

UNIVERSIDADE FEDERAL DE MINAS GERAIS
Faculdade de Engenharia
Programa de Pós-Graduação em Geotecnia e Transportes

Bruno Tavares Medeiros

**MODELAGEM GEOGRÁFICA PARA A SIMULAÇÃO DE CUSTOS DE
TRANSPORTE DE SOJA EM BACIAS LOGÍSTICAS**

Belo Horizonte

2021

Bruno Tavares Medeiros

**MODELAGEM GEOGRÁFICA PARA A SIMULAÇÃO DE CUSTOS DE
TRANSPORTE DE SOJA EM BACIAS LOGÍSTICAS**

Versão Final

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Geotecnia e Transportes da Universidade Federal de Minas Gerais, como requisito parcial à obtenção do título de Mestre em Geotecnia e Transportes.

Área de concentração: Transportes

Orientador: Rodrigo Affonso de Albuquerque
Nóbrega

Belo Horizonte

2021

M488m

Medeiros, Bruno Tavares.

Modelagem geográfica para a simulação de custos de transporte de soja em bacias logísticas [recurso eletrônico] / Bruno Tavares Medeiros. – 2021.

1 recurso online (64 f. : il., color.) : pdf.

Orientador: Rodrigo Affonso de Albuquerque Nóbrega.

Dissertação (mestrado) - Universidade Federal de Minas Gerais, Escola de Engenharia.

Bibliografia: f. 57-64.

Exigências do sistema: Adobe Acrobat Reader.

1. Transportes - Teses. 2. Logística – Teses. 3. Modelagem de dados – Teses. 4. Soja – Transporte – Teses. I. Nóbrega, Rodrigo Affonso de Albuquerque. II. Universidade Federal de Minas Gerais. Escola de Engenharia. III. Título.

CDU: 656(043)



UNIVERSIDADE FEDERAL DE MINAS GERAIS
ESCOLA DE ENGENHARIA
CURSO DE MESTRADO EM GEOTECNIA E TRANSPORTES

FOLHA DE APROVAÇÃO

MODELAGEM GEOGRÁFICA PARA A SIMULAÇÃO DE CUSTOS DE TRANSPORTE DE SOJA EM BACIAS LOGÍSTICAS

BRUNO TAVARES MEDEIROS

Dissertação submetida à Banca Examinadora designada pelo Colegiado do Programa de Pós-Graduação em GEOTECNIA E TRANSPORTES, como requisito para obtenção do grau de Mestre em GEOTECNIA E TRANSPORTES, área de concentração TRANSPORTES. Aprovada em 30 de setembro de 2021, pela banca constituída pelos membros:

Prof. Rodrigo Affonso de Albuquerque Nóbrega (Orientador) - UFMG
Prof. Marcelo Antônio Nero - UFMG
Prof. Marcelo Franco Porto - UFMG
Prof. José Alberto Quintanilha - USP

Belo Horizonte, 30 de setembro de 2021.



Documento assinado eletronicamente por **José Alberto Quintanilha**, **Usuário Externo**, em 30/09/2021, às 17:07, conforme horário oficial de Brasília, com fundamento no art. 5º do [Decreto nº 10.543, de 13 de novembro de 2020](#).



Documento assinado eletronicamente por **Rodrigo Affonso de Albuquerque Nobrega**, **Professor do Magistério Superior**, em 30/09/2021, às 17:52, conforme horário oficial de Brasília, com fundamento no art. 5º do [Decreto nº 10.543, de 13 de novembro de 2020](#).



Documento assinado eletronicamente por **Marcelo Franco Porto**, **Professor do Magistério Superior**, em 30/09/2021, às 17:52, conforme horário oficial de Brasília, com fundamento no art. 5º do [Decreto nº 10.543, de 13 de novembro de 2020](#).



Documento assinado eletronicamente por **Marcelo Antonio Nero**, **Professor do Magistério Superior**, em 01/10/2021, às 10:04, conforme horário oficial de Brasília, com fundamento no art. 5º do [Decreto nº 10.543, de 13 de novembro de 2020](#).



A autenticidade deste documento pode ser conferida no site https://sei.ufmg.br/sei/controlador_externo.php?acao=documento_conferir&id_orgao_acesso_externo=0, informando o código verificador 0990390 e o código CRC 40252126.

AGRADECIMENTOS

A Deus, por me abençoar todos os dias na busca dos meus sonhos e por guardar as nossas vidas.

À minha família, pelo amor e apoio constante, independente da ocasião. Amo vocês.

À Soraya por fazer parte da minha vida e me trazer felicidade todos os dias.

Ao professor Rodrigo Nóbrega pela paciência e confiança no desenvolvimento deste trabalho. Foi um privilégio poder ser orientado por um profissional sensacional.

Ao mestre William Costa pelos ensinamentos e orientações no trabalho.

Aos professores da UFMG, funcionários e a todos os colegas pela ajuda e conhecimento compartilhado. Um obrigado especial à professora Leise Oliveira e ao professor José Elievam pelo incentivo ao longo do curso. Ao Welisson Gomes pelo suporte e disponibilidade.

À CAPES pelo suporte à pesquisa.

À VLI e aos colegas pelo apoio.

Aos amigos, o meu obrigado.

Todos foram importantes e contribuíram de alguma forma para o meu desenvolvimento.

"A mente que se abre a uma nova ideia jamais voltará ao seu tamanho original"

(Albert Einstein)

RESUMO

Os sistemas de transporte, incluindo os que envolvem fluxos intermodais, vêm sendo cada vez mais estudados frente ao desafio de se capacitar o sistema logístico e estruturar os investimentos. Buscando a melhoria no planejamento, o relatório executivo do Plano Nacional de Logística 2025 divulgado em 2018, prevê investimentos em rodovias, ferrovias, cabotagem e hidrovias, na busca de redução do custo logístico do transporte de cargas no país. A soja, *commodity* que responde por 14% da exportação nacional, tem como um dos principais contrapontos o custo associado ao seu transporte, sendo o custo de frete corresponde a 80% do custo de transporte total. Na avaliação dos impactos da infraestrutura logística considerando o ano de 2020 e a infraestrutura proposta no Plano Nacional de Logística em 2025, o presente estudo investigou as rotas de exportação de soja entre os maiores municípios brasileiros produtores do grão e os principais portos de destino com a aplicação de geotecnologias e simulação de cenários preditivos. A pesquisa foi alimentada por dados públicos oficiais, tanto para o cenário atual como para o previsto para 2025. Os resultados demonstram a redução do custo atrelado ao transporte do produto para as rotas de exportação que se beneficiarão com as implementações propostas na malha de transportes para 2025. A pesquisa contribui para uma maior visibilidade no planejamento estratégico dos investimentos futuros relacionados à infraestrutura logística no Brasil, possibilitando ações estruturadas e direcionadas para modos de transporte. O modelo desenvolvido em software livre pode ser replicado conforme se alterem as infraestruturas das ferrovias, rodovias, hidrovias ao longo do tempo, além dos valores de frete, dentre outras variáveis.

Palavras-Chaves: Transporte; Soja; Modelagem; Geotecnologias; Simulação; Custo Logístico.

ABSTRACT

Transport systems, including those involving intermodal flows, have been increasingly studied in light of the challenge of training the logistics system and structuring investments. Seeking to improve planning, the executive report of the 2025 National Logistics Plan, released in 2018, provides for investments in highways, railways, cabotage and waterways, seeking to reduce the logistical cost of cargo transportation in the country. Soybean, a commodity that accounts for 14% of national exports, has as one of its main counterpoints the cost associated with its transport, with the freight cost corresponding to 80% of the total transport cost. In assessing the impacts of logistics infrastructure considering the year 2020 and the infrastructure proposed in the National Logistics Plan in 2025, this study investigated the soybean export routes between the largest Brazilian municipalities that produce the grain and the main ports of destination with the application of geotechnologies and simulation of predictive scenarios. The survey was fed by official public data, both for the current scenario and for the forecast for 2025. The results demonstrate the reduction in the cost linked to transporting the product to export routes that will benefit from the proposed implementations in the transport network for 2025. The research contributes to greater visibility in the strategic planning of future investments related to logistics infrastructure in Brazil, enabling structured and targeted actions for modes of transport. The model developed in open source software can be replicated as the infrastructure of railways, highways, waterways changes over time, in addition to freight rates, among other variables.

Keywords: Transport; Soy; Modeling; Geotechnologies; Simulation; Logistics Cost.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1: Fatores que contribuem para a baixa competitividade e o aumento do Custo Brasil (CONFEDERAÇÃO NACIONAL DO TRANSPORTE, 2018).....	12
Figura 2: Brasil: Informações Gerais - Produtoras Soja por UF em 2020 (COMEX STAT, 2021).....	16
Figura 3: Brasil: Informações Gerais – Proporção em Valor dos Produtos Exportados em 2020 – Total em US\$209,2 Bilhões (COMEX STAT, 2021).	18
Figura 4: Caminhos para o escoamento da safra dos centros de produção até os principais portos brasileiros (EMBRAPA, 2021).	20
Figura 5: Ilustração das 8 bacias logísticas brasileiras (EMBRAPA, 2018).....	21
Figura 6: Plataforma de modelagem do Dinamica EGO (CENTRO DE SENSORIAMENTO REMOTO - UFMG, 2021).....	28
Figura 7: Ferrovia Norte-Sul de Porto Nacional - TO a Estrela D'Oeste – SP (MINISTÉRIO DA ECONOMIA, 2019)	30
Figura 8: Intervenção – Hidrovia (EMPRESA DE PLANEJAMENTO E LOGÍSTICA, 2018)	32
Figura 9: Rede Básica - Malha multimodal em operação no ano de 2020 (EMPRESA DE PLANEJAMENTO E LOGÍSTICA, 2018).....	34
Figura 10: Cenário PNL 2025 - Rede PNL Multimodal - Malha multimodal com as intervenções propostas no Plano Nacional de Logística para operação em 2025 (EMPRESA DE PLANEJAMENTO E LOGÍSTICA, 2018)	35
Figura 11: Representação gráfica da intermodalidade de rotas (EMPRESA DE PLANEJAMENTO E LOGÍSTICA, 2018).....	39
Figura 12: Mapas Vetoriais dos Modos de Transporte e Portos (Autor, 2021).....	40
Figura 13: Modelagem no Dinamica EGO para a rota de transporte da soja (Autor, 2021)....	42
Figura 14: Módulo 1- Leitura das variáveis de entrada no Dinamica EGO (Autor, 2021).....	42

Figura 15: Módulo 2 – Cálculo de mapas e tabelas modelados no software Dinamica EGO para a obtenção dos resultados do custo de cada rota simulada (Autor, 2021)	43
Figura 16: Metodologia de Avaliação Utilizada (Autor, 2021)	44
Figura 17: Custo Acumulado 2020 do Porto de Itaquí ao municípios produtores de soja (Autor, 2021)	45
Figura 18: Custo Acumulado 2025 do Porto de Itaquí ao municípios produtores de soja (Autor, 2021)	46
Figura 19: Mapa temático da priorização das malhas calculado para o porto de Itaquí (Autor, 2021).....	46
Figura 20: Custo Acumulado 2020 para os 10 maiores Portos exportadores (Autor, 2021)...	47
Figura 21: Custo Acumulado 2025 para os 10 maiores Portos exportadores (Autor, 2021)...	47
Figura 22: Mapa de custo acumulado para identificação das macrobacias logísticas de soja combinando os modos rodoviário, ferroviário e rodoviário para 2020 e 2025 (Autor, 2021) .	48
Figura 23: Municípios influenciados por cada porto em 2020, sendo o percentual de influência dos portos com Santos 34,2%, Itaquí 16,5%, Paranaguá 13,9%, Santarém 11,4%, Manaus 6,3%, Rio Grande 6,3%, Salvador 5,1%, Belém 2,5%, São Francisco do Sul 2,5% e Vitória 1,3% (Autor, 2021).....	51
Figura 24: Municípios influenciados por cada porto em 2025, sendo o percentual de influência dos portos com Santos 29,1%, Santarém 25,3%, Paranaguá 12,7%, Itaquí 10,1%, Rio Grande 6,3%, Salvador 6,3%, Belém 3,8%, Manaus 3,8%, São Francisco do Sul 2,5% e Vitória 0% (Autor, 2021)	51
Figura 25: Mapa temático da priorização das rodovias. Exemplo com foco no município de Sapezal-MT, cuja rota de menor custo deixa de ser pelo modo rodoviário até o porto de Santos-SP a um custo acumulado de R\$ 21.153,08 e passa a ser por modo rodoviário até o porto de Santarém-PA com custo previsto de R\$ 19.182,56 (Autor, 2021).....	52

LISTA DE TABELAS

Tabela 1: Comparativo de área, produtividade e produção de grãos - produtos selecionados (*) Safra 2018/19 e 2019/20, mostrando a tendência de crescimento das áreas cultivadas por região (CONAB, 2020).	17
Tabela 2: Estrutura de Custos Logísticos (Ministério dos Transportes, Portos e Aviação Civil, 2017).....	22
Tabela 3: Custo de transporte de uma tonelada de soja de Primavera do Leste até o Porto de Santos segundo o modal logístico utilizado (KUSSANO e BATALHA, 2012).....	23
Tabela 4: Resumo bibliográfico do uso do geoprocessamento em variados temas da gestão da cadeia de suprimentos e com aplicabilidade em diversas regiões geográficas (Autor, 2021).	25
Tabela 5: Resumo bibliográfico do uso do Dinamica EGO na área de transportes (Autor, 2021).....	28
Tabela 6: Projetos incluídos no Programa Avançar – Rodovias (EMPRESA DE PLANEJAMENTO E LOGÍSTICA, 2018).....	31
Tabela 7: Classificação dos principais municípios produtores de soja em 2020 com a utilização da curva ABC (Autor, 2021).....	36
Tabela 8: Descrição dos 79 Municípios Produtores de Soja em 2020 (COMEX STAT, 2021)	36
Tabela 9: Os 10 maiores Portos de Exportação de Soja em 2020 em volume recebido (COMEX STAT, 2021)	37
Tabela 10: Simulador do Custo de Transporte (EMPRESA DE PLANEJAMENTO E LOGÍSTICA, 2021).....	38
Tabela 11: Variáveis de Entrada no Dinamica EGO (Autor, 2021).....	41
Tabela 12: Custo de Transporte dos 79 municípios com maior produção de soja (90% da produção nacional) aos 10 portos elencados pela EPL calculado pelo modelo a partir da rota menos onerosa (Autor, 2021)	48

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO.....	11
1.1	OBJETIVOS DO TRABALHO.....	13
1.2	JUSTIFICATIVA	14
1.3	ESTRUTURA DA DISSERTAÇÃO	15
2	REVISÃO DA LITERATURA	16
2.1	PRODUÇÃO E EXPORTAÇÃO DE SOJA NO BRASIL	16
2.2	INFRAESTRUTURA LOGÍSTICA NO BRASIL	18
2.3	MACROBACIAS LOGÍSTICAS DE SOJA.....	20
2.4	CUSTO DE TRANSPORTE.....	21
2.5	GEOPROCESSAMENTO NO PLANEJAMENTO DE TRANSPORTE.....	23
2.6	USO DO DINAMICA EGO NA MODELAGEM DE TRANSPORTE	27
2.7	O PLANO NACIONAL DE LOGÍSTICA 2025	29
3	METODOLOGIA	33
3.1	O MÉTODO DE PESQUISA	33
3.2	CARACTERIZAÇÃO DOS CENÁRIOS AVALIADOS.....	33
3.3	LEVANTAMENTO DAS PREMISSAS LOGÍSTICAS	35
3.4	BASE DE DADOS GEOREFERENCIADOS.....	39
3.5	MODELAGEM DINAMICA EGO.....	41
4	RESULTADOS E DISCUSSÃO	45
4.1	CUSTO DE TRANSPORTE ACUMULADO POR PORTO	45
4.2	CUSTO TOTAL DOS PRINCIPAIS MUNICÍPIOS PRODUTORES DE SOJA	48
4.3	INFLUÊNCIA DOS PORTOS AVALIADOS PARA A INFRAESTRUTURA DE 2020 E DE 2025.....	50
4.4	DISCUSSÃO SOBRE OS RESULTADOS	53
5	CONCLUSÕES.....	55
6	REFERÊNCIAS.....	57

1 INTRODUÇÃO

Além do Brasil, os países líderes na produção mundial de soja são os Estados Unidos e a Argentina. Conforme destacado no relatório *Sementes Oleaginosas: Mercados e Comércio Mundiais* divulgado pelo Departamento de Agricultura dos Estados Unidos - *United States Department of Agriculture* (USDA, 2021) referente à safra de soja 2020/2021, a produção global de sementes oleaginosas possui estimativa de aproximadamente 610 milhões de toneladas. Os volumes de comércio aumentaram devido às maiores exportações de soja da Argentina, Brasil e Estados Unidos, sendo a China o principal motivador para aumento das exportações.

No cenário de exportação, Freitas e Santos (2017) destacam a Argentina e Estados Unidos como concorrentes do Brasil no comércio da soja, também pertencendo à União Europeia (Holanda e Espanha, principalmente) uma participação de destaque. Nas exportações de milho é majoritária a participação dos Estados Unidos, com os países europeus a segunda colocação.

Em publicação divulgada em 2018, especialistas da Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária (Embrapa) indicaram que a necessidade de soja no mundo em 2050 será o dobro da atual. O Brasil pode se beneficiar de um comércio em franca expansão através de investimentos em pesquisa, melhoria da infraestrutura e se preparando, portanto, para enfrentar os principais desafios na produção deste importante cultivo.

Junto a estes desafios de produção, está a concentração cada vez maior da produção de soja e milho nas regiões Norte, Centro-Oeste e Nordeste, que tem gerado dificuldades na armazenagem e o escoamento das safras, elevando o valor de frete e, conseqüentemente, diminuindo a competitividade com os grãos originados em outros países (LEMOS *et al.*, 2017).

Análises geográficas das macrobacias logísticas da agropecuária no Brasil como as realizadas por Castro *et al.* (2019) e Costa (2013) indicam forte dependência dos portos nas regiões Sudeste e Sul, os quais estão localizados distantes dos grandes centros de produção, encarecendo o custo com logística e conseqüentemente o produto agropecuário brasileiro. Verificaram-se entraves no acesso aos terminais portuários do arco Norte, onde existe potencial para expansão da capacidade de exportação, como por exemplo na região do Matopiba abrangida pela última fronteira de expansão agrícola no centro norte do Brasil. Em

divulgação da Embrapa (2021) se apresenta que as áreas potenciais para produção agropecuária nos estados do Maranhão, Tocantins, Piauí e Bahia vem naturalmente se consolidando como uma região estratégica para aumento da produção agrícola do país. O Matopiba, formado pelas primeiras siglas dos quatro estados, é uma região emergente no Brasil, onde ocorreu forte expansão agrícola a partir da segunda metade dos anos 1980, principalmente na produção de grãos (EMBRAPA, 2021).

Segundo estudos desenvolvidos pela Empresa de Planejamento e Logística (EPL, 2018), no que tange ao mercado interno brasileiro, a competitividade entre os estados produtores também é prejudicada pelos altos custos logísticos, afetando o crescimento econômico das regiões com menor desenvolvimento ou localizadas nas novas fronteiras agrícolas (Norte e Nordeste), devido às escolhas inadequadas de transporte. Outros fatores que impactam na baixa competitividade são exemplificados na Figura 1.

Figura 1: Fatores que contribuem para a baixa competitividade e o aumento do Custo Brasil (CONFEDERAÇÃO NACIONAL DO TRANSPORTE, 2018).



A formação do preço do frete dos produtos agrícolas no Brasil é proveniente do balanceamento entre oferta e demanda dos serviços de transporte e não composição dos custos de transporte. Em divulgação realizada pelo Grupo de Pesquisa e Extensão em Logística Agroindustrial da Universidade de São Paulo (ESALQ-LOG, 2018), se ressalta que existem diversas razões que impactam na variação dos preços de fretes, como distância transportada, tipo e volume de carga, relação da demanda e oferta por modo de transporte, características regionais, concorrência entre diferentes cargas, dentre outras. Outro item que abrange o preço do frete é denominado frete de retorno, se tratando da disponibilidade de retorno com um produto secundário utilizando o mesmo modo de transporte. Um exemplo na logística brasileira para fretes de retorno é a exportação de soja ou milho para os portos e a utilização dos veículos para o retorno com fertilizantes à região produtora.

Para se buscar uma solução é necessária a análise da infraestrutura logística brasileira. Os sistemas de transporte, incluindo os que envolvem fluxos intermodais, vêm sendo cada vez

mais estudados. Em uma operação altamente complexa, determinar a capacidade de operação dos modos de transporte e suas interligações, de forma a não impactar no giro do sistema logístico e na elevação dos custos é fundamental para garantir o escoamento da produção no prazo delineado. O relatório executivo divulgado do Plano Nacional de Logística 2025 (EPL, 2018) prevê investimentos em rodovias, ferrovias, cabotagem e hidrovias, na busca de redução do custo logístico do transporte de cargas no país. Rotas mais curtas podem beneficiar rentabilidade do escoamento da produção agrícola brasileira.

Na efetivação destes investimentos de melhorias na infraestrutura logística previstos no PNL (EPL, 2018), a Agência Nacional de Transportes Terrestres (ANTT) realizou em 2019 o leilão da subconcessão da Ferrovia Norte-Sul (FNS), referente ao trecho que liga Porto Nacional (TO) até Estrela d'Oeste (SP). Estima-se que, no término da concessão, o trecho ferroviário realize uma captação de demanda próximo a 22,73 milhões de toneladas. Contudo, considerando as variáveis limitadoras da infraestrutura brasileira e diante do crescimento da demanda agrícola, se faz imprescindível entender o impacto na atual estrutura logística frente à entrada das melhorias indicadas no PNL 2025.

O planejamento de transporte carece de estudos e diagnósticos mais críticos que envolvam o contexto geográfico nas análises e simulações de macrologística. Para isto, é necessário segmentar o espaço em regiões produtoras e consumidoras de determinadas cargas e que possam caracterizar as bacias logísticas (delimitação geográfica das regiões de origem e destino das cargas, considerando os portos de influência).

