



**UNIVERSIDADE FEDERAL DO PARÁ
INSTITUTO DE TECNOLOGIA
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA NAVAL**

VITOR HUGO PEREIRA DE OLIVEIRA

**ANÁLISE DE ALTERNATIVAS INTERMODAIS PARA ESCOAR A
PRODUÇÃO DE SOJA DOS ESTADOS DO PARÁ E TOCANTINS**

Belém – PA

2021

VITOR HUGO PEREIRA DE OLIVEIRA

**ANÁLISE DE ALTERNATIVAS INTERMODAIS PARA ESCOAR A
PRODUÇÃO DE SOJA DOS ESTADOS DO PARÁ E TOCANTINS**

Dissertação de Mestrado apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia Naval da Universidade Federal do Pará como requisito para obtenção do Título de Mestre em Engenharia Naval.

Área de Concentração: Transporte Aquaviário

Orientação: Prof^a. Dra. Maisa Sales Gama Tobias

Coorientação: Prof. Dr. Marcus Pinto da Costa da Rocha

Belém – PA

2021

VITOR HUGO PEREIRA DE OLIVEIRA

**ANÁLISE DE ALTERNATIVAS INTERMODAIS PARA ESCOAR A PRODUÇÃO DE
SOJA DOS ESTADOS DO PARÁ E TOCANTINS**

Dissertação de Mestrado apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia Naval da Universidade Federal do Pará como requisito para obtenção do Título de Mestre em Engenharia Naval.

APROVADO EM: 31/08/2021.

BANCA EXAMINADORA

Prof^a. Dra. Maisa Sales Gama Tobias
(Orientadora – PPGENAV/ITEC/UFPA)

Prof. Dr. Marcus Pinto da Costa da Rocha
(Coorientador – PPGENAV/ITEC/UFPA)

Prof. Dr. Valcir João da Cunha Farias
(Membro Interno – PPGME/ICEN/UFPA)

Prof. Dr. Paulo Sérgio Lima Pereira Afonso
(Membro Externo – DPS/EEUM/UMINHO)

Visto:

Prof. Dr. Nelio Moura de Figueiredo
(Coordenador do Programa de Pós-Graduação em Engenharia Naval – UFPA)

Belém – PA

2021

O48a Oliveira, Vitor Hugo Pereira de.
Análise de alternativas intermodais para escoar a
produção de soja dos Estados do Pará e Tocantins / Vitor
Hugo Pereira de Oliveira. — 2021.
103 f. : il. color.

Orientador(a): Prof^a. Dra. Maisa Sales Gama Tobias
Coorientador(a): Prof. Dr. Marcus Pinto da Costa da
Rocha

Dissertação (Mestrado) - Universidade Federal do Pará,
Instituto de Tecnologia, Programa de Pós-Graduação em
Engenharia Naval, Belém, 2021.

1. Intermodalidade. 2. Programação Linear. 3.
Produção de Soja. 4. Rotas de transporte. I. Título.

CDD 386

Dedico este trabalho aos que amo, a meus pais José Roberto e Jane Cristina, a minha avó Geny e minha avó Olinda (in memoriam). Com toda a minha gratidão por todas as orações e amor que proporcionaram em minha vida.

AGRADECIMENTOS

Agradeço ao glorioso Deus, Ele que é manso e humilde de coração, está junto comigo nos momentos mais difíceis, com seu amor, oferecendo sua graça para que eu possa perseverar nesta vida. Agradeço a tão boa Mãe do Filho, a Nossa Senhora da Imaculada Conceição que passa na frente de todas as minhas dificuldades. Gratidão aos meus pais, que eu tanto amo, José Roberto e Jane Cristina por estarem comigo com seu amor, me colocarem em suas orações, me ampararem com seus conselhos, apoio e incentivo em meus caminhos. Agradeço a minha querida avó Geny e as minhas queridas irmãs Joseane e Cristiane por me apoiarem em minha vida.

Grato a minha orientadora, a professora Maisa Sales Gama Tobias por toda atenção e disponibilidade, que foram essências para a conclusão deste trabalho. Gratidão ao meu coorientador, o professor Marcus Pinto da Costa da Rocha pelo auxílio e paciência, além de me ensinar com seu exemplo de humildade. Agradeço aos dois professores pela orientação, sanando as minhas questões e me colocando na direção correta.

Agradeço aos integrantes do Programa de Pós-graduação em Engenharia Naval por toda a colaboração, com a partilha de conhecimento, saber e experiência que me fizeram ter crescimento profissional e pessoal nesta trajetória. Grato ao professor Valcir Farias pelas recomendações e ao bom apreço por esta pesquisa.

Agradeço ao meu amigo Matheus Melo pela amizade e ajuda neste tempo. Por fim, agradeço a todos aqueles que me ajudaram de alguma forma, direta ou indiretamente, para que fosse possível a realização e conclusão deste trabalho.

“Como o Pai me ama, assim também eu vos amo. Perseverai no meu amor.”

Evangelho segundo João 15, 9.

RESUMO

As projeções mundiais indicam o aumento da demanda por soja e, nesta conjuntura, países de dimensões continentais e solos favoráveis como o Brasil se destacam. Particularmente, os Estados da Região Norte do Brasil se mostram como possíveis novas fronteiras agrícolas dessa cultura. Entretanto, é preciso que sejam competitivos, para escoar sua produção; o que indica a necessidade de estudos das alternativas modais disponíveis para determinar aquelas de melhores resultados econômicos. Neste contexto, o presente trabalho realizou a análise de alternativas de rotas intermodais com o uso da programação linear, para a identificação de rota de solução ótima, em apoio à tomada de decisão no transporte de soja para exportação, tendo como caso a região situada nos Estados do Pará e Tocantins, próxima à hidrovía Araguaia-Tocantins. Dentro das categorias de modelos de programação linear, foi empregado o caso particular denominado de problema de transporte e transbordo. O modelo teve como objetivo minimizar os custos de transporte dos centros de produção ao porto exportador, através da infraestrutura atual e, sob diferentes cenários de alternativas intermodais formadas pelo projeto da Ferrovia Paraense S.A. e pela Hidrovía Araguaia-Tocantins, se considera o ano de 2019 e as projeções de produção para o ano de 2029. Os resultados mostraram que os cenários com transporte hidroviário trazem maior benefício para a região, atingindo uma economia de até 23%, além do mais, o complexo portuário de Vila do Conde expande sua zona de influência, assim, obtém aumento da quantidade exportada em até 1059,7%. Também, constata-se que o Estado do Pará é o que mais necessita de uma alternativa intermodal. Ademais, as rotas se configuraram em novas redes de transporte, diminuindo as distâncias percorridas no modal rodoviário para escoar a produção dos municípios, reduzindo o fluxo nas principais rodovias. Com isso, conclui-se que o transporte intermodal melhora a competitividade regional e favorece o desenvolvimento dos Estados.

Palavras-chave: Intermodalidade; Programação Linear; Produção de soja; Rotas de transporte.

ABSTRACT

World projections indicate an increase in demand for soy and, in this context, countries with continental dimensions and favorable soils such as Brazil stand out. Particularly, the states of the northern region of Brazil show themselves as possible new agricultural frontiers for this crop. However, they need to be competitive in order to sell their production, which indicates the need for studies of available modal alternatives to determine those with better economic results. With this in mind, the present work executed the analysis of alternative intermodal routes using linear programming, to identify the optimal solution route, in support to decision-making in the transport of soybeans for export, taking as a case a region located between States of Pará and Tocantins, close to the Araguaia-Tocantins waterway. Within the categories of linear programming models, the particular case called transport and transshipment problem was used. The model aimed to minimize transport costs from the production centers to the exporting port, through the current infrastructure and, under different scenarios of intermodal alternatives formed by the project of Ferrovia Paraense S.A. and by Araguaia-Tocantins waterway, the year 2019 and production projections are considered for the year 2029. The results showed that the scenarios with waterway transport bring greater benefit to the region, achieving savings of up to 23%. Furthermore, the Vila do Conde port complex expands its zone of influence, thus obtaining increase in the quantity exported in up to 1059.7%. As well, it confirms that the State of Pará is the one that most needs an intermodal alternative. Furthermore, the routes were configured in new transport networks, reducing the distances traveled in the road modal to transport production from the municipalities, reducing the flow on the main highways. Thus, it is concluded that intermodal transport improves regional competitiveness and favors the development of States.

Keywords: Intermodality; Linear Programming; Soybean production; Transport routes.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1: Avanço da área de soja plantada no Brasil.....	13
Figura 2: Corredores logísticos estratégicos: exportação	22
Figura 3: Rede de transporte.....	33
Figura 4: Rede do problema de transbordo.....	35
Figura 5: Etapas metodológicas	39
Figura 6: Localização geográfica dos municípios produtores no Estado do Pará	40
Figura 7: Regiões geográficas dos municípios produtores no Estado do Tocantins	41
Figura 8: Malha rodoviária dos municípios do Estado do Pará	43
Figura 9: Malha rodoviária dos municípios do Estado do Tocantins	44
Figura 10: Localização geográfica das estações de transbordo rodo-ferro – FNS...	45
Figura 11: Localização geográfica das estações de transbordo rodo-ferro – FPA ..	47
Figura 12: Principais rios que compõem a Hidrovia	50
Figura 13: Municípios produtores de soja	53
Figura 14: Pontos propostos para terminais hidroviários de transbordo.	59
Figura 15: Principais vias para escoar a produção pela Rodovia, FNS e Hidrovia...	60
Figura 16: Custo por tonelada transportada dos municípios em cada cenário.....	68
Figura 17: Resultado monetário em cada cenário.....	72
Figura 18: Exportação de soja por complexo portuário – 2019.1	73
Figura 19: Custo por tonelada transportada na FNS, na FPA e na Hidrovia.	74
Figura 20: Parcela da soja escoada por cada opção intermodal.....	75
Figura 21: Resultado monetário em cada cenário.....	76

LISTA DE TABELAS

Tabela 1: Produção de soja em grão (mil toneladas)	19
Tabela 2: Principais rodovias do corredor logístico no Estado do Pará	42
Tabela 3: Principais rodovias do corredor logístico no Estado do Tocantins	43
Tabela 4: Investimentos para melhorar a navegabilidade	52
Tabela 5: Produção Agrícola Anual por Município – 2019	54
Tabela 6: Critérios para custo médio hidroviário.....	56
Tabela 7: Análise de cenários proposta.....	59
Tabela 8: Envio de carga para estações de transbordo – Pará – 2019.1	65
Tabela 9: Envio de carga para estações de transbordo – Pará - 2019.2.....	65
Tabela 10: Envio de carga para estações de transbordo – Pará - 2019.3.....	66
Tabela 11: Frete Hidroviário – Pará - 2019.4.....	66
Tabela 12: Movimentação nos terminais de transbordo – Pará – 2019.4.....	67
Tabela 13: Movimentação nos terminais de transbordo no Pará – 2019.5.....	67
Tabela 14: Reduções no frete para escoar a produção no Pará, %	69
Tabela 15: Envio de carga para terminais de transbordo no Tocantins – 2019.2.....	70
Tabela 16: Envio de carga para estações de transbordo – Tocantins – 2019.3.....	70
Tabela 17: Envio de carga para estações de transbordo – Tocantins - 2019.4.....	71
Tabela 18: Envio de carga para estações de transbordo – Tocantins - 2019.5.....	71
Tabela 19: Exportação de soja por complexo portuário.....	73
Tabela 20: Terminais hidroviário determinados: 2029 – 2029s	77
Tabela 21: Exportação de soja por complexo portuário: 2029 – 2029s	77
Tabela 22: Economia por cenário - 2019.....	78
Tabela 23: Movimentação por opção modal (em toneladas) - 2019	78

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO	12
1.1	Justificativa	15
1.2	Objetivos	17
1.2.1	Objetivo geral	17
1.2.2	Objetivos específicos.....	17
2	REFERÊNCIAL TEÓRICO	18
2.1	Produção, infraestrutura e transporte de soja	18
2.1.1	Escoamento da produção.....	20
2.1.2	Arco Norte	22
2.2	Intermodalidade e custos de transportes.....	23
2.2.1	Modos de transporte e intermodalidade	23
2.2.2	Custos de transporte	26
2.3	Descrição do modelo.....	27
2.3.1	Modelo de programação linear	28
2.3.2	Problema de transporte	31
2.3.3	Problema de transbordo	34
2.4	Transporte do agronegócio com abordagem de programação linear.....	36
3	ESTUDO DE CASO	38
3.1	Caracterização do estudo.....	39
3.1.1	Rotas intermodais	45
3.1.2	Centros de produção.....	53
3.1.3	Valores econômicos	55
3.2	Cenários.....	57
3.3	Modelagem.....	60
3.3.1	Restrições	62
3.3.2	Parâmetros.....	62
4	RESULTADOS E DISCUSSÃO	64
4.1	Resultados no Estado do Pará.....	64
4.2	Resultados no Estado do Tocantins.....	69
4.3	Resultados gerais.....	72
4.4	Resultados para a projeção em 2029.....	76
4.5	Síntese	78
5	CONCLUSÕES	79
	REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	83

1 INTRODUÇÃO

De acordo com a Confederação da Agricultura e Pecuária do Brasil (CNA, 2020), o agronegócio movimenta grande parte da economia brasileira, quando retrata os dados da Pesquisa Nacional por Amostra de Domicílios - PNAD de 2015, realizada pelo IBGE, 32,3% dos trabalhadores brasileiros pertencem ao agronegócio, o que comprova o elevado grau de participação do agronegócio na economia nacional.

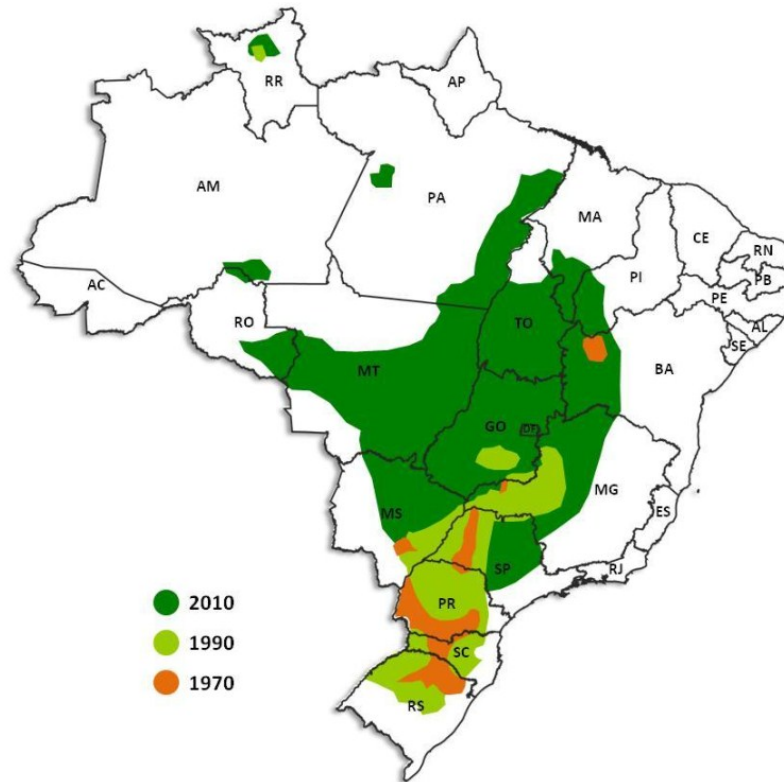
Segundo a Companhia Nacional de Abastecimento (CONAB, 2020), a produção total da safra referente ao período 2019/2020 atingiu o recorde de 257,8 milhões de toneladas de grãos, sendo que 124,8 milhões de toneladas desse total refere-se à soja, representando um recorde histórico desse tipo de produto. Com isso, o país superou a produção de soja dos EUA na safra 2019/2020, que foi de 96,68 milhões de toneladas de acordo com o Departamento de Agricultura dos Estados Unidos (USDA, 2020), o que situou o Brasil como o maior produtor e exportador de soja do mundo.

O estado do Pará é um dos estados brasileiros produtores de soja, cuja produção atualmente está em ritmo acelerado de crescimento. No período de 2010 a 2017, a área plantada aumentou de 85,4 mil para 500,4 mil hectares, o que é equivalente a 30% do total da área de lavouras no estado, com isso, é a mais ampla cultura cultivada (FAEPA, 2020). Tal como, o aumento da produção subiu de 243.616,00 toneladas em 2010 para 1.781.672,00 em 2019 (IBGE, 2021).

Outro estado da região norte que está no caminho da expansão da produção de soja é o Estado do Tocantins. Segundo dados do IBGE, a região aumentou sua área colhida de 352,9 mil hectares para 905,4 mil hectares; além disso, houve aumento da produção, saindo de 875.428,00 toneladas em 2009 para 2.615.178,00 toneladas em 2019. A Figura 1, elaborada pela CONAB (2016 *apud* MTPA, 2017), ilustra a expansão da área de soja plantada no país.

No Brasil, entretanto, o setor ainda sofre com a falta de infraestrutura logística para o escoamento da produção, o que aumenta seus custos de transporte atingindo, então, sua competitividade no cenário internacional. Do mesmo modo, a falta de boas condições estruturais do transporte e armazenamento representam os principais problemas do agronegócio (KUSSANO; BATALHA, 2012). Ainda, conforme Fioroni *et al.* (2015), as plantações de soja estão localizadas em regiões no interior brasileiro, distantes do litoral, o que resulta em grandes dificuldades para escoar a produção.

Figura 1: Avanço da área de soja plantada no Brasil.



Fonte: CONAB, 2016 *apud* MTPA, 2017.

Ademais, os custos de transporte no interior do continente, em média, constituem 80% do custo total de transporte de remessas internacionais, enquanto o transporte no interior dos países cobre apenas 10% da distância total (RODRIGUE; NOTTEBOOM, 2012). A Fundação Dom Cabral (2017), realizou um estudo sobre os custos logísticos no Brasil e constatou que estas despesas equivalem a 12,37% da receita das empresas, sendo o maior número entre as principais economias do mundo.

Modais inapropriados para o transporte geram alto custo operacional, limitando o desenvolvimento regional (SOLIANI, 2015). Além disso, Halim, Kwakkel e Tavassy (2016) indicam que as melhorias nos sistemas de distribuição porto-interior podem afetar positivamente a competitividade, além de desempenharem um papel importante na escolha do porto dos remetentes e, portanto, no roteamento e volumes de mercadorias transportadas.

Ainda, como mostrou a Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária (EMBRAPA, 2016), 42% dos grãos são transportados até os portos por rodovias, 47% por ferrovias e 11% por hidrovias. Entretanto, o Modal hidroviário é o preferido para

escoar as mercadorias até os portos do Arco Norte, que, devido ao seu baixo custo, vem aumentando anualmente a sua participação nas rotas para escoar a produção.

É importante destacar que no Estado do Pará, a produção de soja envolve três grandes polos, o sul do Pará que têm Santana do Araguaia como principal município produtor, o nordeste paraense que é encabeçado por Paragominas e o polo oeste liderado por Santarém. Especificamente a produção do Polo Sul é escoada pelo corredor rodoviário composto pelas rodovias BR-158/BR-155/PA-150. Com esta predominância do transporte rodoviário, é comum haver conflitos que aumentam o tempo das viagens, em áreas como nas passagens por trechos urbanos, além do alto custo do modal (CRUZ, 2019).

O transporte, da região mais ao Sul do Estado, é feito por caminhões graneleiros com capacidade de carga líquida de 50 toneladas, por uma extensão de até mais de 1000 km, até chegar à zona portuária em Vila do Conde, no Município de Barcarena do Estado do Pará.

No Estado do Tocantins a produção de soja está distribuída por todas as suas regiões, com os principais corredores para escoar a produção formados pelas rodovias Belém-Brasília e BR-226, bem como com a opção intermodal pela Ferrovia Norte-Sul, utilizando os pontos de transbordo em locais nos municípios de Porto Nacional -TO, Palmeirante - TO e Porto Franco - MA.

No entanto, como alternativa modal para o Estado do Pará e para o Estado do Tocantins, apresentam-se duas novas possibilidades de transporte intermodal: modal ferroviário e modal hidroviário. Com isso, se tem a hidrovía do Araguaia-Tocantins que é apontada pelo Departamento Nacional de Infraestrutura de Transportes – DNIT, como tendo capacidade para ser umas das principais vias de transporte do corredor Centro-Norte brasileiro, com potencial para se transformar numa das principais vias de águas navegáveis do País (DNIT, 2021).

Outra alternativa é o projeto da Ferrovia Paraense S.A., que, segundo a Secretaria de Estado de Desenvolvimento Econômico, Mineração e Energia – SEDEME (2017), poderá ter uma extensão de até 1319 km, ligando o sul do Pará ao complexo portuário de Vila do Conde.

1.1 Justificativa

A relevância do desenvolvimento da presente pesquisa justifica-se pelo fato da região centro-norte brasileiro ser beneficiada pelo curso do rio Araguaia, em conjunto com o Rio Tocantins, e, com isso, potencializar a utilização de um transporte com maior capacidade de carga e, por outro lado, reduzir o número de conflitos na movimentação/circulação do produto, tais como os enfrentados pelo modal rodoviário nos trechos urbanos. Além disso, outro ponto favorável envolvendo a hidrovia Araguaia-Tocantins é que há vários planos governamentais que visam sua utilização para navegação comercial em toda sua extensão, a exemplo do Plano Nacional de Integração Hidroviária - PNIH, que descreve as características físico-geográficas, obras a serem realizadas, as demandas e ofertas de cada segmento representativo de produção de cargas na zona de influência da hidrovia.

Por outro lado, espera-se que seja intensificado o uso de hidrovias na bacia amazônica de forma a potencializar novos corredores intermodais, os quais contribuirão para a redução dos custos de transporte das regiões produtoras até os portos de exportação. Dessa forma, há planejamento e projetos governamentais para hidrovia Tocantins-Araguaia que visam definir as obras e serviços a serem realizados na hidrovia com a finalidade de garantir a navegação de caráter comercial, segura e contínua.

Dentre eles, está o Plano Nacional de Integração Hidroviária elaborado pela ANTAQ (2013), que prevê o melhoramento das condições de navegação da hidrovia; o referido relatório apontou que seriam viáveis obras de infraestrutura para situar a hidrovia como uma excelente opção modal; e a existência de um significativo fluxo potencial de carga geral, granel sólido e granel sólido agrícola a ser transportado pela hidrovia.

Adicionalmente, existe o projeto de derrocamento do Pedral do Lourenço, que visa viabilizar a navegação durante o ano todo no trecho, e de acordo com o Programa de Parcerias de Investimento (BRASIL, 2020) o empreendimento está na etapa de licenciamento ambiental e a conclusão da obra está prevista para 2022. Diante da possibilidade de se viabilizar a Hidrovia Araguaia-Tocantins, vislumbra-se o surgimento de uma alternativa modal que possa se apresentar como a melhor alternativa para o escoamento da produção de soja do Estado do Pará.

Também existe o projeto para a implantação da Ferrovia Paraense S.A., que poderá beneficiar regiões próximas a zona de influência da hidrovia, como descreve a SEDEME (2017), com a ferrovia se estendendo até o município de Santana do Araguaia. Portanto, os modais ferroviário e aquaviário se apresentam como uma alternativa de transporte, para o escoamento da produção de soja do Estado do Pará e do Estado do Tocantins.

Diante do exposto, faz-se necessário uma análise comparativa entre as rotas formadas pelos modais rodoviário, ferroviário e hidroviário. A viabilidade técnico-econômica deve ser considerada de forma a avaliar a melhor infraestrutura para escoar a produção, bem como os custos envolvidos no transporte. O que irá proporcionar a informação para o planejamento de políticas públicas para investimentos e tomadas de decisão, relacionadas ao escoamento de grãos até os portos de exportação que, por sua vez, resultaria no aumento de competitividade do setor de agronegócio na região.

Com todas as opções de transporte para a rede logística das regiões produtoras, como indica López (2017), nota-se necessário o conhecimento e compreensão dos custos que envolvam a cadeia logística para o escoamento de grão de soja para exportação e, através do uso da programação matemática, possa se obter a melhor configuração de cadeias de suprimentos.

A navegação interior e a ferrovia apresentam-se como uma alternativa de transporte para o escoamento da produção de soja dos Estados do Pará e do Tocantins, conseqüentemente, faz-se necessário uma análise comparativa entre as rotas formadas pela modificação da infraestrutura.

Assim sendo, a hipótese deste trabalho é de que os projetos de transporte hidroviário e ferroviário passam a ser alternativas viáveis ao escoamento da produção de soja da região. Como teste desta hipótese, será realizada a análise de rede de transporte, na qual estão inseridas as novas rotas para o escoamento de soja.

Portanto, este trabalho busca analisar o escoamento da produção de soja em determinada região dos Estados do Pará e Tocantins, com o uso da programação linear, considerando as condições de infraestrutura logística. O modelo de programação linear será empregado para a otimização das rotas, inserindo as alternativas ferroviária e hidroviária, pela Ferrovia Paraense e pelos rios Tocantins e Araguaia, no trecho que atende a região de produção.

Nos procedimentos metodológicos, pretende-se estabelecer arranjos de rotas intermodais para o escoamento de grãos de soja dos municípios. Por fim, o estudo poderá servir de auxílio para tomadas de decisão tanto do setor privado quanto público, para o planejamento do transporte de soja nos Estados do Pará e Tocantins.

1.2 Objetivos

1.2.1 Objetivo geral

Analisar e identificar alternativa intermodal para o transporte de grãos de soja, de municípios dos Estados do Pará e Tocantins, a partir da minimização dos custos operacionais, para apoio à tomada de decisão em investimentos de transportes.

1.2.2 Objetivos específicos

- a. Caracterizar o problema e identificar a região de estudo e os respectivos municípios produtores de soja.
- b. Levantar as possíveis rotas, para o escoamento dos grãos de soja dos municípios produtores até o porto de exportação, bem como todos os custos operacionais envolvidos no transporte.
- c. Desenvolver um modelo de programação linear para avaliar o desempenho da rede de transporte formada em diferentes cenários.
- d. Comparar os resultados obtidos nos diferentes cenários e identificar a melhor alternativa.

2 REFERÊNCIAL TEÓRICO

Neste capítulo são abordados os referenciais teóricos que subsidiaram o entendimento sobre aspectos da logística de distribuição da soja, os atores envolvidos, seus custos, as vias, as alternativas de modais utilizados para o seu transporte e a fundamentação para modelagem aplicada a transporte, como ferramenta de auxílio para a análise proposta na dissertação.

2.1 Produção, infraestrutura e transporte de soja

Este tópico retrata as características e particularidades de produção, infraestrutura e transporte de soja para exportação no Brasil. Desta maneira, demonstra as bases para entender as individualidades e deficiências para escoar este tipo de produto. Além disso, expõe o caminho de soluções para o transporte de soja, sobretudo para as regiões mais ao norte do país.

De acordo com os dados do Centro de Estudos Avançados em Economia Aplicada e da Confederação da Agricultura e Pecuária do Brasil (CEPEA; CNA, 2021), a produção de soja mais uma vez cresceu em dezembro de 2020 (2,06%). Com isso, o PIB do agronegócio progrediu 24,31% em 2020, frente a 2019, atingindo, então, a parcela de 26,6% do PIB brasileiro. Em valores monetários, o PIB do agronegócio chegou a aproximadamente dois trilhões de reais, divididos nas seguintes atividades: insumos, que estão relacionadas a cadeia de suprimentos para iniciar a produção agrícola (sementes, fertilizantes, máquina, implementos etc.); agropecuária, com o PIB relacionado às atividades efetivadas na propriedade rural; agroindústria, a fase em que os produtos da agropecuária são transformados em subprodutos divididos em categoria alimentar e não-alimentar; e agrosserviços, este último, serviços prestados por profissionais que atuam nos diversos setores do agronegócio.

A tendência é que continue um expressivo aumento da produção de grãos de soja no Brasil, conforme indica as projeções do agronegócio até a safra 2029/2030, obtidas pelos estudos realizados pela Secretaria de Política Agrícola - SPA, do Ministério da Agricultura, Pecuária e Abastecimento – MAPA (MAPA, 2020). Assim, a soja é o produto agrícola mais importante para a maior parte dos estados brasileiros, de acordo com estudos que analisaram vários indicadores, como a expansão da produção, rebanho bovino, abates de animais e preços de terras, e que mostraram

claramente a tendência que vem ocorrendo de crescimento da agricultura, incluindo a cultura da soja, para o norte, principalmente, em direção aos estados de Rondônia, Pará e Tocantins.

