0	0	0	0	0	0
C-FERROGRÃO-2	1,013196	5	23	#N/D	#N/D	461,3007	3798459	0	0	0,000137	0	852809,3	78754,26
C-FERROVIADOFRANGO	1	7	#N/D	#N/D	#N/D	0	0	0	0	0	0	0	0
C-FICO+FNS-1	1,643914	7	16	#N/D	#N/D	88,53314	6065508	0	66,60758	6,88E-05	0	169567,4	0
C-FICO+FNS-2	1,354374	7	15	16	#N/D	284,9467	8194310	0	0	0,000234	0	313684,3	0
C-FICO-1	1	10	#N/D	#N/D	#N/D	0	0	0	0	0	0	0	0
C-FICO-2	1,099478	5	10	18	23	0	3565572	0	0	6,73E-05	0	43499,07	0
C-FICO-3	1,258792	5	15	23	#N/D	146,1744	4215975	0	0	0,000139	0	49047,63	0
C-FIOL-1	1,014507	18	#N/D	#N/D	#N/D	46,57882	0	0	8,569428	3,93E-05	469,2305	5337,938	0
C-FIOL-2	1,189475	5	16	18	23	0	0	0,07029	3,555941	0	0	27066,19	0
C-FIOL-3	1	15	#N/D	#N/D	#N/D	0	0	0	0	0	0	0	0
C-FMSSANTOS	1	16	#N/D	#N/D	#N/D	0	0	0	0	0	0	0	0
C-FNS-1	1,445541	16	18	#N/D	#N/D	0	4993720	0	118,1395	9,24E-05	1689,968	106352,9	0
C-FNS-2	1	18	#N/D	#N/D	#N/D	0	0	0	0	0	0	0	0
C-FNS-SUL	1	19	#N/D	#N/D	#N/D	0	0	0	0	0	0	0	0
C-FNS-TOTAL	1,137868	7	#N/D	#N/D	#N/D	141,6563	9417729	0	27,72809	0,000241	0	245916,6	3705,648
C-FPANORAMA	1,020273	16	18	#N/D	#N/D	0	374279,1	0,290391	10,80261	0	2951,008	0	1899,543
C-FPANTANAL	1,346728	5	10	16	#N/D	13,66749	158577,2	0	0	4,25E-05	0	8428,657	0
C-FPARAENSE-1	1	23	#N/D	#N/D	#N/D	0	0	0	0	0	0	0	0
C-FPARAENSE-2	2,150476	5	7	16	23	0	2515866	0,516617	0	0	0	745062,8	0
C-FVILHENA	1,082727	5	16	#N/D	#N/D	139,8275	1687881	0,717856	2,290337	0	0	211362,9	0
C-H-MARABÁ	1,707255	16	#N/D	#N/D	#N/D	33,58913	265219,8	0,76241	21,31535	0	5823,353	183325	0

Fonte: dados de saída do *software* R.

Notas:

* “peer” significa par ou conjunto de referência, em que: 1 = C-EMN-1, 2 = C-EMN-2, 3 = C-EMN-3, 4 = C-FDOURADOSPARANAGUÁ, 5 = C-FERROGRÃO-1, 6 = C-FERROGRÃO-2, 7 = C-FERROVIADOFRANGO, 8 = C-FICO+FNS-1, 9 = C-FICO+FNS-2, 10 = C-FICO-1, 11 = C-FICO-2, 12 = C-FICO-3, 13 = C-FIOL-1, 14 = C-FIOL-2, 15 = C-FIOL-3, 16 = C-FMSSANTOS, 17 = C-FNS-1, 18 = C-FNS-2, 19 = C-FNS-SUL, 20 = C-FNS-TOTAL, 21 = C-FPANORAMA, 22 = C-FPANTANAL, 23 = C-FPARAENSE-1, 24 = C-FPARAENSE-2, 25 = C-FVILHENA e 26 = C-H-MARABÁ.

** os valores “-” são iguais a zero, ao passo que “0,00” fazem referência a valores muito próximos porém maiores que zero.