Na oportunidade de aplicação de geotecnologias e simulação na avaliação deste projeto, se busca responder as seguintes questões:

- A implantação do Plano Nacional de Logística (PNL 2025) reduzirá o custo de transporte da soja para os principais municípios produtores no Brasil?
- Como a infraestrutura do PNL 2025 comparada ao atual cenário de transporte em 2020 modificará as macrobacias logísticas considerando as rotas de escoamento da soja?

1.1 Objetivos do trabalho

O objetivo geral desta pesquisa é identificar, quantificar e simular as rotas de exportação de soja para os maiores municípios produtores brasileiros e os principais portos de destino

através de uma análise geográfica espacial, considerando a atual infraestrutura logística (ano de 2020) e a infraestrutura proposta no Plano Nacional de Logística (ano de 2025).

São objetivos específicos:

- Comparar as rotas de exportação da soja através do cenário de infraestrutura atual (ano referência 2020) e o cenário com a implantação do PNL (ano de 2025) do governo brasileiro, sendo o foco do PNL a implantação da Ferrovia Norte-Sul (FNS), Ferrovia Ferrogrão e Ferrovia de Integração Oeste-Leste (FIOL).
- Relacionar o custo de escoamento da produção da soja com origem nos maiores municípios produtores e destino para os principais portos exportadores considerando o cenário de infraestrutura atual (2020) e o cenário do PNL avaliada (2025).

1.2 Justificativa

O estudo proporciona uma maior visibilidade no planejamento estratégico dos investimentos futuros relacionados à infraestrutura logística no Brasil, visto que, frente a demanda do tema, há ainda um baixo índice de pesquisas relacionando geoprocessamento à logística de escoamento de cargas. Trabalhos como o de Lopes *et al.* (2016) e Silva e Marujo (2012) apresentam e analisam a otimização de modelos intermodais para escoamento da produção de soja, incluindo também investigações como a de Silva *et al.* (2013) que modela estimativas da matriz origem-destino da cadeia produtora-exportadora dessa *commodity* no Brasil. Contudo, embora estejam inseridas no contexto geográfico essas investigações estão pautadas no escopo da otimização logística do processo. A pesquisa também contribui para o crescimento econômico de forma sustentável, permitindo uma melhor distribuição e oferta de produtos com preços mais competitivos frente às políticas atuais e reduzindo incertezas sobre os possíveis impactos de novos projetos.

A contribuição científica é fornecida com a identificação de rotas logísticas para cenários distintos de infraestrutura de transporte empregando técnicas matemáticas e computacionais na utilização da informação geográfica em conjunto com a modelagem de transporte, incluindo os mapas das probabilidades de transição e das variáveis dinâmicas para a avaliação dos custos de escoamento da produção de soja, considerando possíveis alterações na macrobacia logística brasileira, por meio do uso do geoprocessamento e da simulação como ferramentas de estudo. O modelo desenvolvido pode ser replicado conforme se alterem as

infraestruturas das ferrovias, rodovias, hidrovias ao longo do tempo, além dos valores de frete, dentre outras variáveis.

É importante destacar que a avaliação dos custos de transporte, considerando as influências nas bacias logísticas, permite que as políticas de investimento em infraestrutura no planejamento de longo prazo sejam melhores estruturadas e direcionadas para modos de transporte com melhor eficiência energética, gerando contribuições para o meio ambiente, frente aos danos causados pela emissão de dióxido de carbono em fluxos de transporte. Apesar de não fazerem parte do escopo da pesquisa, estas contribuições ambientais podem ser avaliadas e incorporadas futuramente a partir da estruturação e considerações deste trabalho.

1.3 Estrutura da dissertação

Além deste capítulo introdutório, outros quatro capítulos compõem este trabalho. No capítulo 2 é apresentada a revisão da literatura que fundamenta a metodologia desta pesquisa, apresentada no capítulo 3. Os resultados e discussões obtidos com a aplicação da metodologia são apresentados no capítulo 4, finalizando com as conclusões no capítulo 5.

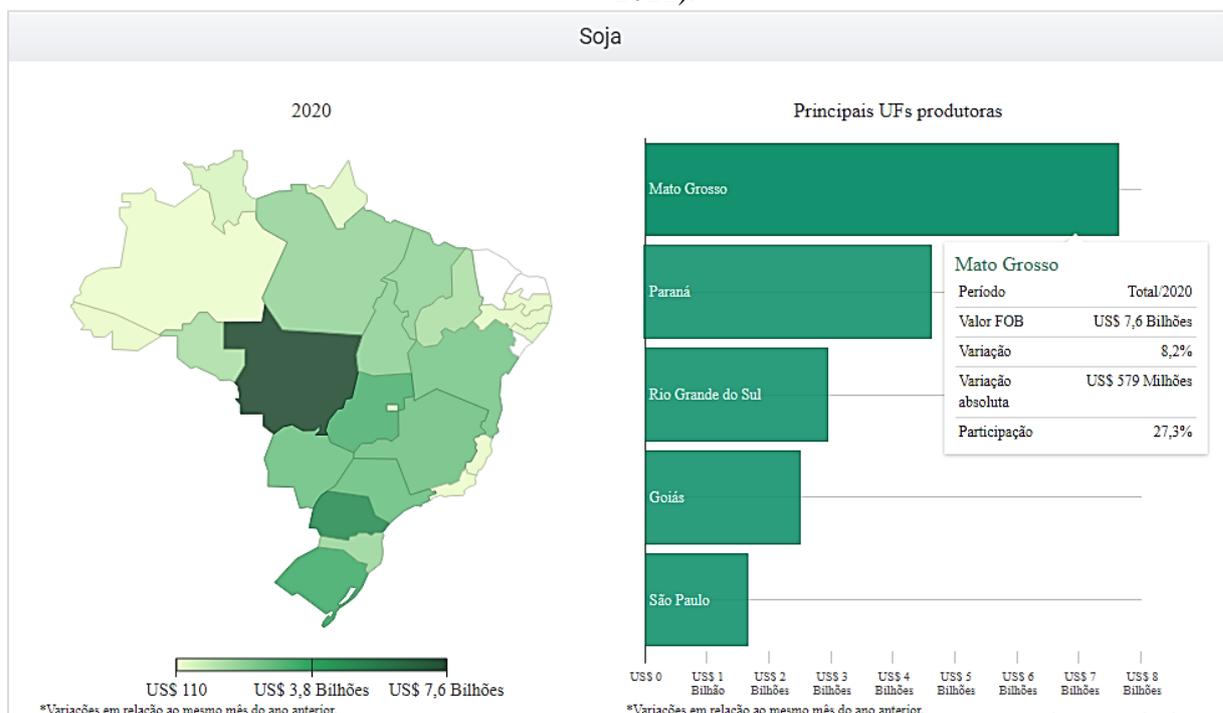
2 REVISÃO DA LITERATURA

O referencial teórico possui 7 subtópicos apresentados a seguir de forma a estruturar os conceitos aplicados. Um capítulo para a metodologia é estabelecido como sequência, porém de forma separada.

2.1 Produção e Exportação de Soja no Brasil

Na produção agrícola, a referência é a soja. O estado do Mato Grosso é o maior produtor (35,9 milhões de toneladas) seguido por Paraná e Rio Grande do Sul, respectivamente, conforme apresentado na Figura 2 (COMEX STAT, 2021).

Figura 2: Brasil: Informações Gerais - Produtoras Soja por UF em 2020 (COMEX STAT, 2021).



O levantamento da safra de grãos 2019/2020 realizado pela CONAB (2020) apontou que a ampliação das áreas dos principais produtos agrícolas representou um incremento de 4% no aumento da safra em comparação à anterior, influenciada principalmente pelo crescimento das áreas de soja, milho, algodão e trigo. Na Tabela 1 é apresentado um comparativo de área, produtividade e produção entre as regiões brasileiras para o período de safra 2018/2019 e 2019/2020. Essa tendência de crescimento das safras alerta sobre a necessidade de avaliação da infraestrutura de escoamento das cargas.

Tabela 1: Comparativo de área, produtividade e produção de grãos - produtos selecionados (*)
Safras 2018/19 e 2019/20, mostrando a tendência de crescimento das áreas cultivadas por região (CONAB, 2020).

REGIÃO/UF	ÁREA (Em mil ha)			PRODUTIVIDADE (Em kg/ha)			PRODUÇÃO (Em mil t)		
	Safra 18/19	Safra 19/20	VAR. %	Safra 18/19	Safra 19/20	VAR. %	Safra 18/19	Safra 19/20	VAR. %
	(a)	(b)	(b/a)	(c)	(d)	(d/c)	(e)	(f)	(f/e)
NORTE	3.097,4	3.288,9	6,2	3.280	3.458	5,4	10.159,7	11.374,2	12,0
NORDESTE	8.013,7	8.161,0	1,8	2.415	2.699	11,7	19.354,8	22.023,8	13,8
CENTRO-OESTE	26.881,4	28.405,5	5,7	4.140	4.261	2,9	111.285,4	121.043,0	8,8
SUDESTE	5.656,6	5.852,4	3,5	4.032	4.162	3,2	22.809,0	24.356,4	6,8
SUL	19.613,1	20.081,7	2,4	4.002	3.617	(9,6)	78.486,0	72.627,5	(7,5)
NORTE/NORDESTE	11.111,1	11.449,9	3,0	2.656	2.917	9,8	29.514,5	33.398,0	13,2
CENTRO-SUL	52.151,1	54.339,6	4,2	4.076	4.012	(1,6)	212.580,4	218.026,9	2,6
BRASIL	63.262,2	65.789,5	4,0	3.827	3.822	(0,1)	242.094,9	251.424,9	3,9

Legenda: (*) Produtos selecionados: Carvão de algodão, amendoim (1ª e 2ª safras), arroz, aveia, canola, centeio, cevada, feijão (1ª, 2ª e 3ª safras), gergelim, girassol, mamona, milho (1ª, 2ª e 3ª safras), soja, sorgo, trigo e triticale
Fonte: Conab.
Nota: Estimativa em julho/2020.

A Companhia Nacional de Abastecimento (CONAB, 2021) na publicação do boletim de acompanhamento da safra brasileira de grãos estima que a produção de soja para a safra 2020/21 seja de 135,54 milhões de toneladas, um aumento de 8,6% em relação à safra anterior, que foi de 124,85 milhões de toneladas.

Segundo Lemos *et al.* (2017) a perspectiva é que a produção de soja no Brasil tenha um crescimento por volta de 35% entre as safras de 2015-2016 e 2025-2026 e a ampliação por volta de 35 milhões de toneladas deve acontecer principalmente com o acréscimo de área plantada ocupando regiões de pastagens, pois a produtividade média da cultura já é elevada e não deverão ocorrer saltos de produtividade no período.

A soja também possui significativa representatividade no cenário dos produtos mais exportados pelo Brasil. Em 2020 foi a principal carga de exportação nacional (Figura 3), tendo a China como principal destino (COMEX STAT, 2021).

- Uso de cerca de 37 mil quilômetros de vias de transportes alocados entre os modos rodoviário, ferroviário e hidroviário com significativa participação de rodovias;
- Verificando-se que o modo rodoviário não é o mais adequado para longas distâncias, se observa altos custos de transportes para o escoamento dos produtos analisados;
- O transporte de soja, farelo de soja e milho predomina na malha federal com 21% da participação de rodovias estaduais;
- Caso o governo brasileiro deseje priorizar o escoamento do complexo de soja e milho, serão necessários investimentos por volta de 25% da malha federal disponível (Infraestrutura Geral dos Corredores Logísticos Estratégicos – Exportação), que apresenta uso de aproximadamente um quarto de cada modo de transporte dessa malha (rodovia federal com a exclusão das planejadas, malha ferroviária concedida e vias hidroviárias interiores economicamente navegadas).
- Foram identificados 11 (onze) principais complexos portuários no escoamento destes produtos.

Além das observações supracitadas do Ministério dos Transportes, Portos e Aviação Civil, é importante destacar também que em uma determinada região um modo de transporte apresenta uma viabilidade maior em relação a outro, decorrente da estrutura ofertada para aquela modalidade ou devido às características geográficas (MTPA, 2017).

No escoamento da soja e do milho, geralmente é utilizado mais de um modo de transporte da origem (fazendas) ao destino final no Brasil (portos). Quando se movimentam cargas utilizando dois ou mais modos de transporte se tem o transporte intermodal. Entre as principais vantagens da intermodalidade se destaca uma melhor aplicação e utilização da infraestrutura das redes, a redução de custos totais e o menor consumo energético e no tráfego (SILVA e MARUJO, 2012). Há a necessidade de avaliação para se identificar os ganhos, que podem variar de uma região do país para outra, decorrente da infraestrutura de redes disponível.

Segundo a Embrapa (2021), quando se considera exclusivamente a chegada aos portos, esse a distribuição da matriz de transporte apresenta outro comportamento. Uma pesquisa elaborada por esta instituição indicou que cerca de 47% dos grãos (milho e soja) chegam aos portos por ferrovias, 42% através de rodovias e 11% utilizando hidrovias. A Figura 4 apresenta os caminhos da produção até os portos brasileiros:

Figura 4: Caminhos para o escoamento da safra dos centros de produção até os principais portos brasileiros (EMBRAPA, 2021).

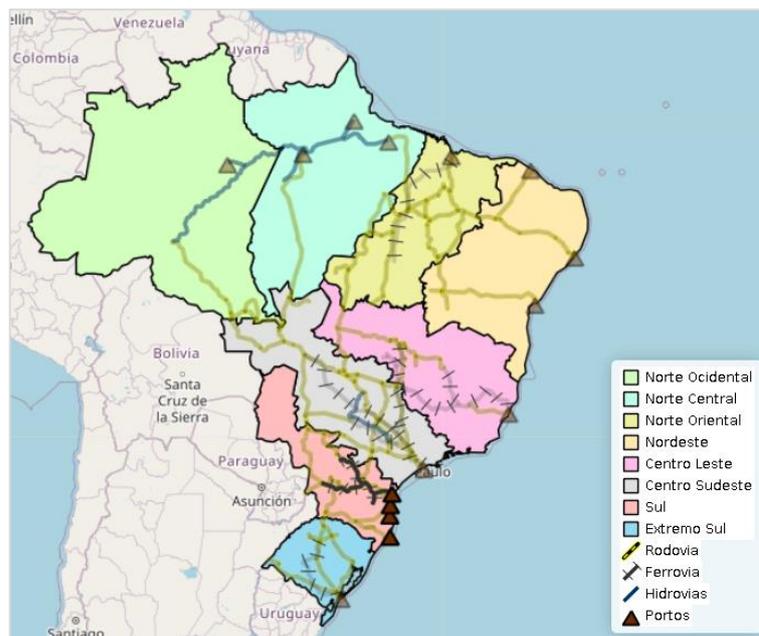


Os estados de São Paulo, Bahia, Paraná e Rio Grande do Sul possuem trajetos para a exportação de soja e milho bem definidos, fator este que pode ser explicado devido à infraestrutura portuária, pois nas regiões Sul e Sudeste se concentram 4 dos 5 portos exportadores de grãos. Entretanto, nos estados de Goiás, Mato Grosso e Mato Grosso do Sul ainda se necessita buscar alternativas ao escoamento dos produtos através de rotas variadas, buscando competitividade nos cenários da logística interna e externa (DASSAN *et al.*, 2016). Investimentos foram realizados pelo governo federal na busca de condicionamento do transporte pelos portos localizados no município de São Luís no estado do Maranhão, como por exemplo, no Porto de Itaqui e o Terminal de Grãos (Tegram).

2.3 Macrobacias Logísticas de Soja

Entre os diversos estudos elaborados pela Embrapa, se destaca a determinação das bacias logísticas da agropecuária no Brasil. A bacia logística é o agrupamento de municípios nos quais o escoamento da produção acontece preferencialmente pelas mesmas rotas, modos de transporte e destinos (EMBRAPA, 2018). Utilizando ferramentas de georreferenciamento na avaliação do fluxo de origem/destino da produção de soja e milho, foram estabelecidos as classificações e os mapeamentos de oito bacias logísticas, conforme apresentado na Figura 5.

Figura 5: Ilustração das 8 bacias logísticas brasileiras (EMBRAPA, 2018).



Na demarcação das bacias logísticas de grãos elaborada pela Embrapa foi considerada:

- Distinção da distribuição por região dos municípios produtores de grãos
- Dimensionamento da exportação de grãos nos portos
- Geocodificação da macrologística da exportação de grãos
- Análise do fluxo origem e destino dos grãos até os portos nos territórios
- Demarcação das bacias logísticas da exportação de grãos

A delimitação das bacias logísticas é influenciada por condições como o custo do frete, tornando-a flexível (COSTA, 2013). Outros elementos como alterações relacionadas à variação de produção, obras de melhorias nas vias ou novos modos de transporte também modificam as bacias.

2.4 Custo de Transporte

Em pesquisa elaborada pela Escola Superior de Agricultura Luiz de Queiroz (ESALQ-LOG) da Universidade de São Paulo (2018), se definiu que o sistema de fretes para produtos agrícola é estipulado entre a oferta do serviço de transporte (prestadores de serviço) e a demanda do serviço de transporte. O custo de transporte para uma rota está atrelado a diversos motivos, dentre eles o tipo do equipamento de transporte, a estrutura que paga os insumos de transporte separada em custo fixo (não depende do uso do ativo) e custo variável (depende do uso do ativo) e a produtividade operacional da rota.

Na análise realizada por Costa (2013), foi medido o custo acumulado de transporte a partir de cada porto de embarque brasileiro considerando o escoamento da soja, utilizando como cálculo as áreas de influência dos portos. Os resultados indicam que os investimentos devem ser realizados em modos de transporte mais apropriados com a necessidade das regiões produtoras, de forma a tornar o transporte mais eficiente.

De acordo com a Confederação Nacional do Transporte (2008) um dos pontos fundamentais a ser considerado quando se trata do transporte de cargas brasileiro é o fator econômico. Ainda se ressalta que um transporte eficiente economicamente produz elevado retorno para o desenvolvimento regional e internacional de um país.

No diagnóstico do Ministério dos Transportes, Portos e Aviação Civil (2017), se verificou que para as *commodities* de grãos no Brasil, os custos logísticos possuem maior impacto na competitividade, pois os produtos agrícolas detêm baixo valor agregado sendo transportados na maioria das vezes em grandes volumes. Ao mesmo tempo, o uso racional dos modos de transporte, como por exemplo a transferência do rodoviário para os demais modos, diminuiria os custos logísticos e elevaria a competitividade dos produtos como soja e milho frente aos concorrentes. A Tabela 2 indica a estrutura dos custos logísticos no transporte de soja e milho no mercado brasileiro:

Tabela 2: Estrutura de Custos Logísticos (Ministério dos Transportes, Portos e Aviação Civil, 2017).

Item	%
Administração	0,50%
Armazenagem	0,90%
Estoque	5,00%
Transportes	9,00%
Total	15,40%

O custo do transporte rodoviário está em maior parte associado ao preço do combustível e dos pedágios, compondo o maior percentual do custo do transporte rodoviário. No caso do ferroviário, geralmente são feitos contratos juntos às grandes *tradings* para o atendimento do alto volume transportado por estas companhias para operações durante um longo período. Em relação ao transporte hidroviário no Brasil, ainda que o seu potencial não seja todo explorado, é o que apresenta um custo por quilômetro percorrido mais baixo em relação ao rodoviário e ferroviário (Tabela 3). De acordo com Kussano e Batalha (2012), na composição dos custos de transporte, o custo de frete é o mais representativo e corresponde a aproximadamente 80% do custo de transporte total.

Tabela 3: Custo de transporte de uma tonelada de soja de Primavera do Leste até o Porto de Santos segundo o modal logístico utilizado (KUSSANO e BATALHA, 2012).

Origem	Fluxo 1				Fluxo 2		Fluxo 3	
	Primavera do L. (MT)	São Simão (GO)	Pederneiras (SP)	Total	Primavera do L. (MT)	Alto Araguaia (MT)	Total	Primavera do L. (MT)
Destino	São Simão (GO)	Pederneiras (SP)	Santos (SP)	-	Alto Araguaia (MT)	Santos (SP)	-	Santos (SP)
Distância (km)	724	650	560	1934	334	1357	1691	1685
Tempo total (dias) transporte + transbordos	0,5	7	1,5	9 dias	0,3	3,7	4 dias	3 dias
Modal	Rodoviário	Hidroviário	Ferrovário	-	Rodoviário	Ferrovário	-	Rodoviário
Frete (R\$)	87,75	35,00	55,00	177,75	47,62	95,00	142,62	180,00
R\$/km	0,1212	0,0538	0,0982	0,0919	0,1425	0,0700	0,0843	0,1068
Quebra no transporte (R\$)	1,63	1,63	1,63	4,88	1,63	1,63	3,25	1,63
Remuneração por estadia (R\$)	0	0	0	0	1,50	0	1,50	0
Custo estoque em trânsito (R\$)		1,35		1,35		0,60	0,6	0,44
<i>Custo de transporte total (R\$)</i>	90,73	36,63	56,63	183,98	49,85	81,63	148,11	183,70

2.5 Geoprocessamento no Planejamento de Transporte

Para avaliar os problemas logísticos e de infraestrutura, alguns pesquisadores têm recorrido à aplicação e uso do Sistema de Informação Geográfica. Este sistema é de grande utilidade para a análise e a tomada de decisão em Políticas Públicas do Setor de Transportes com o intuito de melhorar a infraestrutura dos modos de transporte e o escoamento de produtos, através de soluções mais eficientes e a interligação dos modos para uma estrutura multimodal (BORBA e SILVA, 2010).

O geoprocessamento, na explicação de Câmara e Davis (2001), remete à utilização de técnicas matemáticas e computacionais para o tratamento da informação geográfica, sendo cada vez mais empregada nas áreas de Cartografia, Transportes, Comunicações, Energia e Planejamento, dentre outras. As ferramentas computacionais para Geoprocessamento, denominadas de Sistemas de Informação Geográfica (SIG ou *Geographic Information System* – GIS), admitem avaliações complexas, integrando informações fontes variadas e ao construir bancos de dados georreferenciados. Possibilita ainda a automação da elaboração de documentos cartográficos. Os dados temáticos podem ser representados tanto de forma matricial quanto vetorial (CÂMARA, DAVIS e MONTEIRO, 2001).