Conforme se apresenta na Tabela 1, a produção de soja na safra 2029/30 está projetada em 156,5 milhões de toneladas, mas poderá chegar a 185,9 milhões de toneladas. Esses números representam acréscimos que variam de 30,1% a 54,5%. Caso atinja a maior produção projetada, o crescimento pode ser próximo ao ocorrido nos últimos 10 anos no Brasil, que foi de 60%.

Tabela 1: Produção de soja em grão (mil toneladas)

	Produção	
	Projeção	Lsup.
2019/20	120.330	-
2020/21	123.367	134.382
2021/22	127.259	140.788
2022/23	130.835	147.307
2023/24	134.531	153.320
2024/25	138.183	159.131
2025/26	141.851	164.739
2026/27	145.514	170.201
2027/28	149.179	175.541
2028/29	152.843	180.782
2029/30	156.507	185.939

Fonte: Ministério da Agricultura, Pecuária e Abastecimento, 2020.

Como indica o estudo do MAPA (2020), entre outros casos, o Biodiesel como fonte de energia alternativa abriu mais um espaço para a soja no Brasil. Desse modo, a produção de soja deverá aumentar em 9,7 milhões de hectares a área cultivada com a cultura da soja nos próximos 10 anos, dessa forma, pode ser a lavoura que mais deve se expandir até a safra 2029/30, seguida pelo milho segunda safra. Bem como, haverá aumento nas exportações de soja, para 103,4 milhões de toneladas, podendo chegar a 134,3 milhões de toneladas na próxima década.

Os seguintes fatores podem ser responsáveis pelas projeções positivas de crescimento da produção de soja no Brasil e aumento da demanda mundial (EMBRAPA, 2021):

- Aumento da população humana, que consumirá soja por meio do consumo de carnes, produzidas de rações compostas pelos farelos de soja e milho;

- Aumento do poder de compra da população humana, com destaque aos países asiáticos;
- Substituição do farelo de carne por farelo de milho;
- Utilização de soja e seus subprodutos para a indústria de biodiesel, tinta, lubrificantes, plásticos entre outros;
- Sendo o Brasil, o maior exportador mundial de carnes é crescente a demanda por farelo de soja no país;
- Redução do protecionismo e dos subsídios à soja por parte dos países ricos;
- Desoneração de parte dos pesados tributos incidentes na cadeia produtiva do Brasil, aumentando a competitividade no mercado externo.

2.1.1 escoamento da produção

Este item explicita as características do transporte de soja para exportação no Brasil. Desta maneira, descreve a infraestrutura para o escoar a soja, assim como, suas principais deficiências. Ademais, aponta a direção que se deve seguir para atender as condições necessárias para melhorias no transporte de soja.

A infraestrutura para o escoamento de soja é composta por portos, armazéns e terminais especializados, ademais, a reduzida infraestrutura de apoio ao transporte de soja é considerado um gargalo do setor (DUBKE e PIZZOLATO, 2011). Conforme descreve a Confederação Nacional do Transporte (CNT, 2021) uma parte da produção é destinada ao mercado interno, sendo enviada por transporte rodoviário primeiro para armazéns ou indústrias de processamento e posteriormente para o consumidor final, outra parte é direcionado aos portos de exportação via rodovias, ferrovias e hidrovias.

Para exportar a produção de soja dos estados brasileiros, são utilizados diferentes portos. Assim, para o escoamento das exportações de grãos pelo Norte do Brasil usa-se o porto de Itacoatiara, em Manaus, no Estado do Amazonas, alcançado exclusivamente por rios; além do porto de Santana em Macapá, da zona portuária de Santarém e da zona portuária do Porto de Vila do Conde em Barcarena, no Estado do Pará, alcançados, respectivamente, tanto por rodovias quanto por rios; e a região nordeste do Brasil, com o porto de Itaqui em São Luís, no Estado do Maranhão, alcançado tanto por ferrovia quanto por rodovias. Estas rotas para escoar a produção de soja, são demonstradas no mapa de corredores para exportação de soja (Figura 2), elaborado pelo Ministério dos Transportes, Portos e Aviação Civil - MTPA (2017).

O fluxo de caminhões acentuado, junto ao baixo estado de conservação das rodovias, faz com que a cada safra nas estradas brasileiras se tenha altos índices de perda de grãos durante a viagem até o destino final. Além dos problemas rodoviários, as malhas de transportes ferroviários e hidroviários, também, apresentam sérias deficiências (KUSSANO, 2010).

É importante destacar que os custos de escoamento da produção agrícola, como exemplificam Kussano e Batalha (2012), estão diretamente ligados aos problemas de infraestrutura de transporte, incorrendo no aumento nos custos dos produtos brasileiros, e prejudicando a competitividade no mercado interno e externo. Além do mais, como esclarece Hijjar (2004), a expansão da produção de grãos tem maior crescimento no interior do país, em locais remotos mais distantes dos portos de exportação, enfatizando ainda mais a necessidade de melhorar a infraestrutura logística brasileira.

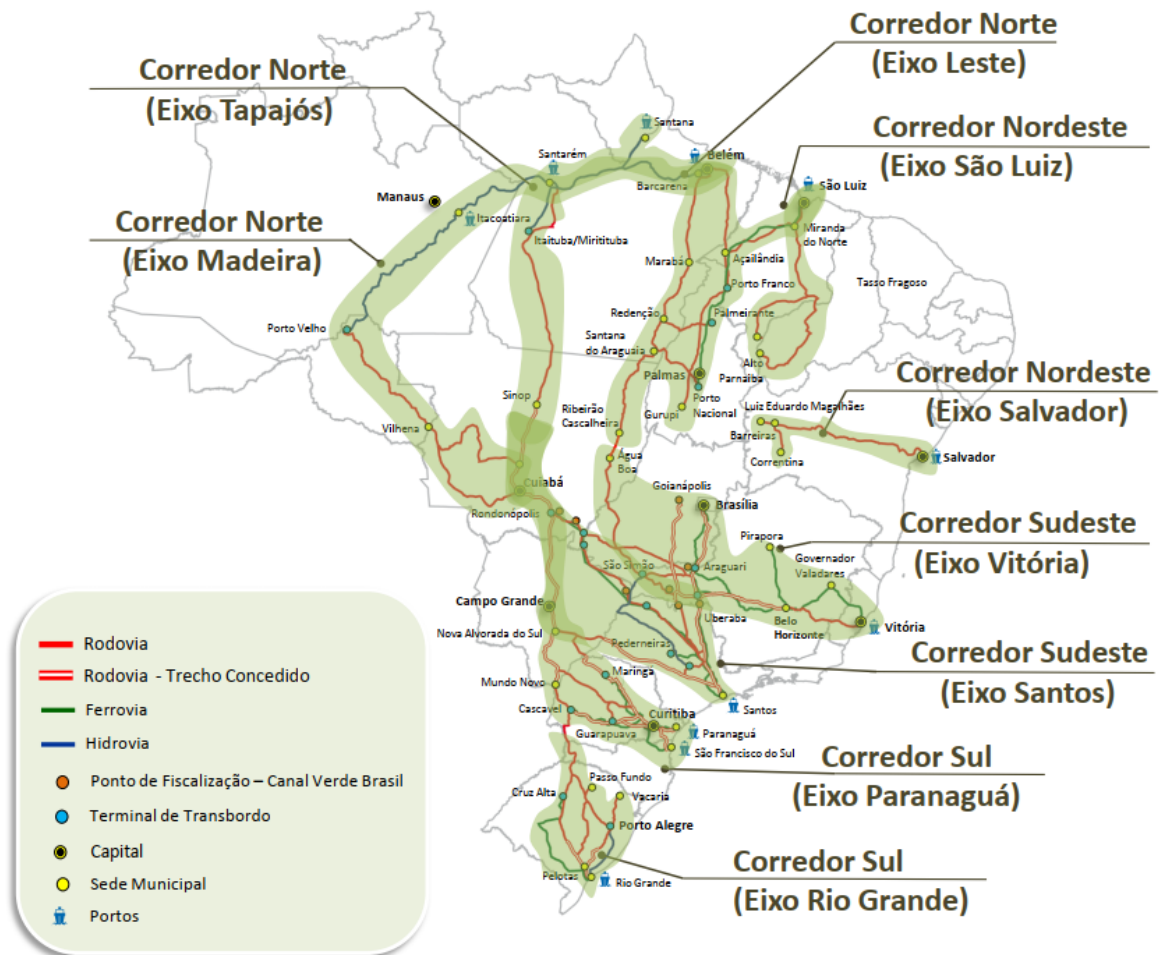
Como explicita a CONAB (2017), os custos logísticos das empresas brasileiras do agronegócio podem chegar a 15% de sua receita líquida em transporte, armazenagem e estoque. Desta forma, a competitividade das *commodities* agrícolas de exportação estaria bastante atrelada aos custos de transporte nos corredores multimodais. Portanto, para a tomada de decisão da melhor rota, o agente logístico deve avaliar o custo de deslocamento e o nível de serviço oferecido pelo transporte, sendo que o valor de transporte é relevante para competitividade do produto por conta do baixo valor agregado dos grãos.

Ademais, o modal rodoviário, ainda, é fortemente utilizado para escoamento logístico no transporte de grãos, contribuindo para elevação dos custos de transporte. Conforme adverte a CONAB, a alternativa do sistema norte requer investimentos urgentes em infraestrutura, dado que a maior atratividade pelas *commodities* agrícolas nacionais vai depender de novos e eficazes corredores de transporte, que promovam agilidade para os produtores e fornecedores, bons níveis de serviço, satisfaça os critérios de seus clientes internacionais, bem como proporcione a otimização dos custos.

De acordo com Melo, Vieira e Cordeiro (2017), há uma deficiência de investimentos em rodovias de acesso aos portos do Pará. Entretanto, apesar da urgente necessidade por melhoramentos, a rota da soja em direção ao norte ainda é mais vantajosa, considerando três condições estratégicas: a proximidade dos produtores aos portos no Pará; a proximidade destes portos aos mercados Americano,

Europeu e Asiático e; a multimodalidade permitida pela região, sendo parte da rota da soja para os portos por hidrovias, possibilitando os deslocamentos de cargas maiores.

Figura 2: Corredores logísticos estratégicos: exportação



Fonte: Ministério dos Transportes, Portos e Aviação Civil - MTPA, 2017.

2.1.2 Arco Norte

Com o Leste do Pará sendo uma das novas fronteiras agrícolas, espera-se que nos próximos anos deva haver um grande incremento da produção de *commodities* nessa área. Desta forma, com a expansão geográfica do agronegócio e o aumento da produção agrícola nas regiões mais ao norte do país, iniciou-se uma busca por alternativas de corredores logísticos para o escoamento da soja e do milho (CONAB, 2017). Com isso, entre essas novas possibilidades, destaca-se as apresentadas via Arco Norte, como descreve o Departamento de Infraestrutura e Logística para o Setor Agropecuário – DILOG (2020), a denominação Arco Norte é caracterizada por um

conjunto de portos localizados acima do paralelo 16° Sul, onde estão os portos de principal interesse do agronegócio que compõem esse segmento logístico: Itacoatiara (AM), Santarém e Barcarena (PA), Santana (AP), São Luís (MA), Salvador e Ilhéus (BA), conforme indicados na Figura 2.

No primeiro semestre de 2020, as instalações Portuárias do Arco Norte escoaram 31,4% das exportações de soja e milho do Brasil, retratado no Segundo Anuário Estatístico Aquaviário, produzido pela Gerência de Estatística e Avaliação de Desempenho, da Superintendência de Desempenho, Desenvolvimento e Sustentabilidade da Agência Nacional de Transportes Aquaviários - GEA-SDS/ANTAQ, com crescimento de 10% da movimentação em relação ao ano de 2019 e, o aumento de 482% em relação a 2010 (ANTAQ, 2020).

Conforme a CNA (2020), entre 2009 e 2020 as regiões Norte, Nordeste e parte do Centro-Oeste, acima do Paralelo 16, tiveram crescimento de 92,6 milhões de toneladas, representando evolução de 165,3%. A CNA, também, indicou a importância de se investir em obras de infraestrutura para reduzir os custos de transporte, assim como, a necessidade de atender a demanda por infraestrutura para escoar a produção cada vez mais recorde dos Estados do Mato Grosso, Pará, Maranhão, Tocantins e Bahia.

2.2 Intermodalidade e custos de transportes

Dois conceitos fundamentais para o problema estudado nesta dissertação são o de intermodalidade e de custo de transporte. Assim, será feita uma breve exposição de suas bases teóricas.

2.2.1 Modos de transporte e intermodalidade

Entender as características de cada modo de transporte é fundamental para definir qual a melhor escolha para o transporte de carga até o seu destino final. Dois pontos relevantes para escolha modal são o tempo de viagem e o custo, em que cada atributo pode ter mais peso dependendo do tipo de operação. Como descreve Almeida *et al.* (2017), quanto menor é o tempo para percorrer o trajeto, mais eficiente é o modal, em relação ao custo, sendo desejável que atinja os menores valores, para que não tenha muito impacto no valor do produto. Assim sendo, cada modalidade será

adequada, conforme o tipo de situação ou tipo de carga transportada, havendo vantagens e desvantagens.

O modal rodoviário é o mais comum e mais expressivo na matriz de transporte do Brasil, retratado nos trabalhos de Ballou (2010), Dias (2012), Novaes (2004) e Polli (2015). Este modal é composto pelas vias terrestres como as ruas, estradas e rodovias (pavimentadas ou não), para deslocar pessoas ou cargas. Entre suas vantagens, este transporte tem grande flexibilidade podendo realizar o serviço porta a porta, permitindo ter a carga e descarga diretamente da origem ao destino, o modal tem frequência, agilidade e maior versatilidade na escolha das rotas (não estando preso a trajetos fixos). Sendo este modal, no geral, bastante competitivo em curtas distâncias, tendo neste caso rápida entrega e baixo custo. Porém, como desvantagens se tem a baixa capacidade de carga, baixa segurança, deterioração da infraestrutura e custos elevados para longas distâncias.

A malha ferroviária e aquaviária brasileira ainda é pequena em relação as possibilidades brasileiras, sendo retratadas, também, nos trabalhos de Dias (2012), Castiglioni (2007), Novaes (2007) e Polli (2015). O transporte ferroviário tem grande capacidade de carga, assim como, baixo consumo de combustível por tonelada movimentada e baixos custos operacionais diretos. No entanto os custos fixos de uma ferrovia são elevados, devido à frequente manutenção para sua conservação, à operação dos terminais, operação das estações, alimentação de energia etc. Com isso, as ferrovias passam a ser competitivas, em relação ao modal rodoviário, a partir de médias e longas distâncias.

Outra desvantagem do modal ferroviário é a baixa velocidade do transporte que, em geral, para o transporte de cargas trafega em baixas velocidades; o transbordo também é lento e de elevado custo. Além disso, o transporte ferroviário necessita que se leve as cargas até o terminal de embarque, contribuindo para que o modal tenha pouca flexibilidade. Desta forma, então, o transporte ferroviário é bastante apropriado para longas distancias de cargas com baixo valor agregado, como a produção agrícola, fertilizantes, minério de ferro, etc.

No modal aquaviário estão inclusos na navegação interior o transporte fluvial e lacustre. O transporte por navegação interior é considerado bastante competitivo, com o valor do frete baixo, quando comparado ao modal rodoviário. Também, tem grande capacidade de movimentação de carga e menor consumo de combustível por tonelada transportada. O transporte hidroviário tem economia de escala, eficiência na

carga e descarga, baixo custo de implantação e manutenção, custos variáveis baixos, boa vida útil da infraestrutura, considerado seguro e com alto potencial no Brasil.

Entretanto, como desvantagem está o elevado custo inicial da frota, influência do clima, o transporte de carga deste modal é considerado lento e, além disso, caso a origem e destino da carga não estejam localizadas às margens da via, o modal acaba sendo dependente de outro modais. Este modal é muito utilizado para o transporte de produtos agrícolas, fertilizantes, minério, derivados de petróleo e álcool e, na Amazônia, também, ocorre o transporte de produtos manufaturados.

No que tange a intermodalidade, considerando cada situação, a integração dos modos se apresenta como alternativa para buscar as qualidades de cada modal, de forma mais vantajosa, em que um modo auxilia o outro, com o intuito de aperfeiçoar serviço e minimizar os custos (BALLOU, 2010; DIAS, 2012).

Para cada mudança modal é necessário um transbordo de carga, tendo que haver infraestrutura adequada de equipamentos carga e descarga dos modais. Os terminais de transporte devem ter eficiência e serem apropriados às necessidades dos produtos da operação intermodal. Dessa forma, o terminal de carga é ponto de integração entre os modais e algumas de suas operações são: receber e expedir mercadoria em curto espaço de tempo; pesagem e controle; classificação; estocagem; conservação; movimentação e carregamento; emissão de documentos; despacho de veículos, trens ou navios. Assim, é imprescindível a canalização de investimentos em pontos de transbordo em busca de interface de transferência da carga, de forma rápida, fácil e segura, com custo compensador de forma a tornar as hidrovias e ferrovias brasileiras mais competitivas (DIAS, 2012).

O transporte intermodal pode minimizar problemas com congestionamentos nas rodovias, vias com restrições para caminhões ou aumento do preço dos combustíveis (PISSINELLI, 2016). Conforme Ballou (2006), existem as seguintes combinações: Ferroviário-Rodoviário; Ferroviário-Aquaviário; Ferroviário-Dutoviário; Rodoviário-Aeroviário; Aquaviário-Aeroviário; Rodoviário-Aquaviário; Rodoviário-Dutoviário; Aquaviário-Dutoviário; Aquaviário-Aeroviário. Além das vezes em que se usa mais de dois modais em uma rota.

A intensificação da hidrovia por meio da integração entre os modais, como esclarece o Instituto de Engenharia (2018), fez com que a Europa, por exemplo, obtivesse um modo de transporte que movimenta a maior quantidade de carga a custos inferiores aos praticados até então por caminhões. Nos grandes centros, com

elevado deslocamento de cargas e pessoas, foram resolvidos problemas de mobilidade. Ademais, ao longo das hidrovias, os terminais intermodais para transbordo de cargas são implementados e, logo em seguida, fábricas começam a ser implantadas as margens dos rios. Desse modo, os polos de integração entre os modais se transformam em regiões de progresso social e crescimento econômico regional, proporcionando geração de emprego e renda.

2.2.2 Custos de transporte

As alternativas para o escoamento de soja no Brasil ainda são reduzidas, sendo que o fluxo para escoar a produção em direção ao mercado externo se inicia no local de produção e termina no porto de exportação. Com isso, é fundamental ter o conhecimento dos custos envolvidos no transporte de produtos agrícolas e as alternativas de estrutura logística, para posteriormente, propor soluções com o propósito de diminuir as perdas e custos envolvidos na operação (KUSSANO; BATALHA, 2012).

Entretanto, como exemplifica Magee (1977), cada situação se mostra com elementos próprios, não havendo fatores de custo universais. Portanto, cada problema específico e circunstâncias envolvidas devem ser avaliados para obter os custos envolvidos na atividade. Um conceito importante é o de custo fixo e custo variável; aos quais Novaes (2007) denominou de custos variáveis aqueles custos que variam em função do volume produzido e de uma forma variável operacional qualquer. Ao custo fixo se referiu às despesas que a sua variação não pode ser explicada pelo volume de serviço produzido, por exemplo o aluguel mensal de um armazém.

Em se tratando do custeio, e sua obtenção, a Empresa de Planejamento e Logística S.A (EPL, 2021), que é responsável pela elaboração do Plano Nacional de Logística - PNL, desenvolveu ferramentas que permitem calcular os custos de transporte e transbordo para os vários modos de transporte. Com isso, a EPL (2021a), apresentou a metodologia aplicada na apuração dos custos de transporte para os diferentes tipos de carga e modais de transporte. Considerando, então, os custos divididos em três aspectos: os Custos Fixos, os Custos variáveis e a Remuneração do Capital.

A remuneração do capital, é o retorno esperado pelo investimento efetivado. Já, os custos fixos estão ligados aos gastos que não mudam conforme a produção,

com a produção de transporte caracterizada pela movimentação de carga entre dois pontos da rede logística, estes custos podem ser a depreciação dos equipamentos e instalações, salários, seguros, capital destinado a reposição da frota, licenciamentos, seguros, despesas administrativas etc. Por fim, o custo variável é formado pelas despesas que variam de acordo com a utilização dos equipamentos ou conforme a produção, como por exemplo, os gastos com consumo de combustíveis, lavagem, lubrificantes, manutenção da frota, consumo de pneus (modal rodoviário) etc.

2.3 Descrição do modelo

Neste tópico, apresenta-se as bases para o desenvolvimento do modelo de programação linear que será aplicado no problema real abordado neste trabalho. De maneira, que o modelo irá permitir analisar a rede de transporte atual, assim como, a rede formada pela modificação da infraestrutura.

Desse modo, entende-se como modelo a representação simplificada de um sistema real (LISBOA, 2002). Como exemplificam Arenales *et al.* (2011), para elaborar um modelo matemático, simplificações de um objeto real precisam ser consideradas e a validação do modelo depende da solução do modelo matemático ser coerente ao seu contexto real. Desta forma, o modelo matemático é uma representação simplificada do problema real.

Assim, a modelagem matemática é um procedimento para encontrar uma solução de um problema que envolve a representação de um caso real. A programação matemática trata de problemas reais de decisão e faz uso de modelos matemáticos. Sendo que a modelagem define variáveis e as relações descrevem o comportamento relevante do sistema real. A análise se vale do emprego do modelo matemático para avaliar o problema frente às variáveis previamente selecionadas. Por fim, a interpretação dos resultados, que visa responder às hipóteses enunciadas e direcionar conclusões ou decisões para o problema real.

No caso de busca de otimização, a programação linear se apresenta como um dos modelos mais difundidos. Como descrevem os autores, Belfiore e Favero (2013) e Hiller e Lieberman (2006), tal modelo matemático é constituído de equações matemáticas que descrevem a essência do problema. Assim, o modelo é constituído por três elementos primordiais: variáveis de decisão e parâmetros; função objetivo; e restrições.

De modo que se houverem inúmeras decisões quantificáveis, elas serão na forma de variáveis de decisão, como por exemplo $x_1, x_2 \dots, x_n$. Os parâmetros são as constantes, primeiramente conhecidas do problema, que se encontram nas restrições e na função objetivo. Já, a função objetivo é uma função matemática, como por exemplo $Z = 3x_1 + 4x_2 + \dots + 10x_n$, que estabelece o valor que se busca atingir ou a qualidade da solução, em função das variáveis de decisão e dos parâmetros. Dessa forma, pode ser uma função de maximização, como por exemplo para maximizar a receita, lucro, nível de serviço, entre outros ou de minimização, como por exemplo minimizar o risco, custo, erro etc. Para que um modelo possa ser considerado válido, é necessário que ele represente ou preveja, com precisão aceitável, o comportamento do sistema em estudo. Por fim, a solução obtida precisa ser validada de forma que o objetivo em questão tenha sido atingido.

2.3.1 Modelo de programação linear

Como esclarece Marins (2011), um aspecto importante dos problemas envolvendo tomada de decisões é o de otimização; quando se procura as melhores maneiras de utilizar os recursos disponíveis para atingir objetivos. Com isso, a Programação linear - PL visa, sobretudo, atingir a melhor solução para problemas que tenham seus modelos representado por expressões lineares. Ademais, de acordo com Hiller e Lieberman (2006), a PL envolve o planejamento de atividades para obter uma solução ótima, isto é, um resultado que atinja o melhor objetivo entre todas as alternativas viáveis.

Um problema de programação linear é um problema de programação matemática, que tem como áreas de aplicação, entre outras, o planejamento regional, alocação de recurso limitados, transporte e rede de distribuição (LACHTERMARCHER, 2007). É desejável o uso de programação linear, por ser um modelo utilizado no auxílio a tomada de decisão, particularmente tem seu uso para resolver problemas de transporte de mercadoria (MOREIRA, 2010). Para Taylor (2005), a técnica de otimização de programação linear é uma ferramenta de gerenciamento extremamente eficaz para se aplicar no gerenciamento da cadeia de suprimentos.

Os recursos escassos representam a realidade de se ter recursos finitos, e a programação linear resolve problemas de alocação de recursos, ou seja, busca as

melhores soluções conforme a realidade dos recursos (COLIN, 2011). Além do mais, a programação linear é a técnica mais comum no gerenciamento da cadeia de suprimentos (TAYLOR, 2005). Andrade (2004), esclareceu que os problemas de alocação de recursos, entre as variadas atividades, se diferenciam por terem um objetivo explícito por meio de variáveis de decisão, tendo que atender restrições para alocar recursos, conforme as quantidades disponíveis e melhor forma de aplicar, de forma que a programação linear busca atingir os objetivos, levando a técnica a ter um grande campo de aplicação, além de ser eficaz em organização de transporte.

Como discorre Prado (2016), a PL é uma técnica de planejamento, tendo a palavra programação o significado referente a planejamento, o autor demonstra algumas vantagens do uso da PL: permite a identificação de gargalos, fornece diretrizes para expansão, possibilita avaliar o potencial de aplicabilidade para aprofundar o entendimento do problema e permite identificar as melhores opções em estudos.

Pode-se considerar a Programação Linear como uma das maiores revoluções técnicas científicas do século XX, pois viabiliza a obtenção de soluções ótimas para as mais variadas categorias de problemas. Desta forma, a sua aplicação vem gerando grande economia, para inúmeras indústrias em todo mundo (BARBOSA; ZANARDI 2010).

Belfiore e Fávero (2013) reportaram que a PL teve um período de efetivo crescimento na sua utilização quando foi desenvolvido o método Simplex por George B. Dantzig em 1947 e, desde então, a PL vem sendo utilizada para a otimização de problemas reais em diversos setores. Como exemplos, tem-se os setores de comércio, de serviços, bancário, de transporte, automobilístico, de aviação, naval, alimentício, de bebidas, agropecuário, de saúde, imobiliário, de siderurgia, de metalurgia, de mineração, de papel e celulose, de energia elétrica, de petróleo, gás e combustíveis, de computadores e de telefonia, entre outros. Segundo Winston (2004), uma pesquisa das 500 maiores empresas americanas listadas pela revista Fortune evidenciou que 85% dos respondentes usavam ou já haviam usado a técnica de programação linear.

A programação linear para Lachtermacher (2007), é uma programação matemática, onde as equações do problema de otimização são constituídas por funções lineares. Para Rodrigues, Santos e Bachega (2013), a programação linear é utilizada quando se busca solucionar problemas, que levam em consideração a

destinação ótima de recursos para realização das atividades que envolvem o problema, de forma a alcançar determinado objetivo de otimização, atendendo as restrições determinadas.

Como exemplificam Corrar e Garcia (2001) o problema de programação linear pode ser resumido em minimizar ou maximizar alguma variável dependente, admitindo a função linear de diferentes variáveis independentes (que é a função objetivo), sujeitas a restrições. Um modelo de programação linear, de acordo com Ravindran, Phillips e Solberg (1987), segue as etapas de Identificação das variáveis de decisão, da função objetivo linear e das restrições que envolvem o problema. Ainda, como exemplifica Hiller e Lieberman (2006), para que um problema matemático se molde em um modelo de programação linear, ele necessita ter um formato genérico, tendo o propósito de planejar atividades de forma a atingir os melhores resultados diante das alternativas presentes.

Dessa forma, em um problema de programação linear, a função objetivo e todas as restrições do modelo são constituídas por funções lineares. Adicionalmente, as variáveis de decisão devem ser todas contínuas, ou seja, devem assumir valores em um intervalo de números reais. O objetivo consiste em maximizar ou minimizar determinada função linear de variáveis de decisão, sujeita a um conjunto de restrições (que determinam uma região de soluções viáveis) representadas por equações ou inequações lineares, incluindo as de não negatividade das variáveis de decisão.

Como descrevem Belfiore e Fávero, construído o modelo matemático que representa o problema real de PL em estudo, o próximo passo consiste em determinar a solução ótima do modelo, que é aquela com o maior valor (se o problema for de maximização) ou menor valor (se o problema for de minimização) na função objetivo e que satisfaça as restrições lineares impostas. Portanto, o objetivo da PL é definir a solução ótima. Diversos algoritmos ou métodos de solução podem ser aplicados para a determinação da solução ótima do modelo, sendo o método Simplex o mais conhecido e utilizado.

Ademais, as soluções que satisfazem todas as restrições, inclusive as de não negatividade das variáveis de decisão, são chamadas de soluções factíveis. Deste modo, a solução factível com melhor resultado da função objetivo é chamada solução ótima. Por fim, a formulação de um modelo geral de programação linear pode ser representada como:

$$\max \text{ ou } \min z = f(x_1, x_2, \dots, x_n) = c_1x_1 + c_2x_2 + \dots + c_nx_n$$

de distribuição. Diversos modelos de otimização foram aplicados por mais de 20 anos para analisar projetos de redes de serviços de transporte, se consagrando como um caso particular de PL bastante utilizado em estudos logísticos.

Para os autores Bektas e Crainic (2007) os dois principais tipos de decisões considerados no projeto de rede de serviços são para determinar a rede de atendimento e o direcionamento do fluxo da demanda. O primeiro está relacionado à escolha das rotas, com (nós) origem-destino e atributos da rota física (arcos). O segundo se refere a escolha de como mover o fluxo de cada demanda, incluindo os serviços e os terminais de uso, etc. Apesar de que em projeto de redes de serviços o principal objetivo, em muitos casos, seja a minimização do custo operacional, outra meta que também vem sendo considerada é a melhora da qualidade de serviço que pode ser medida, por exemplo, pela velocidade, flexibilidade e confiabilidade do transporte.

Para Andrade (2000, p. 103), os objetivos dos problemas de transporte na programação linear são de “determinar o carregamento da rede de transporte que minimize o custo total”. Ainda, conforme exemplifica Taha (2008), o problema de transporte é uma classe de problemas de programação linear que lida com envios de mercadoria de origens para destinos, com objetivo de minimizar o custo total e, também, que satisfaça os limites de fornecimento e demanda.

Os problemas de transporte referem-se a produtos que são transportados entre os centros de produção e os mercados consumidores. Tais produtos podem ser de diversos tipos, tais como: petróleo, equipamentos, máquinas, produção agrícola etc. O transporte deve ser efetuado respeitando-se as limitações de oferta e demanda (ARENALES *et al.*, 2011).

Para a elaboração matemática do problema de transporte, denomina-se os centros de produção de origens e os locais onde se recebe a mercadoria de destinos. Desse modo, a formulação é descrita por Arenales *et al.* (2011), da seguinte forma: os autores mostram que haverá m origens e n destinos para um produto e que o custo para transportar uma unidade desse produto da origem i para o destino j é b_j . Ademais, a variável de oferta do produto na origem i é a_i . A Figura 3 ilustra um esquema gráfico para representar a rede de transporte.

Assim, as variáveis do problema são as quantidades transportadas das origens aos destinos, com isso x_{ij} é a quantidade deslocada da origem i para o destino j .

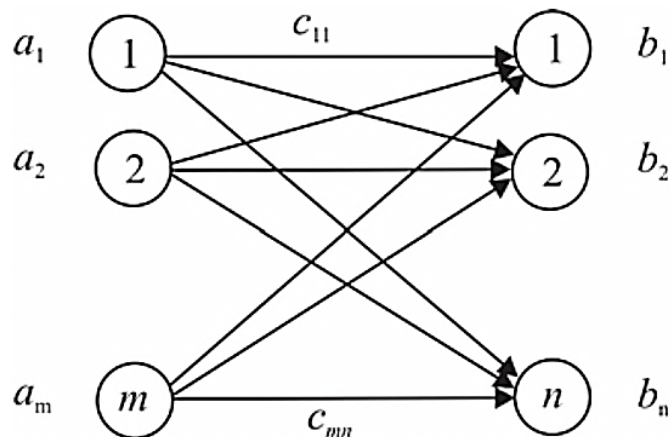
Essas quantidades não podem ser negativas, portanto, as restrições $x_{ij} \geq 0$, $i = 1, \dots, m$ e $j = 1, \dots, n$, constituem o modelo matemático. Com isso, $c_{ij}x_{ij}$ é o custo para se realizar o transporte. De forma que, como indicam Arenales *et al.*, o custo total de transporte é a somatória dos custos de deslocamento das quantidades movimentadas de todas as origens i a todos os destinos j , ou seja:

$$\sum_{i=1}^m \sum_{j=1}^n c_{ij}x_{ij}$$

As quantidades transportadas das diferentes origens ao destino j devem satisfazer a demanda pela mercadoria neste destino, logo:

$$\sum_{i=1}^m x_{ij} = b_j$$

Figura 3: Rede de transporte



Fonte: ARENALES *et al.*, 2011.

O modelo do problema de transporte é estipulado, como:

$$\text{minimizar } f(x_{11}, x_{12}, \dots, x_{mn}) = \sum_{i=1}^m \sum_{j=1}^n c_{ij}x_{ij}$$

$$\sum_{j=1}^n x_{ij} = a_i \quad i = 1, \dots, m$$

$$\sum_{i=1}^m x_{ij} = b_j \quad j = 1, \dots, n$$

$$x_{ij} \geq 0 \quad i = 1, \dots, m \text{ e } j = 1, \dots, n.$$

2.3.3 Problema de transbordo

O problema de transbordo é uma extensão do problema clássico de transporte, no qual, considera-se pontos intermediários de transbordo (como por exemplo um centro de distribuição, terminal, estação de transbordo, porto ou fábrica) que podem conectar caminhos de origens e destinos, com objetivo de reduzir os custos logístico. Dessa forma, o problema de transbordo é modelado a partir de três elos na cadeia de suprimentos, e o processo de transporte ocorre em dois estágios: transporte dos centros de produção (origens) para os pontos de transbordo e transporte dos pontos de transbordo para os pontos de demanda (destinos). Com isso, o objetivo do problema de transbordo é determinar o fluxo de mercadorias a serem transportadas a partir de um conjunto de origens para um conjunto de destinos via pontos de transbordo, com a finalidade de minimizar o custo total de transporte no sistema (BELFIORE; FÁVERO, 2013).

A formulação matemática e a representação das redes do problema de transbordo são descritas por Belfiore e Fávero (2013), da seguinte forma: considera-se um conjunto de m fornecedores que fornecem a carga para um conjunto de n consumidores via pontos de transbordo intermediários. A quantidade máxima a ser transportada de um fornecedor ou centro de produção i ($i = 1, \dots, m$) corresponde à sua capacidade de Cfi unidades. Assim como, a demanda de cada consumidor ou destino j ($j = 1, \dots, n$) deve ser atendida, sendo retratada por d_j . Os pontos de transbordo são representados pelo índice k ($k = 1, \dots, K$). O custo unitário do centro de produção i para o destino j via ponto de transbordo k é representado por $c_{ij,k}$. Ademais, o objetivo é determinar as quantidades a serem transportadas do centro de produção ou origem i para o destino ou consumidor j , passando por um ponto de transbordo k ($x_{ij,k}$), de forma a minimizar o custo total de transporte (z). A Figura 4 mostra a ilustração em redes do problema de transbordo.

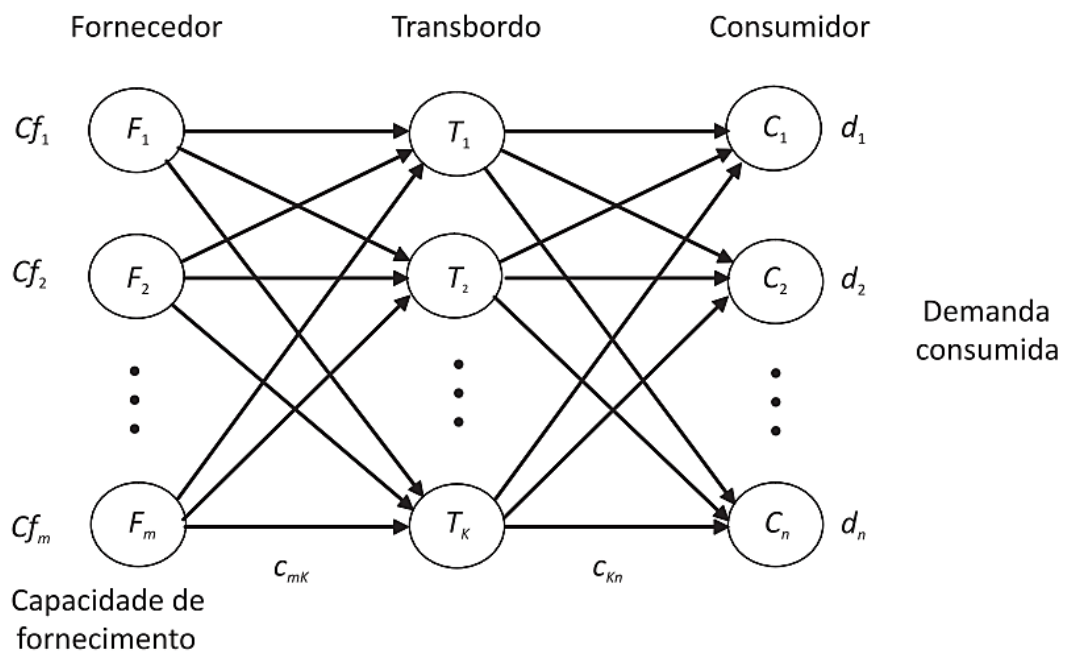
O custo unitário de transporte da origem i para o destino j via ponto de transbordo k é ($c_{ij,k}$), que corresponde à soma dos custos unitários de transporte da origem i para o ponto de transbordo k (c_{ik}) e do ponto de transbordo k para o destino j (c_{kj}):

$$c_{ij,k} = c_{ik} + c_{kj}$$

De forma semelhante, a quantidade transportada da origem i para o destino j via ponto de transbordo k ($x_{ij,k}$) equivale à soma das quantidades transportadas do fornecedor i para o ponto de transbordo k (x_{ik}) e do ponto de transbordo k para o consumidor j (x_{kj}):

$$x_{ij,k} = x_{ik} + x_{kj}$$

Figura 4: Rede do problema de transbordo



Fonte: BELFIORE; FÁVERO, 2013.

A formulação matemática do problema de transbordo é:

$$\min z = \sum_{i=1}^m \sum_{k=1}^K c_{ik} x_{ik} + \sum_{k=1}^K \sum_{j=1}^n c_{kj} x_{kj}$$

$$\sum_{k=1}^K x_{ik} = Cf_i \quad i = 1, 2, \dots, m$$

$$\sum_{i=1}^K x_{kj} = d_j \quad j = 1, 2, \dots, n$$

$$\sum_{i=1}^m x_{ik} = \sum_{j=1}^n x_{kj} \quad k = 1, 2, \dots, K$$

$$x_{ij} \geq 0 \quad i = 1, 2, \dots, m \text{ e } j = 1, 2, \dots, n.$$

Concluindo, tem-se descrita a base matemática sobre a qual se assentará a modelagem a ser feita para o estudo de caso em questão. Reiterando o objetivo geral, que é de analisar e identificar alternativa intermodal de rede de transporte, a partir da minimização dos custos operacionais, para apoio a tomada de decisão em investimentos de transportes e, assumindo um comportamento temporal linear dos dados, ou seja, passível a utilização da programação linear, no caso específico, do problema do transporte. Por se tratar de um estudo de cunho exploratório, foram utilizados cenários de evolução de dados e da própria rede, com possibilidade de combinação dos modos de transporte, para buscar a solução ótima ao problema investigado.

2.4 Transporte do agronegócio com abordagem de programação linear

Este tópico apresenta algumas aplicações de programação linear no transporte do agronegócio. De modo, que estes trabalhos contribuem como base para melhor compreensão de similares formas de uso da programação linear, para analisar impactos gerados por modificações da infraestrutura e rede de transporte de produtos do agronegócio.

Com isso, uma forma de se avaliar as opções modais para escoar os produtos do agronegócio brasileiro, é através da otimização do custo de transporte para exportação. Dessa forma, o estudo de Oliveira, V. *et al.* (2021) faz uso da programação linear para analisar uma nova opção intermodal para escoar a produção de soja do Estado do Pará. De modo, que otimizou a rede de transporte formada por rotas atuais e alternativas para escoar a soja. Neste modelo, foi adotado como base para elaboração, os problemas de transporte e transbordo, assim, os resultados mostraram a prioridade pela opção intermodal para escoar a produção dos municípios.

Para analisar, entre outros, os aspectos ambientais do transporte de commodities agrícolas, o trabalho de Souza *et al.* (2020), otimizou rotas para escoar a produção de soja do estado do Mato Grosso. Os resultados mostraram a redução dos impactos socioambientais quando implantada novas rotas com transporte intermodal.

Considerando a cadeia logística do agronegócio, o trabalho de Oliveira *et al.* (2015) analisa os fluxos das principais rotas para exportação do milho produzido no Estado do Mato Grosso. Os resultados mostraram que as rotas rodo-hidro destinadas

aos portos do Arco Norte, localizados nos municípios de Santarém – PA e Manaus – AM, se destacam pela vantagem competitiva para escoar o milho do norte do Estado.

Para analisar o impacto de investimentos na infraestrutura portuária brasileira nos fluxos da rede de transporte de fertilizantes, o estudo de Simões, Caixeta-Filho e Palekar (2018), utiliza um modelo de programação linear baseado no problema de transporte. O estudo indica que os investimentos previstos devem garantir economia nos custos da logística do Brasil. Ademais, os resultados apontam, que particularmente o Arco Norte apresenta maiores benefícios ao se expandir sua infraestrutura.

O estudo de Lin *et al.* (2019), avalia o fluxo da cadeia de suprimentos de alimentos entre condados dos Estados Unidos. De forma, que o trabalho trouxe informações de infraestrutura de transporte, bem como, elementos para melhor entender as vulnerabilidades da cadeia de abastecimento alimentar do País.

Outro trabalho, é o desenvolvido por Mitchell e Kurniawan (2015), que estimam o fluxo do transporte de commodities agrícolas (trigo, grãos grossos, leguminosas, açúcar, algodão e arroz) da Austrália, o modelo inclui particularidades da rede de transporte de commodities, como por exemplo terminais intermodais e armazéns. Dessa forma, a pesquisa avalia os movimentos de frete entre as fontes de produção (fazendas), instalações de produção intermediárias e pontos de demanda final (como por exemplo portos e fabricas). Além disso, o estudo também analisa o impacto de mudanças na infraestrutura de transporte.

Para avaliar os corredores verdes para exportações de soja do Brasil com destino a China, a pesquisa de Péra *et al.* (2019), elabora um modelo de problema de PL. Desta forma, este trabalho analisa os investimentos em infraestrutura para reduzir o custo e as emissões de CO₂ que envolvem o transporte para escoar a soja brasileira produzida no Centro-Oeste. Já o estudo de Silva Neto (2018), utiliza PL, de modo que aborda o escoamento da produção de soja e milho do Brasil, considerando cenários que englobam mudanças na capacidade portuária, capacidade intermodal e a qualidade das vias, posteriormente se avalia os ganhos resultantes das alterações na rede de transporte. Outra pesquisa, é a de Oliveira, A. *et al.* (2021), em que se otimiza as rotas de transporte da soja da região denominada MATOPIBA, de modo que, o modelo permite examinar a configuração da cadeia logística das exportações pelos portos do nordeste e do sudeste brasileiro.

3 ESTUDO DE CASO

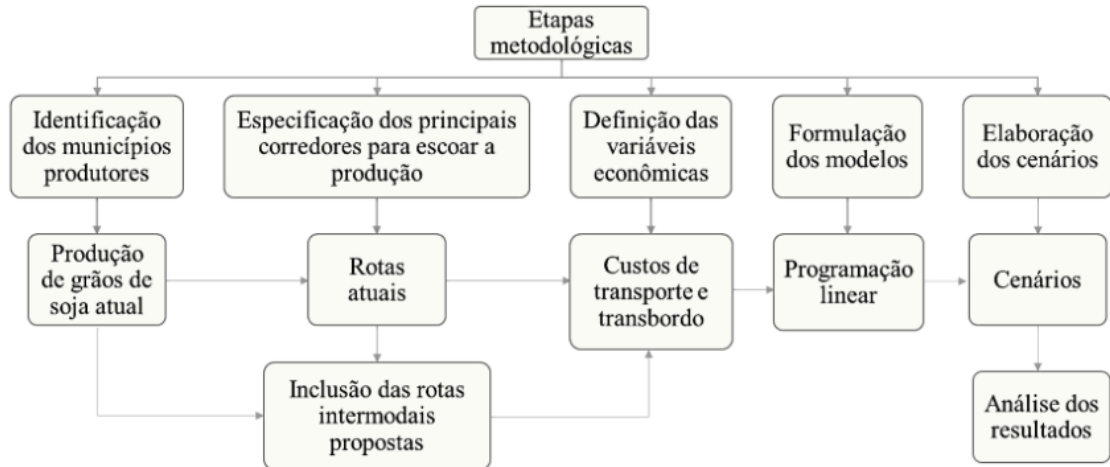
A presente pesquisa surgiu com a proposta de análise de mudança da infraestrutura, devido a inclusão de alternativas intermodais, por meio de uma abordagem de problema de otimização de rota de transporte na busca de solução que possibilite a minimização dos custos. Para tanto, adotou-se a programação linear como técnica adequada nesse processo de otimização. O objeto de estudo foi o transporte em si, em decorrência da importância da produção de soja para os estados do Pará e Tocantins, aliada à necessidade premente de investimentos em infraestrutura para promover a competitividade no mercado interno e externo. Como resultados esperados, pretendeu-se apresentar a programação linear como ferramenta de auxílio à tomada de decisão, para o melhoramento da rede de transporte e oferecer uma alternativa intermodal para o escoamento de soja brasileira da região produtora até os portos de exportação.

Para organizar as informações e atingir os objetivos pretendidos, foram utilizados fundamentos de cadeia logística, transporte, modelagem matemática e processo de otimização. A abordagem, permitiu calcular e analisar a rede transporte porto-interior, usando medidas de custos de transporte. A aplicação de um modelo de programação linear teve como estudo de caso uma rede de transporte no sentido do porto exportador de municípios dos estados do Pará e Tocantins, para a qual os dados estavam disponíveis. Além disso, foram introduzidas na rede transporte dos municípios produtores de soja a hidrovia Araguaia-Tocantins e a Ferrovia Paraense S.A., nos cenários propostos e, com o respectivo potencial para terminais intermodais.

Vale ressaltar que, uma das dificuldades de um estudo desta natureza é a escassez de informações. Assim, para formar um banco de dados, foi realizado um levantamento de dados existentes em estudos acadêmicos, assim como, em relatórios técnicos realizados e disponibilizados por entidades governamentais; que abrangem pesquisas geográficas e estatísticas brasileiras. Para identificar as rotas para escoar a produção de grãos de soja dos municípios produtores até o porto de exportação, foram levantadas informações de mapas e condições das vias, de fontes disponíveis através de entidades governamentais. Os custos envolvidos na elaboração do trabalho foram obtidos dos valores divulgados pelas empresas que operam no transporte, bem como, de trabalhos realizados por empresas e departamentos,

responsáveis pelo planejamento do transporte nacional, como também, de literatura científica. A Figura 5 descreve as etapas metodológicas.

Figura 5: Etapas metodológicas



No processo de preparação para a modelagem, mediante os cenários estabelecidos, foi utilizado o software General Algebraic Modelling System - GAMS (2021), como ferramenta computacional. E, para efeito de modelagem, foi considerado que toda a produção municipal de soja será destinada para exportação, analisando comparativamente os cenários, em termos de respostas das rede de transporte que estão configuradas dentro da premissa de minimização de custos, com o propósito de indicar quais as melhores soluções de rota para o escoamento de grãos de soja dos municípios em questão.

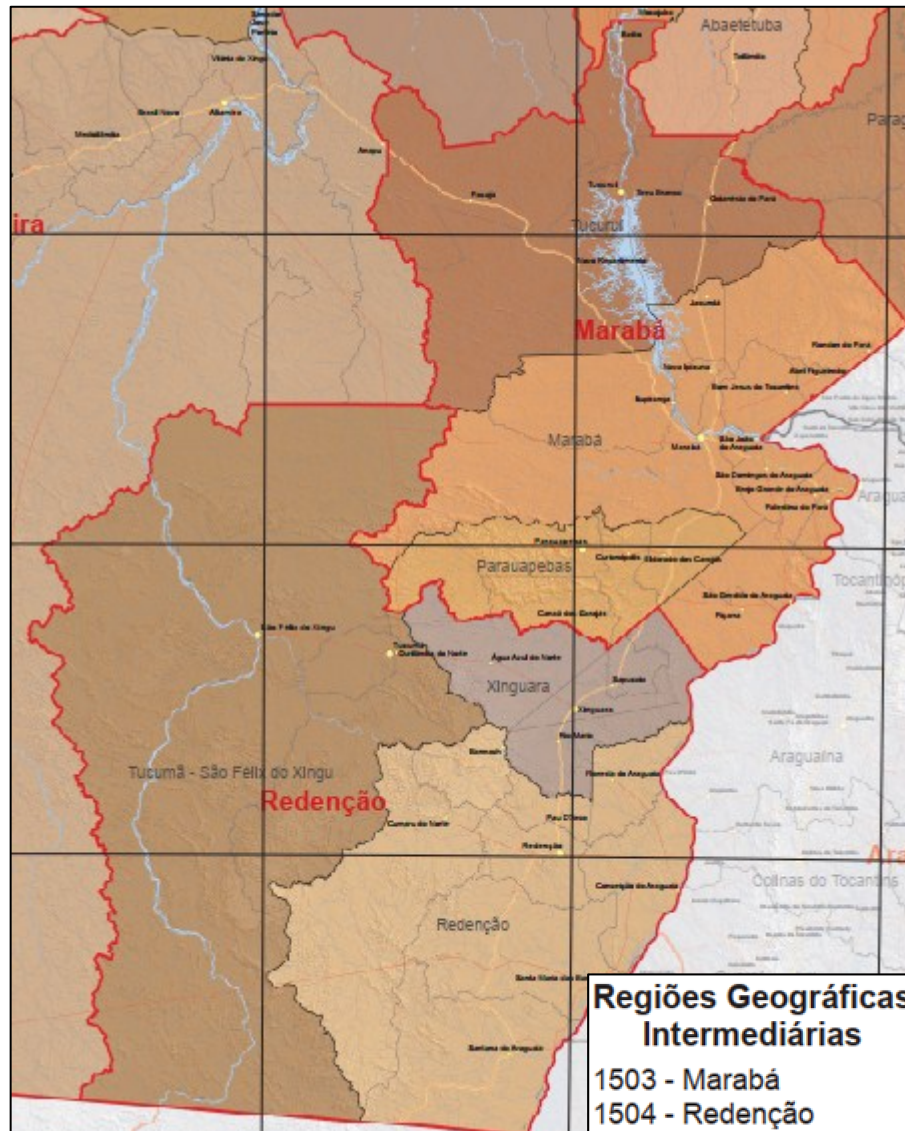
3.1 Caracterização do estudo

Este tópico aborda informações relacionadas às propriedades geográficas da região de estudo, bem como descreve as características da produção de soja local. Com isso, também, evidencia as condições e possibilidades de rotas para escoar a produção dos municípios que serão estudados.

A região é composta por localidades que estão na zona de influência da hidrovia Araguaia-Tocantins, cujos os municípios integrantes fazem parte das regiões intermediárias de Marabá e de Redenção no Estado do Pará (ver Figura 6). Assim como das regiões intermediárias do Estado do Tocantins, que são Palmas, Araguaína e Gurupi, excluindo os municípios da região imediata de Dianópolis, que são

apontados pela ANTAQ (2013) como fora da área de influência do porto de Itaquí, as regiões do Estado são apresentadas na Figura 7.

Figura 6: Localização geográfica dos municípios produtores no Estado do Pará

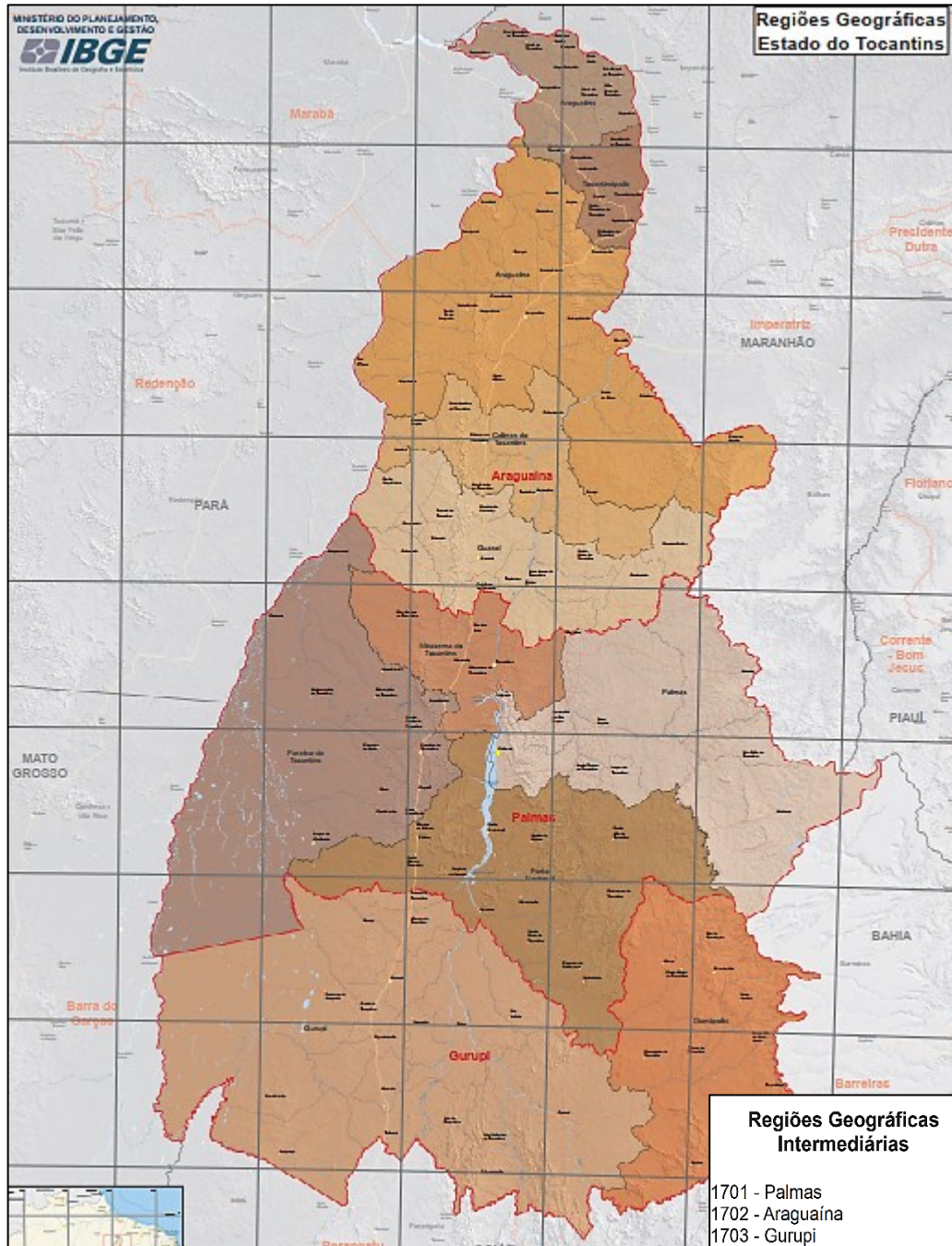


Fonte: IBGE, 2017.

Dessa forma, na Figura 6, mostra-se a região que possui um total de 181,673 mil hectares de área plantada em 2019, o que corresponde a 31,5% do total de área plantada do Estado do Pará (IBGE, 2021), e que a quantidade de soja produzida nos municípios foi de 563.442,00 toneladas. Além disso, o Estado do Pará, segundo dados da Secretaria de Estado de Transportes do Pará – SETRAN (2021) e do DNIT (2017), possui uma malha de 13.122,00 km, sendo 7.659,50 km de rodovias estaduais e 5.463,00 km de rodovias federais, incluindo, rodovias duplicadas, pavimentadas,

implantadas e, em leito natural. Deste total, 3.658,50 km são de rodovias pavimentadas.