Dados geográficos e sistemas de informação geográfica (GIS), em conjunto com os sistemas especializados de tecnologia da informação (TI) utilizados no tratamento de dados mapeados,

são empregados cada vez mais em todos os níveis de governo, por muitas empresas, sociedade civil e outras organizações que tentam entender como, por quê e o que está acontecendo e o que pode ser feito, apoiando no planejamento de novas rotas de transporte, como por exemplo nas ferrovias, sendo capaz de estimar os custos de projetos (BURROUGH *et al.*, 2015).

Sistemas de informação retratam em forma de gráfico um sistema de transporte através de coordenadas, possibilitando a interface com várias informações via banco de dados georreferenciado fornecido pela tecnologia SIG, visualização de gráficos da situação presente e a análise de projeções futuras com maior confiabilidade e segurança (AYALA FILHO e LOPES, 2018).

Em territórios de grandes dimensões como o brasileiro, onde há carência de informações para suportar a tomada de decisões, o geoprocessamento proporciona um grande potencial, principalmente quando se avalia tecnologias de baixo custo. Na área de Transportes, em especial quando esta recorre a grandes extensões territoriais, a aplicação do Sistema de Informação Geográfica é estratégica, considerando as diversas oportunidades para explorar as relações geográficas através do sistema de informação no âmbito das atividades da cadeia logística (BORBA e SILVA, 2010). Também nesta linha, estudos de inteligência geográfica aplicado à corredores ferroviários utilizaram a modelagem geográfica para a elaboração dos diversos cenários de infraestrutura avaliados. O procedimento abrange o tratamento da informação de cada mapa temático para que estes possam ser processados e analisados em conjunto durante o estudo de viabilidade técnica, econômica e ambiental do empreendimento (NOBREGA *et al.*, 2016). Estudos de otimização locacional como o de Souza *et al.* (2020) e Souza (2019) integram técnicas clássicas de tomada de decisão espacial na arquitetura matricial como o Processo Analítico Hierárquico (AHP) com métodos de locação-alocação fundados em análises topológicas de rede da arquitetura vetorial, demonstrando a versatilidade do geoprocessamento para atender a demandas, muitas delas ainda latentes, do planejamento e gestão de transportes.

Os Sistemas de Informação Geográfica (SIG) representam cada vez mais um importante instrumento que auxilia na resolução de problemas de transportes. Diversos estudos utilizam desse tipo de sistema de informação no planejamento, na gestão, na operação e no diagnóstico de sistemas de transportes. Entre as aplicações do SIG nos transportes (SIG-T) estão o Transporte Coletivo Urbano, Rodoviário, de Carga, e na Engenharia de Tráfego (DANTAS *et al.*, 1996).

Apresenta-se a seguir (Tabela 4) um resumo da bibliografia abordando o uso do geoprocessamento em temas relacionados à gestão da cadeia de suprimentos, demonstrando a aplicabilidade em diversas áreas e regiões geográficas:

Tabela 4: Resumo bibliográfico do uso do geoprocessamento em variados temas da gestão da cadeia de suprimentos e com aplicabilidade em diversas regiões geográficas (Autor, 2021)

Local de Publicação	Título	Área Geográfica	Descrição	Autor(es)	Ano
Biofuels, Bioproducts and Biorefining	GIS method to design and assess the transportation performance of a decentralized biorefinery supply system and comparison with a centralized system: case study in southern Quebec, Canada	Sul da cidade de Quebec, Canadá	Apresentação de um método de sistema de informação geográfica (SIG) baseado na otimização de transporte para projetar e comparar o desempenho de um sistema de suprimento de biorrefinaria descentralizado versus centralizado.	Pierre - Olivier Lemire, Benoit Delcroix, Jean - François Audy, François Labelle, Patrice Mangin, Simon Barnabé	2019
Journal of Cleaner Production	A GIS methodology for optimal location of a wood-fired power plant: Quantification of available woodfuel, supply chain costs and GHG emissions	Astúrias, Espanha	Estabelecimento de uma metodologia baseada no Sistema de Informações Geográficas (SIG) para analisar a viabilidade e a localização ideal de uma nova usina hipotética a lenha em uma região específica.	S. Sánchez-García, D.Athanassiadis, C.Martínez-Alonso, E.Tolosana, J.Majada, E.Cangaa	2017
Renewable Energy	Decision support system integrating GIS with simulation and optimisation for a biofuel supply chain	Norte da península inferior do estado de Michigan, nos Estados Unidos	Localização de instalações de biocombustíveis e de design da cadeia de suprimentos de biocombustíveis para minimizar o custo geral.	Fengli Zhang, Dana Johnson, Mark Johnson, David Watkins, Robert Froese, Jinjiang Wang	2016
Applied Energy	Effects of supply chain structure and biomass prices on bioenergy feedstock supply	Ontário, Canadá	Avaliação do fornecimento de switchgrass e miscanthus, em Ontário, Canadá, sob diferentes preços de biomassa e estruturas da cadeia de suprimentos, usando um modelo econômico, biofísico e SIG integrado, para avaliar a política de bioenergia	Aaron V. De Laporte, Alfons J. Weersink, Daniel W. McKenney	2016
State of Australian Cities Conference	A GIS Methodology for Estimating the Transport Network Impedance to Last-Mile Delivery	Cidade de Maribyrnong, Austrália	Medição da impedância da rede de transporte para a entrega nas áreas urbanas usando um conjunto de indicadores urbanos baseados em SIG.	Kolawole Ewedairo, Prem Chhetri, Jago Dodson	2015
Winter Simulation Conference	GIS based discrete event modeling and simulation of biomass supply chain	Estado de Ohio, EUA	Desenvolvimento de uma estrutura de modelagem sustentável da cadeia de suprimentos de biomassa acoplada ao GIS (Sistema de Informações Geográficas) para estimar a taxa de fluxo da matéria-prima e o custo fornecido.	Kamalakanta Sahoo, Sudhagar Mani	2015

Local de Publicação	Título	Área Geográfica	Descrição	Autor(es)	Ano
Transportation Research Part E: Logistics and Transportation Review	Modeling downstream petroleum supply chain: The importance of multi-mode transportation to strategic planning	Regiões da Costa do Golfo e Costa Leste dos Estados Unidos	Proposta de um modelo determinístico de programação linear inteira mista para redes de cadeia de suprimentos de petróleo a jusante para determinar as localizações, capacidades, modos de transporte e volumes de transferência ideais do centro de distribuição.	Yasaman Kazemi, Joseph Szmerekovsky	2015
National Conference of the Australian Society for Operations Research	A GIS model for simulating infrastructure investments in livestock logistics: Application to the northern beef industry	Região norte da Austrália	Descrição de um modelo baseado em SIG, projetado para simular o custo de transporte e implicações para as empresas em toda a cadeia de suprimentos de gado no norte da Austrália.	Stephen McFallan, Andrew Higginsa, Di Prestwidgea, Luis Laredoa	2013
International Journal of Hydrogen Energy	Models, methods and approaches for the planning and design of the future hydrogen supply chain	N.A.	Classificação de modelos e abordagens, que inclui métodos de otimização matemática, sistema de suporte à decisão baseado em sistema de informações geográficas (SIG) e planos de avaliação para uma melhor transição para a cadeia de suprimento de hidrogênio (HSC).	Hanane Dagdougui	2012
Journal of Transportation Technologies	A Freight Mode Choice Analysis Using a Binary Logit Model and GIS: The Case of Cereal Grains Transportation in the United States	Estados Unidos	Modelo de análise para estudar o movimento de grãos de cereais por caminhão e trem nos Estados Unidos.	Guoqiang Shen, Jiahui Wang	2012
Biosystems Engineering	Cluster building and logistics network integration of local food supply chain	Regiões sul, central e norte da Suécia	Investigação das características da cadeia de suprimento local de alimentos e desenvolvimento de um sistema de distribuição coordenado para melhorar a eficiência logística	TG Bosona, G. Gebresenbet	2011
Biomass and Bioenergy	Supply chain cost analysis of long-distance transportation of energy wood in Finland	Finlândia	Modelo baseado em GIS para cadeias de suprimento de madeira para energia foi criado e usado para simular os custos de várias cadeias de suprimentos em uma área de estudo no leste da Finlândia.	Timo Tahvanainen, Perttu Anttila	2011
Transportation Research Part C	Geographic information systems for transportation in perspective	N.A.	SIG de transporte em uma perspectiva mais ampla de pesquisa em SIG e Ciência da Informação Geográfica.	Jean-ClaudeThill	2000

2.6 Uso do Dinamica EGO na Modelagem de Transporte

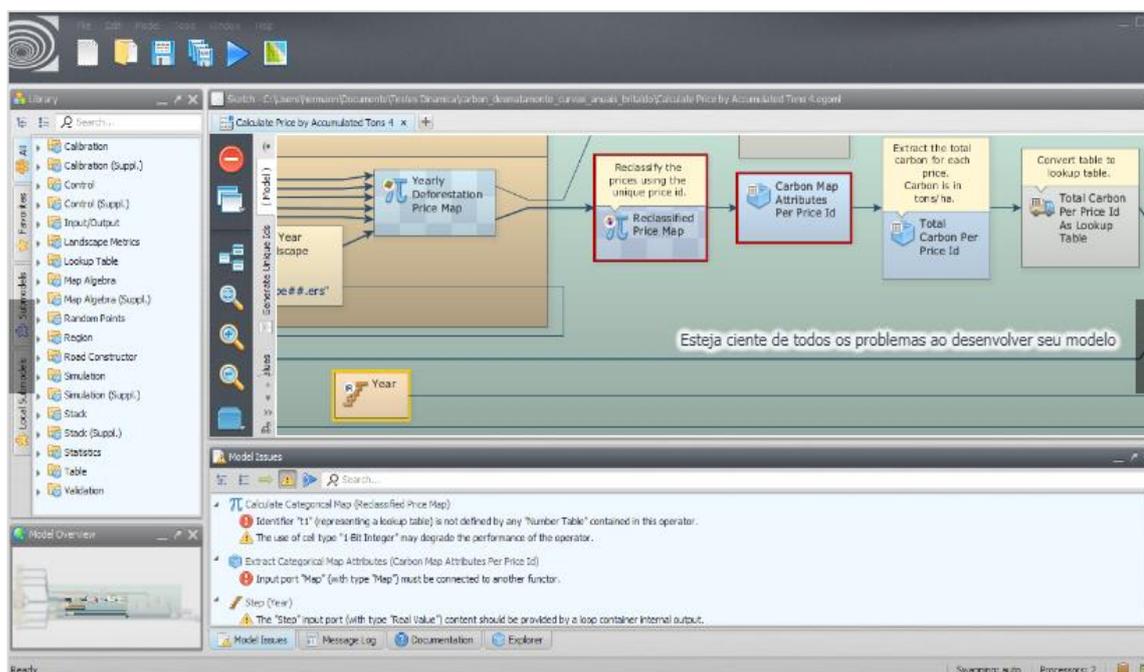
O desenvolvimento do programa Dinamica EGO (*Environment for Geoprocessing Objects*) possui como fundamento a modelagem de paisagem. Segundo Soares-Filho (1998), se tem como premissa de entrada um mapa inicial, resultando como saída mapas de paisagem (ou tabelas), para cada passo de tempo, incluindo os mapas das probabilidades de transição e das variáveis dinâmicas. Para esta pesquisa, os mapas de custo acumulado a partir de cada porto e a estimativa de rotas de exportação de soja em cenário avaliado são resultados das simulações do modelo elaborado no Dinamica EGO.

Destacam-se algumas publicações recentes com a utilização desse mesmo programa, tais como *Large-scale pasture restoration may not be the best option to reduce greenhouse gas emissions in Brazil* (BATISTA *et al.*, 2019), *Cenários para a intensificação da bovinocultura de corte brasileira* (BATISTA *et al.*, 2020), *The gathering firestorm in southern Amazonia* (BRANDO *et al.*, 2020), *Modeling Environmental Dynamics with Dinamica EGO: Guide Book 2.0* (LEITE-FILHO *et al.*, 2019) e *Focus on leakage and spillovers: informing land-use governance in a tele-coupled world* (MEYFROIDT *et al.*, 2020).

A interface de modelagem do Dinamica EGO proporciona benefícios pelo fato de trazer um ambiente flexível, simples e rápida performance, contribuindo no processamento das informações e resultados gerados, ilustrado pela Figura 6. Destaca-se que possui aplicabilidade nas análises de modelagem como um instrumento de verificação de dinâmica de sistemas ambientais (RODRIGUES, SOARES-FILHO e COSTA, 2007).

No programa Dinamica EGO, conforme destacado por Trentin e Freitas (2010), os parâmetros podem ser ajustados a partir de interfaces gráficas. Ele é empregado como uma ferramenta de verificação da direção de paisagens e da dinâmica de elementos espaciais por ser um modelo genérico de mudanças.

Figura 6: Plataforma de modelagem do Dinamica EGO (CENTRO DE SENSORIAMENTO REMOTO - UFMG, 2021)



A aplicação desta ferramenta no planejamento de projetos logísticos apresenta viabilidade frente à aptidão da modelagem em operacionalizar análises de sistemas complexos. É um software gratuito e não comercial.

Um resumo da bibliografia onde o uso do Dinamica EGO foi aplicado nos transportes pode ser observado a seguir na Tabela 5.

Tabela 5: Resumo bibliográfico do uso do Dinamica EGO na área de transportes (Autor, 2021)

Local de Publicação	Título	Área Geográfica	Descrição	Autor(es)	Ano
Revista Ibero-Americana de Ciências Ambientais	Uma perspectiva ambiental no planejamento da ferrovia bioceânica: modelagem quantitativa de cenários.	Ferrovia bioceânica Peru-Brasil.	Proposta de modelo para calcular corredores ambientalmente viáveis, considerados no planejamento da ferrovia bioceânica.	Miluska Blas Leon; NÓBREGA, Rodrigo Affonso Albuquerque Nóbrega; William Leles de Souza Costa.	2020
Revista do Departamento de Geografia - USP	O Papel das Infraestruturas Ferroviárias nas Mudanças de Uso e Cobertura do Solo no MATOPIBA	Região formada pelos estados do Maranhão, Tocantins, Piauí e Bahia (MATOPIBA), Brasil	Desenvolvimento de uma modelagem espacialmente explícita explorando as associações entre a infraestrutura ferroviária (trilhos, pátios ferroviários e terminais intermodais) e a dinâmica de uso e cobertura do solo em uma área de 650.682 km ² no MATOPIBA.	Ícaro Neri Pereira de Souza, Rodrigo Affonso de Albuquerque Nóbrega, Sônia Maria Carvalho Ribeiro	2019

Local de Publicação	Título	Área Geográfica	Descrição	Autor(es)	Ano
Simpósio Brasileiro de Sensoriamento Remoto - SBSR	Modelagem de corredores ótimos para instalação de empreendimentos ferroviários com o software livre Dinâmica EGO a partir de produtos gratuitos de sensoriamento remoto	Trecho da Ferrovia Transcontinental (EF-354) localizado na porção norte do estado do Mato Grosso, Brasil	Avaliação da utilização do software livre Dinâmica EGO na modelagem de corredores ótimos para instalação de empreendimentos ferroviários, a partir de dados originados do processamento de imagens Landsat-8 e produtos do projeto TOPODATA.	Felipe Ramos Nabuco de Araujo, Jefferson William Lopes Almeida, Ítalo Sousa de Sena, Rodrigo Affonso de Albuquerque Nóbrega	2015
Universidade Federal de Minas Gerais	Modelagem e caracterização das rotas de exportação da Soja	Rota da soja para exportação, Brasil	Desenvolvimento de um modelo espacialmente explícito para caracterizar o caminho de menor custo de transporte desde os municípios produtores até os portos utilizados para embarque e exportação da soja.	William Leles de Souza Costa	2013

Verifica-se, dentre os artigos apresentados, a aplicação de avaliações dos impactos futuros para cenários simulados a fim de compreender as mudanças em transporte a partir das variáveis consideradas e dos parâmetros ajustados no modelo.

O estudo de modelagem espacial e caracterização das rotas de exportação da soja realizado por Costa (2013) será utilizado como base inicial aplicado a esta pesquisa, onde serão as rotas de soja na exportação brasileira considerando os cenários do Plano Nacional de Logística 2025 (EPL, 2018).

2.7 O Plano Nacional de Logística 2025

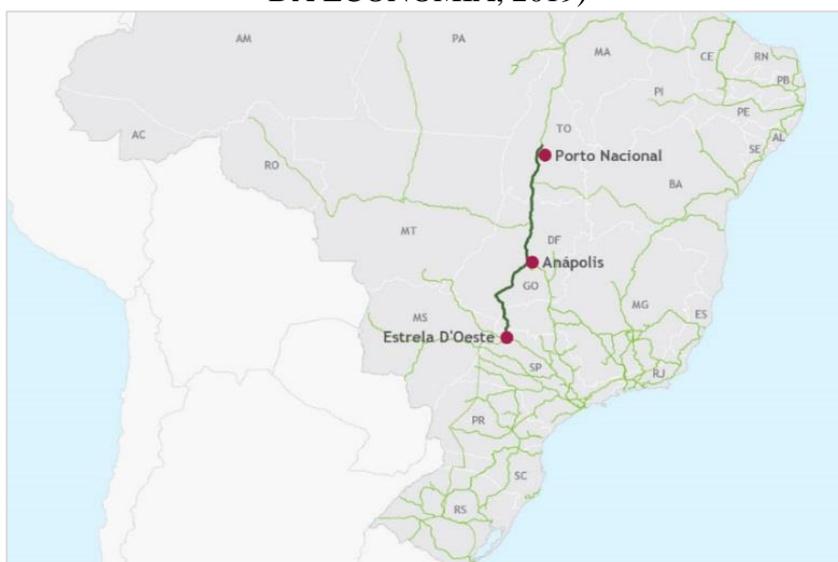
O Plano Nacional de Logística 2025 (EPL, 2018) aponta quais são os empreendimentos e investimentos mandatórios para a otimização da infraestrutura até o ano citado. O PNL visa a elaboração de uma metodologia capaz de proporcionar ações envolvendo todos os modos de transporte, gerando melhorias de eficiência da matriz de transporte, diminuindo os custos logísticos e as emissões de poluentes.

Segundo o relatório executivo elaborado em 2018 pela Empresa de Planejamento e Logística (EPL), nos empreendimentos ferroviários, foram contemplados no “Cenário PNL 2025” a construção de 3,2 mil quilômetros de novas vias previstas no Programa Avançar Parcerias,

quais sejam: Ferrovia Norte-Sul – FNS, Ferrovia Ferrogrão e Ferrovia de Integração Oeste-Leste (FIOL).

A Ferrovia Norte-Sul (EF-151), foi planejada para interligar de forma estratégica o território brasileiro e contribuir para a redução do custo logístico do transporte de cargas. Como divulgado pelo Ministério da Economia (2019), o Programa de Parcerias de Investimentos (PPI) implicou o concessão do trecho com extensão de 1.537 km, interligando Estrela d'Oeste (SP) a Porto Nacional (TO), demonstrado na Figura 7.

Figura 7: Ferrovia Norte-Sul de Porto Nacional - TO a Estrela D'Oeste – SP (MINISTÉRIO DA ECONOMIA, 2019)



O trecho entre Porto Nacional (TO) e Estrela D'Oeste (SP) é dividido em dois segmentos, o tramo-central e o tramo-sul. O tramo-central, com 855 km de extensão, está em operação atualmente, porém com baixos volumes de carga e está localizado entre Porto Nacional (TO) a Anápolis (GO). O tramo-sul, localizado entre Ouro Verde de Goiás (GO) e Estrela d'Oeste (SP), tem 682 km de extensão (MINISTÉRIO DA ECONOMIA, 2019). De acordo com o Ministério da Infraestrutura (MINFRA, 2021), o trecho tramo-sul da FNS começou a operar oficialmente em março de 2021.

Ainda, segundo o Programa de Parcerias de Investimentos, se espera que esse empreendimento viabilize a interligação de outros trechos ferroviários nas conexões logísticas brasileiras. Segundo o Ministério da Economia (2019), enquanto o trecho de Estrela d'Oeste a Três Lagoas (MS) se estende por localidades com ampla capacidade agrícola e industrial, contribuindo para o transporte de grãos e celulose, o trecho de Campinorte (GO) a Água Boa (MT) viabilizará a entrada de produções agrícolas da região centro-oeste à malha ferroviária implantada, representando outra alternativa logística para o fluxo de grãos.

Em novas oportunidades com a finalização de todos os trechos, o Ministério dos Transportes, Portos e Aviação Civil (2018) destaca que com a conexão da FNS à Estrada de Ferro Carajás, em Açailândia/MA, para acesso ao Porto de Itaqui/MA, permitirá a entrada do projeto de conexão futura ao Porto de Barcarena/PA. Na região Sul, em Estrela d’Oeste/SP, a ferrovia se interligará à Ferrovia Malha Paulista, permitindo acesso ao Porto de Santos/SP. Considerou-se ainda a ampliação nas capacidades das ferrovias e malhas da Estrada de Ferro Vitória a Minas, MRS Logística, Ferrovia Centro-Atlântica, Rumo Malha Paulista e a Estrada de Ferro Carajás.

Para os projetos rodoviários, foi avaliada a inclusão de aproximadamente 7,8 mil quilômetros de obras em rodovias, envolvendo duplicação, adequação e construção. Os projetos foram incluídos através do Programa Avançar, conforme detalhamento na Tabela 6.