Figura 7: Regiões geográficas dos municípios produtores no Estado do Tocantins



Fonte: IBGE, 2017.

Ainda, em torno de 48,51% da malha rodoviária do Pará é constituída de rodovias não pavimentadas. Como descreve a CNT (2017), 86% da malha rodoviária do estado apresenta deficiência, gerando aumento nos custos de transporte,

ocasionando graves problemas nos períodos críticos das chuvas, resultando em custos mais elevados para a movimentação de carga. Por outro lado, o problema imposto por um tráfego de caminhões leva à deterioração prematura dos pavimentos das rodovias federais e estaduais, agravada por recursos insuficientes para a sua manutenção.

No trabalho do Ministério dos Transportes, Portos e Aviação Civil - MTPA (2017) foram identificados para o escoamento de soja, farelo de soja e milho, nove corredores logísticos estratégicos para os fluxos de exportação e quatro corredores logísticos estratégicos para o fluxo de abastecimento interno. Em relação ao escoamento da produção de soja das regiões geográficas de Marabá e Redenção, no Pará, tem-se as principais rodovias do corredor logístico dadas na Tabela 2 e; no Estado do Tocantins, o principal corredor rodoviário utilizado é formado pelas rodovias indicadas na Tabela 3. Nas Figuras 8 e 9 estão apresentadas as malhas rodoviárias dos respectivos estados.

Tabela 2: Principais rodovias do corredor logístico no Estado do Pará

Rodovia	Trecho	Extensão (km)
Rodovias Federais		
BR-158	Divisa PA/MT – Entroncamento BR-155 (Redenção)	299,10
BR-155	Entroncamento BR-158 (Redenção) - Entroncamento BR-222 (Marabá)	343,90
Rodovias Estaduais		
PA-150	Entroncamento BR-222 (Morada Nova) - Entroncamento PA-475	331,69
PA-475	Entroncamento PA-150 - Entroncamento PA-252	41,54
PA-252	Entroncamento PA-475 - Entroncamento PA-151(A) (Colônia Velha)	42,40

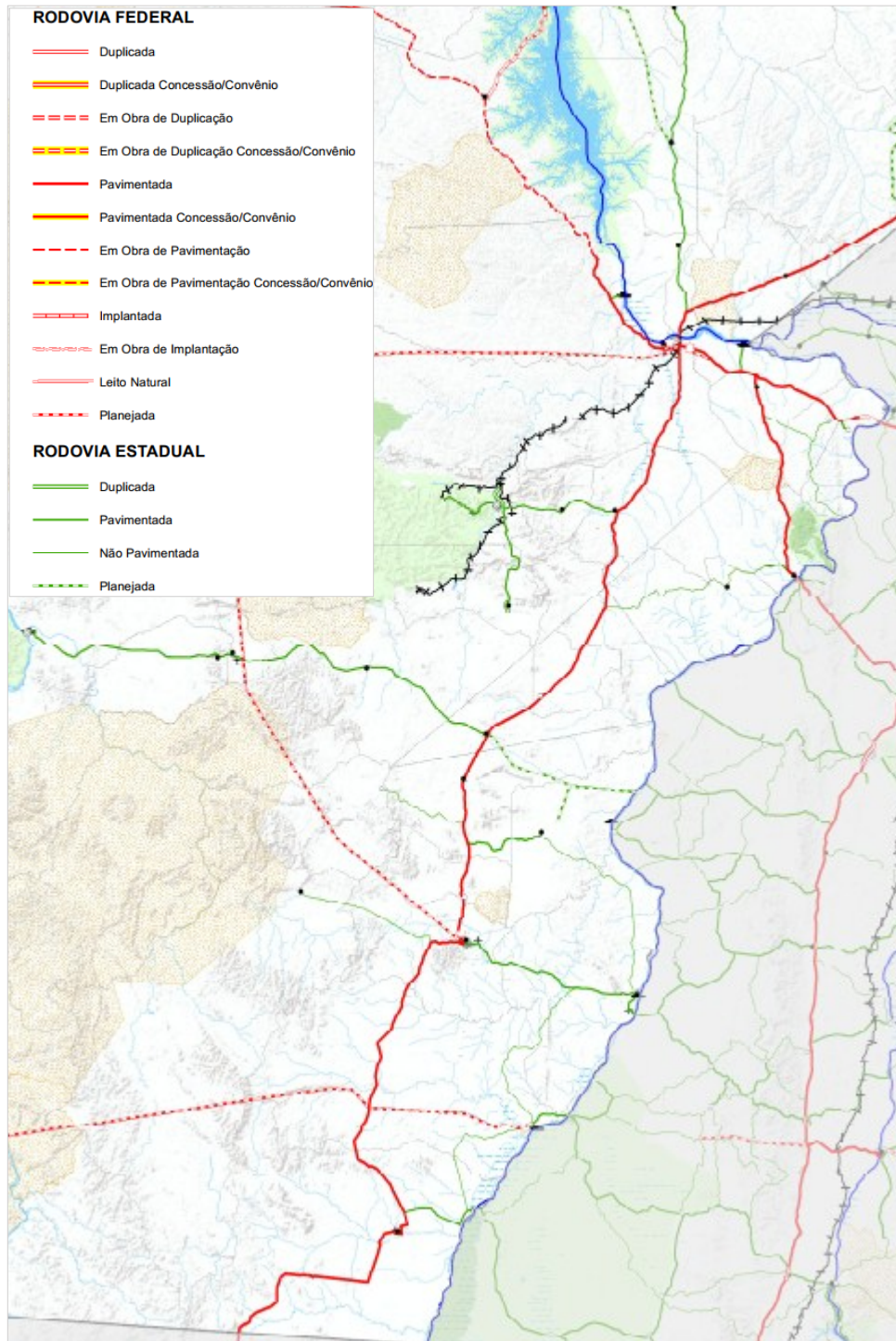
Fonte: MTPA, 2017; DNIT, 2017 e SETRAN, 2017.

No caso da região do Estado do Tocantins, se teve em 2019 um total de 833,1 mil hectares de área colhida o que equivale a 92% do total de área colhida de soja no Estado, ainda de acordo com o IBGE (2021) a quantidade de soja produzida nos municípios foi de 2.388.032,00 toneladas. Ademais, conforme a SUDAM (2016), o Estado possui um total de 5.961 km de rodovias implantadas, sendo 11 rodovias estaduais e 6 rodovias federais, destas 4.464 km são pavimentadas, no total mais de 50% das rodovias do estado não são pavimentadas. Na Tabela 3 tem-se as principais rodovias, que são a BR-153 e a BR-226.

Tabela 3: Principais rodovias do corredor logístico no Estado do Tocantins

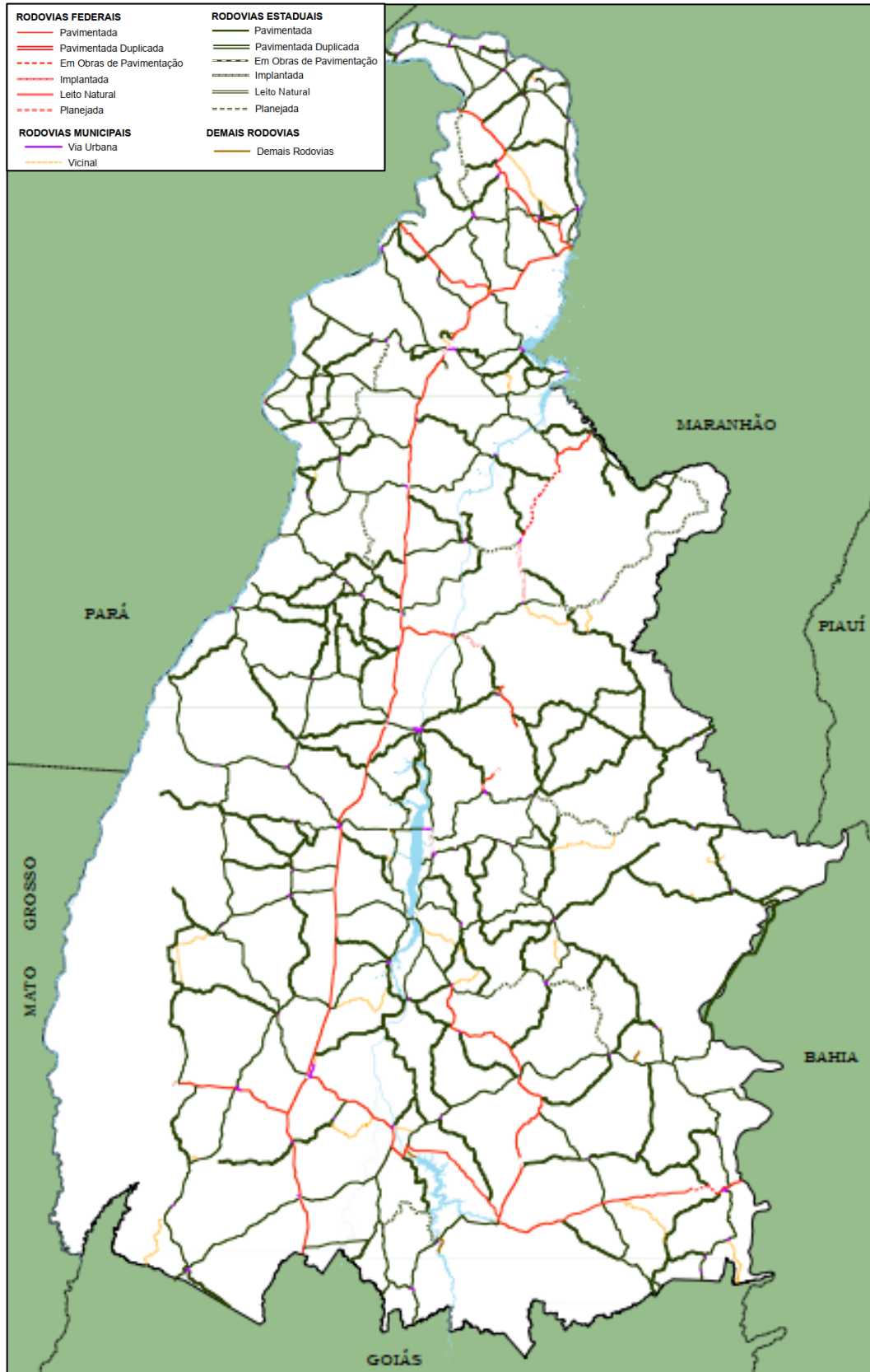
Rodovia	Trecho	Extensão (km)
Rodovias Federais		
BR-153	Divisa TO/GO – Entroncamento BR-226 (Wanderlândia)	798,10
BR-155	Entroncamento BR-226 – Divisa MA/TO	71,30

Fonte: MTPA, 2017; SUDAM, 2016 e AGETO, 2020.

Figura 8: Malha rodoviária dos municípios do Estado do Pará

Fonte: DNIT, 2017.

Figura 9: Malha rodoviária dos municípios do Estado do Tocantins



Fonte: AGETO, 2020.

O Estado do Tocantins, também, conta com a opção intermodal pela Ferrovia Norte Sul – FNS, atualmente controlada pela VLI Logística – VLI, possuindo a extensão total de 720 km de linha férrea entre Açailândia - MA e Porto Nacional - TO. Sendo que a partir de Açailândia a ferrovia se liga com a Estrada de Ferro Carajás permitindo acesso ao complexo portuário de Itaqui. Ademais, a produção de grãos do Tocantins é escoada pela ferrovia através de três pontos para transbordo, estes estão localizados nos municípios de Porto Nacional – TO, Palmeirante – TO e Porto Franco – MA, são apresentados na Figura 10 (SUDAM, 2016; AGETO, 2020; VLI, 2021).

Figura 10: Localização geográfica das estações de transbordo rodo-ferro – FNS



Fonte: Extraído da SUDAM (2016).

3.1.1 Rotas intermodais

Em relação a infraestrutura dos corredores intermodais do Arco Norte, a hidrovía Araguaia-Tocantins se destaca como alternativa para o escoamento da produção dos Estados do Pará e Tocantins. A viabilização dessa hidrovía proporciona o aumento de competitividade internacional da região, bem como poderá ocasionar o aumento da produção local. Segundo o Departamento Nacional de Infraestrutura de Transportes (DNIT, 2021), a hidrovía tem o potencial navegável de aproximadamente

3.000 km. Assim como, tem capacidade para comboios com calado de um metro e meio, 16 metros de boca e 108 metros de comprimento. Ademais, para o intervalo de 43 km no Estado do Pará, que fica entre a Ilha da Bogéa e Santa Terezinha do Tauri, permite comboios de 32 metros de largura e 150 metros de comprimento, com calado mínimo de 2,1 metros.

Outra alternativa em destaque para escoar a produção, pelo Estado do Pará, é o projeto da Ferrovia Paraense S.A. A proposta pretende iniciar a estrada de ferro no município de Barcarena e deve seguir em direção ao interior do Estado, podendo se estender até o município de Santana do Araguaia, ligando a região portuária ao sul do Pará.

a) Detalhamento da alternativa pela Ferrovia Paraense

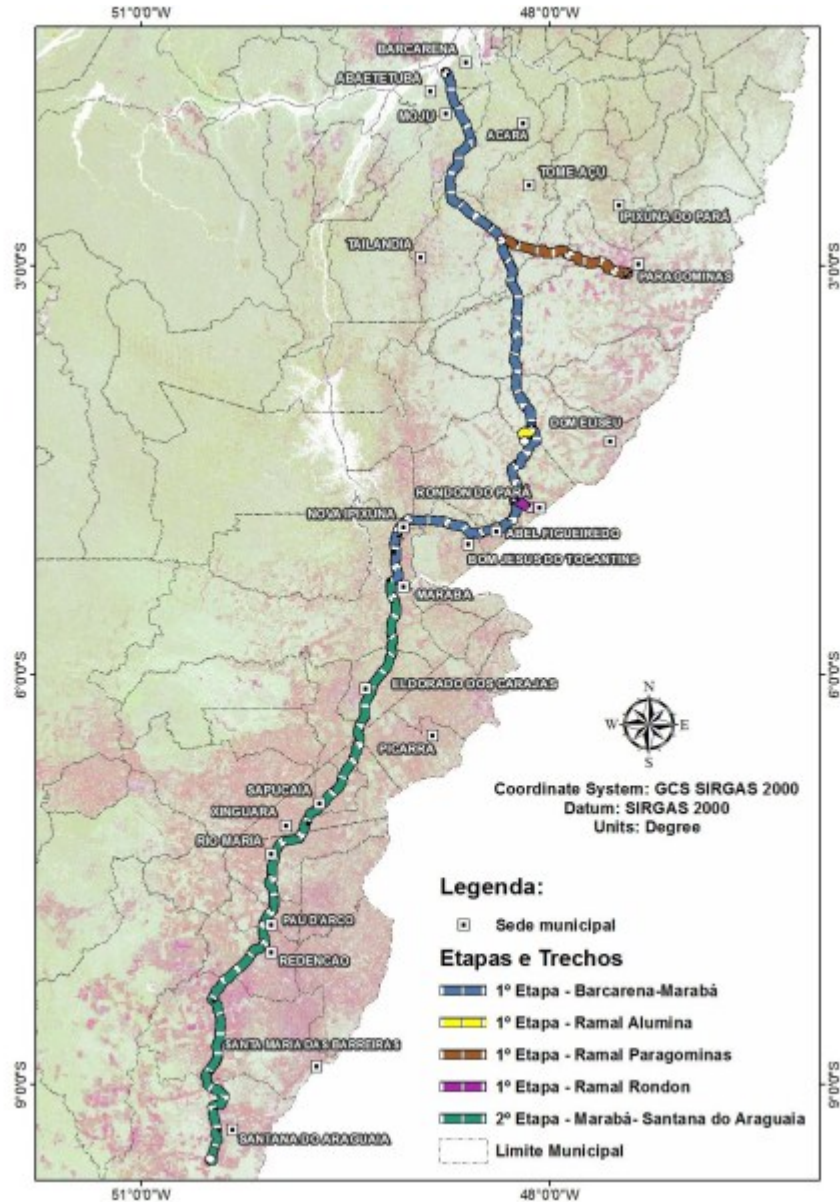
A Ferrovia Paraense S.A – FPA é um projeto que propõe a implantação de uma estrada de ferro no Estado do Pará com extensão total de até 1.319 km. Na Figura 11 tem-se o traçado da ferrovia formado pela Linha Troncal da Primeira e Segunda etapas, bem como os ramais projetados. Como descreve a SEDEME (2017), estão planejados três desvios e cinco estações ferroviárias, os desvios serão nos municípios de Tome-Açu, Dom Eliseu e Rondon do Pará.

As estações de transbordo serão localizadas nos municípios de Barcarena, Paragominas, Rondon do Pará, Marabá e Santana do Araguaia. A ferrovia terá como ponto inicial a região do complexo portuário de Vila do Conde, no município de Barcarena. No primeiro trecho irá seguir até o município de Paragominas, passando pela empresa Hydro Paragominas – Mina de bauxita. O segundo trecho iniciará pelo desvio ferroviário 01 no município de Tomé-Açu, seguindo até o município de Rondon do Pará, chegando ao Projeto Alumina Rondon. Saindo de Rondon do Pará, o terceiro trecho, atravessa o rio Tocantins em direção ao município de Marabá, depois atravessa o Rio Itacaiúnas, seguindo até Eldorado dos Carajás. No quarto trecho, que é o último e mais extenso, inicia em Eldorado dos Carajás e segue até 25 km ao sul da cidade de Santana do Araguaia.

Como pontos de transbordo de graneis agrícolas propostos para os primeiros oito anos de operação, haverá estações de transbordo nos municípios de Marabá e Santana do Araguaia. Desta forma, percorrerá uma distância por ferrovia total de 596

km de Barcarena até Marabá, em sequência, previsto para a segunda etapa, no quinto ano de implantação, a ligação de 560 km de Marabá até Santana do Araguaia.

Figura 11: Localização geográfica das estações de transbordo rodo-ferro – FPA



Fonte: SEDEME, 2017.

b) Detalhamento da rota pela navegação fluvial

Por conta da Bacia Hidrográfica do Rio Amazonas, o norte do país é favorecido por várias vias para navegação interior. Entre elas, as principais são a Hidrovia do Solimões-Amazonas, a Hidrovia do Madeira, a Hidrovia do Tapajós e a Hidrovia do Araguaia-Tocantins (DNIT, 2021).

Primordialmente, a produção de soja e milho do Estado do Pará é escoada pelo modal rodoviário, tendo como principal corredor a rodovia BR-158, em destino a zona portuária de Vila do Conde. Entretanto, a presença do Rio Tocantins em conjunto com o Rio Araguaia, apresentam o potencial de servir como alternativa hidroviária para suprir à demanda por um corredor de transporte para escoar a produção de grãos da região. O relatório técnico da Bacia do Tocantins-Araguaia elaborado pela ANTAQ (2013) apresenta mais detalhamentos do trajeto pelos rios Tocantins e Araguaia, sendo base para a descrição, que segue, neste trabalho.

Esperasse que, quando realizadas as obras que permitirão melhorar a navegação, a extensão dessa hidrovia possa totalizar cerca de 3.000 quilômetros, seguindo pelas regiões Centro-Oeste e Norte do país, ligando a parte central do Brasil até os complexos portuários localizados no Estado do Pará em Barcarena e Belém, assim como aos portos do Maranhão em Itaqui e de Ponta da Madeira por meio da Estrada de Ferro Carajás – EFC, conforme aponta a Agência Nacional de Águas (2005).

Há previsão de extensão total de 2.230 quilômetros para a Hidrovia Araguaia-Tocantins, sendo navegável nos seguintes trechos: no Rio das Mortes (afluente da margem esquerda do rio Araguaia), no Rio Araguaia e no Rio Tocantins. O trecho do Rio das Mortes inicia na cidade de Nova Xavantina - MT e vai até o encontro desse rio com o Araguaia, numa extensão navegável de 580 quilômetros (BRASIL, 2015). Oliva (2009) destacou mais 1.300 quilômetros potenciais para navegação nessa hidrovia.

b.1) Rio Tocantins

O Rio Tocantins, como descreve a Secretaria de Estado de Gestão e Planejamento do Estado de Goiás (GOIÁS, 2010 *apud* ANTAQ, 2013), forma-se a partir dos rios Das Almas, Maranhão e Tocantinzinho, percorrendo uma extensão de 2.400 quilômetros até chegar na Baía do Marajó, próximo a Belém – PA.

O rio possui uma extensão navegável nas cheias de 712 quilômetros, divididos em três trechos principais. Como esclarece Brasil (2010c *apud* ANTAQ, 2013), o primeiro trecho de 254 quilômetros, inicia na foz em Abaetetuba – PA e segue até a eclusa de Tucuruí – PA. Desse ponto, o rio percorre uma distância de 244 quilômetros até a cidade de Marabá – PA, marcando o segundo trecho viável à navegação, com

percurso sujeito a variação dos níveis do reservatório da Usina Hidrelétrica de Tucuruí. Finalmente, o terceiro trajeto parte de Marabá – PA até a cidade de Imperatriz -MA, distante 214 quilômetros.

A Agência Nacional de Águas (2005) informou que o primeiro trecho, que parte da foz até a barragem, tem seu regime definido pela variação das marés e pelas vazões da Usina Hidrelétrica de Tucuruí. Este local dispõe de excelentes condições de navegação durante todo o ano, com calado das embarcações podendo variar de 1,50 metros até 2,50 metros. Da foz até a cidade Cametá – PA, o comboio-tipo para o Tocantins possui comprimento total de 200 metros, boca de 24 metros e calado de 2,5 metros. Como mostra Godoy e Vieira (1999 *apud* ANTAQ, 2013), de Marabá – PA até Imperatriz – MA, o rio apresenta certas restrições próximo à foz do Rio Araguaia, tendo em vista declínios acentuados e alguns pedrais existentes na região.

De Imperatriz – MA até Porto Franco – MA, o Rio Tocantins não é classificado com condições para navegação. Nessa região, a montante de Imperatriz – MA, está prevista a construção da barragem de Serra Quebrada, que formará um lago com profundidade aproximada de 132 metros e 100 quilômetros de extensão (BRASIL, 2010c *apud* ANTAQ, 2013).

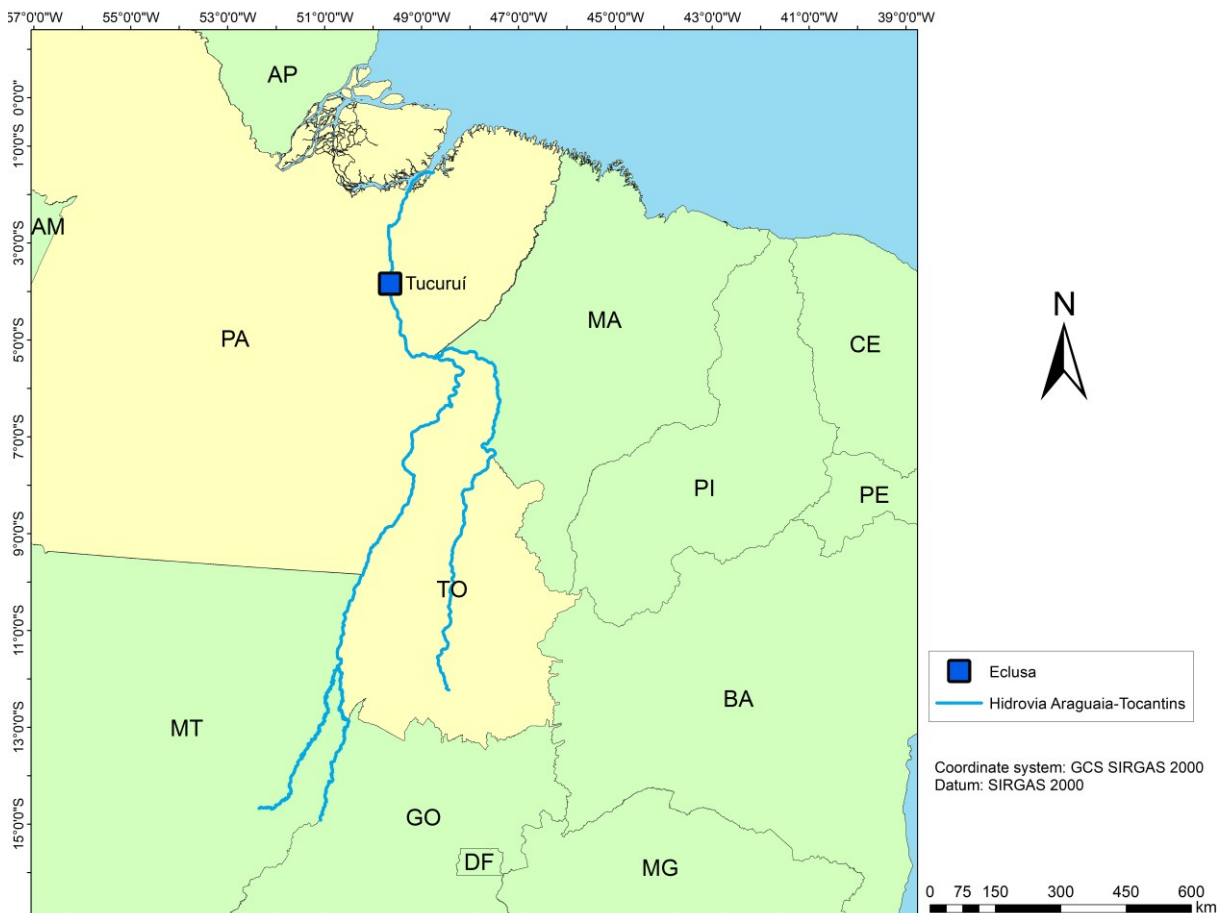
Se inundasse, então, o trecho ainda não navegável, poderia haver ligação de 712 quilômetros navegáveis de jusante com os 483 quilômetros de montante, atualmente apontado como inviável à navegação comercial, até a cidade de Miracema do Tocantins – TO. Entre Porto Franco - MA e Miracema do Tocantins - TO, no município de Lajeado - TO, encontra-se o lago do reservatório da usina hidrelétrica Luís Eduardo Magalhães, com 630 quilômetros quadrados e, neste, quando implantada uma eclusa, propiciará navegação até a cidade de Palmas - TO e até a cidade de Peixe - TO (ANTAQ, 2013). Ademais, em relação a navegabilidade de Estreito – MA até Peixe – TO, como descreve a SUDAM (2016), para o transporte aquaviário, a via permite calado de 0,9 metros de julho a novembro e 2,5 metros de dezembro a junho.

b.2) Rio Araguaia

O rio possui uma extensão total de 2.115 quilômetros até chegar no rio Tocantins, dos quais 1.818 são navegáveis. Assim, como exemplifica Brasil (2002 *apud* ANTAQ, 2013), a navegação comercial pode ocorrer basicamente entre sua foz,

no Rio Tocantins, e a cidade de Baliza - GO. Dessa forma, o primeiro trecho dispõe de profundidade mínima de 1,0 metro e, estende-se por 1.472 quilômetros, desde a foz até a cidade de Aruanã - GO. A segunda parte de Aruanã - GO vai até Barra do Garças - MT em um trecho de 288 quilômetros de extensão e de 0,9 metros de profundidade mínima. Por fim, o trecho de Barra das Garças - MT até o município de Baliza - GO, que corresponde a mais 58 quilômetros de extensão navegável, com profundidade mínima de 0,8 metros. A Figura 12 identifica os principais rios que compõem a hidrovia discutida.

Figura 12: Principais rios que compõem a Hidrovia



Fonte: Autor, 2021.

De acordo com a Agência Nacional de Águas (2005), a navegação no rio Araguaia ocorre apenas no período de cheias, principalmente, entre os meses de dezembro e maio. A construção das barragens e eclusas de Santa Isabel - PA e

Araguanã - TO, ainda em fase de projeto, bem como obras de dragagem e derrocamento de pedral, criará condições para tornar a navegação viável o ano todo.