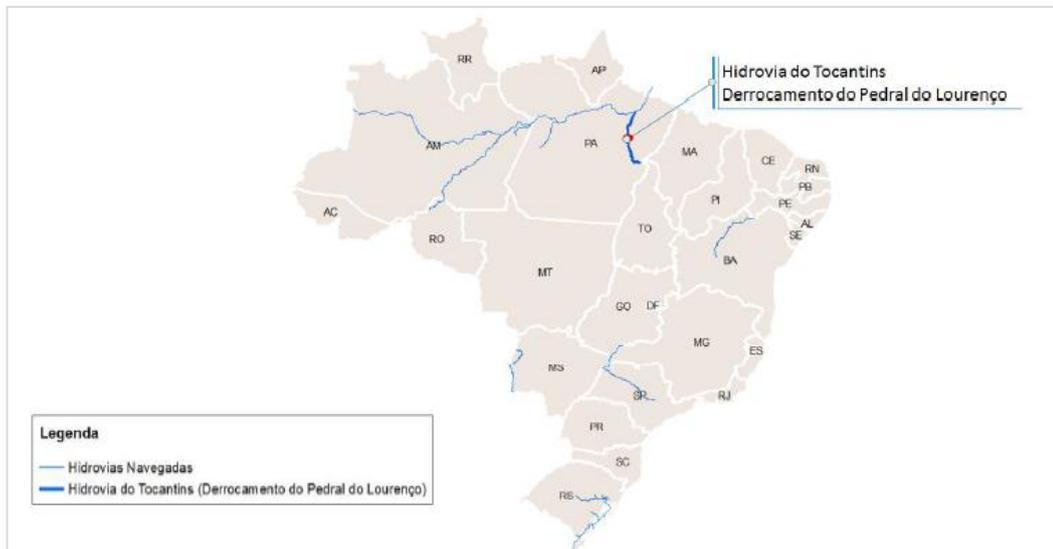
Tabela 6: Projetos incluídos no Programa Avançar – Rodovias (EMPRESA DE PLANEJAMENTO E LOGÍSTICA, 2018)

UF	BR	Tipo	Trecho	Extensão (em km)
AL	101	Duplicação	Div. PE/AL - Div. AL/SE	193,0
BA	235	Construção	Div. SE/BA - Div. BA/PI	332,9
MG	146	Construção	Entr. MG-050 (Passos) - Entr. BR-491 (Guaxupé)	88,0
MG	381	Duplicação	Entr. BR-116/451 (Governador Valadares) - Entr. BR-262 (Anel de Belo Horizonte)	305,3
MT	158	Construção	Entr. MT-412 (p/ Canarana do Norte) - Entr. MT-322	122,9
MT	174	Construção	Entr. MT-420 (Castanheira) - Entr. MT-206/418 (Colniza)	267,6
MT	242	Construção	Entr. BR-158/MT-243 - Entr. BR-163/MT-242 (Sorriso)	433,9
PA	230	Construção	Entr. BR-153/155/222 (Marabá) - Medicilândia	486,3
PA	230	Construção	Medicilândia - Entr. BR-163 (Rurópolis)	256,0
PA	230	Construção	Entr. BR-163 (Rurópolis) - Entr. BR-163 (Campo Verde)	111,9
PE	101	Duplicação	Entr. PE-087/096 (Palmares) - Div. PE/AL	28,2
PR	487	Construção	Porto Camargo - Entr. BR-272 (anel viário de Campo Mourão)	166,0
RJ	493	Duplicação	Arco Rodoviário do Rio de Janeiro (Manilha - Santa Guilhermina)	26,0
RS	116	Duplicação	Entr. BR-290/386 (Porto Alegre) - Entr. BR-392/471	256,1
SC	163	Duplicação	Entr. BR-282/386 (p/ São Miguel do Oeste) - Div. SC/PR	58,3
SC	280	Duplicação	Porto de São Francisco do Sul - Entr. SC-416 (Jaraguá do Sul)	60,1
SC	470	Duplicação	Navegantes - Entr. BR-477 (p/ Blumenau)	54,6
SE	101	Duplicação	Div. AL/SE - Entr. SE-245/429 (Pedra Branca)	77,6
SP	116	Construção	Rodoanel de São Paulo: Trecho Norte (Rodovia Bandeirantes - BR-116)	44,0
TO	242	Construção	Entr. TO-110 (acesso Taguatinga) - Entr. TO-373 (Peixe)	298,4
Total				3.667,1

Em relação à infraestrutura na oferta da cabotagem marítima, se abrange investimentos no acesso ferroviário e rodoviário aos portos e terminais em todo o litoral brasileiro. Também nas premissas inseridas para o “Cenário PNL 2025” foi prevista a possibilidade de todos os portos brasileiros serem utilizados para a navegação de cabotagem marítima, incluindo aqueles

portos que atualmente não realizam esse tipo de operação. O projeto de intervenção na hidrovia é ilustrado na Figura 8.

Figura 8: Intervenção – Hidrovia (EMPRESA DE PLANEJAMENTO E LOGÍSTICA, 2018)



3 METODOLOGIA

A metodologia integrada proposta compõe o uso da tecnologia GIS (Sistema de Informação Geográfica) em conjunto com ferramentas de simulação e modelagem. O emprego do GIS foi utilizado em uma primeira fase da pesquisa para selecionar e preparar os mapas dos modos de transporte ferroviário, rodoviário, portuário, hidroviário, além daqueles referentes às principais áreas de produção agrícola e dos portos. Estes mapas então serviram como premissas para a modelagem e simulação na ferramenta Dinamica EGO, em conjunto com as variáveis de entrada de custos de fretes por modo de transporte. Logo após a modelagem foram realizadas as simulações e as avaliações dos cenários das rotas de transporte e das bacias logísticas, uma delas considerando a atual infraestrutura de transportes (2020) e a outra com a base de dados do PNL (2025).

3.1 O Método de Pesquisa

Este estudo é caracterizado quanto à sua abordagem como Pesquisa Quantitativa, com a avaliação dos custos de transporte de soja. Em relação à sua natureza, se define como uma Pesquisa Aplicada, onde se busca o desenvolvimento de soluções práticas aplicáveis no transporte da soja para exportação. Na análise de dados se classifica como Pesquisa Exploratória, com o uso de dados georreferenciados como base para a construção de hipóteses para os dois cenários avaliados. E por último, quanto aos procedimentos, se trata de uma Pesquisa Experimental, identificando a variação nas rotas de transporte de soja utilizando a modelagem e a simulação em um experimento virtual.

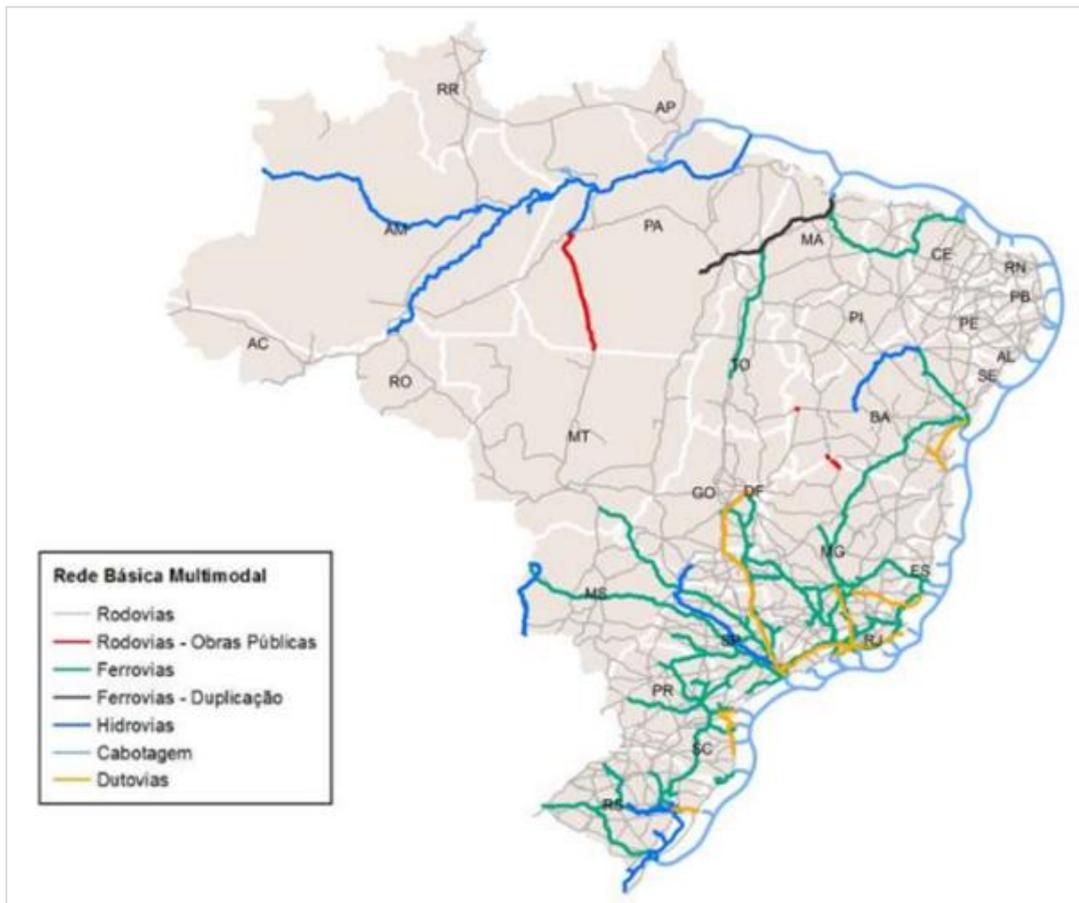
3.2 Caracterização dos Cenários Avaliados

Os cenários definidos neste estudo compreendem todo o território nacional brasileiro, considerando para as rotas de exportação da soja. As modelagens elaboradas são divididas em duas simulações principais:

- 1) Cenário com a infraestrutura atual (referente à 2020): a rede georreferenciada é constituída pelo “Cenário Rede Básica” (Figura 9), caracterizada pela rede com os elementos atuais das infraestruturas para os modos de transporte rodoviário,

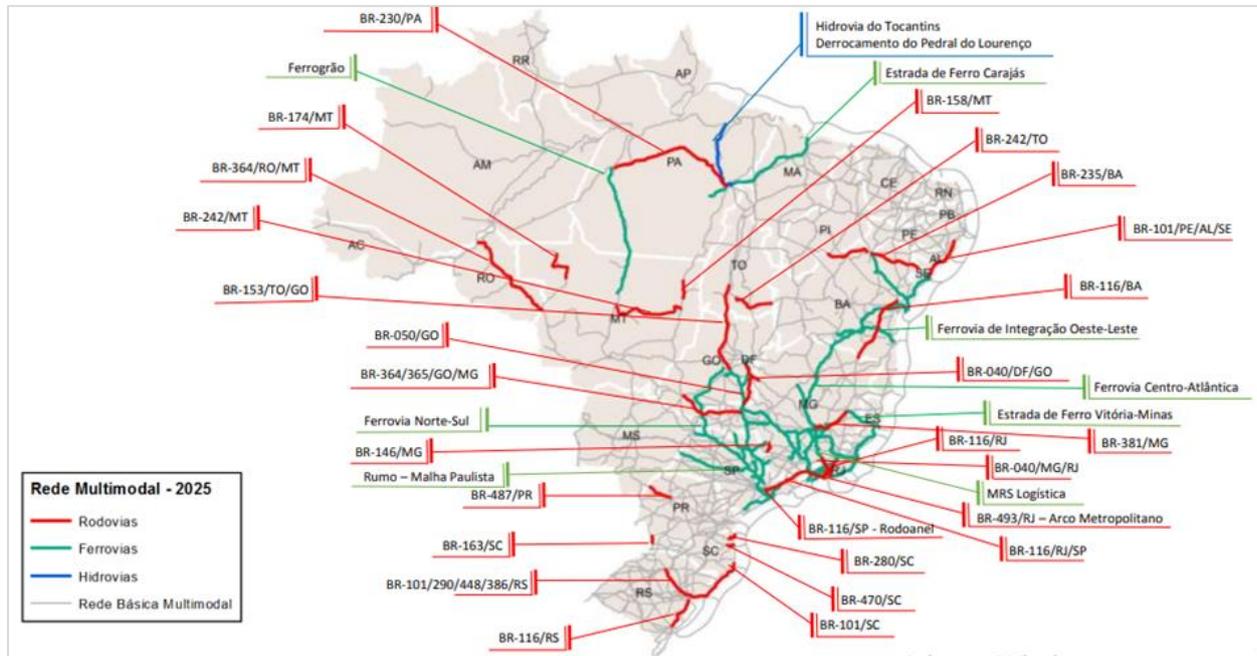
aquaviário (fluvial e marítimo) e ferroviário provenientes da EPL, acrescida das obras com previsão de conclusão até o ano de 2020.

Figura 9: Rede Básica - Malha multimodal em operação no ano de 2020 (EMPRESA DE PLANEJAMENTO E LOGÍSTICA, 2018)



- 2) Cenário com a infraestrutura do PNL 2025: o “Cenário PNL 2025” (Figura 10) considera os projetos de infraestrutura com estimativa de conclusão, e com início de operação até o ano de 2025.

Figura 10: Cenário PNL 2025 - Rede PNL Multimodal - Malha multimodal com as intervenções propostas no Plano Nacional de Logística para operação em 2025 (EMPRESA DE PLANEJAMENTO E LOGÍSTICA, 2018)



O levantamento das premissas logísticas, dos mapas geográficos e a modelagem para a realização das simulações são detalhados logo a seguir.

3.3 Levantamento das Premissas Logísticas

Os dados de entrada constituem de informações de transporte, distâncias envolvidas das rotas e custos logísticos associados. A base de dados utilizada foi obtida via plataforma do Comex Stat, um sistema para consultas e extração de dados do comércio exterior brasileiro, disponibilizado pelo Ministério da Indústria, Comércio Exterior e Serviços (MDIC). Nele foi possível filtrar as consultas de movimentação por UF, por município, por porto e por grupo de mercadoria.

Modos de transporte utilizados para os produtos definidos

A partir das definições levantadas no estudo “Caminhos da safra da produção e Exportação de grãos” realizado pela Embrapa (2018), se verificou que a produção de grãos é escoada até os portos utilizando 3 modais: ferroviário, rodoviário e hidroviário. Os mapas georreferenciados da infraestrutura logística brasileira foram obtidos através da base de dados da EPL (Empresa de Planejamento e Logística S.A.) e do Ministério da Infraestrutura tanto para o cenário de infraestrutura de 2020 quanto para o de 2025 já com as alterações previstas no PNL.

Municípios Produtores de Soja para Exportação

Realizou-se um levantamento dos municípios produtores de soja no ano de 2020 através da base de dados extraída da plataforma Comex Stat do sistema de dados do comércio exterior brasileiro. Em seguida foi utilizado um método de classificação (análise de Pareto ou curva ABC) para priorizar os principais produtores de um total de 342 municípios (Tabela 7).

Tabela 7: Classificação dos principais municípios produtores de soja em 2020 com a utilização da curva ABC (Autor, 2021).

Curva ABC	Total	Total Exportado
A (70%)	36	70,44%
B (20%)	43	90,09%
C (10%)	263	100,00%

Do total de 342 municípios, foram inseridas no estudo a localização de 79, que representam 90,09% do total extraído da base do Comex Stat. Os municípios selecionados são detalhados na Tabela 8.

A base desses municípios foi correlacionada com os códigos geográficos (geocódigos) das sedes dos municípios fornecidos pelo IBGE (Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística). Na sequência os dados espaciais foram convertidos para o formato *raster*.

Tabela 8: Descrição dos 79 Municípios Produtores de Soja em 2020 (COMEX STAT, 2021)

GEOCÓDIGO	Município	Estado	Toneladas	GEOCÓDIGO	Município	Estado	Toneladas
5100201	Água Boa	MT	378.258	2919553	Luís Eduardo Magalhães	BA	2.128.093
2100808	Anapurus	MA	494.661	5212501	Luziânia	GO	1.242.217
5000906	Antônio João	MS	313.480	4115200	Maringá	PR	4.546.118
3103504	Araguari	MG	399.894	5105606	Matupá	MT	589.710
2101400	Balsas	MA	1.357.980	5106224	Nova Mutum	MT	984.556
1501303	Barcarena	PA	813.822	5106240	Nova Ubiratã	MT	589.914
2903201	Barreiras	BA	789.951	1721000	Palmas	TO	944.857
4102802	Bela Vista do Paraíso	PR	239.210	1505502	Paragominas	PA	759.024
2201903	Bom Jesus	PI	527.958	4118204	Paranaguá	PR	8.195.104
5101902	Brasnorte	MT	536.317	4314100	Passo Fundo	RS	2.836.999
4104303	Campo Mourão	PR	641.736	4119905	Ponta Grossa	PR	269.447
5102637	Campo Novo do Parecis	MT	2.265.236	4314902	Porto Alegre	RS	1.066.112
5102678	Campo Verde	MT	687.938	2109007	Porto Franco	MA	557.138
5102686	Campos de Júlio	MT	1.235.254	1718204	Porto Nacional	TO	516.894
5102702	Canarana	MT	704.704	1100205	Porto Velho	RO	683.231
4104808	Cascavel	PR	233.339	5107040	Primavera do Leste	MT	1.210.235
5205109	Catalão	GO	245.392	5107065	Querência	MT	2.507.789
1100056	Cerejeiras	RO	404.952	4315602	Rio Grande	RS	2.480.972
5002951	Chapadão do Sul	MS	365.940	5218805	Rio Verde	GO	3.576.418
3512001	Colina	SP	355.115	5107602	Rondonópolis	MT	1.032.919
5103353	Confresa	MT	349.666	5107248	Santa Carmem	MT	401.894
2909307	Correntina	BA	439.650	4316907	Santa Maria	RS	1.220.077

GEOCÓDIGO	Município	Estado	Toneladas	GEOCÓDIGO	Município	Estado	Toneladas
5206206	Cristalina	GO	412.043	5107768	Santa Rita do Trivelato	MT	251.815
4306106	Cruz Alta	RS	904.880	1506708	Santana do Araguaia	PA	408.866
3513504	Cubatão	SP	255.682	1506807	Santarém	PA	349.156
4106902	Curitiba	PR	364.344	3548500	Santos	SP	3.007.190
5103502	Diamantino	MT	942.100	5107859	São Félix do Araguaia	MT	660.882
5003702	Dourados	MS	1.333.756	4216206	São Francisco do Sul	SC	1.759.743
2911105	Formosa do Rio Preto	BA	591.828	3550308	São Paulo	SP	2.432.850
1709302	Guaraí	TO	403.975	5107875	Sapezal	MT	1.527.548
3518701	Guarujá	SP	1.757.084	4126504	Sertãoópolis	PR	261.398
1709500	Gurupi	TO	264.067	3551702	Sertãozinho	SP	580.760
4207304	Imbituba	SC	529.704	5107909	Sinop	MT	2.207.232
5104526	Ipiranga do Norte	MT	611.161	5107925	Sorriso	MT	3.257.338
1503606	Itaituba	PA	345.073	5107958	Tangará da Serra	MT	704.114
4208450	Itapoá	SC	337.112	3170206	Uberlândia	MG	1.639.312
5104609	Itiquira	MT	298.058	3170404	Unaí	MG	820.649
5211909	Jataí	GO	1.542.891	2211209	Uruçuí	PI	254.093
3526704	Leme	SP	246.637	1100304	Vilhena	RO	799.153
5105259	Lucas do Rio Verde	MT	682.279				

Definição dos Portos Exportadores de Soja

A Tabela 9 contempla as informações extraídas da base de dados de exportação de soja em 2020 considerando os principais portos em volumes recebidos (toneladas) dos estados brasileiros. Os portos indicados receberam carga total anual acima de 1 milhão de toneladas.

Tabela 9: Os 10 maiores Portos de Exportação de Soja em 2020 em volume recebido (COMEX STAT, 2021)

Via de Exportação	Toneladas Exportadas
PORTO DE SANTOS	21.133.118
PORTO DE PARANAGUA	14.781.000
PORTO DE RIO GRANDE	9.319.934
PORTO DE ITAQUI	8.803.467
PORTO DE BELÉM	7.337.759
PORTO DE SAO FRANCISCO DO SUL	5.642.669
PORTO DE VITORIA	4.391.516
PORTO DE SANTAREM	3.708.133
PORTO DE SALVADOR	3.313.617
PORTO DE MANAUS	3.119.804

Custo Médio de Transporte

Como suporte aos cálculos dos custos logísticos para as rotas pré-determinais e para cada modo de transporte foi construída a Tabela 10 a seguir utilizando o Simulador de Custo de Transporte elaborado pela EPL, indicando o custo médio por KM em R\$/tonelada:

Tabela 10: Simulador do Custo de Transporte (EMPRESA DE PLANEJAMENTO E LOGÍSTICA, 2021)

Modo Transporte	Granel Sólido Agrícola		Granel Sólido Não Agrícola		Granel Líquido		Carga Geral		Carga Geral em Contêiner	
Rodoviário	R\$	15,42	R\$	13,86	R\$	17,42	R\$	22,94	R\$	25,21
Hidroviário (alta restrição)	R\$	7,80	R\$	7,34	R\$	10,91	R\$	17,57	R\$	17,37
Hidroviário (média restrição)	R\$	5,64	R\$	5,47	R\$	9,41	R\$	14,39	R\$	14,19
Hidroviário (baixa restrição)	R\$	4,04	R\$	3,87	R\$	9,40	R\$	14,38	R\$	14,19
Cabotagem	R\$	13,27	R\$	11,75	R\$	15,64	R\$	23,51	R\$	24,22
Ferrovário (sem tarifas acessórias)	R\$	7,03	R\$	12,12	R\$	5,95	R\$	15,21	R\$	3,48
Ferrovário (com tarifas acessórias)	R\$	27,60	R\$	18,57	R\$	16,43	R\$	31,47	R\$	7,30

Consideram-se ainda as seguintes informações complementares para a tabela:

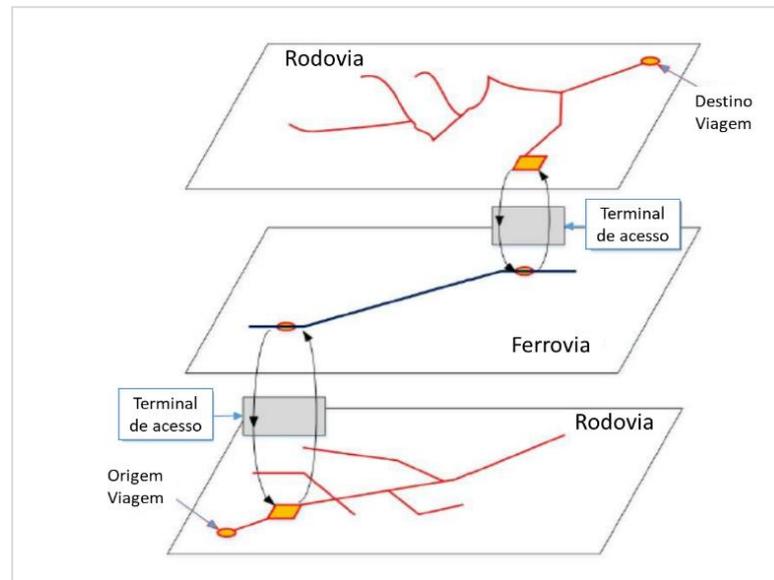
- Granel Sólido Agrícola - GSA: farelo de soja, milho em grão e soja em grão;
- Granel Sólido Não Agrícola - GSNA: carvão mineral, cimento, minério de ferro e outros minerais;
- Carga Geral - CG: alimentos e bebidas (processados), celulose e papel, outros da lavoura e pecuária, produtos básicos de borracha, plástico e não metálicos, produtos da exploração florestal e da silvicultura e manufaturados;
- Granel Líquido – GL: combustíveis, petro e químicos.