Ainda, segundo Godoy e Vieira (1999 *apud* ANTAQ, 2013), entre a foz e Santa Isabel (PA), cerca de 165 quilômetros da foz do rio, a navegação é viável, entretanto, demonstra algumas restrições de calado nos períodos de águas baixas. O comboio-tipo para o Araguaia detém calado de um metro e meio, boca de 16 metros e comprimento de 108 metros. Entre Santa Isabel - PA e Xambioá - TO, em um trecho de 60 quilômetros, encontram-se as quedas d'água de Santa Isabel, com 14 metros de desnível, as de Santa Cruz e Sumauma, e a de São Miguel, com 8 metros; tornando este intervalo inapropriado à navegação comercial, e deixando clara a necessidade da construção das barragens e eclusas de Santa Isabel. De Xambioá (TO) até Conceição do Araguaia (PA), em um curso de aproximadamente 280 quilômetros, o rio é navegável e possui balizamento e sinalização, mesmo com alguns travessões de rochas existentes. Por fim, como descreve a SUDAM (2016), o trecho entre Xambioá – TO e Aruanã – GO permite calado de 2,5 metros na época das cheias entre os meses de dezembro e junho.

b.3) Detalhamento das obras para navegação comercial permanente

Para a hidrovia ser plenamente navegável comercialmente, além do derrocamento do Pedral do Lourenço, no Estado do Pará, é necessário obras no rio Tocantins e Araguaia (ver tabela 4). Conforme descreve a SUDAM (2016), a hidrovia do Tocantins, a montante de Marabá - PA, possui oito projetos, sendo cinco eclusas. Assim, para melhorar a navegabilidade do Rio Tocantins entre Marabá e Estreito – MA deverá ser realizado obras de derrocamento, dragagem, sinalização e balizamento em uma extensão total de 288,5 km, bem como por ser indispensável para navegação, a barragem da usina hidrelétrica planejada de Serra Quebrada, assim como, deverá ser construída a eclusa para um desnível de 26,5 metros. Posteriormente, a montante do rio deve ser implantada a eclusa na Usina Hidrelétrica Estreito, com desnível de 22 metros. Seguindo a montante, caso o projeto da Usina Hidrelétrica de Tupiratins seja implantado, precisará construir a sua eclusa de transposição para um desnível de 22 metros. Em seguida, para permitir a navegação, necessitará de obras de derrocamento, dragagem, sinalização e balizamento em uma extensão total de 740 km, bem como a construção da eclusa da Hidrelétrica em

Lajeado, além de caso seja construída a planejada Usina Hidrelétrica de Ipueiras, deverá ser construído a sua eclusa.

Para o rio Araguaia serão necessárias obras de derrocamento, dragagem, sinalização e balizamento da foz até a Barra do Garças – MT, chegando a uma extensão total de 1500 km; é imprescindível a construção da planejada Usina Hidrelétrica de Santa Isabel – PA que permitirá boas condições de navegabilidade, assim como, será preciso uma eclusa para transposição e, caso se construa a Hidrelétrica em Araguaia – TO, será necessária a construção da eclusa.

Tabela 4: Investimentos para melhorar a navegabilidade

Rio	Descrição	Investimento (R\$ milhões)	Correção (IPCA)
Araguaia	Derrocamento, dragagem, sinalização e balizamento	1.778,20	2.227,31
	Construção da eclusa da UHE Santa Isabel (planejada)	157,30	193,03
	Construção da eclusa da UHE Araguaia (planejada)*	417,70	523,2
	Total	2.353,20	2.943,54
	Total por km	1,57	1,96
Tocantins	Derrocamento, dragagem, sinalização e balizamento	458,30	574,05
	Construção da eclusa da UHE Serra Quebrada (planejada)	607,5	760,93
	Construção da eclusa da UHE Estreito	716,1	896,96
	Construção da eclusa da UHE Tupiratins (planejada)*	377,1	472,34
	Construção da eclusa da UHE Lajeado	866,4	1.085,22
	Construção da eclusa da UHE Ipueiras (planejada)*	452,3	566,54
	Total	3.477,7	4356,04
	Total por km	3,38	4,23

* Implantação da UHE não é indispensável para a navegação

Fonte: SUDAM, 2016.

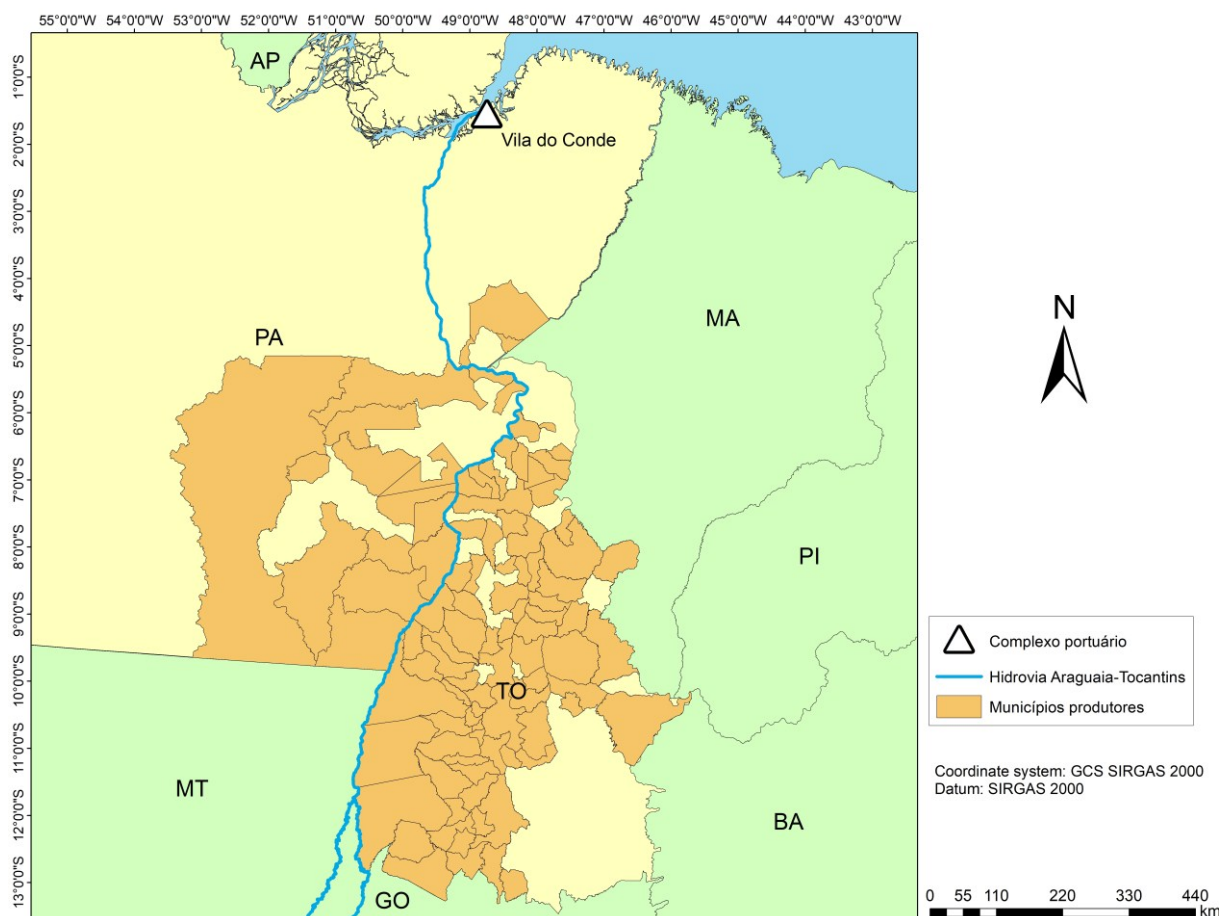
Desse modo, a Tabela 4 apresenta os custos das obras descritas nos rios Tocantins e Araguaia, sendo importante salientar que caso sejam construídas apenas as hidrelétricas necessárias para permitir a navegação, o valor do investimento descrito pela SUDAM (2016), já corrigido pelo IPCA, ficaria em R\$ 2.420,31 milhões

para o rio Araguaia e R\$ 3.317,16 milhões para o rio Tocantins, respectivamente R\$ 1,61 milhões por km e R\$ 3,23 milhões por km.

3.1.2 Centros de produção

A região objeto de estudo neste trabalho é composta por municípios dos Estados do Pará e Tocantins que estão na zona de influência da hidrovia Araguaia-Tocantins, assim como estão na zona de influência dos portos exportadores de Itaqui e de Vila do Conde. Com isso, as localidades integrantes fazem parte das Regiões Geográficas Intermediárias de Marabá e de Redenção no Pará, bem como das regiões intermediárias de Araguaína, Palmas e Gurupi. Neste estudo, a sede do município foi considerada como ponto geográfico de origem para o transporte da produção de soja do município, então, os pontos de origem estão nas áreas das sedes municipais, a Figura 13 mostra os municípios produtores considerados nesta pesquisa.

Figura 13: Municípios produtores de soja



Fonte: Autor, 2021.

Em 2019, a soja exportada, tendo o Pará como origem do produto, foi de 1.508.827,76 toneladas de soja, o que equivale a 85% da produção de 2019, do Estado do Pará. Em 2020, 2.226.511,63 toneladas foram exportadas, o que equivale a 25% acima da produção de 2019. Ademais, a exportação tendo o Tocantins como origem, foi de 2.213.290,72 toneladas em 2019 e 2.553.876,22 toneladas em 2020, o que equivale a 85% e 98% da produção de 2019, respectivamente.¹

A região, deste estudo, teve cerca de 1.014,8 mil hectares de área colhida de soja no ano de 2019, o que correspondeu a soma de 31,5% e 92% do total de área cultivada com soja no estado do Pará e Tocantins (IBGE, 2021), totalizando a quantidade de soja produzida nos municípios em 2.951.474,00 toneladas. Os dados de produção mais atualizados divulgados pelo IBGE são referentes ao ano de 2019. Entretanto, é provável que em 2021 as exportações da produção de soja dos Estados devam superar a quantidade produzida em 2019. Logo, com base nas projeções de crescimento da produção e das exportações de soja, foi considerado neste trabalho que toda a produção anual de 2019 dos municípios será destinada à exportação. Assim, os dados de produção de cada município foram retirados do levantamento realizado pelo IBGE (2021), e mostrados na Tabela 5.

Tabela 5: Produção Agrícola Anual por Município – 2019

Estado	Município	Produção (t)	Estado	Município	Produção (t)
PA	Abel Figueiredo	12.400,00	PA	Xinguara	360,00
PA	Água Azul do Norte	2.300,00	TO	Abreulândia	16.335,00
PA	Brejo grande do Araguaia	1.590,00	TO	Aliança do Tocantins	19.115,00
PA	Conceição do Araguaia	9.442,00	TO	Alvorada	60.000,00
PA	Cumaru do Norte	43.992,00	TO	Ananás	1.800,00
PA	Floresta do Araguaia	10.304,00	TO	Aparecida do Rio Negro	74.250,00
PA	Marabá	1.550,00	TO	Aragominas	1.200,00
PA	Parauapebas	1.620,00	TO	Araguacema	57.600,00
PA	Redenção	16.383,00	TO	Araguaçu	24.966,00
PA	Rio Maria	1.800,00	TO	Araguaína	1.200,00
PA	Rondon do Pará	105.000,00	TO	Arapoema	1.901,00
PA	Santa Maria das Barreiras	162.000,00	TO	Babaçulândia	5.940,00
PA	Santana do Araguaia	191.337,00	TO	Bandeirantes do Tocantins	750,00
PA	São Felix do Xingu	1.344,00	TO	Barra do Ouro	13.519,00
PA	São João do Araguaia	1.120,00	TO	Bom Jesus do Tocantins	39.150,00
PA	Tucumã	900,00	TO	Brasilândia do Tocantins	875,00

¹Os dados foram divulgados pela COMEX STAT (2021), sistema governamental que divulga dados do comércio exterior brasileiro baseado na declaração dos exportadores.

Tabela 5: Produção agrícola anual por município – 2019

(continuação)					
Estado	Município	Produção (t)	Estado	Município	Produção (t)
TO	Brejinho de Nazaré	67.620,00	TO	Monte do Carmo	105.640,00
TO	Campos Lindos	227.700,00	TO	Monte Santo do Tocantins	3.480,00
TO	Cariri do Tocantins	44.945,00	TO	Muricilândia	2.016,00
TO	Caseara	103.314,00	TO	Nova Olinda	897,00
TO	Centenário	11.100,00	TO	Nova Rosalândia	12.525,00
TO	Chapada de Areia	714,00	TO	Novo acordo	17.918,00
TO	Couto Magalhães	11.660,00	TO	Oliveira de Fátima	4.127,00
TO	Cristalândia	16.513,00	TO	Palmas	51.720,00
TO	Crixás do Tocantins	15.885,00	TO	Palmeirante	15.936,00
TO	Darcinópolis	29.088,00	TO	Palmeiras do Tocantins	900,00
TO	Darcinópolis	29.088,00	TO	Palmeirópolis	5.656,00
TO	Divinópolis do Tocantins	22.211,00	TO	Paraíso do Tocantins	3.715,00
TO	Dois irmãos do Tocantins	12.000,00	TO	Pedro Afonso	34.560,00
TO	Dueré	4.400,00	TO	Peixe	100.000,00
TO	Fátima	5.561,00	TO	Pequizeiro	714,00
TO	Figueirópolis	65.182,00	TO	Piraquê	14.544,00
TO	Formoso do Araguaia	4.687,00	TO	Porto nacional	132.800,00
TO	Goianorte	6.458,00	TO	Pugmil	7.442,00
TO	Goiatins	33.540,00	TO	Rio dos Bois	27.363,00
TO	Guaraí	37.483,00	TO	Rio Sono	8.910,00
TO	Gurupi	35.405,00	TO	Sandolândia	2.023,00
TO	Ipueiras	9.235,00	TO	Santa fé do Araguaia	22.560,00
TO	Itacajá	13.652,00	TO	Santa Maria do Tocantins	19.320,00
TO	Itapiratins	26.719,00	TO	Santa Rita do Tocantins	37.800,00
TO	Jaú do Tocantins	4.030,00	TO	Silvanópolis	60.480,00
TO	Lagoa da confusão	99.630,00	TO	Sucupira	45.650,00
TO	Lagoa do Tocantins	7.614,00	TO	Tabocão	13.866,00
TO	Lizarda	3.765,00	TO	Talismã	36.155,00
TO	Luzinópolis	1.080,00	TO	Tocantínia	10.728,00
TO	Marianópolis do Tocantins	84.630,00	TO	Tupirama	24.171,00
TO	Mateiros	130.275,00	TO	Tupiratins	651,00
TO	Miracema do Tocantins	30.089,00	TO	Wanderlândia	1.100,00
TO	Miranorte	29.921,00	TO	Xambioá	1.260,00

Fonte: IBGE, 2021.

3.1.3 Valores econômicos

Os dados dos valores de transbordo do modal rodoviário para o modal hidroviário (Rodo-Hidro) utilizados neste trabalho foram obtidos de duas referências. O trabalho de Cruz (2019), que obteve o valor praticado pelo mercado no ano de 2018, que foi de R\$ 25,00 por tonelada a tarifa da empresa Hidrovias do Brasil. A segunda referência, é a tarifa média padrão de transbordo fornecida e praticada pela empresa Unitapajós (2021), na sua Estação de Transbordo de Cargas de Miritituba no município de Itaituba – PA, sendo o mesmo valor de R\$ 25,00 por tonelada. Então, o

valor considerado para o transbordo intermodal Rodo-Hidro será de R\$ 25,00 por tonelada.

Para o modal ferroviário, os valores considerados são os praticados pela concessionária da Ferrovia Norte Sul. Que é a empresa VLI (2021a), conforme divulgado pela empresa, os valores praticados na ferrovia foram de 0,0758 R\$/t.km mais uma parcela fixa de 24,17 R\$/t no ano de 2018, já incluindo o transbordo da carga de soja, este valor também será considerado para a Ferrovia Paraense.

Os custos de transporte do modal hidroviário, foram obtidos através da ferramenta Simulador de Custo de Transporte, desenvolvida e disponibilizada pela Empresa de Planejamento e Logística S.A. – EPL. A ferramenta foi desenvolvida para servir de suporte para a elaboração do Plano Nacional de Logística (EPL, 2021). Os valores disponíveis são referentes ao custo médio para o transporte hidroviário de granel sólido agrícola no ano de 2018. Assim, a EPL considera três tipos de custos hidroviários (ver Tabela 6), variando de acordo com as restrições da via.

Tabela 6: Critérios para custo médio hidroviário

Restrição	Descrição
Baixa restrição	Representa o valor médio de custo operacional para o transporte de cargas em uma hidrovía com baixa restrição. Entende-se por baixa restrição a hidrovía onde não são necessários desmembramentos de comboio e o rio raramente ou nunca possui restrições operacionais à navegação, mesmo em períodos de seca. Como resultado, há baixa restrição ao porte ou à velocidade comercial média de navegação dos comboios.
Média restrição	Representa o valor médio de custo para o transporte de cargas em uma hidrovía com média restrição. Entende-se por média restrição a hidrovía onde são necessários poucos desmembramentos de comboio e o rio possui poucas restrições operacionais à navegação, concentradas principalmente em período de seca. Como resultado, há moderadas limitações ao porte e à velocidade comercial média de navegação dos comboios.
Alta restrição	Representa o valor médio de custo para o transporte de cargas em uma hidrovía com alta restrição. Entende-se por alta restrição a hidrovía onde são necessários vários desmembramentos de comboio para superação de obstáculos e o rio possui restrições operacionais à navegação, especialmente em períodos de seca. Como resultado, há severas limitações ao porte e à velocidade comercial média de navegação dos comboios.

Fonte: EPL, 2021b.

Para o frete rodoviário, os valores foram calculados com base na formulação matemática da tabela de preços mínimos do transporte rodoviário de cargas, estipulada pela Agência Nacional de Transportes Terrestres (2018). Os fretes foram

calculados para caminhões nove eixos, tendo peso total de setenta e quatro toneladas e carga líquida de cinquenta toneladas. Ademais, como os valores econômicos de transporte ferroviário e hidroviário são referentes aos praticados no ano de 2018, de forma a manter todos os valores econômicos obtidos para um mesmo ano, a tabela de frete utilizada é a formulada e praticada no ano de 2018.

3.2 Cenários

Alguns cenários foram considerados para análise deste trabalho, estes tiveram como base os dados da produção do ano de 2019. Assim como, a infraestrutura atual, que é composta pelos corredores rodoviários que vão até os portos, bem como a opção pela Ferrovia Norte Sul, com três estações para transbordo. Posteriormente, foram adicionadas as rotas propostas formadas pela Ferrovia Paraense S.A. e pela hidrovía Araguaia-Tocantins como alternativas de transporte intermodal.

Em seguida, foram elaborados cenários com base nos dados do ano de produção de 2019. No cenário base 2019.1 foi considerado apenas as rotas utilizadas pelo modal rodoviário e pelo modal ferroviário pela Ferrovia Norte Sul. No cenário 2019.2, além das rotas existentes foi incluída como alternativa intermodal proposta o projeto da Ferrovia Paraense S.A., tendo os locais planejados para o transbordo de soja, localizados nos municípios de Marabá – PA e Santana do Araguaia – PA.

Para a definição dos cenários com a hidrovía, alguns critérios foram considerados para a definição do trecho a ser estudado. Em virtude disso, a montante do encontro entre os rios Araguaia e Tocantins, o rio Araguaia é aquele que apresenta o menor custo por km para ser implantado, como é demonstrado na caracterização do estudo no item 3.1.1, sendo R\$ 1,61 milhões por km para o rio Araguaia e R\$ 3,23 milhões por km para o rio Tocantins. Ademais, o rio Tocantins a montante de Marabá terá em sua via no mínimo três eclusas para transposição, enquanto que o rio Araguaia pode ter apenas uma, o que reduz as restrições na Hidrovía.

Além disso, enquanto o rio Tocantins poderá atingir cerca 1028 km de rota navegável a montante de Marabá, o rio Araguaia poderá se estender por 1500 km, beneficiando os estados do Pará, Tocantins, Mato Grosso e Goiás. Portanto, o rio Araguaia é a alternativa que se apresenta mais viável para ser implantada em um primeiro momento. Conseqüentemente, considerando as particularidades para implantar a hidrovía, este trabalho adotou como alternativa de rota pela navegação

interior apenas o rio Araguaia, a montante do encontro dos dois principais rios que compõe a hidrovia em questão.

De acordo com o detalhamento da rota pela navegação interior, demonstrados na caracterização do estudo no item 3.1.1 e, conforme os exemplos citados pela EPL (2021a), este trabalho considerou a hipótese de a hidrovia ter média ou alta restrição. Assim, para o cenário 2019.3 foi incluída como alternativa intermodal a hidrovia com média restrição para navegação apenas no trajeto que será possível com o derrocamento do Pedral do Lourenço, ou seja, até o distrito de Santa Isabel – PA. A partir deste ponto, a montante, somente será possível manter a navegação comercial, caso seja implantada uma barragem de hidrelétrica com eclusa, conforme descrito pela ANTAQ (2013).

No cenário 2019.4, além das opções que compõe os outros cenários, foi acrescentada a alternativa pela navegação interior com a hidrovia implantada e plenamente viável até a divisa do Pará com o Mato Grosso. Além dessas alternativas, com base nos critérios de restrição da hidrovia da EPL, nas descrições da hidrovia apresentadas no item 3.1.1 que trata sobre as obras necessárias para minimizar as restrições na via, assim, para o cenário 2019.5, admitiu-se a hipótese que a montante de Marabá a hidrovia terá alta restrição. E suma, além das opções de transporte pela intermodalidade até o porto, para todos os cenários, se tem a opção de transporte até o porto apenas pelo modal rodoviário. Ademais, com base nas projeções de aumento das exportações, foi considerado os cenários de projeções com aumento de cerca de 30,1% para o ano de 2029 e de 54,5% como limite superior para cenários 2029s. A Tabela 7 apresenta os cenários analisados.

Para o escoamento da produção de soja dos municípios, foram estipuladas diversas alternativas de locais para o transbordo de carga ao longo da hidrovia. O propósito desta distribuição de opções de terminais pela via, é fornecer várias possibilidades de locais para terminais que irão compor as rotas de escoamento da produção. Os pontos dos terminais intermodais propostos foram estabelecidos de acordo com a sua infraestrutura logística existente e qualidade dos acessos, então, estão em espaços disponíveis nas proximidades de travessias já estabelecidas entre os dois estados, pontes e de municípios e distritos. A Figura 14 ilustra os pontos de transbordo propostos na hidrovia Araguaia-Tocantins.

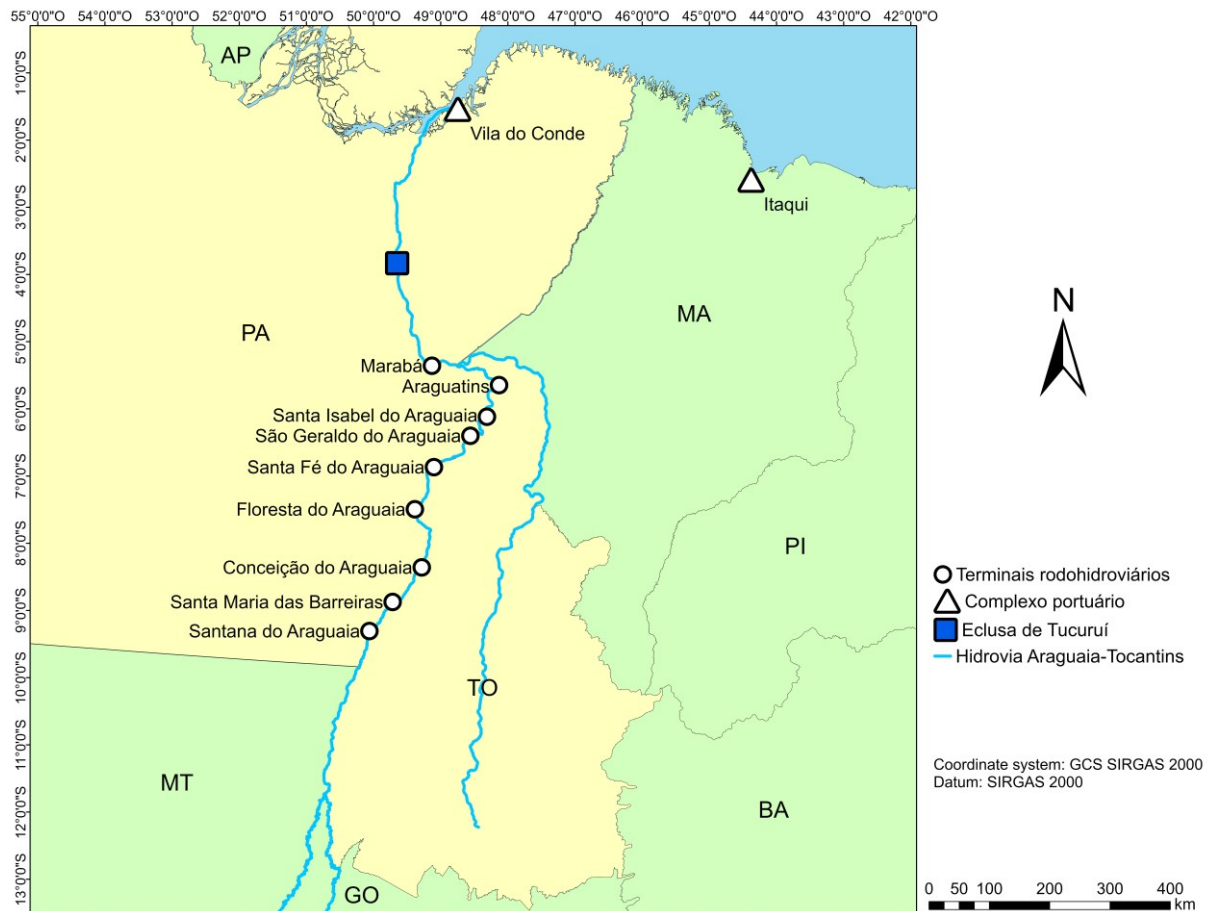
Como critério para manter o terminal de transbordo, buscou-se valores de movimentação que foram divulgados pelo anuário estatístico da ANTAQ (2021), com

as menores movimentações de soja embarcadas para navegação interior no ano de 2020, considerando a movimentação de carga no terminal exclusivamente para a navegação interior.

Tabela 7: Análise de cenários proposta

Cenários	Corredores	Produção (t)
2019.1	Rodovia + Ferrovia (norte-sul)	2019
2019.2	Incluir Ferrovia Paraense	2019
2019.3	Incluir Hidrovia (até Sta. Isabel)	2019
2019.4	Incluir Hidrovia (toda a extensão)	2019
2019.5	Considerar alta restrição em parte da Hidrovia	2019
2029.1 a 2029.5	Mesmas opções modais de 2019.1 a 2019.5	2029
2029s.1 a 2029s.5	Mesmas opções modais de 2029.1 a 2029.5	2029 – L. superior

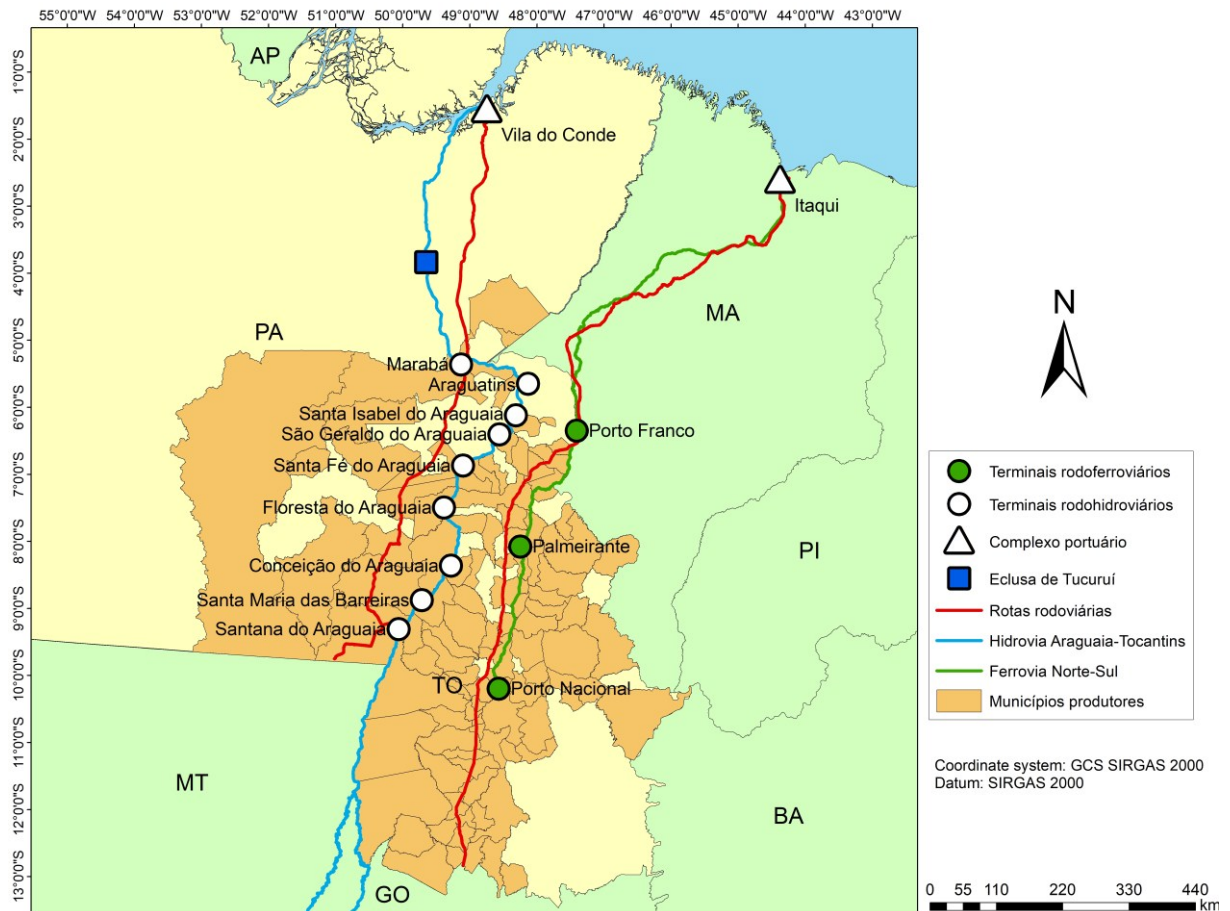
Figura 14: Pontos propostos para terminais hidroviários de transbordo.