Intermodalidade

A intermodalidade se trata do uso integrado da cadeia de transportes. Na avaliação realizada para o escoamento da soja até os portos, foram considerados os modos de transporte ferroviário, rodoviário e hidroviário.

Para que não haja no modelo de simulação um transbordo de cargas em qualquer ponto de cruzamento entre os modos de transporte, foram utilizados os terminais logísticos de transbordo como sendo os locais de acesso de um modo de transporte para outro (exemplo: rodoviário para ferroviário), demonstrado na Figura 11.

Figura 11: Representação gráfica da intermodalidade de rotas (EMPRESA DE PLANEJAMENTO E LOGÍSTICA, 2018)

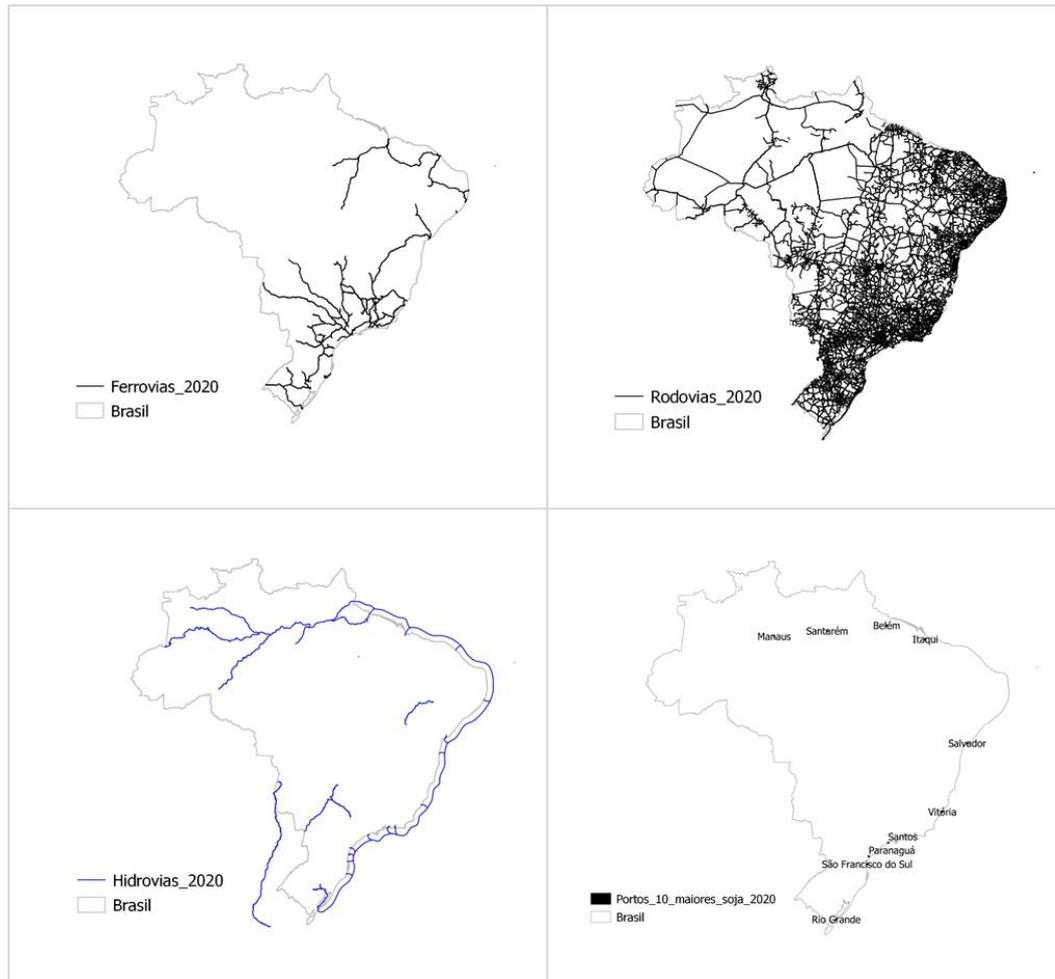


A intermodalidade permite a avaliação da competitividade entre os modos de transporte e pode acarretar na redução de custos logísticos (EPL, 2018).

3.4 Base de Dados Georeferenciados

A metodologia baseada em GIS foi empregada para pré-selecionar e preparar os mapas vetoriais escolhidos (Figura 12). O sistema de geoprocessamento utilizado foi o QGIS, software livre de sistema de informação geográfica. A projeção cartográfica utilizada é a *South_America_Albers_Equal_Area_Conic*, projeção que minimiza a deformação das áreas e mantém paridade na proporção com a área real. Todos os dados que compuseram as camadas geográficas do modelo foram reprojutados para o padrão supracitado.

Figura 12: Mapas Vetoriais dos Modos de Transporte e Portos (Autor, 2021)



Os mapas vetoriais selecionados foram convertidos para formato *raster*, que é a representação por linhas (horizontais) e colunas (verticais) de *pixels* ou células, ou seja, matricial. O *pixel* representa uma região geográfica e o valor atribuído a ele estabelece um atributo dessa região. Foi utilizada a resolução espacial de 1.000 metros por *pixel*. A escolha dessa resolução espacial atende às representações dos modos de transporte utilizados (ferrovia, rodovia e hidrovia) tendo em vista a amplitude geográfica da área do projeto em nível nacional.

A opção por arquivos em formato *raster* se dá pela melhor representatividade dos fenômenos com variação contínua no espaço¹. Os cálculos realizados durante a etapa de análise espacial que antecedem a modelagem somente são possíveis de serem realizados com arquivos matriciais (álgebra de mapas). Além disso, a modelagem realizada no Dinamica EGO lida com mapas ou imagens *raster*, porque os cálculos espaciais são realizados através deles,

¹ O presente estudo é parte de uma investigação mais ampla em desenvolvimento no *Transportation Research & Environmental Modeling* da Universidade Federal de Minas Gerais (TREM-UFGM) e que tem como base a arquitetura raster das análises espaço-temporais (geocampo), transcendendo o limitado universo representativo dos geobjetos.

utilizando cada *pixel* para a realização da operação, enquanto que vetores são linhas, pontos e polígonos, não sendo possível a realização dos cálculos necessários.

3.5 Modelagem Dinamica EGO

A ferramenta utilizada para a modelagem dos cenários e caracterização das rotas logísticas foi o Dinamica EGO. Apesar de ser uma plataforma de modelagem ambiental, a ferramenta permite a construção de álgebra de mapas (operações aplicadas a um ou mais conjuntos de dados *raster*) de forma a se calcular o custo acumulado das rotas de transporte de soja (origem e destino), incluindo a representação visual do modelo. Para a realização da modelagem, são definidas 6 etapas:

- 1) Preparação e leitura das variáveis de entrada (tabelas e mapas).
- 2) Interface entre a tabela de custo de frete e os mapas geográficos de infraestrutura de transporte.
- 3) Criação dos mapas de fricção (também denominados na literatura como superfícies de curso ou de esforço) com os custos de transporte a partir de cada porto.
- 4) Criação dos mapas de rota considerando o menor custo do município ao porto de destino.
- 5) Criação das regiões de influência de cada porto considerando as rotas mais baratas dos municípios avaliados.

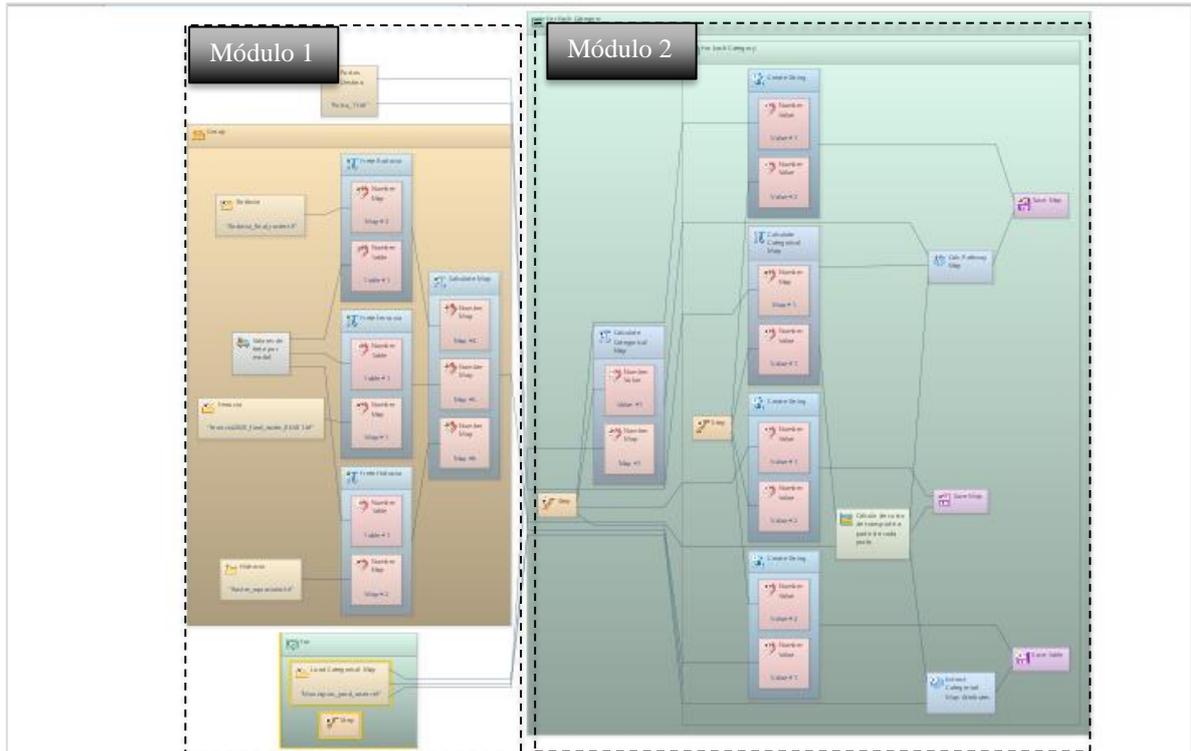
As variáveis de entrada utilizadas na modelagem (Tabela 11) possuem as seguintes fontes e formatos:

Tabela 11: Variáveis de Entrada no Dinamica EGO (Autor, 2021)

Variável de Entrada	Fonte	Formato
Custo de Frete	EPL	Tabela
Mapas dos modos de transporte ferroviário, rodoviário e hidroviário	EPL e Ministério da Infraestrutura	<i>Raster</i>
Mapa dos Portos Exportadores de Soja	Comex Stat	<i>Raster</i>
Mapas do Municípios Produtores de Soja	Comex Stat	<i>Raster</i>

Os resultados finais da simulação a serem apresentados são através de tabelas e mapas. O modelo desenvolvido para a simulação e análise do transporte de soja é apresentado na Figura 13.

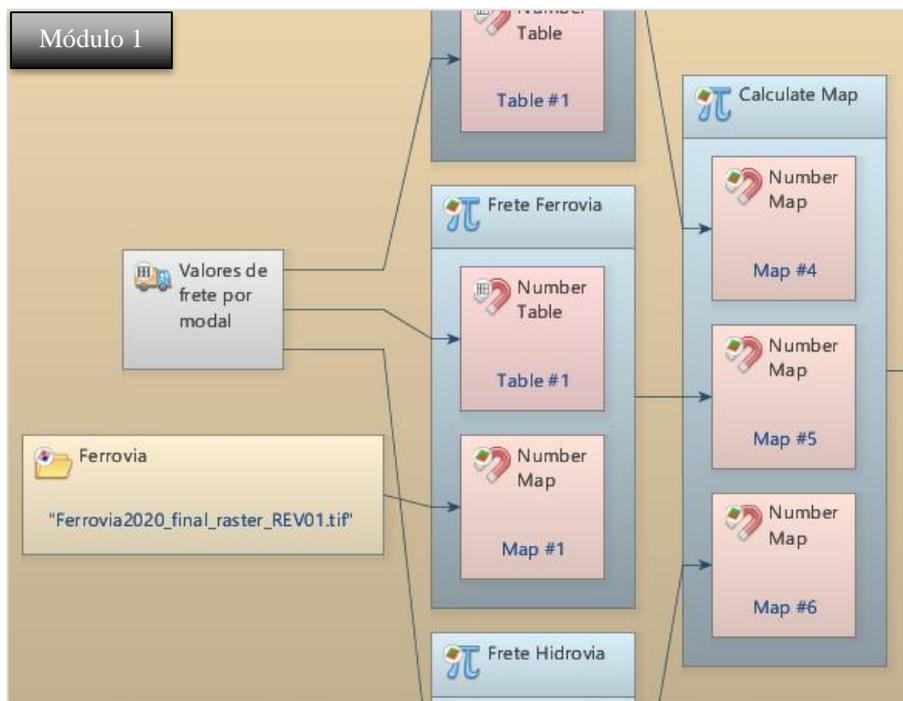
Figura 13: Modelagem no Dinamica EGO para a rota de transporte da soja (Autor, 2021)



O modelo desenvolvido no Dinamica EGO possui as seguintes estruturas e funções:

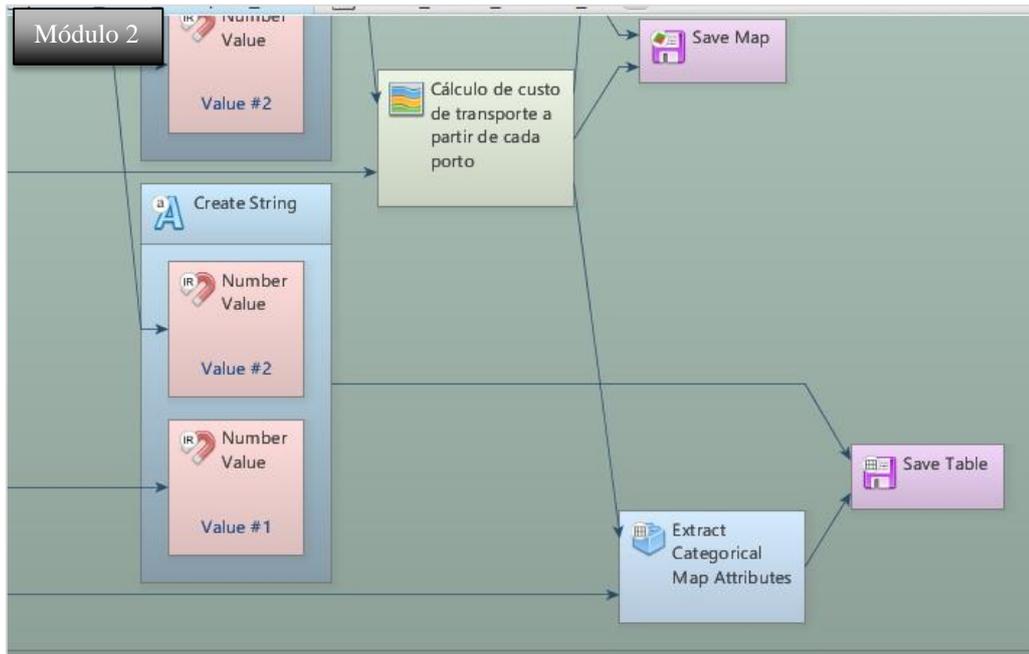
Módulo 1: Leituras dos mapas rasterizados dos modos de transporte (ferroviário, rodoviário, hidroviário), do mapa rasterizado das sedes dos municípios e dos portos e da tabela dos valores médios de frete da soja para cada modo de transporte (Figura 14).

Figura 14: Módulo 1- Leitura das variáveis de entrada no Dinamica EGO (Autor, 2021)



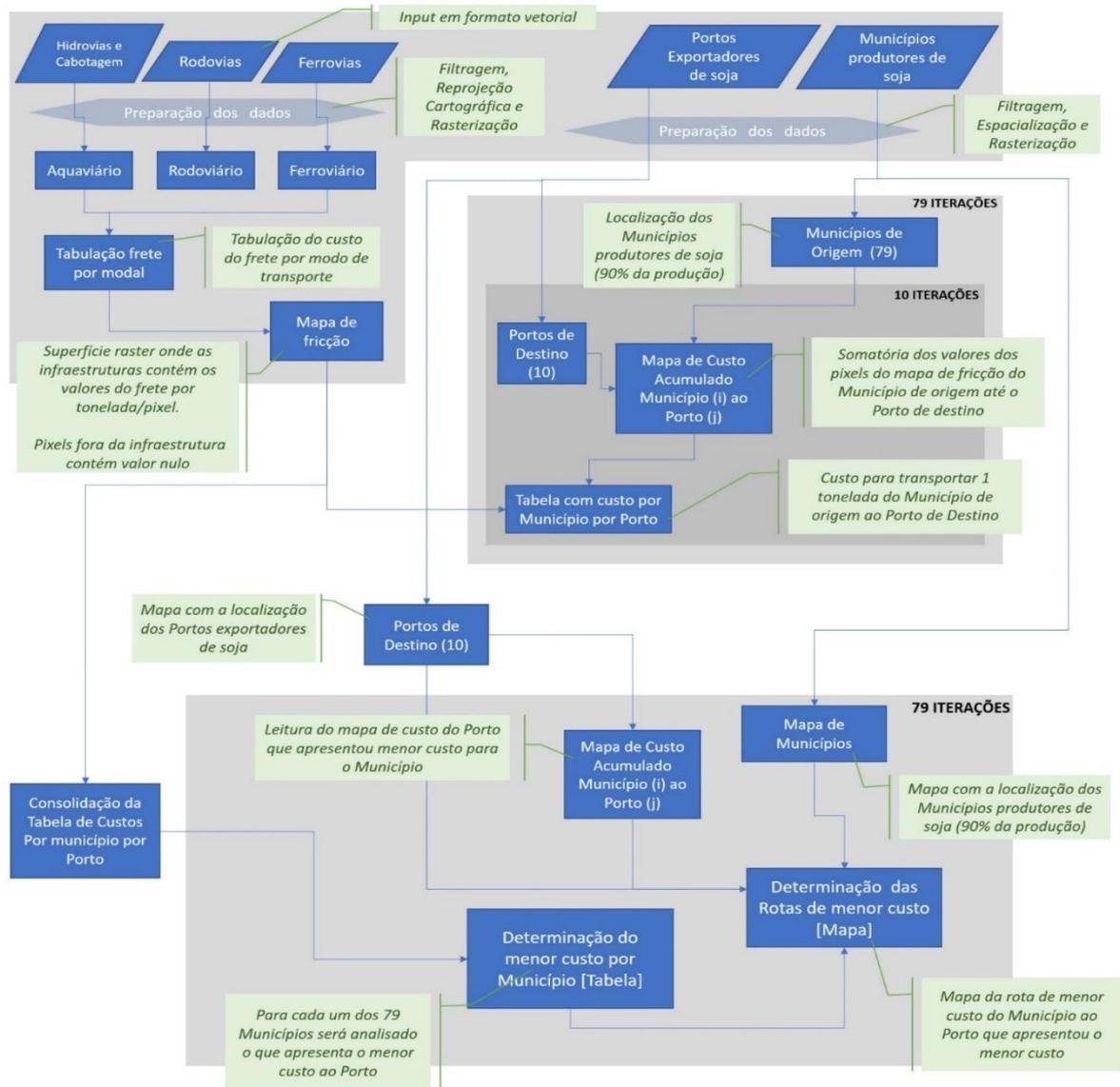
Módulo 2: Cálculo dos mapas de custo acumulado para cada porto de destino, dos mapas da melhor rota simulada de cada município ao porto de destino e criação das tabelas com os custos do município ao porto (Figura 15).

Figura 15: Módulo 2 – Cálculo de mapas e tabelas modelados no software Dinamica EGO para a obtenção dos resultados do custo de cada rota simulada (Autor, 2021)



O modelo é composto por três grupos de processos, sendo o primeiro referente à entrada dos dados e preparação das variáveis do modelo, o segundo referente ao cálculo da superfície de custo entre os pontos de origem e destino sobre a malha multimodal e o terceiro referente a determinação das alternativas de menor custo de transporte e consecutivo mapeamento das rotas. A Figura 16 ilustra o fluxograma comentado dos processos.

Figura 16: Metodologia de Avaliação Utilizada (Autor, 2021)



A solução foi desenvolvida para que a partir de *inputs* vetoriais como o mapa com o rol dos pontos de origem (municípios produtores) e pontos de destino (portos exportadores), mapa da malha rodoviária, ferroviária e aquaviária e de informações tabulares sobre os valores de frete, fossem computadas as rotas alternativas ligando cada ponto de origem aos diversos pontos de destino, quantificando os correspondentes valores de frete para cada alternativa e o mapeamento das rotas de menor valor. A solução de geoprocessamento opera em arquitetura matricial, e surge como uma alternativa aos métodos baseados em topologia de rede em dados vetoriais. Todavia, este estudo não retrata análises comparativas entre diferentes métodos, mas sim o desenvolvimento de um método transparente e de entendimento simples para explorar de forma gráfica e métrica os cenários futuros apresentados pelo governo federal e testar se a hipótese de redução do custo de transporte pode ser satisfeita.

4 RESULTADOS E DISCUSSÃO

O capítulo apresenta os resultados das simulações realizadas. Os custos acumulados para o transporte da soja até os portos, o custo total dos principais municípios exportadores de soja e a influência dos portos avaliados para a infraestrutura de 2020 e de 2025 são divulgados logo adiante. Um tópico com a discussão é utilizado para analisar os resultados obtidos e discuti-los perante outros trabalhos.

4.1 Custo de Transporte Acumulado por Porto

O custo acumulado é calculado pelo modelo considerando a infraestrutura logística disponível para a exportação da soja até o porto. Sendo assim, é possível visualizar as regiões com impacto de baixo ou alto custo de transporte ao porto de destino. Na Figura 17 se ilustra o Porto de Itaqui, localizado no estado do Maranhão, contendo na análise a infraestrutura de transporte para 2020 e na Figura 18 o mesmo porto com a infraestrutura de 2025.