Fonte: Autor, 2021.

Observou-se que, por exemplo, a ETC - Terminal Hidroviário de Porto Murtinho movimentou 52.932,00 toneladas de soja no ano de 2020. Com base nesse valor, foi considerado adotar o terminal com movimentação mínima de 52.932,00 toneladas para o modelo. A Figura 15 apresenta os principais corredores rodoviários utilizados para escoar a produção da região, bem como os principais rios que compõem a hidrovia em questão, além do trajeto e das estações da Ferrovia Norte Sul.

Figura 15: Principais vias para escoar a produção pela Rodovia, FNS e Hidrovia.



Fonte: Autor, 2021.

3.3 Modelagem

Este tópico apresenta o modelo aplicado neste estudo de caso. Dessa forma, a rede de transporte para o fluxo de escoamento de soja sentido exportação tem origem nos municípios produtores (centros de produção), pontos de transbordo nos terminais intermodais propostos e, ponto final no porto de exportação, com alternativas modais para ligar os nós da rede. Ademais, conforme descrito por Kazemi

e Szmerekovs (2015), a armazenagem nos locais de transbordo é feita em curto período, a operação tem o objetivo de transferir a carga para outro modal e, desta forma, os locais de transbordo são definidos como pontos de estoque zero.

O modelo foi fundamentado de acordo com o que foi exemplificado no tópico denominado Descrição do Modelo no item 2.3, aplicado ao problema deste trabalho. Com isso, o modelo foi elaborado com base na técnica de otimização utilizando a programação linear como ferramenta, aplicando os conceitos de modelos em rede, com as principais características das classes de problemas de programação linear para Problema de Transporte e Problema de Transbordo (ARENALES *et al.*, 2011; BELFIORE; FÁVERO, 2013; HILLER; LIEBERMAN, 2006).

O modelo de otimização linear terá o objetivo de minimizar o custo global de transporte. Assim, é composto pelos custos de transporte no modal rodoviário até o porto de destino e até o terminal intermodal; bem como pelos custos de transbordo intermodal rodo-hidro e, por sua vez; pelos custos no modal hidroviário e ferroviário, realizado do terminal até o porto. A Eq. 1 é a função objetivo Z empregada, com as restrições pertinentes dadas pelas equações (2), (3) e (4).

Então, cada somatória da função objetivo do modelo tem relação a um determinado aspecto do problema real estudado. Deste modo, a primeira somatória é referente aos custos envolvendo o transporte de soja dos centros de produção i aos portos exportadores j , a segunda está relacionada aos custos que envolvem enviar a soja para os terminais intermodais k , a terceira refere-se aos custos de transferência de carga nos terminais de transbordo rodo-hidro e a última compreende aos custos de transporte na alternativa intermodal por modo hidroviário ou ferroviário, de forma que para as ferrovias o custo de transporte já inclui o custo de transbordo.

$$\begin{aligned}
 Z = & \sum_{i=1}^I \sum_{j=1}^J SMP_{ij} * DMP_{ij} * CR_{ij} \\
 & + \sum_{i=1}^I \sum_{k=1}^K SMT_{ik} * DMT_{ik} * CT_{ik} + \sum_{i=1}^I \sum_{k=1}^K SMT_{ik} * TR_k \\
 & + \sum_{k=1}^K \sum_{j=1}^J ST_{kj} * DT_{kj} * CI_{kj}
 \end{aligned} \tag{1}$$

3.3.1 Restrições

Para garantir o escoamento da produção de soja dos municípios, tem-se a restrição em que a somatória da quantidade de soja transportada do centro de produção i para os portos de exportação j mais a somatória de toda a carga enviada até os terminais intermodais k deve ser igual à soma de toda a produção dos municípios, logo:

$$\sum_{j=1}^J SMP_{ij} + \sum_{k=1}^K SMT_{ik} = PRO_i, \quad \text{para todo } I \quad (2)$$

Ademais, tem-se a restrição de carga total de soja para exportação. Em que, a soma de toda carga dos centros de produção i enviada para os portos de exportação j mais a somatória de toda a soja transportada por ferrovia e hidrovía até o porto deve ser igual ao total exportado, assim:

$$\sum_{i=1}^I SMP_{ij} + \sum_{k=1}^K ST_{kj} = EXP_j, \quad \text{para todo } J \quad (3)$$

Também, tem-se a restrição que garante a transferência de toda a carga que chega no terminal de transbordo, isto é, toda a carga que chega no terminal deve sair, de forma que o terminal seja um ponto intermediário. Consiste, em que toda a quantidade de soja que chega no terminal de transbordo k menos a carga que sai deve ser igual a zero, ou seja:

$$\sum_{k=1}^K SMT_{ik} - \sum_{k=1}^K ST_{kj} = 0, \quad \text{para todo } K. \quad (4)$$

3.3.2 Parâmetros

Segue, a descrição dos índices, parâmetros e variáveis de decisão que compõe o modelo:

Índices:

i : Municípios produtores de grãos de soja, $i \in I$.

j : Porto exportador de grãos de soja, $j \in J$.

k : Terminais de transbordo intermodal de grãos de soja, $k \in K$.

I : Conjunto associado as origens (municípios produtores).

J : Conjunto associado aos portos de exportação.

K : Conjunto associado aos terminais de transbordo intermodal.

Parâmetros:

CR_{ij} : Custo de transporte rodoviário em reais por tonelada com origem no município produtor i e com destino ao porto exportador j .

CT_{ik} : Custo de transporte rodoviário em reais por tonelada com origem no município produtor i e com destino ao terminal de transbordo intermodal k .

CI_{kj} : Custo de transporte intermodal em reais por tonelada com origem no terminal de transbordo intermodal k e com destino ao porto exportador j .

DMP_{ij} : Distância em quilômetros entre o município produtor i e o porto exportador j .

DMT_{ik} : Distância em quilômetros entre o município produtor i e o terminal de transbordo intermodal k .

DT_{kj} : Distância em quilômetros entre o terminal de transbordo intermodal k e porto exportador j .

EXP_j : Exportação total de grãos do porto exportador j em toneladas por ano.

PRO_i : Produção total de grãos de soja destinados à exportação dos municípios produtores i em toneladas por ano.

TR_k : Custo para operação de transbordo no terminal intermodal rodo-hidro k em reais por tonelada.

Variáveis de decisão:

SMP_{ij} : Fluxo de grãos em toneladas no modal rodoviário com origem no município produtor i e com destino ao porto exportador j .

SMT_{ik} : Fluxo de grãos em toneladas no modal rodoviário com origem no município produtor i e com destino ao terminal de transbordo intermodal k .

ST_{kj} : Fluxo de grãos em toneladas no transporte intermodal com origem no terminal de transbordo intermodal k e com destino ao porto exportador j .

Desta maneira, procedeu-se a modelagem das rotas de transportes para os cenários elencados, com a apresentação dos resultados para os cenários das redes de transportes apresentados no capítulo 4.

4 RESULTADOS E DISCUSSÃO

Neste capítulo estão os resultados da modelagem desenvolvida. Vale ressaltar que, os dados monetários foram atualizados conforme o Índice Nacional de Preços ao Consumidor Amplo - IPCA (IBGE, 2021), cujo acumulado para correção foi de 13%, para o ano de 2021. Na formação da rede de transporte, no cenário que faz uso do modal hidroviário, foram determinados terminais hidroviários que melhor contribuem para o escoamento da produção agrícola, considerando o critério de movimentação anual mínima. No processo de otimização, admitiu-se que a oferta de terminais hidroviários disponíveis é alterada até que todos os terminais rodo-hidro disponíveis alcancem a movimentação mínima, com o menor custo total. Sendo esses terminais hidroviários determinados como resultado da otimização do custo total, obtendo-se a melhor configuração de rota para os diversos municípios estudados.

Para verificação dos resultados obtidos após a redução dos terminais hidroviários, o modelo foi novamente otimizado contendo como opção de transbordo rodo-hidro apenas os terminais hidroviários determinados para a configuração das rotas. Feito isso, os resultados da solução ótima se mantiveram, de onde pode-se deduzir como satisfatório o resultado do modelo para escolha dos terminais. Os resultados são apresentados e discutidos por estado e, na sequência, para a rede de transporte, independentemente da localização geográfica, e ainda por tipo de cenário.

4.1 Resultados no Estado do Pará

Para escoar 563.442,00 toneladas de soja do Estado do Pará, o cenário que fez uso da intermodalidade apresentou um resultado com menor valor final. Neste cenário, com transporte hidroviário com média restrição até Santana do Araguaia, obteve-se a redução de 42% em relação aos valores do cenário-base 2019.1. A economia total foi de R\$ 39.050.236,81 para escoar a produção de soja do Estado.

Cenário 2019.1: Nesse cenário a produção de soja do Pará foi escoada tanto pelo modal rodoviário quanto através do transporte intermodal pela Ferrovia Norte Sul. O valor total resultou em R\$ 92.181.787,12. Com isso, os municípios de Conceição do Araguaia e de Santa Maria das Barreiras foram os únicos que optaram pela Ferrovia

Norte Sul, a Tabela 8 mostra a quantidade de carga, em toneladas, enviada ao terminal de transbordo no cenário 2019.1.

Tabela 8: Envio de carga para estações de transbordo – Pará – 2019.1

Tipo	Terminal intermodal	Movimentação (Ton.)	%
Ferroviário	Palmeirante – TO	171.442,00	30,4

Cenário 2019.2: quando adicionada a alternativa pela Ferrovia Paraense S.A., apenas Rondon do Pará envia direto para o porto exportador, enquanto que os outros centros de produção optaram pelo transporte intermodal, dessa forma o valor total de frete para transportar a soja ficou em R\$ 82.837.810,82, atingindo uma redução de 10%. Assim, os municípios de Santa Maria das Barreiras e Santana do Araguaia escoaram sua produção pelo terminal ferroviário de Santana do Araguaia, já Conceição do Araguaia ainda utiliza o terminal de transbordo de Palmeirante - TO. Por fim, os outros municípios utilizaram a rota intermodal pelo terminal de Marabá. A Tabela 9 mostra a quantidade escoada, em toneladas, por cada terminal rodo-ferro.

Tabela 9: Envio de carga para estações de transbordo – Pará - 2019.2

Tipo	Terminal intermodal	Movimentação (Ton.)	%
Ferroviário	Marabá – PA	95.663,00	16,98
Ferroviário	Palmeirante – TO	9.442,00	1,68
Ferroviário	Santana do Araguaia – PA	353.337,00	62,71

Cenário 2019.3: foi adicionada a alternativa hidroviária até o terminal de Santa Isabel, e os resultados demonstraram um custo total com frete de R\$ 78.297.166,85, alcançando uma redução de 5,5% em relação ao cenário de 2019.2 e, cerca de 15%, quando comparado ao cenário 2019.1. Neste cenário, o terminal ferroviário de Santana do Araguaia foi a única opção pela Ferrovia Paraense, este, foi utilizado para o transporte da soja de Santana do Araguaia. Os demais municípios tiveram a produção transportada para o Terminal Rodo-Hidro de Marabá. A Tabela 10 apresenta a movimentação, em toneladas, nos terminais no cenário 2019.3.

Tabela 10: Envio de carga para estações de transbordo – Pará - 2019.3

Tipo	Terminal intermodal	Movimentação (Ton.)	%
Hidroviário	Marabá	372.105,00	66,04
Ferrovário	Santana do Araguaia – PA	191.337,00	33,96

Cenário 2019.4: nesse cenário a composição da rede de transporte consistiu na maior parte por modo hidroviário, com complementação do modo rodoviário. A Tabela 11 apresenta os fretes hidroviários resultantes, de alguns dos municípios, no cenário 2019.4, sendo que o custo hidroviário inclui o custo de transbordo. Ademais, os resultados deste cenário demonstraram que todos os municípios paraenses escolheram o transporte intermodal via hidrovía para compor a rota para escoar a produção agrícola, excluindo, então, todas opções pelo modal ferroviário.

Tabela 11: Frete Hidroviário – Pará - 2019.4

Município	(R\$/t)
Água Azul do Norte	R\$ 66,23
Cumaru do Norte	R\$ 73,10
Parauapebas	R\$ 52,57
Rio Maria	R\$ 66,23
Rondon do Pará	R\$ 52,57
Santa Maria das Barreiras	R\$ 76,02
Santana do Araguaia	R\$ 78,39
São Felix do Xingu	R\$ 66,23
São João do Araguaia	R\$ 52,57
Tucumã	R\$ 66,23

No cenário 2019.4 tem-se, por fim, uma diminuição no valor de 32% em relação ao cenário 2019.3, resultando em R\$ 53.131.550,31. Com isso, a maior parcela dos custos é formada pela soma dos custos de transbordo intermodal mais os custos do transporte hidroviário. A Tabela 12 demonstra a movimentação, em toneladas, nos terminais.

Observou-se, também, que Conceição do Araguaia, Cumaru do Norte, Floresta do Araguaia e Redenção escoam a produção pelo terminal rodo-hidro de Conceição do Araguaia. Os centros de produção de Xinguara, São Felix do Xingu, Tucumã, Água Azul do Norte e Rio Maria enviaram ao terminal de Santa fé do Araguaia. Já, Santa Maria das Barreiras escoou pelo terminal localizado em seu município e Santana do

Araguaia, por sua vez, pelo terminal hidroviário de Santana do Araguaia. Os demais centros de produção escoaram pelo terminal rodo-hidro de Marabá.

Tabela 12: Movimentação nos terminais de transbordo – Pará – 2019.4

Tipo	Terminal intermodal	Movimentação (Ton.)	%
Hidroviário	Marabá	123.280,00	21,88
Hidroviário	Santa Fé do Araguaia	6.704,00	1,19
Hidroviário	Conceição do Araguaia	80.121,00	14,22
Hidroviário	Santana Maria das Barreiras	162.000,00	28,75
Hidroviário	Santana do Araguaia – PA	191.337,00	33,96

Cenário 2019.5: Se tem os resultados gerados na alternativa que considera a hidrovía com restrição alta, a partir de Marabá. Neste, os custos se elevam em relação ao cenário de 2019.4. O resultado do cenário foi de R\$ 65.002.868,99, tendo aumento de 22% acima de 2019.4 e, redução de 17% em relação ao cenário 2019.3. Assim, a Tabela 13 apresenta a movimentação, em toneladas nos terminais no cenário 2019.5. Neste cenário, apenas os municípios Redenção, Floresta do Araguaia, Cumaru do Norte, Conceição do Araguaia, Santa Maria das Barreiras e Santana do Araguaia não escoam pelo terminal hidroviário de Marabá.

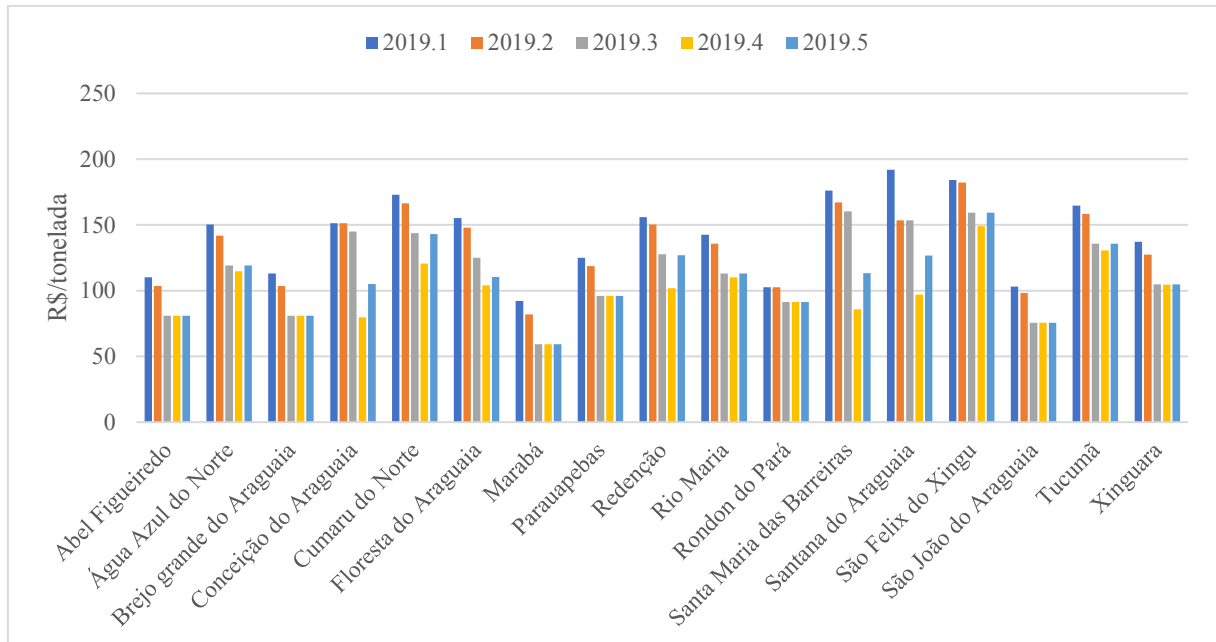
Tabela 13: Movimentação nos terminais de transbordo no Pará – 2019.5

Tipo	Terminal intermodal	Movimentação (Ton.)	%
Hidroviário	Marabá	129.984,00	23,07
Hidroviário	Floresta do Araguaia	54.296,00	9,64
Hidroviário	Conceição do Araguaia	25.825,00	4,58
Hidroviário	Santa Maria das Barreiras	162.000,00	28,75
Ferrovário	Santana do Araguaia – PA	191.337,00	33,96

Os centros de produção que apresentaram menor diferença de valor no cenário com melhor desempenho, o cenário 2019.4, em relação ao cenário-base 2019.1, foram em Tucumã com 20,8%, São Felix do Xingu em 18,95% e de 11% em Rondon do Pará. Todavia, Rondon do Pará tem a segunda menor distância rodoviária até o porto no cenário 2019.1, além disso Tucumã e São Felix do Xingu estão longes da margem da Hidrovía. A Figura 16, mostra os resultados do custo de transporte para o

escoar a soja nos diversos municípios estudados em diferentes cenários até o momento explicitados.

Figura 16: Custo por tonelada transportada dos municípios em cada cenário.



As maiores diferenças entre os valores de frete dos cenários ocorreram em Santana do Araguaia e Santa Maria das Barreiras, com diminuições de 49% e 51% nos custos de transporte, respectivamente. Os dois municípios tem predominância do modo hidroviário no cenário 2019.4, e estão próximos da hidrovia, bem como são os centros de produção mais distantes do porto. São expressos na Tabela 14 em termos de redução percentual em relação a 2019.1 por cenário e para cada centro de produção.

O custo total em relação a movimentação de soja no cenário 2019.1, ou seja, o valor para o transporte de uma tonelada de soja foi de 163,60 R\$/t, no cenário 2019.2 foi de 147,02 R\$/t, em 2019.3 resultou em 138,96 R\$/t, em 2019.4 foi de 94,30 R\$/t e no cenário 2019.5 de 115,37 R\$/t.

Ademais, levando em consideração os valores de cada rota, apresentados na Figura 16, o frete por tonelada médio dos municípios para escoar a soja até o porto no cenário 2019.1 foi de 142,89 R\$/t; no cenário 2019.2 foi de 134,78 R\$/t; no cenário 2019.3 resultou em 115,97 R\$/t; no cenário 2019.4 de 98,96 R\$/t e, no cenário 2019.5, a média foi de 108,34 R\$/t. Portanto, o cenário 2019.4 apresentou resultados com os menores valores.

Tabela 14: Reduções no frete para escoar a produção no Pará, %

Municípios	2019.2	2019.3	2019.4	2019.5
Abel Figueiredo	5,9	26,5	26,5	26,5
Água Azul do Norte	5,6	20,7	23,7	20,7
Brejo grande do Araguaia	8,3	28,3	28,3	28,3
Conceição do Araguaia	0,0	4,1	47,2	30,5
Cumarú do Norte	3,8	16,9	30,3	17,4
Floresta do Araguaia	4,8	19,4	32,9	28,9
Marabá	11,1	35,7	35,7	35,7
Parauapebas	5,1	23,3	23,3	23,3
Redenção	3,6	18,2	34,8	18,6
Rio Maria	4,8	20,7	22,8	20,7
Rondon do Pará	0,0	11,1	11,1	11,1
Santa Maria das Barreiras	5,1	9,1	51,4	35,7
Santana do Araguaia	20,1	20,1	49,4	34,0
São Félix do Xingu	1,1	13,4	19,0	13,4
São João do Araguaia	4,6	26,6	26,6	26,6
Tucumã	3,8	17,6	20,8	17,6
Xinguara	7,1	23,7	23,9	23,7

4.2 Resultados no Estado do Tocantins

Para o Estado do Tocantins, o cenário que fez uso da intermodalidade com transporte aquaviário apresentou um resultado com menor valor final. Este é o cenário com transporte hidroviário com média restrição, o cenário 2019.4, apresentou uma redução de 18,6% em relação aos custos do cenário de 2019.1. Obtendo, então, uma economia total de R\$ 75.788.246,06 para escoar a produção de soja do Estado.

No cenário 2019.1 apenas um município envia a soja direto ao porto, o restante da produção do Estado do Tocantins foi escoada pelo modal ferroviário através do transporte intermodal pela Ferrovia Norte Sul. O valor do custo total resultou em R\$ 406.703.841,57. Assim, o terminal de Porto Franco - TO obteve movimentação total de 388.254,00 toneladas de soja, e Palmeirante - TO atingiu movimentação de 507.721,00 toneladas.

O terminal mais distante do porto, que é o terminal de Porto Nacional - TO, resultou na maior carga, alcançado a movimentação de 1.490.797,00 toneladas de grãos de soja. O anexo A apresenta por quais terminais os municípios escoaram a sua produção em cada cenário.

Quando adicionada a alternativa pela Ferrovia Paraense S.A. no cenário 2019.2, o valor total para transportar a soja ficou em R\$ 403.810.420,20, atingindo

redução de 0,71%. A Ferrovia Paraense recebeu a produção pelos terminais de Marabá e Santana do Araguaia, sendo que, o primeiro recebeu carga de apenas de um município do Estado do Tocantins, o que foi pouco benéfico. A Tabela 15 mostra a quantidade escoada por cada terminal rodo-ferro.

Tabela 15: Envio de carga para terminais de transbordo no Tocantins – 2019.2

Tipo	Terminal intermodal	Movimentação (Ton.)	%
Ferroviário	Marabá – PA	1.260,00	0,05
Ferroviário	Santana do Araguaia – PA	245.544,00	10,28
Ferroviário	Porto Franco – MA	388.254,00	16,26
Ferroviário	Palmeirante – TO	346.807,00	14,52
Ferroviário	Porto Nacional – TO	1.406.167,00	58,88

No cenário 2019.3 foi incluída a alternativa hidroviária até o terminal de Santa Isabel, e os resultados demonstraram um custo total de R\$ 394.771.683,51, alcançando uma redução de 2,93% em relação ao cenário de 2019.1. O terminal hidroviário de Marabá recebeu uma parte da carga, entretanto o terminal de Santa Isabel foi a alternativa hidroviária que escoou mais carga do Estado, com municípios migrando para o transporte hidroviário, em detrimento do modal ferroviário. A Tabela 16 apresenta a movimentação nos terminais.

Tabela 16: Envio de carga para estações de transbordo – Tocantins – 2019.3

Tipo	Terminal intermodal	Movimentação (Ton.)	%
Hidroviário	Marabá	57.600,00	2,41
Hidroviário	Santa Isabel	756.421,00	31,68
Ferroviário	Santana do Araguaia – PA	187.944,00	7,87
Ferroviário	Porto Nacional – TO	1.386.067,00	58,04

No cenário 2019.4, o transporte é composto por rotas via modo hidroviário. Os resultados deste cenário demonstraram que todos os municípios escolheram o transporte intermodal por hidrovias, para compor a rota e escoar a produção agrícola, excluindo opções por ferrovia.

O cenário 2019.4 teve diminuição de 16% em relação ao cenário 2019.3, resultando em um valor de R\$ 330.915.595,51. Com isso, a maior parcela dos fretes

é formada pela soma dos custos de transbordo intermodal rodo-hidro mais os custos do transporte hidroviário. A Tabela 17 demonstra a movimentação nos terminais.

Tabela 17: Envio de carga para estações de transbordo – Tocantins - 2019.4

Tipo	Terminal intermodal	Movimentação (Ton.)	%
Hidroviário	Santa Isabel	317.849,00	13,31
Hidroviário	Santa Fé do Araguaia	56.431,00	2,36
Hidroviário	Conceição do Araguaia	360.320,00	15,09
Hidroviário	Santa Maria das Barreiras	163.868,00	6,86
Hidroviário	Santana do Araguaia	1.489.564,00	62,38

Nos resultados gerados na alternativa em que se considera a hidrovía com média restrição até o terminal hidroviário de Marabá e, restrição alta a montante de Marabá, ou seja, no cenário 2019.5, os custos se elevam em relação ao cenário de 2019.4. O resultado do cenário para o Estado do Tocantins foi de R\$ 382.650.807,97, com aumento de 15,6% acima de 2019.4 e, a redução de 3% em relação a 2019.3. A Ferrovia Paraense não é opção para escoar a produção do Estado do Tocantins. A Tabela 18 apresenta a movimentação nos terminais.

Tabela 18: Envio de carga para estações de transbordo – Tocantins - 2019.5

Tipo	Terminal intermodal	Movimentação (Ton.)	%
Hidroviário	Marabá	35.256,00	1,48
Hidroviário	Sta. Isabel	60.948,00	2,55
Hidroviário	Floresta do Araguaia	21.971,00	0,92
Hidroviário	Conceição do Araguaia	290.813,00	12,18
Hidroviário	Santa Maria das Barreiras	146.815,00	6,15
Hidroviário	Santana do Araguaia	845.891,00	35,42
Ferrovário	Porto Franco – TO	262.140,00	10,98
Ferrovário	Palmeirante – TO	56.958,00	2,39
Ferrovário	Porto Nacional – TO	667.240,00	27,94

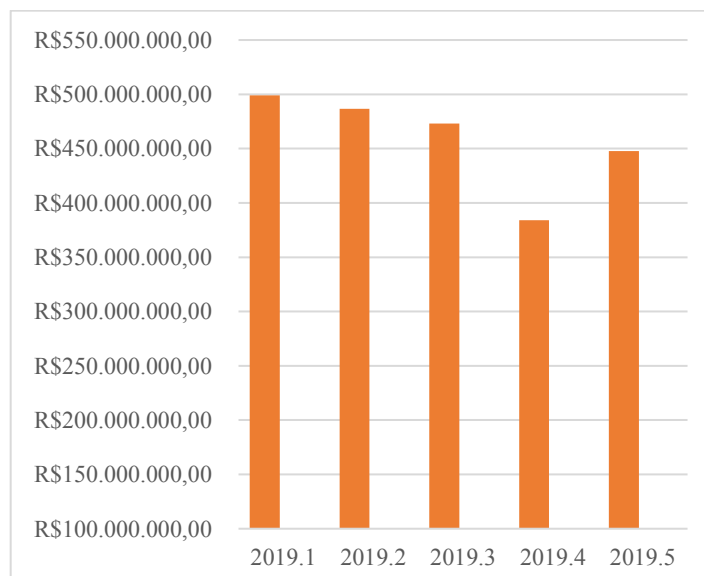
Analisando o custo total em relação a movimentação de soja do Estado do Tocantins, no cenário 2019.1, o valor para o transporte de uma tonelada de soja foi de 170,31 R\$/t; no cenário 2019.2 foi de 169,10 R\$/t; em 2019.3 resultou em 165,31 R\$/t; no cenário 2019.4 em 138,57 R\$/t e no cenário 2019.5 de 160,24 R\$/t.