Figura 17: Custo Acumulado 2020 do Porto de Itaqui ao municípios produtores de soja
(Autor, 2021)

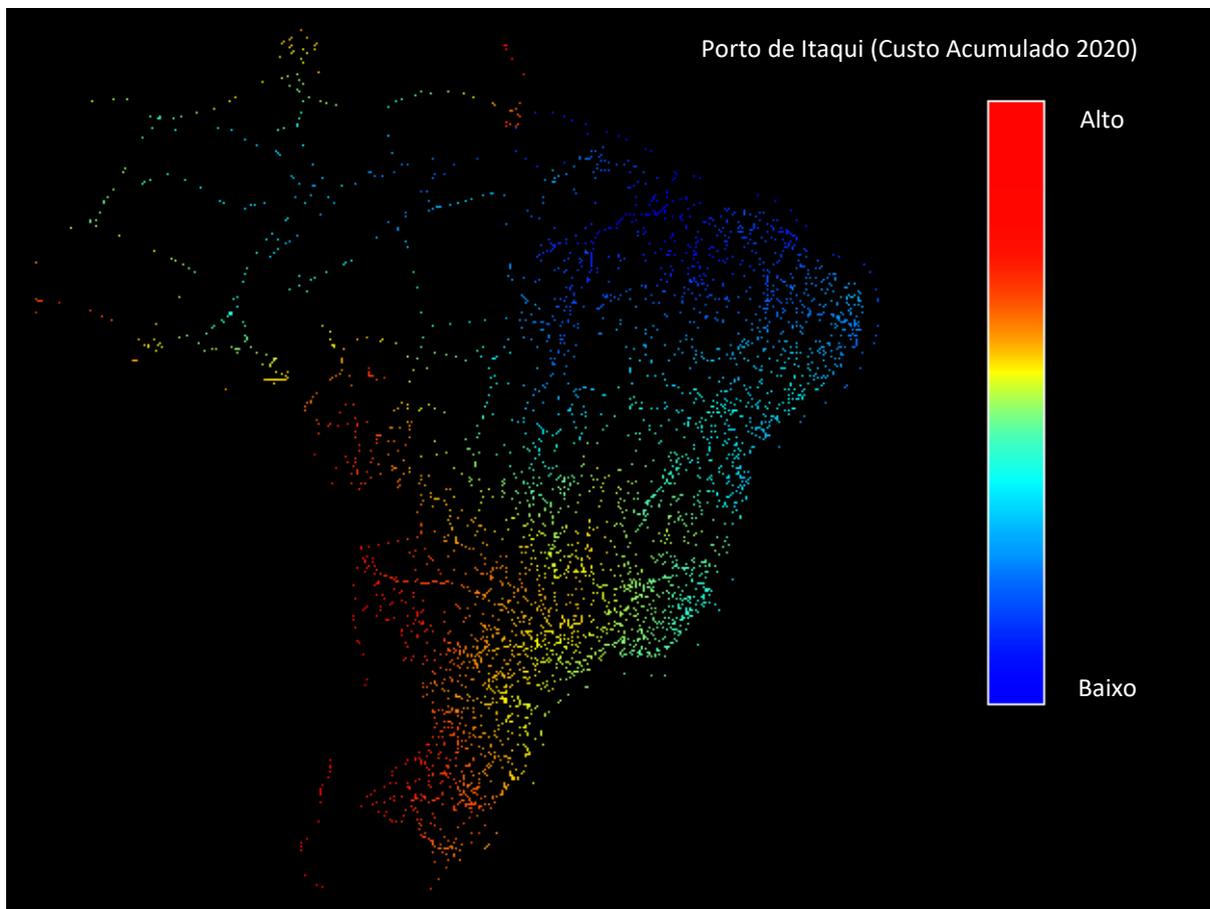
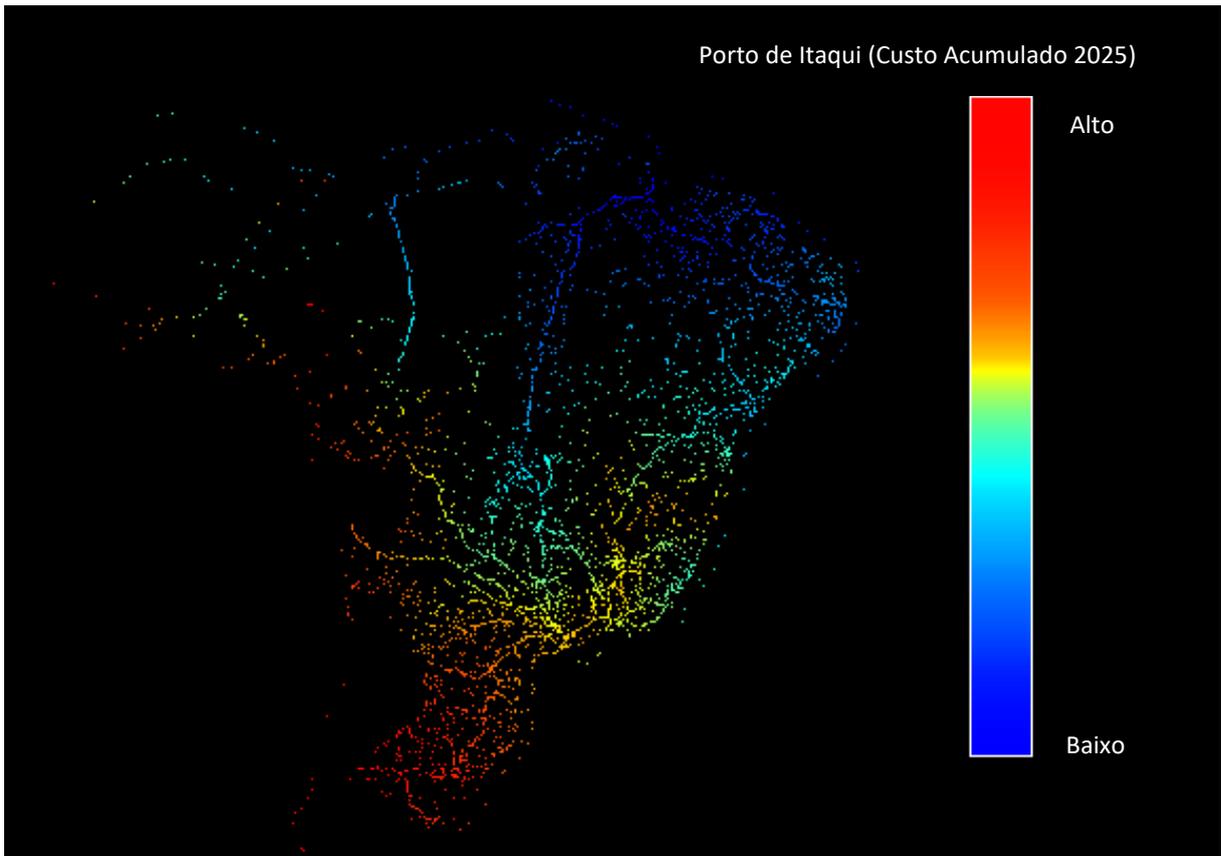
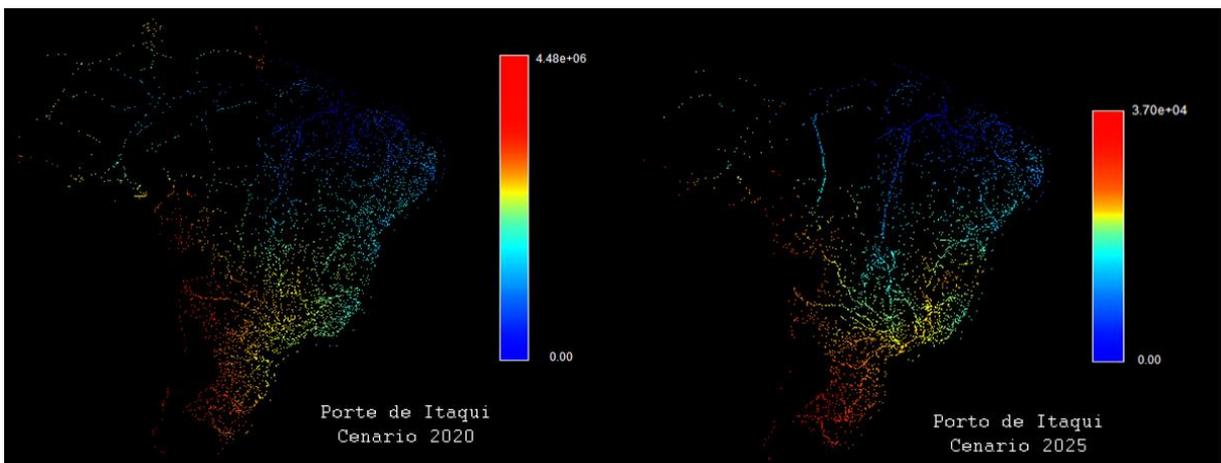


Figura 18: Custo Acumulado 2025 do Porto de Itaqui ao municípios produtores de soja
(Autor, 2021)



Notam-se alterações com a influência da redução do custo acumulado em 2025 comparado à 2020 quando se verifica as regiões das ferrovias FNS e Ferrogrão, demonstradas na Figura 19.

Figura 19: Mapa temático da priorização das malhas calculado para o porto de Itaqui (Autor, 2021)



Os mapas de fricção (também denominados na literatura como superfícies de curso ou de esforço) gerados pelo modelo indicam o valor do frete por quilômetro e representam o custo acumulado do transporte da soja de um município até o porto de destino considerando a

intermodalidade (ou não) dos modos de transporte. No custo acumulado estes valores também são somados considerando todos os 10 portos selecionados. As Figuras 20 e 21 individualizam o resultado para cada cenário de infraestrutura utilizada.

Figura 20: Custo Acumulado 2020 para os 10 maiores Portos exportadores (Autor, 2021)

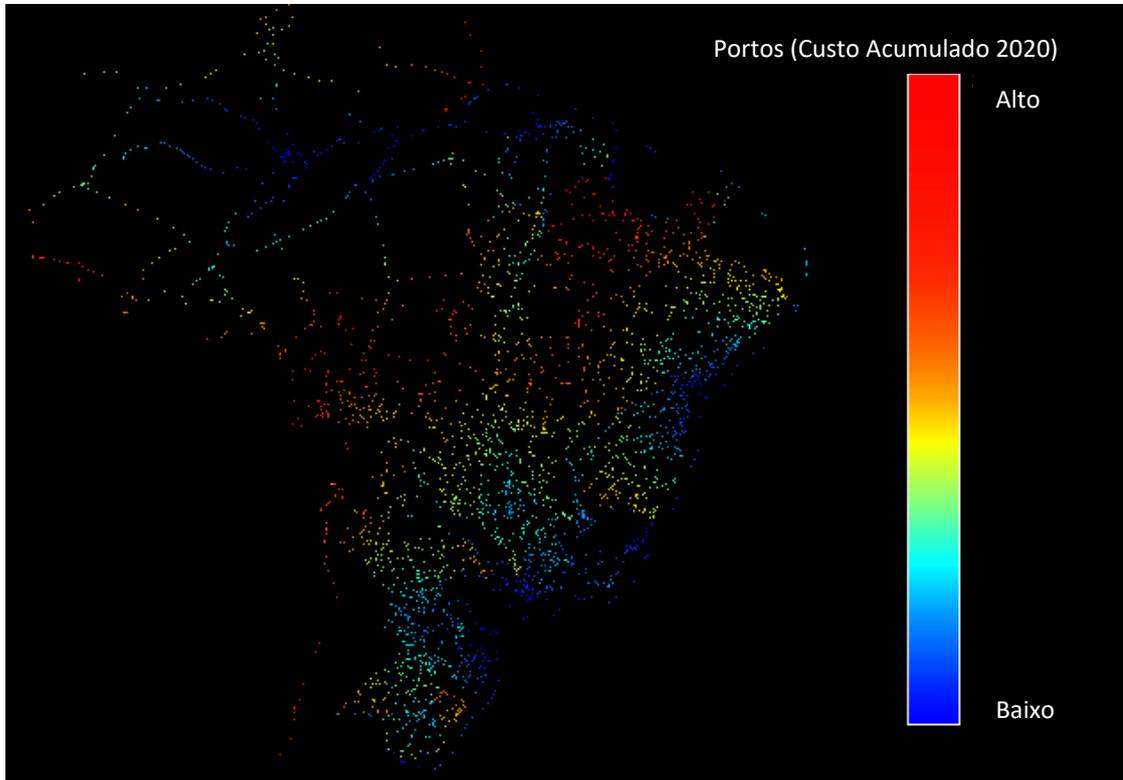
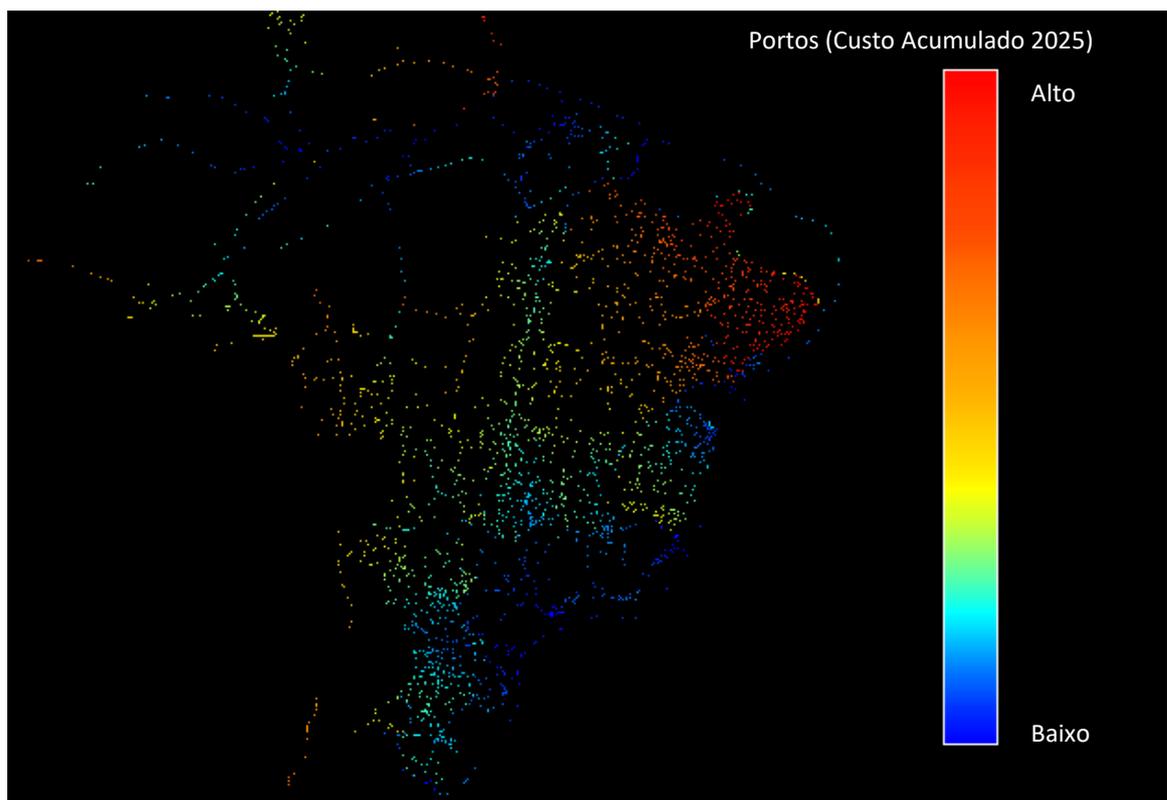
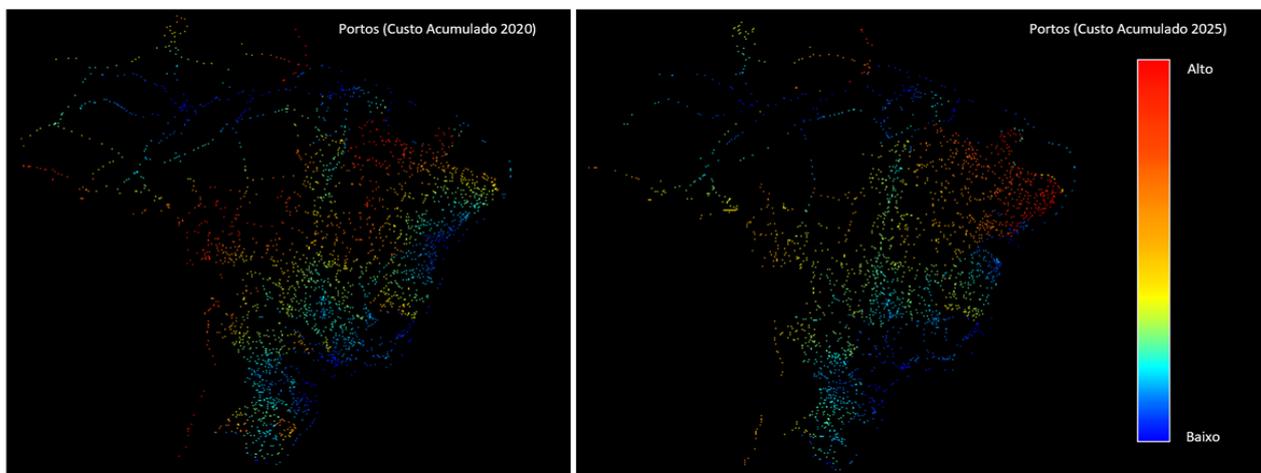


Figura 21: Custo Acumulado 2025 para os 10 maiores Portos exportadores (Autor, 2021)



A Figura 22 diferencia o resultado para cada cenário de infraestrutura utilizada (cenário de 2020 no lado esquerdo e de 2025 no lado direito).

Figura 22: Mapa de custo acumulado para identificação das macrobacias logísticas de soja combinando os modos rodoviário, ferroviário e rodoviário para 2020 e 2025 (Autor, 2021)



Os pontos de custo acumulado fora do território brasileiro nos mapas de portos (Figuras 17 a 22) são decorrentes da continuação das infraestruturas logísticas que se conectam aos países vizinhos e que constam na base de dados dos mapas utilizados da EPL e do Ministério da Infraestrutura.

4.2 Custo Total dos Principais Municípios Produtores de Soja

O mapa de custo de transporte acumulado dos principais municípios produtores de soja foi calculado até os portos se obtendo a rota com o menor custo. Na avaliação dos cenários de infraestrutura de 2020 e de 2025 se resultou a Tabela 12 com os valores especificados para cada origem e destino.

Tabela 12: Custo de Transporte dos 79 municípios com maior produção de soja (90% da produção nacional) aos 10 portos elencados pela EPL calculado pelo modelo a partir da rota menos onerosa (Autor, 2021)

Nome Município	UF	Geocódigo	Menor_Custo 2020	Porto_Destino 2020	Menor_Custo 2025	Porto_Destino 2025
PARANAGUÁ	PR	4118204	R\$ 0,27	Paranaguá	R\$ 0,27	Paranaguá
MARINGÁ	PR	4115200	R\$ 4.148,76	Paranaguá	R\$ 4.033,66	Paranaguá
RIO VERDE	GO	5218805	R\$ 10.747,70	Santos	R\$ 7.762,42	Santos
SORRISO	MT	5107925	R\$ 18.038,43	Santarém	R\$ 10.054,40	Santarém
SANTOS	SP	3548500	R\$ 8,98	Santos	R\$ 7,32	Santos
PASSO FUNDO	RS	4314100	R\$ 3.676,20	Rio Grande	R\$ 3.634,40	Rio Grande