Considerando os valores de cada rota, conforme mostrados no anexo B, o frete por tonelada médio dos municípios para escoar a soja até o porto no cenário 2019.1 foi de 162,31 R\$/t; no cenário 2019.2 foi de 161,85 R\$/t, em 2019.3 resultou em 152,38 R\$/t; de 128,95 R\$/t no cenário 2019.4 e de 151,37 R\$/t no cenário 2019.5. Portanto, o cenário 2019.4 apresentou resultados com valores menores. Ainda, no Anexo C tem-se as reduções percentuais em relação a 2019.1 por cenário e centro de produção.

4.3 Resultados gerais

A Figura 17 apresenta os resultados gerados pelo modelo, referentes ao valor total da rede de transporte, resultantes em cada cenário desta pesquisa. Com isso, o cenário que fez uso da intermodalidade com a hidrovía apresentou um resultado com menor valor final. O cenário 2019.4, com transporte hidroviário considerado com média restrição, apresentou uma redução de 23% em relação aos custos do cenário 2019.1. Obtendo-se, então, uma economia total de R\$ 114.838.482,87 para escoar a produção de soja. O segundo cenário, com maior redução foi 2019.5, que considerou a hipótese de parte da hidrovía ter alta restrição, obteve uma economia de R\$ 51.231.951,73, o que representa uma redução de 10,3% em relação a 2019.1. No cenário 2019.2, que apresenta apenas a alternativa pela FPA, ainda obteve economia de R\$ 12.237.397,67.

Figura 17: Resultado monetário em cada cenário.



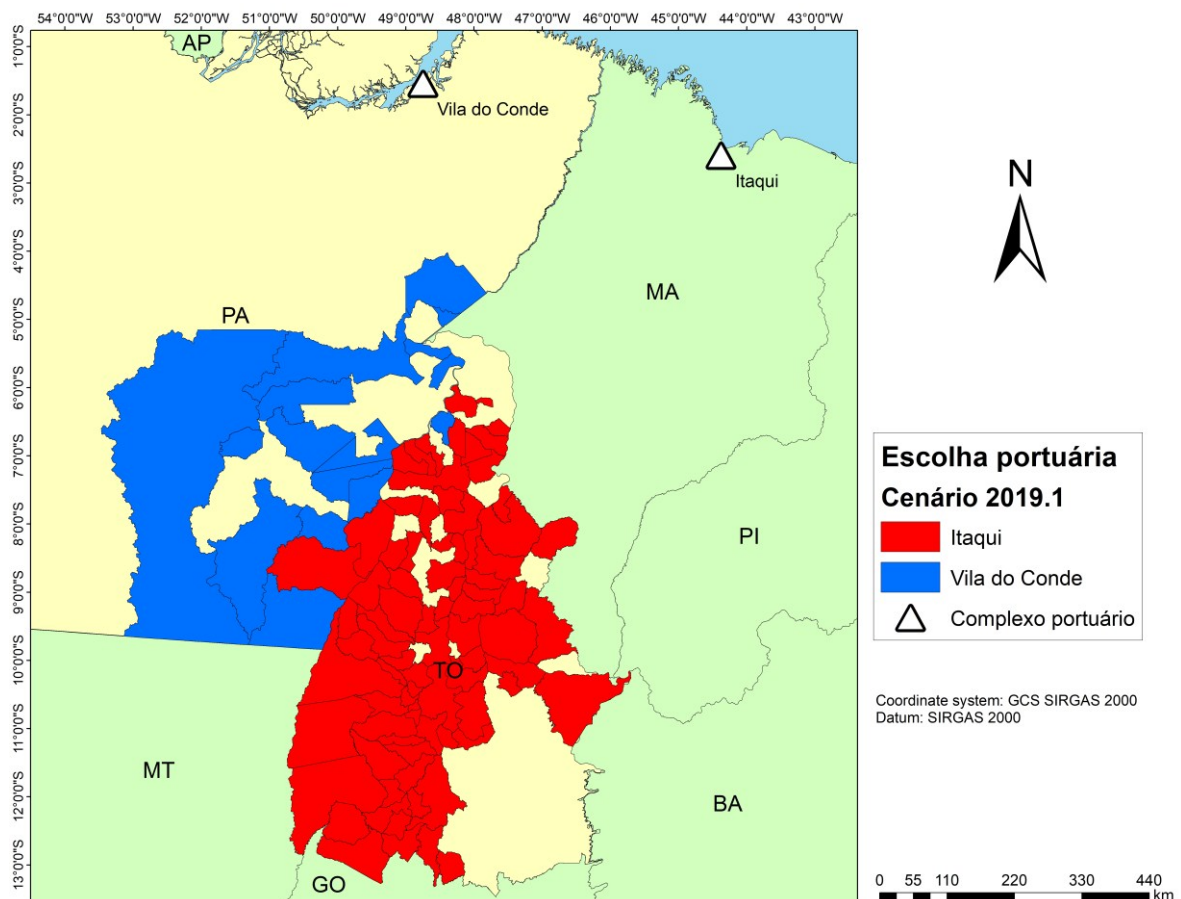
A Tabela 19 mostra a variação de carga exportada pelos complexos portuários de Vila do Conde - VLC e Itaqui. No cenário 2019.1 apenas 13,3% da produção tem como destino para exportação o porto de VLC. Entretanto, em seguida, no cenário 2019.2, apresenta-se o crescimento de 103,6% nas exportações de soja.

Tabela 19: Exportação de soja por complexo portuário

Cenário	Vila do Conde		Itaqui	
	Toneladas	%	Toneladas	%
2019.1	393.260,00	13,3	2.558.214,00	86,7
2019.2	800.804,00	27,1	2.150.670,00	72,9
2019.3	1.565.407,00	53,0	1.386.067,00	47,0
2019.4	2.951.474,00	100,0		0,00
2019.5	1.965.136,00	66,6	986.338,00	33,4

No cenário 2019.3, Vila do Conde, teve aumento de 95,5% em relação a 2019.2 e de 298,1% em relação ao cenário-base 2019.1. Na Figura 18, se ilustra a zona de influência de cada complexo portuário e por quais portos os municípios escoaram nos cenários 2019.1.

Figura 18: Exportação de soja por complexo portuário – 2019.1

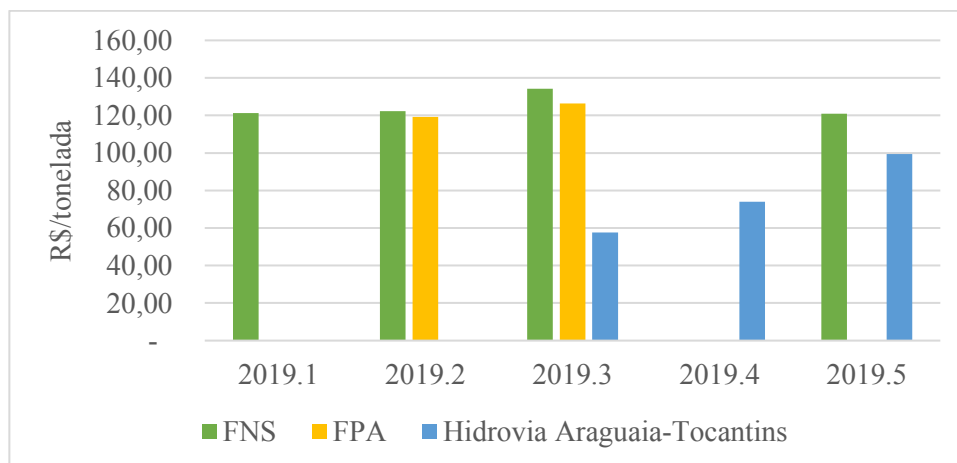


Ainda, o cenário 2019.4 mostrou crescimento das exportações de Vila do Conde em 88,5% em relação a 2019.3 e, de 650,5% de aumento de toneladas de soja em comparação a 2019.1. Em seguida, o cenário 2019.5 reduziu em 33,4% a movimentação em relação 2019.4, mas apresentou aumento de 399,7% em comparação a 2019.1.

Dessa forma, através da figura 18, pode-se identificar que a alternativa intermodal pela Ferrovia Norte Sul é cada vez mais competitiva quanto mais distante dos portos está localizado o município. Entretanto, pela tabela 19, verifica-se o redirecionamento das exportações de soja para Vila do Conde. Assim, devido a inclusão das alternativas intermodais, a maior parte da soja passa a ser exportada pelo Estado do Pará. Com isso, quando modificada a infraestrutura se tem a expansão da área de influência do complexo portuário de Vila do Conde.

Nos cenários em que se inclui como opção intermodal o transporte hidroviário, o modal obtém o menor custo por tonelada. Como demonstra a Figura 19, para o cenário 2019.3, resultou em um valor de 57,63 R\$/tonelada, com o custo de transbordo compondo uma parcela de 49% do valor.

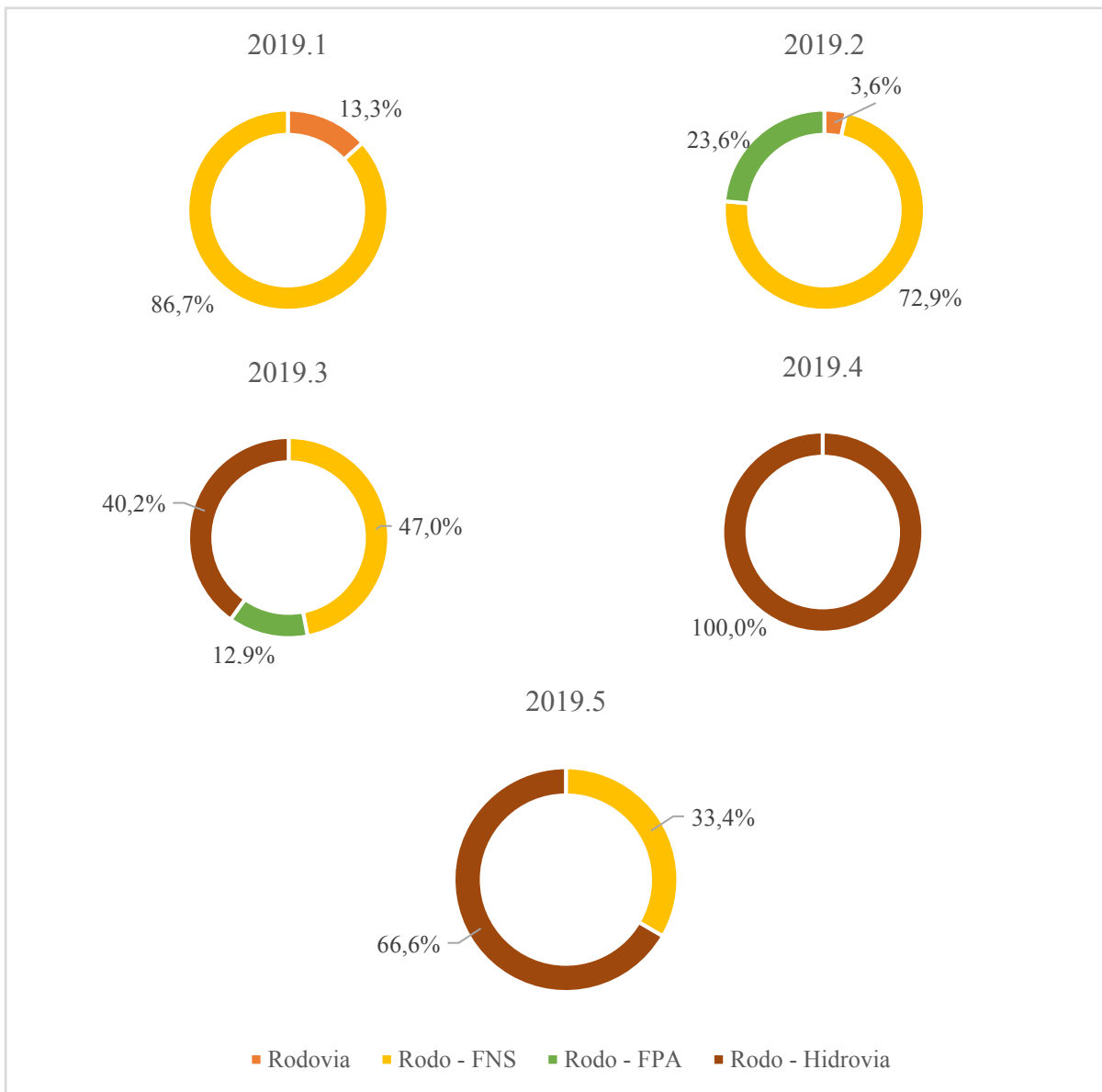
Figura 19: Custo por tonelada transportada na FNS, na FPA e na Hidrovia.



Ademais, no cenário de 2019.4, o custo por tonelada movimentada foi de 74,07 R\$/t; sendo o custo de transbordo rodo-hidro 38% do total. No cenário 2019.5, o custo por tonelada movimentada se elevou para 99,41 R\$/t, um aumento de 34%, entretanto 18% menor que o resultado da FNS, e 28,4% desse valor representa o custo de transbordo rodo-hidro.

A Figura 20 apresenta a porcentagem de carga transportada, por modal, até o porto. Tem-se a porcentagem escoada por somente o modo rodoviário, pelo transporte intermodal rodo-ferro pela Ferrovia Norte Sul - FNS e pela Ferrovia Paraense - FPA, além da alternativa intermodal rodo-hidro, pela Hidrovia Araguaia-Tocantins.

Figura 20: Parcela da soja escoada por cada opção intermodal



Desse modo, as alternativas intermodais propostas, a Ferrovia Paraense e a Hidrovia Araguaia-Tocantins, apresentam crescimento na participação chegando a transportar 53% da soja no cenário 2019.3, até a Hidrovia atingir 100% do total de soja transportada em 2019.4. Entretanto, a FNS só não detém parte da movimentação no

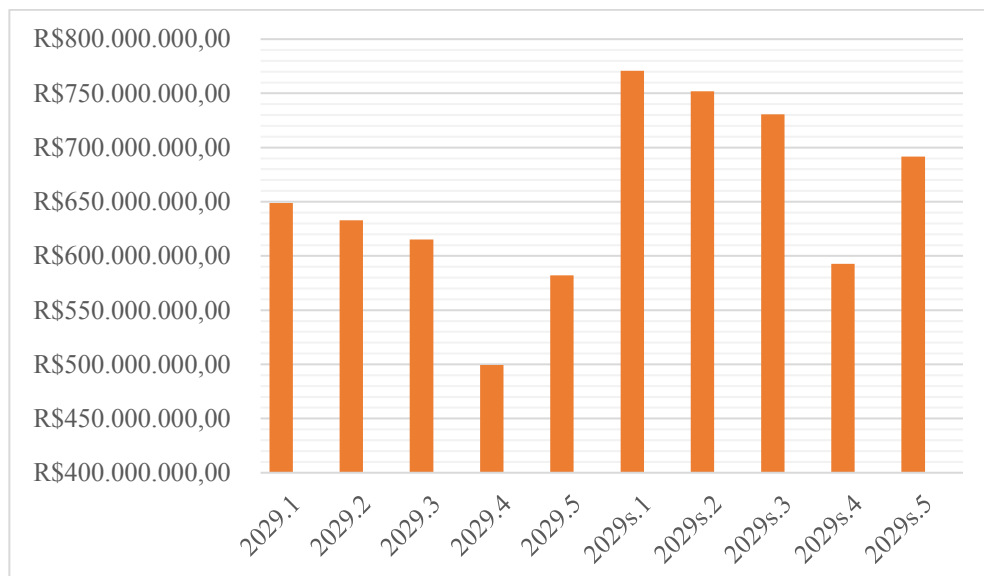
cenário 2019.4 quando se considera média restrição para o custo hidroviário. Em 2019.5, mesmo parte da hidrovía com alta restrição, ainda é a opção que mais transporta soja.

Analisando o custo total por tonelada transportada de soja, no cenário 2019.1 o valor para o transporte de uma tonelada de soja foi de 169,03 R\$/t; no cenário 2019.2 foi de 164,88 R\$/t; no cenário em 2019.3 o resultado foi de 160,28 R\$/t; no cenário 2019.4 de 130,12 R\$/t e no cenário 2019.5 de 151,67 R\$/t.

4.4 Resultados para a projeção em 2029

Para as projeções de aumento de produção, o cenário com transporte hidroviário média restrição, ou seja, o cenário 2029.4, apresentou uma economia total de R\$ 149.358.930,81 e, o cenário 2029.5 teve economia de R\$ 66.632.276,42, no valor total de custo para escoar a produção de soja. Para a projeção no limite superior, o cenário 2029s.4 apresentou uma economia total de R\$ 178.122.760,65 e o cenário 2029s.5 teve economia de R\$ 79.193.422,06 no valor total de custo total para escoar a produção de soja. A Figura 21 mostra os resultados em cada cenário.

Figura 21: Resultado monetário em cada cenário.



Desta forma, identifica-se o aumento dos custos à medida que cresce a produção de soja. Bem como, caso seja construída uma nova infraestrutura com as novas alternativas de transporte intermodal propostas, ao longo de dez anos podem

ser economizados centenas de milhões de reais, apenas para transportar este produto. A Tabela 20 mostra os terminais hidroviários determinados em cada cenário.

Tabela 20: Terminais hidroviário determinados: 2029 – 2029s

Terminais	2029.3	2029s.3	2029.4	2029s.4	2029.5	2029s.5
Marabá	X	X	X	X	X	X
Araguatins		X		X		
Santa Isabel	X	X	X	X	X	X
São Geraldo do Araguaia						X
Santa fé do Araguaia			X	X		
Floresta do Araguaia				X	X	X
Conceição do Araguaia			X	X	X	X
Santa Maria das Barreiras			X	X	X	X
Santana do Araguaia			X	X	X	X

Ademais, analisando o custo total por tonelada transportada de soja, ocorreram mudanças no cenário 2029s.3, 2029s.4 e 2029s.5, em que o valores para o transporte de uma tonelada de soja foram de 160,21 R\$/t, 129,97 R\$/t e 151,66 R\$/t, respectivamente. Então, observa-se a redução do custo por tonelada entre os cenários 2019 e 2029s, por conta da mudança nas rotas. Os custos por tonelada movimentada se mantêm nos outros cenários de 2029 visto que não há alteração nas rotas. A Tabela 21 mostra a variação de carga exportada pelos complexos portuários de Vila do Conde e Itaqui.

Tabela 21: Exportação de soja por complexo portuário: 2029 – 2029s

Cenário	Vila do Conde		Itaqui	
	Produção (t)	%	Produção (t)	%
2029.1	511.473,96	13,3	3.327.213,13	86,7
2029.2	1.041.525,68	27,1	2.797.161,40	72,9
2029.3	2.035.598,34	53,0	1.802.718,74	47,0
2029.4	3.838.687,08	100,0	-	0,0
2029.5	2.555.855,88	66,6	1.282.831,20	33,4
2029s.1	607.665,35	13,3	3.952.952,27	86,7
2029s.2	1.237.402,34	27,1	3.323.215,28	72,9
2029s.3	2.418.866,90	53,0	2.141.750,73	47,0
2029s.4	4.560.617,63	100,0	-	0,0
2029s.5	3.057.623,22	67,0	1.502.994,41	33,0

Verifica-se que à medida que se tem oferta de terminal próximo do centro de produção, o custo por tonelada movimentada é reduzido. Ocorre que nas projeções, de 2029s.3, 2029s.4 e 2029s.5 os municípios que antes escoavam por outros

terminais, passaram a utilizar as rotas formadas pelos terminais hidroviários de Araguatins, Floresta do Araguaia e São Geraldo do Araguaia. Dessa forma, os municípios próximos a esses terminais reduzem o preço do frete por tonelada para exportar a produção.

4.5 Síntese

Este item apresenta uma síntese dos resultados. Contendo, então, os principais resultados para o melhor entendimento do objeto de estudo. Dessa forma, a tabela 22 apresenta o ganho monetário no custo de transporte para os cenários do ano 2019 em relação ao cenário base 2019.1, ou seja, a economia que pode ser alcançada caso sejam implementadas as alternativas intermodais.

Tabela 22: Economia por cenário - 2019

	2019.2	2019.3	2019.4	2019.5
Economia	R\$ 12.237.397,67	R\$ 25.816.812,89	R\$ 114.838.482,87	R\$ 51.231.951,73

Ademais, outro fator relevante para análise do problema é a movimentação por transporte intermodal. Desse modo, a tabela 23 mostra a quantidade de soja transportada até os portos de exportação, em toneladas, por opção modal nos cenários do ano de 2019. Portanto, resumidamente, os resultados demonstram a preferência pela hidrovía, assim como, a expansão da zona de influência do complexo portuário de Vila do Conde e a redução do frete ao se implantar as alternativas intermodais propostas.

Tabela 23: Movimentação por opção modal (em toneladas) - 2019

	2019.1	2019.2	2019.3	2019.4	2019.5
Rodovia	393.260,00	105.000,00			
Rodo - FNS	2.558.214,00	2.150.670,00	1.386.067,00		986.338,00
Rodo - FPA		695.804,00	379.281,00		
Rodo - Hidrovía			1.186.126,00	2.951.474,00	1.965.136,00

5 CONCLUSÕES

O modelo proposto de programação linear, possibilitou chegar em resultados satisfatórios, que permitem analisar as alternativas modais de transporte para o escoamento de grãos de soja da região. Assim, a produção do Estado do Pará, no cenário-base de 2019.1, foi escoada com o custo por tonelada total de 163,60 R\$/t e cerca de 30,4% da soja foi escoada pela Ferrovia Norte Sul, demonstrando falta influência do complexo portuário de Vila do Conde, em relação a alguns municípios localizados no próprio Estado do porto.

Entretanto, no primeiro cenário, com a nova alternativa intermodal - o projeto da Ferrovia Paraense - 98,32% da produção do Estado do Pará passou a ser exportada pelo próprio porto do Estado, além de obter redução de 10,1% no custo por tonelada movimentada no Estado. Constatou-se, então, o grande impacto positivo que causa uma nova alternativa intermodal para o Estado do Pará.

No cenário 2019.3, a redução em relação a 2019.2 foi de apenas 5,5% para o Estado do Pará, indicando certa competitividade entre o transporte pela hidrovia e a FPA nos terminais localizados na cidade de Marabá, apesar de que a opção hidroviária se mostrou mais competitiva. Já, o cenário, 2019.4, que apresentou a hidrovia com média restrição plenamente implantada, apresentou-se como o mais benéfico para os municípios do Estado, obtendo economia de 42,4% em relação ao cenário-base 2019.1 e um custo por tonelada movimentada de 94,30 R\$/t. Entretanto, o cenário 2019.5 mostrou-se menos competitivo que o 2019.4. Todavia, é o segundo cenário com maior redução, em relação a 2019.1. Portanto, a hidrovia trará maiores benefícios econômicos para o Estado do Pará.

O Estado do Tocantins obteve as melhores economias nos cenários 2019.4 e 2019.5, com 18,6% e 5,9% de redução em relação a 2019.1. Com isso, se evidencia que o Estado apresenta bons resultados econômicos quando utilizada a hidrovia. Além do mais, no cenário 2019.3, o terminal hidroviário de Santa Isabel é o que mais recebe soja para escoar a produção do Estado e, no cenário 2019.5, mesmo o Terminal da FPA de Santana do Araguaia sendo competitivo, a preferência foi pelo terminal hidroviário de Santana do Araguaia. Portanto, a hidrovia é a mais benéfica ao Estado, tanto até Santa Isabel quanto até Santana do Araguaia, mesmo quando se tem alta restrição.

Entre a FNS, FPA e a Hidrovia, os menores custos por tonelada transportada se deram no modal aquaviário. No entanto, quanto menor a distância percorrida na hidrovia maior peso tem o custo de transbordo Rodo-Hidro, chegando a compor 49% no cenário 2019.3. O que evidenciou a necessidade de se buscar um baixo custo de transbordo na hidrovia. Outro aspecto importante, é que os municípios distantes dos portos e próximos a hidrovia obtiveram maior economia, como é o caso de Santana do Araguaia – PA e Caseara – TO, chegando a ter redução de 49% e de 53,9%, respectivamente. Ademais, Nos cenários das projeções de 2029s, admitindo se produção mínima para tornar viável o transporte pelos terminais de Araguatins, São Geraldo do Araguaia e Floresta do Araguaia, os municípios que estiverem próximos aos terminais poderão obter maior economia do que nos cenários de 2019, e com isso a distribuição dos terminais intermodais ao longo da hidrovia proporcionara o melhor arranjo de rotas. Deste modo, conclui-se a necessidade de se buscar implantar terminais hidroviários de baixo custo de transbordo e que possam operar com menor movimentação anual, para aumentar a oferta de terminais na hidrovia, de forma a se obter maior economia e competitividade.

Conforme os resultados obtidos, se implantada a hidrovia, o complexo portuário de Vila de Conde poderá ter aumento de 650% na quantidade de soja exportada, podendo chegar até 1059,7% de aumento, nas projeções, em relação a 2019.1. Deste modo, com a expansão da zona de influência do complexo portuário de Vila do Conde, para o Estado do Pará, as alternativas modais, além de oferecerem maior economia, também direcionaram as exportações para Vila do Conde, o que deverá trazer vantagem econômica para o Estado, com novos investimentos no complexo portuário. O Estado do Pará, com base na análise efetuada, seria o maior beneficiário com uma nova alternativa intermodal, sendo mais oportuna a implantação da hidrovia.

As diferenças entre os cenários, com opção modal proposta e os resultados obtidos nos municípios que estão próximos da FNS, sinalizam que as localidades que ainda não dispõem de uma alternativa intermodal são as que obterão maior benefício e maior aumento de competitividade. Portanto, conclui-se que a montante de Marabá, a preferência de implantação deve ser o rio Araguaia, pois o rio traria maiores ganhos competitivos na sua região de influência, em relação ao rio Tocantins, nos municípios próximos dele; onde já se tem a opção pela FNS, além do fato do rio Araguaia ter metade do custo por km para ser implantado e menor número de eclusas necessárias. Além disso, avaliando as diferenças entre os resultados com média restrição na

hidrovia e com parte dela com alta restrição, conclui-se a necessidade de se implantar todas as obras previstas para minimizar as restrições a navegação na hidrovia.

Por fim, considerando os resultados dos cenários para escoar a produção de soja dos Estados do Pará e Tocantins, se nada for feito, se não for implantada nenhuma alternativa intermodal, a tendência será o aumento do custo para escoar a produção ao longo dos anos, somente para exportar soja. Além disso, as projeções indicam aumento da produção do Brasil em até 66 milhões de toneladas e, esse aumento, será em direção aos Estados da Região Norte. Reforçando, a urgência em se implantar uma alternativa intermodal para os Estados do Pará e Tocantins, de forma a não comprometer a competitividade do país no cenário mundial.

Os resultados indicaram a hidrovia como a melhor opção para ser implantada, diminuindo o tráfego intenso de caminhões no corredor rodoviário, contribuindo para o desenvolvimento sustentável da região. Assim, reduzindo impactos ambientais nas cidades que estão ao longo do percurso da rodovia até o porto exportador; além da geração de riqueza, desenvolvimento regional e a consolidação dos estados como grandes produtores e exportadores de grãos.