Nome Município	UF	Geocódigo	Menor_Custo 2020	Porto_Destino 2020	Menor_Custo 2025	Porto_Destino 2025
QUERÊNCIA	MT	5107065	R\$ 18.716,69	Itaqui	R\$ 16.463,05	Santarém
RIO GRANDE	RS	4315602	R\$ 362,75	Rio Grande	R\$ 362,75	Rio Grande
SÃO PAULO	SP	3550308	R\$ 637,12	Santos	R\$ 556,92	Santos
CAMPO NOVO DO PARECIS	MT	5102637	R\$ 19.815,50	Santos	R\$ 16.697,93	Santarém
SINOP	MT	5107909	R\$ 16.686,33	Santarém	R\$ 8.709,31	Santarém
LUÍS EDUARDO MAGALHÃES	BA	2919553	R\$ 13.707,61	Itaqui	R\$ 11.326,77	Salvador
SÃO FRANCISCO DO SUL	SC	4216206	R\$ 10,05	São Francisco do Sul	R\$ 10,05	São Francisco do Sul
GUARUJÁ	SP	3518701	R\$ 15,34	Santos	R\$ 15,34	Santos
UBERLÂNDIA	MG	3170206	R\$ 5.677,86	Santos	R\$ 5.378,09	Santos
JATAÍ	GO	5211909	R\$ 11.060,07	Santos	R\$ 8.949,76	Santos
SAPEZAL	MT	5107875	R\$ 21.153,08	Santos	R\$ 19.182,56	Santarém
BALSAS	MA	2101400	R\$ 9.207,77	Itaqui	R\$ 9.168,32	Itaqui
DOURADOS	MS	5003702	R\$ 10.335,72	Paranaguá	R\$ 9.774,40	Santos
LUZIÂNIA	GO	5212501	R\$ 8.389,75	Santos	R\$ 8.065,12	Santos
CAMPOS DE JÚLIO	MT	5102686	R\$ 20.456,55	Manaus	R\$ 20.025,93	Santarém
SANTA MARIA	RS	4316907	R\$ 3.491,75	Rio Grande	R\$ 3.425,86	Rio Grande
PRIMAVERA DO LESTE	MT	5107040	R\$ 12.619,13	Santos	R\$ 12.270,44	Santos
PORTO ALEGRE	RS	4314902	R\$ 1.618,71	Rio Grande	R\$ 1.618,71	Rio Grande
RONDONÓPOLIS	MT	5107602	R\$ 10.673,67	Santos	R\$ 10.327,02	Santos
NOVA MUTUM	MT	5106224	R\$ 17.571,28	Santos	R\$ 12.591,69	Santarém
PALMAS	TO	1721000	R\$ 9.150,42	Itaqui	R\$ 9.132,14	Itaqui
DIAMANTINO	MT	5103502	R\$ 16.600,81	Santos	R\$ 14.365,35	Santarém
CRUZ ALTA	RS	4306106	R\$ 4.491,61	Rio Grande	R\$ 4.425,72	Rio Grande
UNÁÍ	MG	3170404	R\$ 11.282,94	Vitória	R\$ 10.306,44	Santos
BARCARENA	PA	1501303	R\$ 1.566,28	Belém	R\$ 1.552,29	Belém
VILHENA	RO	1100304	R\$ 17.554,27	Manaus	R\$ 17.419,48	Manaus
BARREIRAS	BA	2903201	R\$ 12.300,76	Salvador	R\$ 9.952,01	Salvador
PARAGOMINAS	PA	1505502	R\$ 4.435,28	Belém	R\$ 4.435,28	Belém
CANARANA	MT	5102702	R\$ 17.317,68	Santos	R\$ 16.920,91	Santos
TANGARÁ DA SERRA	MT	5107958	R\$ 17.421,88	Santos	R\$ 16.507,76	Santarém
CAMPO VERDE	MT	5102678	R\$ 12.776,60	Santos	R\$ 12.436,66	Santos
PORTO VELHO	RO	1100205	R\$ 6.852,28	Manaus	R\$ 6.676,27	Manaus
LUCAS DO RIO VERDE	MT	5105259	R\$ 19.050,82	Santarém	R\$ 11.073,80	Santarém
SÃO FÉLIX DO ARAGUAIA	MT	5107859	R\$ 17.318,49	Itaqui	R\$ 16.919,25	Santarém
CAMPO MOURÃO	PR	4104303	R\$ 5.723,03	Paranaguá	R\$ 5.048,08	Paranaguá
IPIRANGA DO NORTE	MT	5104526	R\$ 18.947,76	Santarém	R\$ 10.970,74	Santarém
FORMOSA DO RIO PRETO	BA	2911105	R\$ 14.485,76	Salvador	R\$ 12.249,80	Salvador
NOVA UBIRATÃ	MT	5106240	R\$ 19.287,90	Santarém	R\$ 11.388,50	Santarém
MATUPÁ	MT	5105606	R\$ 13.399,49	Santarém	R\$ 7.034,63	Santarém
SERTÃOZINHO	SP	3551702	R\$ 3.489,97	Santos	R\$ 3.397,62	Santos
PORTO FRANCO	MA	2109007	R\$ 4.986,42	Itaqui	R\$ 4.986,42	Itaqui
BRASNORTE	MT	5101902	R\$ 19.166,81	Manaus	R\$ 19.237,11	Santarém
IMBITUBA	SC	4207304	R\$ 2.194,14	São Francisco do Sul	R\$ 2.185,98	São Francisco do Sul
BOM JESUS	PI	2201903	R\$ 13.702,06	Salvador	R\$ 9.529,87	Salvador
PORTO NACIONAL	TO	1718204	R\$ 9.987,33	Itaqui	R\$ 9.986,48	Itaqui
ANAPURUS	MA	2100808	R\$ 3.193,94	Itaqui	R\$ 3.193,94	Itaqui
CORRENTINA	BA	2909307	R\$ 11.897,52	Salvador	R\$ 9.221,82	Salvador
CRISTALINA	GO	5206206	R\$ 9.329,24	Santos	R\$ 7.966,52	Santos
SANTANA DO ARAGUAIA	PA	1506708	R\$ 13.472,94	Itaqui	R\$ 11.359,94	Belém
CEREJEIRAS	RO	1100056	R\$ 18.888,31	Manaus	R\$ 18.750,03	Manaus
GUARAÍ	TO	1709302	R\$ 8.608,47	Itaqui	R\$ 8.062,18	Itaqui
SANTA CARMEM	MT	5107248	R\$ 17.246,01	Santarém	R\$ 9.268,98	Santarém
ARAGUARI	MG	3103504	R\$ 5.859,10	Santos	R\$ 5.556,48	Santos

Nome Município	UF	Geocódigo	Menor_Custo 2020	Porto_Destino 2020	Menor_Custo 2025	Porto_Destino 2025
ÁGUA BOA	MT	5100201	R\$ 16.437,49	Santos	R\$ 16.137,51	Santos
CHAPADÃO DO SUL	MS	5002951	R\$ 7.814,71	Santos	R\$ 7.465,95	Santos
CURITIBA	PR	4106902	R\$ 545,63	Paranaguá	R\$ 580,58	Paranaguá
COLINA	SP	3512001	R\$ 3.924,66	Santos	R\$ 3.815,47	Santos
CONFRESA	MT	5103353	R\$ 17.327,92	Itaqui	R\$ 14.321,61	Santarém
SANTARÉM	PA	1506807	R\$ 52,81	Santarém	R\$ 44,47	Santarém
ITAITUBA	PA	1503606	R\$ 1.583,34	Santarém	R\$ 1.520,35	Santarém
ITAPOÁ	SC	4208450	R\$ 1.082,57	Paranaguá	R\$ 1.082,57	Paranaguá
ANTÔNIO JOÃO	MS	5000906	R\$ 12.569,22	Paranaguá	R\$ 11.631,68	Paranaguá
ITUIQUIRA	MT	5104609	R\$ 12.739,15	Santos	R\$ 10.648,19	Santos
PONTA GROSSA	PR	4119905	R\$ 1.552,41	Paranaguá	R\$ 1.546,98	Paranaguá
GURUPI	TO	1709500	R\$ 11.264,39	Itaqui	R\$ 10.352,08	Itaqui
SERTANÓPOLIS	PR	4126504	R\$ 4.504,29	Paranaguá	R\$ 4.388,38	Paranaguá
CUBATÃO	SP	3513504	R\$ 75,40	Santos	R\$ 78,64	Santos
URUÇUÍ	PI	2211209	R\$ 9.658,01	Itaqui	R\$ 8.314,16	Itaqui
SANTA RITA DO TRIVELATO	MT	5107768	R\$ 18.687,47	Santos	R\$ 12.889,50	Santarém
LEME	SP	3526704	R\$ 2.094,76	Santos	R\$ 2.005,50	Santos
CATALÃO	GO	5205109	R\$ 7.218,67	Santos	R\$ 6.176,75	Santos
BELA VISTA DO PARAÍSO	PR	4102802	R\$ 4.448,08	Paranaguá	R\$ 4.448,08	Paranaguá
CASCAVEL	PR	4104808	R\$ 4.447,63	Paranaguá	R\$ 4.442,19	Paranaguá

Na análise do cenário PNL 2025 elaborada pela EPL em 2018, a melhoria na eficiência da nova infraestrutura logística gerou uma estimativa de uma redução de 16% no custo total de transporte. Considerando os municípios avaliados e os portos de destino, a média de redução foi de 10% entre os 2 cenários simulados.

4.3 Influência dos Portos Avaliados para a Infraestrutura de 2020 e de 2025

Utilizando como base as rotas de menor custo dos municípios para os portos avaliados, foi identificado qual o melhor de destino e em seguida realizado um agrupamento dos 79 municípios para cada porto de influência nos 2 cenários estudados de acordo com as Figuras 23 e 24.

Figura 23: Municípios influenciados por cada porto em 2020, sendo o percentual de influência dos portos com Santos 34,2%, Itaqui 16,5%, Paranaguá 13,9%, Santarém 11,4%, Manaus 6,3%, Rio Grande 6,3%, Salvador 5,1%, Belém 2,5%, São Francisco do Sul 2,5% e Vitória 1,3% (Autor, 2021)

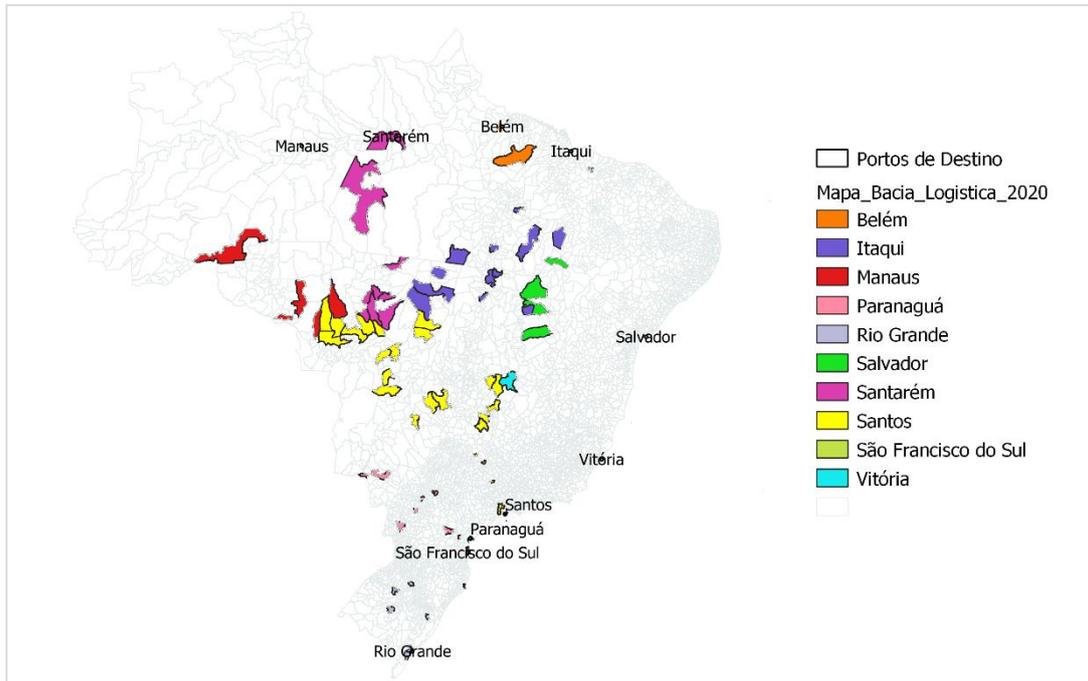
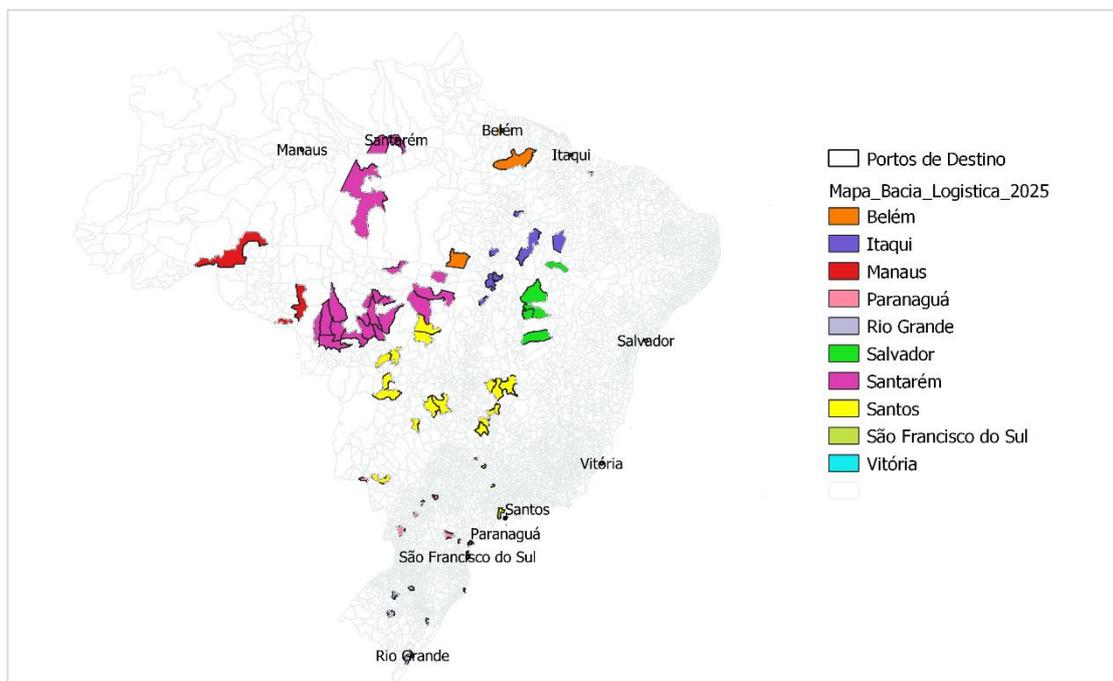


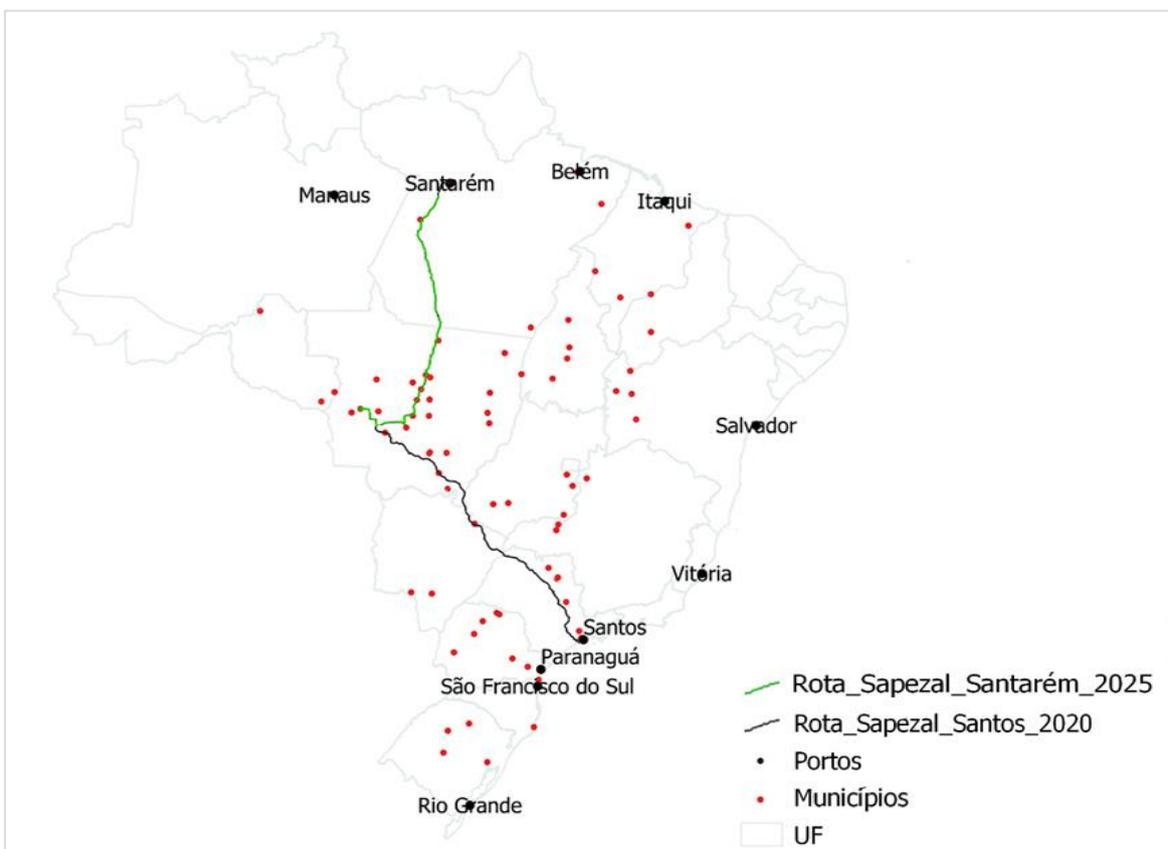
Figura 24: Municípios influenciados por cada porto em 2025, sendo o percentual de influência dos portos com Santos 29,1%, Santarém 25,3%, Paranaguá 12,7%, Itaqui 10,1%, Rio Grande 6,3%, Salvador 6,3%, Belém 3,8%, Manaus 3,8%, São Francisco do Sul 2,5% e Vitória 0% (Autor, 2021)



Nos 79 municípios produtores analisados, houve uma alteração em 19% deles considerando os portos de destino para os cenários de 2020 e 2025. Dessa alteração total, 73% são de municípios que possuíam como rota em 2020 os portos Santos-SP, Itaqui-MA e Manaus-AM e na simulação de 2025 passaram a escoar a produção via o porto de Santarém-PA. Outras alterações de rotas são para os portos de Belém-PA, Santos-SP e Salvador-BA, modificando assim as regiões de influência de alguns portos.

A Figura 25 exemplifica as alterações de rotas de transporte para o município de Sapezal-MT. A rota com menor custo acumulado considerando a infraestrutura de 2020 é o porto de Santos-SP e com a implantação das melhorias pontuadas na PLN 2025 a nova rota foi alterada para o porto de Santarém-PA.

Figura 25: Mapa temático da priorização das rodovias. Exemplo com foco no município de Sapezal-MT, cuja rota de menor custo deixa de ser pelo modo rodoviário até o porto de Santos-SP a um custo acumulado de R\$ 21.153,08 e passa a ser por modo rodoviário até o porto de Santarém-PA com custo previsto de R\$ 19.182,56 (Autor, 2021)



Em ambos os cenários de rota com o menor custo para o município de Sapezal-MT foi utilizada a composição rodovia-ferrovia. A alteração para a mudança de rota no cenário de 2025 se deve à entrada da Ferrogrão na infraestrutura planejada.

4.4 Discussão sobre os Resultados

Considerando os resultados obtidos, foi possível compará-los às avaliações realizadas em outros estudos para os cenários de infraestrutura de 2020 e 2025.

Em estudo divulgado pela EPL em 2018 para o cenário do PNL 2025, se indicou que a inserção da Ferrovia de Integração do Centro-Oeste (FICO), da Ferrovia de Integração Oeste Leste (FIOL) e das rodovias alimentadoras BR-080/GO/MT e BR- 242/TO/MT proporcionam um potencial de captação de carga mais elevado quando se compara a outros projetos do programa. Em paralelo ao modelo e resultados apresentados para o cenário do PNL 2025 comparado ao atual cenário de transporte em 2020, se verificam alterações nas regiões de influência dos portos considerando as rotas de escoamento da soja. Os maiores impactos avaliados são principalmente nos estados do Mato Grosso que tinham como destino a rota para os portos de Itaqui e Santos e que passaram em 2025 a roteirizar a carga para o porto de Santarém-PA, mostrando que a Ferrogrão pode gerar um impacto significativos das regiões de macrobacias logísticas dos portos. Há também alteração para o porto de Salvador, considerando as implantações da FICO. Com a análise de todos os municípios exportadores do Brasil, essas alterações das regiões de influência dos portos para a FICO e a FIOL podem se mostrar mais evidentes.

No que tange ao custo de transporte logístico, o relatório do PNL 2025 estima uma redução maior no custo total de transporte comparado aos resultados deste estudo. As considerações de limitação da quantidade dos municípios definidos no escopo do trabalho a partir da base da plataforma de comércio exterior brasileira, além da restrição aos portos com maior quantidade de carga exportada em 2020, podem ter influenciado no resultado final quando comparado ao relatório da ETL. Visto que outros municípios serão beneficiados os projetos definidos para 2025, o ganho estimado não foi incorporado na estimava final desta pesquisa.

Em outro diagnóstico de roteirização envolvendo o transporte multimodal para transporte da produção agrícola do Mato Grosso, Waydzik *et al.* (2020) contemplaram no trabalho a escolha dos 5 municípios mais relevantes no estado e dos três principais portos de destino, que foi incluído na matriz origem/destino. Verificou-se que em algumas situações que o transporte multimodal de rodoviário aliado ao ferroviário proporcionava pequena variação de custos em relação ao multimodal rodoviário e hidroviário e em alguns casos um custo maior. Essa variação foi devida ao percurso rodoviário necessário até os terminais de descarga. As distribuições dos terminais de transbordo estão correlacionadas ao resultado final de custo.

Assim, alguns municípios que no cenário simulado para 2025 continuam exportando para o porto de Santos, principalmente na região do estado de Mato Grosso, podem ser impactados caso haja essa redução no distanciamento e na oferta de terminais de transbordo. Contudo, a escolha do porto de destino é mais complexa e transcende o objeto deste estudo posto que considera também a ponderação de fatores externos, como a viabilidade do frete frente à carga de retorno. Neste sentido a indústria aduaneira que opera no Porto de Santos detém a hegemonia do mercado por ofertar um rol mais completo para alavancar o frete de retorno.

O resultado deste estudo também demonstra o potencial do uso da multimodalidade no escoamento das cargas de soja na comparação dos cenários de infraestrutura, realçando a importância do planejamento estratégico do sistema de transporte. Em publicação do Ministério da Agricultura, Pecuária e Abastecimento (MAPA) em 2020, a pasta indica a necessidade de inovação do Arco Norte de forma a reduzir as rotas de transporte entre os municípios produtores, com destaque para a região do Mato Grosso, e os portos exportadores. Neste contexto, a simulação desenvolvida no presente estudo permitiu verificar a melhoria quanto à redução do custo de frete acumulado, com destaque para a influência de portos da região Norte, quando se verifica a migração do porto de destino para Santarém-PA no cenário com a infraestrutura do PNL 2025, relacionando os municípios de Mato Grosso a essa migração de destino. Outro ponto mencionado pelo MAPA é a possibilidade de otimização logística através da intermodalidade no transporte (rodo-hidroviário e rodo-ferroviário), gerando o aumento da competitividade na exportação e a redução no custo da logística de transporte. Na inclusão de novas estruturas de ferrovias, rodovias e hidrovias, se obteve a redução no custo logístico e a proposta de novas rotas de atendimento para o escoamento da soja.

As análises de capacidade logística dos modos de transporte, restrições de armazenagem ou de transbordo, bem como a estrutura aduaneira dos portos não foram consideradas na pesquisa. Os gargalos na infraestrutura do transporte da soja podem representar uma criticidade com caráter elevado nos próximos anos. Este problema mostra que há a necessidade de um maior aprofundamento nas pesquisas e melhorias a serem implementadas no modelo simulado considerando outras variáveis para se identificar as possibilidades de alteração das cargas de soja para outras rotas ou modos de transporte diferentes aos apresentados.

5 CONCLUSÕES

A medida provisória 1.065/2021 publicada pelo governo federal em agosto do mesmo ano para regulamentar a exploração do serviço de transporte ferroviário e ao instituir o Programa de Autorizações Ferroviárias, indica que novos investimentos na infraestrutura estão sendo avaliados para os próximos anos e reforçam a necessidade de se mensurar os ganhos operacionais e a redução dos custos de transporte de forma a gerar melhor eficiência nas implantações dos futuros empreendimentos (BRASIL, 2021). Contudo, faz-se necessário promover informações e métodos capazes de permitir aos gestores de transportes e a sociedade analisar cenários, os prós e os contras das propostas de infraestrutura. Desta forma, a investigação proposta vai ao encontro da necessidade do planejamento de transportes quanto à promoção de transparência e modernização do processo.

O objetivo geral da pesquisa foi alcançado. Um modelo geográfico para predição de custo de transporte foi construído utilizando dados oficiais públicos em uma plataforma livre. O modelo, montado em uma arquitetura matricial, foi desenhado para conjugar simultaneamente análises multimodais, multiorigem e multidestino. O estudo considerou os 79 municípios responsáveis por 90% da produção nacional de soja registrados no Comex Stat, sendo estes distribuídos nos estados de MT, MA, MS, MG, PA, BA, PR, PI, GO, RO, SP, SC e RS, bem como os 10 principais portos exportadores (Santos/SP, Paranaguá/PR, Rio Grande/RS, Itaquí/MA, Barcarena/PA, São Francisco do Sul/SC, Vitória/ES, Santarém/PA, Salvador/BA e Manaus/AM). Foram considerados também dois diferentes cenários: o primeiro contemplando a infraestrutura rodoviária, ferroviária e hidroviária operante em 2020, e segundo contemplando as modificações planejadas para 2025.

A comparação das rotas de exportação da soja e a avaliação do custo total de escoamento da produção da soja foram realizadas, mostrando uma redução do custo entre os cenários de infraestrutura e os impactos nas regiões de influência de cada porto.

Os resultados encontrados com o modelo não apenas confirmam a hipótese de que a malha rodo-ferro-hidroviária nacional prevista para 2025 no Plano Nacional de Logística aumentará a oferta de rotas para o escoamento da soja entre os municípios com maior produção dessa commodity até os principais portos exportadores de destino, mas também quantificam o volume e preço por segmento. A média de redução no custo foi de 10% entre os 2 cenários simulados. Nos 79 municípios produtores analisados, houve uma alteração em 19% deles considerando os portos de destino para os cenários de 2020 e 2025. Dessa alteração total, 73%

são de municípios que passaram a ter como rota de destino o porto de Santarém-PA, indicando não somente a importância dos projetos como também as alterações das regiões de influência dos portos com a inclusão de novas rotas de transporte.

A pesquisa contribui para uma melhor visibilidade na alocação dos investimentos em infraestrutura no planejamento de longo prazo. O modelo desenvolvido pode ser replicado conforme se alterem as infraestruturas logísticas, reduzindo incertezas sobre os possíveis impactos de novos projetos. A utilização de softwares livres e gratuitos, como neste trabalho, permite a transmissão do conhecimento através da acessibilidade e utilização para outros estudos logísticos, promovendo assim uma boa prática científica junto à sociedade.

6 REFERÊNCIAS

- ARAÚJO, F.; ALMEIDA, J. W. L.; SENA, I.; NOBREGA, R. Modelagem de corredores ótimos para instalação de empreendimentos ferroviários com o software livre Dinâmica EGO a partir de produtos gratuitos de sensoriamento remoto. XVII Simpósio Brasileiro de Sensoriamento Remoto, p. 3549-3556, 2015.
- AYALA FILHO, G. G. M.; LOPES, S. B. Uso de plataformas livres de sistemas de informação geográfica na engenharia de transportes. 32º Congresso de Pesquisa e Ensino em Transporte da ANPET, 2018. Disponível em: <http://146.164.5.73:30080/tempsite/anais/documentos/2018/Modelos%20e%20Tecnicas%20de%20Planejamento%20de%20Transportes/Modelos%20de%20Otimizacao%20em%20Transportes/3_24_AC.pdf>. Acesso em 05 de outubro de 2021.
- BATISTA, E.; SOARES-FILHO, B.; BARBOSA, F.; MERRY, F.; DAVIS, J.; VAN DER HOFF, R.; RAJÃO, R. G. Large-scale pasture restoration may not be the best option to reduce greenhouse gas emissions in Brazil. *Environmental Research Letters*, v. 14, n. 12, p. 125009, 2019.
- BATISTA, E. D. S.; SOARES FILHO, B. S.; RAJÃO, R. G.; BARBOSA, F. A.; COSTA, M. A. Cenários para intensificação da bovinocultura de corte brasileira. IGC/UFMG, 2020. Disponível em: <https://csr.ufmg.br/brasilpec/wp-content/uploads/2020/01/cenarios_pecuaria_corte.pdf>. Acesso em 05 de outubro de 2021.
- BORBA, L.M.; SILVA, J.L.G. O Sistema de Informação Geográfica (GIS) como estratégia nas decisões do setor de Transportes no Brasil. *Latin American Journal of Business Management*. Taubaté, p. 84-111, 2010.
- BOSONA, T. G.; GEBRESENBET, G. Cluster building and logistics network integration of local food supply chain. *Biosystems engineering*, v. 108, n. 4, p. 293-302, 2011.
- BRANDO, P.M.; SOARES-FILHO, B.; RODRIGUES, L.; ASSUNÇÃO, A.; MORTON, D.; TUCHSCHNEIDER, D.; FERNANDES, E.C.M.; MACEDO, M.N.; OLIVEIRA, U.; COE, M.T. The gathering firestorm in southern Amazonia. *Science Advances*, DOI: 10.1126/sciadv.aay1632. 2020.

BRASIL, Governo Federal. Medida provisória nº 1.065, de 30 de agosto de 2021. Diário Oficial da União, Publicado em 30/08/2021, Edição 164-A, Seção 1 - Extra A. Disponível em: <<https://www.in.gov.br/en/web/dou/-/medida-provisoria-n-1.065-de-30-de-agosto-de-2021-341649416>>. Acesso em 30 de setembro de 2021.

BURROUGH, P. A. et al. Principles of geographical information systems. Oxford university press, 2015. Disponível em: <https://books.google.com.br/books?hl=pt-BR&lr=lang_es%7Clang_en%7Clang_pt&id=kvoJCAAAQBAJ&oi=fnd&pg=PP1&dq=Principles+of+Geographical+Information+Systems&ots=aLD34hw3GA&sig=MyPSoef8Tj113UzHYPicLNhzE54#v=onepage&q&f=false>. Acesso em 06 de outubro de 2021.

CÂMARA, G.; DAVIS, C. Introdução: por que geoprocessamento. Ministério da Ciência e Tecnologia. Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais, 2001. Disponível em: <<http://mtc-m12.sid.inpe.br/col/sid.inpe.br/sergio/2004/04.19.13.48/doc/cap1-introducao.pdf>>. Acesso em 02 de junho de 2021.

CÂMARA, G.; DAVIS, C.; MONTEIRO, A. M.V. Introdução à Ciência da Geoinformação. Ministério da Ciência e Tecnologia. Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais, 2001. Disponível em: <<http://mtc-m12.sid.inpe.br/col/sid.inpe.br/sergio/2004/04.22.07.43/doc/publicacao.pdf>>. Acesso em 06 de maio de 2021.

CASTRO, G. S. A.; DALTIO, J.; de CARVALHO, C. A.; GUIMARÃES, T. M.; de MIRANDA, E. E. Produção, armazenamento e logística de escoamento do milho safrinha. Embrapa Territorial-Capítulo em livro científico (ALICE). 2019.

CNT, Confederação Nacional Do Transporte. Transporte de Cargas no Brasil: Ameaças e Oportunidades para o Desenvolvimento do País. Biblioteca Digital, 2008. 200p.

CNT, Confederação Nacional Do Transporte. Anuário CNT do Transporte: Estatísticas consolidadas, 2017. Disponível em: <<http://anuariodotransporte.cnt.org.br/2017/>>. Acesso em 21 de maio de 2021.

CNT, Confederação Nacional Do Transporte. Plano CNT de Transporte e Logística 2018. Disponível em: <<http://cms.cnt.org.br/Imagens%20CNT/PDFs%20CNT/Plano%20CNT%20de%20TranspTran%20e%20Log%20C3%ADstica%202018/plano-cnt-transporte-logistica-2018.pdf>>. Acesso em 16 de abril de 2021.

COMEX STAT, Ministério da Indústria, Comércio Exterior e Serviços. Brasil: Informações Gerais. Disponível em: < <http://comexstat.mdic.gov.br/pt/comex-vis>>. Acesso em 07 de maio de 2021.

CONAB, Companhia Nacional de Abastecimento. Acompanhamento da Safra Brasileira de Grãos, Brasília, DF, v. 8, safra 2020/21, n. 7, sétimo levantamento, abr. 2021. Disponível em: <<https://www.conab.gov.br/info-agro/safras/graos/boletim-da-safra-de-graos>>. Acesso em 07 de maio de 2021.

CONAB, Companhia Nacional de Abastecimento. Acompanhamento da safra brasileira de grãos, V. 7 - SAFRA 2019/20 - N. 10 - Décimo levantamento julho 2020. Disponível em: <<https://www.conab.gov.br/info-agro/safras/graos/boletim-da-safra-de-graos>>. Acesso em 07 de abril de 2021.

COSTA, W. L. S. Modelagem e caracterização das rotas de exportação da Soja. Dissertação (Mestrado em Análise e Modelagem de Sistemas Ambientais). Instituto de Geociências, Universidade Federal de Minas Gerais, 2013.

CSR, Centro de Sensoriamento Remoto - UFMG. Dinamica EGO. Disponível em: <<https://csr.ufmg.br/dinamica/>>. Acesso em 05 de julho de 2021.

DAGDOUGUI, H.. Models, methods and approaches for the planning and design of the future hydrogen supply chain. *International Journal of Hydrogen Energy*, v. 37, n. 6, p. 5318-5327, 2012.

DANTAS, A.S.; TACO, P.W.G.; YAMASHITA, Y. Sistemas de informação geográfica em transportes: o estudo do estado da arte. Congresso da Associação Nacional de Pesquisa e Ensino em Transportes (ANPET). Brasília, 1996. pp. 211-222.

DASSAN, M.; CASTRO, G., de CARVALHO, C. A., MAGALHÃES, L. Análise territorial preliminar da macrologística agropecuária: da produção à exportação. Embrapa Territorial-Resumo em anais de congresso (ALICE). Congresso Interinstitucional de Iniciação Científica 2016, Campinas. Embrapa Monitoramento por Satélite, 2016.

DE LAPORTE, A. V.; WEERSINK, A. J.; MCKENNEY, D. W. Effects of supply chain structure and biomass prices on bioenergy feedstock supply. *Applied Energy*, v. 183, p. 1053-1064, 2016.

EMBRAPA, Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária. Caminhos da Safra, 2021. Disponível em: < <https://www.embrapa.br/macrologistica/caminhos-da-safra>>. Acesso em 05 de junho de 2021.

EMBRAPA, Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária. Caminhos da safra da produção e Exportação de grãos, 2018. Disponível em: <https://www.embrapa.br/documents/1355154/32186845/Estudo10-caminhos+da+safra-ppt_web.pdf/fcd34cc8-013b-bd2f-ec59-c8b06c51a88c>. Acesso em 16 de maio de 2021.

EMBRAPA, Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária. Demanda mundial por soja dobrará até 2050, 2018. Disponível em: <<https://www.embrapa.br/busca-de-noticias/-/noticia/39404817/demanda-mundial-por-soja-dobrar-ate-2050>>. Acesso em 05 de maio de 2021.

EMBRAPA, Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária. Matopiba, 2021. Disponível em: <<https://www.embrapa.br/tema-matopiba>>. Acesso em 02 de outubro de 2021.

EPL, Empresa de Planejamento e Logística S.A. Simulador de Custo de Transporte, 2021. Disponível em: < <https://www.epl.gov.br/>>. Acesso em 05 de maio de 2021.

EPL, Empresa de Planejamento e Logística S.A. Rede Georreferenciada – PNL 2025, 2021. Disponível em: <<https://www.epl.gov.br/rede-georeferenciada-pnl-2025>>. Acesso em 15 de maio de 2021.

EPL, Empresa de Planejamento e Logística S.A. Relatório Executivo do PNL 2025, junho de 2018. Disponível em: < <https://www.epl.gov.br/download-do-relatorio-executivo-do-pnl-ja-esta-disponivel>>. Acesso em 14 de maio de 2021.

ESALQ-LOG, Escola Superior de Agricultura Luiz de Queiroz. Análise dos impactos da medida provisória nº 832 de 2018 (política de preços mínimos do transporte rodoviário de cargas) na logística do agronegócio brasileiro. Série: Logística do Agronegócio - Oportunidades e Desafios Volume 3, Universidade de São Paulo, junho de 2018.

EWEDAIRO, K., CHHETRI, P, DODSON, J.. A GIS methodology for estimating the transport network impedance to last-mile delivery. In: 7th State of Australian Cities Conference. p. 9-11. 2015.

- FREITAS, R.E.; SANTOS, G.R. Exportações do Complexo Soja-Milho-Aves: concorrentes do Brasil e potenciais acordos bilaterais. Ipea – Instituto de Pesquisa Econômica Aplicada, 2017. Disponível em: <http://repositorio.ipea.gov.br/bitstream/11058/8110/1/Radar_n53_exporta%C3%A7%C3%B5es.pdf>. Acesso em 20 de junho de 2021.
- IBGE, Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística. Levantamento Sistemático da Produção Agrícola. Disponível em: <<https://sidra.ibge.gov.br/home/lspa/brasil>>. Acesso em 07 de maio de 2021.
- KAZEMI, Y.; SZMEREKOVSKY, J. Modeling downstream petroleum supply chain: The importance of multi-mode transportation to strategic planning. *Transportation Research Part E: Logistics and Transportation Review*, v. 83, p. 111-125, 2015.
- KUSSANO, M. R.; BATALHA, M. O. Custos logísticos agroindustriais: avaliação do escoamento da soja em grão do Mato Grosso para o mercado externo. *Gestão & Produção*, v. 19, n. 3, p. 619-632, 2012.
- LEITE-FILHO, A. T.; DAVIS, J. L.; SOARES-FILHO, B. S.; RODRIGUES, H. O. Modeling Environmental Dynamics with Dinamica EGO: Guide Book 2.0. Ed.: CSR/IGC, Belo Horizonte-MG, 2019. Disponível em: <https://www.csr.ufmg.br/dinamica/dokuwiki/doku.php?id=guidebook_start>. Acesso em 05 de outubro de 2021.
- LEMIRE, P. O. et al. GIS method to design and assess the transportation performance of a decentralized biorefinery supply system and comparison with a centralized system: case study in southern Quebec, Canada. *Biofuels, Bioproducts and Biorefining*, v. 13, n. 3, p. 552-567, 2019.
- LEMOES, M.L.F.; GUIMARAES, D.D.; MAIA, G.P.S.; AMARAL, G.F. Agregação de valor na cadeia da soja. *Agroindústria. BNDES*, 2017. Setorial 46, 167-217.
- LEON, M. B.; NÓBREGA, R. A. A.; COSTA, W. L. S. Uma perspectiva ambiental no planejamento da ferrovia bioceânica: modelagem quantitativa de cenários. *Revista Ibero-Americana de Ciências Ambientais*, v. 11, n. 3, p. 454-468, 2020.

- LOPES, H. S.; LIMA, R. A.; FERREIRA, R. C. A cost optimization model of transportation routes to export the Brazilian soybean. *Custos e Agronegócios*, v. 12, n. 4, pp. 90-109, 2016.
- MAPA, Ministério da Agricultura, Pecuária e Abastecimento. Infraestrutura e Logística, 2020. Disponível em: <<https://www.gov.br/agricultura/pt-br/assuntos/politica-agricola/infraestrutura-e-logistica/infraestrutura-e-logistica>>. Acesso em 20 de setembro de 2021.
- MCFALLAN, S. et al. A GIS model for simulating infrastructure investments in livestock logistics: Application to the northern beef industry. In: Submitted to International Congress on Modelling and Simulation, Adelaide, South Australia. 2013.
- MDIC, Ministério da Indústria, Comércio Exterior e Serviços. Base de dados do Comex Stat. Disponível em: <<http://www.mdic.gov.br/index.php/comercio-exterior/estatisticas-de-comercio-exterior/base-de-dados-do-comercio-exterior-brasileiro-arquivos-para-download>>. Acesso em 01 de maio de 2021.
- ME, Ministério da Economia. Ferrovia EF-151 – SP/MG/GO/TO (Ferrovia Norte-Sul). Programa de Parcerias de Investimentos (PPI), 2019. Disponível em: <<https://www.ppi.gov.br/ferrovia-ef-151-sp-mg-go-to-ferrovia-norte-sul>>. Acesso em 03 junho de 2021.
- MEYFROIDT, P.; BOERNER, J.; GARRET, R.; GARDNER, T.; GODAR, J.; KIS-KATOS, K.; SOARES-FILHO, B.; WUNDER, S. Focus on leakage and spillovers: informing land-use governance in a tele-coupled world. *Environmental Research Letters*. V1. N.1 p. 1-15, 2020.
- MINFRA, Ministério da Infraestrutura. Mapas Multimodais, 2021. Disponível em: <<http://www.infraestrutura.gov.br/component/content/article.html?id=5124>>. Acesso em 12 de maio de 2021.
- MINFRA, Ministério da Infraestrutura. Liberados 172 quilômetros da Ferrovia Norte-Sul entre Goiás e São Paulo, 2021. Disponível em: <<https://www.gov.br/pt-br/noticias/transito-e-transportes/2021/03/liberados-172-quilometros-da-ferrovia-norte-sul-entre-goias-e-sao-paulo>>. Acesso em 05 de outubro de 2021.

MTPA, Ministério dos Transportes, Portos e Aviação Civil. Corredores Logísticos Estratégicos. Volume I – Complexo de Soja e Milho, 2017. Disponível em: <http://transportes.gov.br/images/2017/05/Relatorio_Corredores_Logisticos_VolumeI_VerVers_Soja_Milho.pdf>. Acesso em 11 de maio de 2021.

MTPA, Ministério dos Transportes, Portos e Aviação Civil. Relatório de Fiscalização Ferrovia Norte-Sul - Palmas - Estrela D'Oeste – SP, Tribunal de Contas da União. Secretaria de Fiscalização de Infraestrutura Portuária e Ferroviária, 2018. Disponível em: <https://www.camara.leg.br/internet/comissao/index/mista/orca/orcamento/OR2019/FiscobraF2018/anexo/SINTETICOS/Sint%C3%A9tico_2018_137.pdf>. Acesso em 10 de junho de 2021.

NOBREGA, R.A.A.; VIEIRA, R.R.T.; BERBERIAN, C. F. Q.; DIAS FILHO, N.; MASUKAWA, N.; QUADROS, E. A. T. Inteligência geográfica para avaliação de propostas de projeto de concessão de corredores ferroviários. *Transportes* v. 24, n.4 (2016), p. 75-84.

RODRIGUES, H. O.; SOARES-FILHO, B. S.; COSTA, W. L. de S. Dinamica EGO, uma plataforma para modelagem de sistemas ambientais. *Simpósio Brasileiro de Sensoriamento Remoto*, v. 13, p. 3089-3096, 2007.

SAHOO, K.; MANI, S. GIS based discrete event modeling and simulation of biomass supply chain. In: *2015 Winter Simulation Conference (WSC)*. IEEE. p. 967-978. 2015.

SÁNCHEZ-GARCÍA, S. et al. A GIS methodology for optimal location of a wood-fired power plant: Quantification of available woodfuel, supply chain costs and GHG emissions. *Journal of Cleaner Production*, v. 157, p. 201-212, 2017.

SHEN, G. et al. A freight mode choice analysis using a binary logit model and GIS: the case of cereal grains transportation in the United States. *Journal of transportation technologies*, v. 2, n. 02, p. 175, 2012.

SILVA, M. P.; MARUJO, L.G. Análise de modelo intermodal para escoamento da produção da soja no centro oeste brasileiro. *Journal of Transport Literature*, v.6, n. 3, pp. 90-106, 2012.

SILVA, M.; D'AGOSTO, M.A. Model to estimate the origin-destination matrix for soybean exportation in Brazil. *Journal of Transport Geography*. Brasília, vol.26, p.97-107, 2013.

- SOARES-FILHO, B. S. Modelagem da dinâmica de paisagem de uma região de fronteira de colonização amazônica. 1998. 299f. Tese (Doutorado em Engenharia de Transportes) - Escola Politécnica da Universidade de São Paulo, São Paulo, 1998.
- SOUZA, I. N. P.; NÓBREGA, R. A. A.; RIBEIRO, S. M. C.. O Papel das Infraestruturas Ferroviárias nas Mudanças de Uso e Cobertura do Solo no MATOPIBA. *Revista Do Departamento De Geografia*, v. 38, p. 123-136, 2019.
- SOUZA, M. F. Otimização da localização de novas unidades armazenadoras de grãos em Minas Gerais. Dissertação de mestrado. Programa de Pós-Graduação em Análise e Modelagem de Sistemas Ambientais, Universidade Federal de Minas Gerais. Belo Horizonte, MG. 108p, 2019.
- SOUZA, M. F.; PINTO, P. H. G.; TEIXEIRA, R. B. A.; NASCIMENTO, C. O. L.; NOBREGA, R.A.A. Dry port location optimization to foster sustainable regional development. *Sustentabilidade em Debate*, v. 11, p. 208-222, 2020.
- TAHVANAINEN, T.; ANTTILA, P. Supply chain cost analysis of long-distance transportation of energy wood in Finland. *Biomass and Bioenergy*, v. 35, n. 8, p. 3360-3375, 2011.
- THILL, J.-C. Geographic information systems for transportation in perspective. *Transportation Research Part C: Emerging Technologies*, v. 8, n. 1-6, p. 3-12, 2000.
- TRENTIN, G.; FREITAS, M. I. C. DE. Modelagem da dinâmica espacial urbana: modelo de autômato celular na simulação de cenários para o município de Americana-SP. *Revista Brasileira de Cartografia*, v. 62, 11, 2010.
- USDA, Departamento de Agricultura dos Estados Unidos. Sementes Oleaginosas: Mercados e Comércio Mundiais. Disponível em: <<https://apps.fas.usda.gov/psdonline/circulars/oilseeds.pdf>>. Acesso em 14 de maio de 2021.
- WAYDZIK, F. A. et al. Análise de roteirização aplicada ao transporte multimodal para escoamento da produção agrícola do estado do mato grosso. *Brazilian Journal of Development*, v. 6, n. 9, p. 66120-66138, 2020.
- ZHANG, F. et al. Decision support system integrating GIS with simulation and optimisation for a biofuel supply chain. *Renewable Energy*, v. 85, p. 740-748, 2016.