Concluindo, na experiência de execução desse trabalho, analisando os projetos de alternativas intermodais para o Brasil escoar a produção agrícola pelas propostas da Ferrovia Paraense e Hidrovia Araguaia-Tocantins. Os resultados permitiram a identificação de gargalos e locais prioritários; diretrizes para a expansão da infraestrutura de transporte; a potencialidade das alternativas intermodais e as melhores opções para escoar a produção. Com isso, este estudo pode contribuir para a reflexão quanto ao planejamento da infraestrutura regional, com informações que poderão servir de diretrizes para a tomada de decisão do setor público e privado.

Como em ciência, cada estudo é um avanço no conhecimento que não se resume em si, sempre abre portas para a indicação de estudos futuros, que possam se converter em novas pesquisas e, com isso, nesse trabalho, também, se tem algumas recomendações. A começar, por explorar tipologias de tecnologias para implantar terminais hidroviários com baixo custo de transbordo e que possam operar com menor movimentação anual. Incluir outras variáveis; além do custo, para analisar o transporte de soja, como o tempo de transporte, de transbordo, a espera no porto, possíveis reduções de acidentes, entre outros. Outra indicação de trabalho futuro, seria a de analisar o custo-benefício ambiental de cada modo e qual projeto, se implantado, traria maior ou menor impacto. Como sugestão, pode-se realizar um

estudo que caracterize qual o nível de restrição da hidrovia quando finalizadas todas as obras possíveis para melhoria da navegabilidade.

Recomenda-se, por fim, a análise dos potenciais produtos que ainda não são explorados por inviabilidade para escoar a produção, como por exemplo, o potencial para a exploração mineral e para outras culturas agrícolas da região, que poderia ser viabilizado com uma alternativa intermodal, bem como estudos que incluíssem o fator de geração de riqueza e emprego na região de menor cobertura de infraestrutura.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ANA - AGÊNCIA NACIONAL DE ÁGUAS. **A navegação interior e sua interface com o setor de recursos hídricos**. Brasília: ANA, 2005.

ANTT - AGÊNCIA NACIONAL DE TRANSPORTE TERRESTRES. **Resolução nº 5.835, de 20 de novembro de 2018**. Altera o Anexo II da Resolução ANTT nº 5.820, de 30 de maio de 2018, em razão o disposto no §3º do art. 5º da Lei nº 13.703, de 8 de agosto de 2018.

AGETO - AGÊNCIA TOCANTINENSE DE TRANSPORTES E OBRAS. **Mapa Rodoviário 2020**. 2020. Disponível em: <https://www.to.gov.br/seinf/mapas-rodoviaros/28sxwjwwyhse>. Acesso em: 07 abr. 2021.

ALMEIDA, B. P. Q. de; CORDEIRO, L. de A.; DE OLIVEIRA, L. A.; DE OLIVEIRA, P. Modais Logísticos: Definição e Necessidade. **Conexão Eletrônica**, [s. l.], v. 14, n. 1. Três Lagoas, 2017.

ANDRADE, E. L. **Introdução à pesquisa operacional**. 2. ed. Rio de Janeiro: LTC, 2000. 103 p.

ANDRADE, Eduardo Leopoldino de. **Introdução à pesquisa operacional: métodos e modelos para análise de decisões**. Rio de Janeiro: LTC, 2004.

ANTAQ. **Relatório Executivo: bacia do Tocantins-Araguaia**. [S. l.]: ANTAQ, 2013. Disponível em: <http://web.antaq.gov.br/portav3/PNIH/BaciaTocantinsAraguaia.pdf>. Acesso em: 04 mar. 2021.

ANTAQ. **Escoamento de soja e milho para exportação pelo Arco Norte cresceu 10,8% no primeiro semestre**. 2020. Disponível em: <https://www.gov.br/antaq/pt-br/noticias/escoamento-de-soja-e-milho-para-exportacao-pelo-arco-norte-cresceu-10-8-no-primeiro-semester>. Acesso em: 21 jan. 2021.

ANTAQ. **Estatísticos Aquaviário**. Disponível em: <http://web.antaq.gov.br/ANUARIO/>. Acesso em: 20 mar. 2021.

ARENALES, Marcos; ARMENTANO, V.; MORABITO, R. e YANASSE H. **Pesquisa Operacional: para cursos de engenharia**. Rio de Janeiro: Elsevier, 2011.

BALLOU, Ronald H., **Gerenciamento da Cadeia de suprimentos/Logística empresarial**. Porto Alegre: Bookman, 2006.

BALLOU, Ronald H. **Logística empresarial: transportes, administração de materiais e distribuição física**. São Paulo: Atlas, 2010.

BARBOSA, M. A., ZANARDI, R. A. D. **Iniciação à Pesquisa Operacional no Ambiente de Gestão**. 1ª. ed. Curitiba: IBPREX 2010.

BEKTAS, T.; CRAINIC, T. G. **A brief overview of intermodal transportation**. Canada: CIRRELT, 2007. 23 p. cit-90.

BELFIORE, Patrícia; FÁVERO, Luiz Paulo. **Pesquisa Operacional para cursos de Engenharia**. Rio de Janeiro: Elsevier, 2013.

BRASIL. **Rio das Mortes**. (2015). Disponível em: <https://www.gov.br/infraestrutura/pt-br/assuntos/conteudo/bacia-do-tocantins-araguaia>. Acesso em: 04 mar. 2021.

BRASIL. **Apoio ao licenciamento ambiental do Pedral do Lourenço: dragagem e derrocamento da via navegável do rio Tocantins**. Dragagem e Derrocamento da Via Navegável do Rio Tocantins. Disponível em: <https://www.ppi.gov.br/apoio-ao-licenciamento-ambiental-do-pedral-do-lourenco-dragagem-e-derrocamento-da-via-navegavel-do-rio-tocantins>. Acesso em: 07 dez. 2020.

CASTIGLIONI, José Antônio de M. **Logística operacional: guia prático**. São Paulo: Érica, 2007.

CEPEA; CNA. **PIB do agronegócio**. 2021. Disponível em: <https://www.cepea.esalq.usp.br/br/pib-do-agronegocio-brasileiro.aspx>. Acesso em: 5 abr. 2021.

CNA. **Panorama do Agro**. 2020. Disponível em: <https://www.cnabrazil.org.br/cna/panorama-do-agro>. Acesso em: 05 fev. 2021.

CNT. **CNT apresenta perspectivas para o futuro da logística brasileira na Intermodal**. Disponível em: <https://cnt.org.br/agencia-cnt/cnt-apresenta-perspectivas-futuro-logistica-brasileira-intermodal>. Acesso em: 16 fev. 2021.

CNT. **Pará tem mais de 86% da malha rodoviária com deficiência**. 2017. Disponível em: <https://www.cnt.org.br/agencia-cnt/pa-mais-86-malha-deficiencias>. Acesso em: 02 fev. 2021.

COLIN, Emerson Carlos. **Pesquisa Operacional**. São Paulo: LTC, 2011.

COMEX STAT. **Exportações e Importações Geral**. Disponível em: <http://comexstat.mdic.gov.br/pt/geral>. Acesso em: 05 maio 2021.

CONAB. **Estimativa do escoamento das exportações do complexo soja e milho pelos portos nacionais: safra 2016/2017**. Brasília: Conab, v. 6, 2017.

CONAB. **Acompanhamento da safra - grãos: safra 2019/2020 – 12° levantamento**. Brasília: Conab, 2020. Disponível em: <https://www.conab.gov.br/info-agro/safras/graos/boletim-da-safra-de-graos?start=10>. Acesso em: 21 fev. 2021.

CORRAR, Luis João; GARCIA, Editinete A. da Rocha. **Programação linear: uma aplicação à contabilidade de custos no processo de tomada de decisão**. In: CONGRESSO INTERNACIONAL DE CUSTOS, 7, 2001, León.

CRUZ, Rodrigo Nassar. **Utilização do método híbrido AHP-TOPSIS para a escolha modal do escoamento da produção de soja do polo Paragominas/pa**. 2019. Dissertação (Mestrado em Transporte Aquaviário) – Faculdade de Engenharia Naval, Universidade Federal do Pará, Belém, 2019.

DIAS, Marco Aurélio P. **Logística, Transporte e Infraestrutura: armazenagem, operador logístico, gestão via TI, multimodal**. São Paulo: Atlas, 2012.

DILOG. **Infraestrutura e Logística**. 2020. Disponível em: <https://www.gov.br/agricultura/pt-br/assuntos/politica-agricola/infraestrutura-e-logistica/infraestrutura-e-logistica>. Acesso em: 1 fev. 2021.

DNIT - DEPARTAMENTO NACIONAL DE INFRAESTRUTURA DE TRANSPORTES. **Hidroviários – Tocantins/Araguaia**. 2021. Disponível em: <https://www.gov.br/dnit/pt-br/assuntos/aquaviario>. Acesso: 03 fev. de 2021.

DNIT - DEPARTAMENTO NACIONAL DE INFRAESTRUTURA DE TRANSPORTES. **Sistema Nacional de Viação**. Brasília, 2017.

DUBKE, Alessandra Fraga; PIZZOLATO, Nelio Domingues. Location model of specialized terminals for soybe an exports in Brazil. **Pesquisa Operacional**. Rio de Janeiro, v. 31, n. 1, p. 21-40, abr. 2011. FapUNIFESP (SciELO).

EMBRAPA - EMPRESA BRASILEIRA DE PESQUISA AGROPECUÁRIA. **Caminhos da safra da produção e exportação de grãos 2015/16**. 2016. Disponível em: <https://www.embrapa.br/macrologistica/caminhos-da-safra>. Acesso em: 15 fev. 2021.

EMBRAPA. **Perspectivas da soja**. Disponível em: https://www.agencia.cnptia.embrapa.br/gestor/soja/arvore/CONTAG01_13_271020069131.html. Acesso em: 07 abr. 2021.

EPL. **Plano Nacional de Logística**. Disponível em: <https://www.epl.gov.br/plano-nacional-de-logistica-pnl>. Acesso em: 16 fev. 2021.

EPL. **Manual:** metodologia de custos de transporte. Metodologia de Custos de Transporte. [2021a]. Disponível em: <https://www.epl.gov.br/manual-metodologia-de-custos-de-transporte>. Acesso em: 07 fev. 2021.

EPL. **Simulador de Custo de Transporte.** [2021b]. Disponível em: <https://www.epl.gov.br/> Acesso em: 03 mar. 2021.

FAEPA - FEDERAÇÃO DA AGRICULTURA E PECUÁRIA DO PARÁ. **Agronegócio Paraense.** Disponível em: <http://sistemafaepa.com.br/faepa/agronegocio-paraense/>. Acesso em: dez. 2020.

FIORONI, Marcelo Moretti; FRANZESE, Luiz Augusto G.; SANTANA, Isac Reis de; LELIS, Pavel Emmanuel Pereira; SILVA, Camila Batista da; TELLES, Gustavo Dezem; QUINTÁNS, José Alexandre Sereno; MAEDA, Fábio Kikuda e VARANI, Rafael. From farm to port: simulation of the grain logistics in Brazil. In: WINTER SIMULATION CONFERENCE (WSC), 2015, Huntington Beach. **Proceedings [...].** Huntington Beach: Winter Simulation Conference (Wsc), 2015. p. 1936-1947.

FUNDAÇÃO DOM CABRAL. **Custos Logísticos no Brasil:** 2017. Disponível em: <https://www.fdc.org.br/conhecimento/publicacoes/relatorio-de-pesquisa-33324>. Acesso em: 05 maio 2021.

GAMS. **GAMS.** Disponível em: <https://www.gams.com/>. Acesso em: fev. 2021.

GODOY, P. R. C.; VIEIRA, A. P. **Hidroviás Interiores:** o estado das águas no Brasil. Brasília: ANEEL, 1999.

HALIM, Ronald A.; KWAKKEL, Ronald A. e TAVASSZY, Lóránt A. A strategic model of port-hinterland freight distribution networks. **Transportation Research Part e: Logistics and Transportation Review**, [s. l.], v. 95, p. 368-384, nov. 2016. Elsevier BV. <http://dx.doi.org/10.1016/j.tre.2016.05.014>.

HIJJAR, Maria Fernanda. **Preços de Frete Rodoviário no Brasil.** Especialistas em Logística e Supply Chain. 2004. Disponível em: <https://www.ilos.com.br/web/logistica-soja-e-comercio-internacional/>. Acesso em: dez. 2020.

HILLER, Frederick S.; LIEBERMAN, Gerald J. **Introdução à pesquisa operacional.** São Paulo: McGraw-Hill, 2006.

IBGE. **Divisão Regional do Brasil:** regiões geográficas - Estado do Pará. Regiões Geográficas - Estado do Pará. 2017. Disponível em: <https://www.ibge.gov.br/geociencias/cartas-e-mapas/15778-divisoes-regionais-do-brasil.html?edicao=24860&t=downloads>. Acesso em: 01 mar. 2021.

IBGE. **Produção Agrícola Municipal: Produção Agrícola - Lavoura temporária - Soja (em grão).** Disponível em: <https://cidades.ibge.gov.br/>. Acesso em: maio. 2021.

IBGE. **Índice Nacional de Preços ao Consumidor Amplo.** [2021a]. Disponível em: <https://www.ibge.gov.br/estatisticas/economicas/precos-e-custos/9256-indice-nacional-de-precos-ao-consumidor-amplo.html?=&t=o-que-e>. Acesso em: jun. 2021.

INSTITUTO DE ENGENHARIA. **A hidrovia como vetor de desenvolvimento e de integração multimodal do Brasil e da América do Sul.** São Paulo: Instituto Engenharia, 2018.

KAZEMI, Yasaman; SZMEREKOVSKY, Joseph. Modeling downstream petroleum supply chain: the importance of multi-mode transportation to strategic planning. **Transportation Research Part e: Logistics and Transportation Review**, [s. l.], v. 83, p. 111-125, nov., 2015. Elsevier BV.

KUSSANO, Marilyn Ribeiro. **Proposta de modelo de estrutura do custo logístico do escoamento da soja brasileira para o mercado externo:** o caso do Mato Grosso. Dissertação (Mestrado em Ciências Exatas e da Terra) - Universidade Federal de São Carlos, São Carlos, 2010.

KUSSANO, M. R.; BATALHA, M. O. Custos logísticos agroindustriais: avaliação do escoamento da soja em grão do Mato Grosso para o mercado externo. **Revista Gestão & Produção.** São Carlos, v. 19, n.

3, p. 619-632, 2012.

LACHTERMACHER, Gerson. **Pesquisa operacional na tomada de decisões**: modelagem em excel. 4. ed. Rio de Janeiro: Elsevier, 2007. ISBN 85-352-2087-9 - 978-85-352-2087-2.

LIN, Xiaowen; RUESS, Paul J; MARSTON, Landon; KONAR, Megan. Food flows between counties in the United States. **Environmental Research Letters**, [s. l.], v. 14, n. 8, p. 084011, 26 jul. 2019. IOP Publishing.

LISBOA, E. F. A. **Pesquisa operacional**. 2002. Disponível em: <http://www.ericolisboa.eng.br>. Acesso em: 28 fev. de 2021.

LÓPEZ, Juan José Uchuya. **Otimização na Reconfiguração de Cadeias de Suprimentos de Quatro Níveis**: o caso da soja no Brasil. 2017. 140 f. Tese (Doutorado) - Curso de Programa de Engenharia Oceânica, Coppe, Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 2017.

MAGEE, J. F. **Logística industrial**: análise e administração dos sistemas de suprimento e distribuição. Pioneira. São Paulo, 1977.

MAPA. **Projeções do Agronegócio**: Brasil 2019/20 a 2029/30 projeções de longo prazo. Brasil 2019/20 a 2029/30 Projeções de Longo Prazo. 2020. 11ª edição. Disponível em: www.agricultura.gov.br. Acesso em: 08 abr. 2021.

MARINS, Fernando Augusto Silva. **Introdução à Pesquisa Operacional**. São Paulo: Cultura Acadêmica, 2011.

MELO, André Cristiano Silva; VIEIRA, Amanda Thais Santos; CORDEIRO, Bruna Adrielle Furtado. Diagnosis of the potential for soybeans outflow through ports in the State of Pará: a bibliographical and documentary analysis. **International Scientific Journal**, [s. l.], nº 3, v.12, article nº 8, julho/setembro 2017.

MITCHELL, David; KURNIAWAN, Teddy. **Estimating Australian Commodity Freight Movements: A Linear Programming Approach**. Sydney: Australasian Transport Research Forum 2015 Proceedings, 2015. Disponível em: <http://www.atrf.info/papers/index.aspx>. Acesso em: 05 maio 2021.

MOREIRA, Daniel Augusto. **Pesquisa Operacional**: curso introdutório. Rio de Janeiro: Cengage Learning, 2010.

MTPA - MINISTÉRIO DOS TRANSPORTES, PORTOS E AVIAÇÃO CIVIL. **Corredores Logísticos Estratégicos**: Complexo de Soja e Milho. 2 v.: gráfs., Il. Brasília, 2017.

NOVAES, Antônio Galvão. **Logística e Gerenciamento da Cadeia de distribuição**: estratégia, operação e avaliação. 2. ed. Rio de Janeiro: Elsevier, 2004.

NOVAES, Antônio Galvão. **Logística e gerenciamento da cadeia de distribuição**. 11ª reimpressão. Rio de Janeiro: Elsevier, 2007.

OLIVA, J. A. B. de. **Panorama das Hidrovias Brasileiras**. In: SEMINÁRIO INTERNACIONAL SOBRE HIDROVIAS: BRASIL-HOLANDA, 2009, Brasília. Palestra. Disponível em: <http://www.antaq.gov.br/portal/pdf/Pales-tras/SeminarioBrasilHolanda/04Marco/PalestraAlexOlivaBrasilHolanda.pdf>.

OLIVEIRA, Andréa Leda Ramos de; FILASSI, Monique; LOPES, Bruna Fernanda Ribeiro; MARSOLA, Karina Braga. Logistical transportation routes optimization for Brazilian soybean: an application of the origin-destination matrix. **Ciência Rural**, [s. l.], v. 51, n. 2, 2021. FapUNIFESP (SciELO).

OLIVEIRA, Andréa Leda Ramos de; MASCARENHAS, Calistênia; LOPES, Bruna Fernanda Ribeiro; MORINI, Cristiano. Aplicação de Modelagem Matemática para Otimização da Logística de Exportação do Milho do Estado do Mato Grosso. **Revista em Agronegócio e Meio Ambiente**, [s. l.], v. 8, n. 3, p. 505, 18 nov. 2015. Centro Universitário de Maringá.

OLIVEIRA, Vitor Hugo Pereira de *et al.* Optimization method applied to decision-making on intermodal alternative for soybean outflow in the State of Pará-Brazil. **International Journal For Innovation Education And Research**, [s. l.], v. 9, n. 7, p. 124-140, 1 jul. 2021.

PÉRA, Thiago Guilherme; BARTHOLOMEU, Daniela Bacchi; SU, Connie Tenin; CAIXETA FILHO, José Vicente. Evaluation of green transport corridors of Brazilian soybean exports to China. **Brazilian Journal Of Operations & Production Management**, [s. l.], v. 16, n. 3, p. 398-412, 28 ago. 2019. Associação Brasileira de Engenharia de Produção - ABEPRO.

PISSINELLI, Glaucia Jardim. **Decisão multicritério aplicada à análise para localização de terminal intermodal**. 2016. 103 f. Dissertação (Mestrado) - Curso de Faculdade de Ciências Aplicadas, Universidade Estadual de Campinas, Campinas, 2016.

POLLI, Marco. **Tecnologias do transporte de carga**. Rio de Janeiro: SESES, 2015. 120 p.

PRADO, Darci Santos do. **Programação Linear**. 7 Ed. Nova Lima: Falconi, 2016.

PROGRAMA DE PARCERIAS DE INVESTIMENTO. **Obras de Dragagem e Derrocamento do Pedral do Lourenço**. Disponível em: <https://www.ppi.gov.br/apoio-ao-licenciamento-ambiental-do-pedraldo-lourenco-dragagem-e-derrocamento-da-via-navegavel-do-rio-tocantins>. Acesso em: 07 dez 2020.

RAVINDRAN, A.; PHILLIPS, D. T.; SOLBERG, J. J. **Operations Reserch – Principles and Practice**. New York: John Wiley & Sons, 1987.

RODRIGUE, Jean-Paul; NOTTEBOOM, Theo. Dry ports in European and North American intermodal rail systems: two of a kind? **Research in Transportation Business & Management**. [S. l.], p. 4-15. dez. 2012.

RODRIGUES, Bruno Felipe da Silva; SANTOS, João Paulo de Oliveira; BACHEGA, Stella Jacyszyn. **Interdisciplinaridades entre pesquisa operacional e ciência da computação**. In: Encontro Annual de Computação, X, 2013, Goiânia. Anais

SETRAN - SECRETARIA DE ESTADO DE TRANSPORTES DO PARÁ. **Sistema Rodoviário do Estado**: Banco de dados georreferenciado. Belém, 2017.

SETRAN - SECRETARIA DE ESTADO DE TRANSPORTES DO PARÁ. **Modal Rodoviário**. 2021. Disponível em: <http://setran.pa.gov.br/site/Conteudo/20>. Acesso em: 20 jun. 2021.

SEDEME - SECRETÁRIA DE ESTADO DE DESENVOLVIMENTO ECONÔMICO, MINERAÇÃO E ENERGIA. **Estudo de Impacto Ambiental**: Ferrovia Paraense S.A. Belém: Sedeme, 2017. 1 v.

SILVA NETO, Samuel da. **Impacto de investimentos em infraestrutura logística na cadeia de grãos no Brasil**: uma aplicação de programação linear. 2018. Dissertação de Mestrado. Escola Politécnica, Universidade de São Paulo. São Paulo, 2018.

SIMÕES, Débora da Costa; CAIXETA-FILHO, José Vicente; PALEKAR, Udatta S. Fertilizer distribution flows and logistic costs in Brazil: changes and benefits arising from investments in port terminals. **International Food And Agribusiness Management Review**, [s. l.], v. 21, n. 3, p. 407-422, 20 mar. 2018. Wageningen Academic Publishers.

SOLIANI, Rodrigo Duarte. An overview of agribusiness logistics in Brazil. **Australian Journal Of Basic And Applied Sciences**. [S. l.], p. 410-422. set. 2015.

SOUZA, M. M.; ROCHA, M. P. C.; FARIAS, V. J. C.; TAVARES, H. R. Optimization of soybean outflow routes from Mato Grosso, Brazil. **International Journal for Innovation Education and Research**, [s. l.], v. 8, p.176-191, 2020.

SUDAM - SUPERINTENDÊNCIA DO DESENVOLVIMENTO DA AMAZÔNIA (org.). **Microeixos do transporte de cargas dos Estados de Roraima e Tocantins**: relatório executivo. Belém: Sudam, 2016.

TAHA, Hamdy A. **Pesquisa operacional: uma visão geral**. 8. ed. São Paulo: Pearson Prentice Hall, 2008. ISBN 978-85-7605-150-3.

TAYLOR, David A. **Logística na cadeia de suprimentos: uma perspectiva gerencial**. São Paulo: Pearson Addison-Wesley, 2005.

UNITAPAJÓS. **Nossa Atuação**. Valores máximos de referência de tarifa de serviço. Disponível em: <https://www.unitapajos.com.br/page/atuacao#atuacao-tres>. Acesso em: 03 jun. 2021.

USDA. **World Agricultural Production**. [S. l.]: USDA, 2020. Disponível em: <https://downloads.usda.library.cornell.edu/usda-esmis/files/5q47rn72z/5m60rf50q/37721178v/production.pdf>. Acesso em: 25 fev. 2021.

VLI. **Ferrovias Norte Sul - FNS**. Disponível em: <https://www.vli-logistica.com.br/conheca-a-vli/ferrovias/ferrovia-norte-sul-fns/>. Acesso em: 07 jun. 2021.

VLI. **Tarifa praticada**. [2021a]. Disponível em: <https://www.vli-logistica.com.br/conheca-a-vli/tarifa-praticada/>. Acesso em: 07 jun. 2021.

WINSTON, W. L. **Operations research: applications and algorithms**. 4. ed. Belmont: Brooks/Cole – Thomson Learning, 2004.

Anexo A

Terminais que os municípios escoaram a produção (Tocantins) - 2019.1

Municípios	Terminal Ferrov. - Porto Franco	Terminal Ferrov. - Palmeirante	Terminal Ferrov. - Porto Nacional
Abreulândia			
Aliança do Tocantins			
Alvorada			
Ananás			
Aparecida do Rio Negro			
Aragominas			
Araguacema			
Araguaçu			
Araguaína			
Arapoema			
Babaçulândia			
Bandeirantes do Tocantins			
Barra do Ouro			
Bom Jesus do Tocantins			
Brasilândia do Tocantins			
Brejinho de Nazaré			
Campos Lindos			
Cariri do Tocantins			
Caseara			
Centenário			
Chapada de Areia			
Couto Magalhães			
Cristalândia			
Crixás do Tocantins			
Darcinópolis			
Divinópolis do Tocantins			
Dois irmãos do Tocantins			
Dueré			
Fátima			
Figueirópolis			
Formoso do Araguaia			
Goianorte			
Goiatins			
Guaraí			
Gurupi			
Ipueiras			
Itacajá			
Itapiratins			
Jaú do Tocantins			
Lagoa da Confusão			
Lagoa do Tocantins			

Terminais que os municípios escoaram a produção (Tocantins) - 2019.1

Municípios	Terminal Ferrov. - Porto Franco	Terminal Ferrov. - Palmeirante	Terminal Ferrov. - Porto Nacional
Lizarda			
Luzinópolis			
Marianópolis do Tocantins			
Mateiros			
Miracema do Tocantins			
Miranorte			
Monte do Carmo			
Monte Santo do Tocantins			
Muricilândia			
Nova Olinda			
Nova Rosalândia			
Novo acordo			
Oliveira de Fátima			
Palmas			
Palmeirante			
Palmeiras do Tocantins			
Palmeirópolis			
Paraíso do Tocantins			
Pedro Afonso			
Peixe			
Pequizeiro			
Piraquê			
Pium			
Porto nacional			
Pugmil			
Rio dos Bois			
Rio Sono			
Sandolândia			
Santa fé do Araguaia			
Santa Maria do Tocantins			
Santa Rita do Tocantins			
Silvanópolis			
Sucupira			
Tabocão			
Talismã			
Tocantínia			
Tupirama			
Tupiratins			
Wanderlândia			

Terminais que os municípios escoaram a produção (Tocantins) - 2019.2

Municípios	T. Ferrov. - Marabá	T. Ferrov. - Santana d.	TF. - Porto Franco	T. Ferrov. - Palmeirante	TF. - Porto Nacional
Abreulândia					
Aliança do Tocantins					
Alvorada					
Ananás					
Aparecida do Rio Negro					
Aragominas					
Araguacema					
Araguaçu					
Araguaína					
Arapoema					
Babaçulândia					
Bandeirantes do Tocantins					
Barra do Ouro					
Bom Jesus do Tocantins					
Brasilândia do Tocantins					
Brejinho de Nazaré					
Campos Lindos					
Cariri do Tocantins					
Caseara					
Centenário					
Chapada de Areia					
Couto Magalhães					
Cristalândia					
Crixás do Tocantins					
Darcinópolis					
Divinópolis do Tocantins					
Dois irmãos do Tocantins					
Dueré					
Fátima					
Figueirópolis					
Fормoso do Araguaia					
Goianorte					
Goiatins					
Guaraí					
Gurupi					
Ipueiras					
Itacajá					
Itapiratins					
Jaú do Tocantins					
Lagoa da Confusão					
Lagoa do Tocantins					
Lizarda					
Luzinópolis					
Marianópolis do Tocantins					

Terminais que os municípios escoaram a produção (Tocantins) - 2019.2

Municípios	T. Ferrov. - Marabá	T. Ferrov. - Santana d.	TF. - Porto Franco	T. Ferrov. - Palmeirante	TF. - Porto Nacional
Mateiros					
Miracema do Tocantins					
Miranorte					
Monte do Carmo					
Monte Santo do Tocantins					
Muricilândia					
Nova Olinda					
Nova Rosalândia					
Novo acordo					
Oliveira de Fátima					
Palmas					
Palmeirante					
Palmeiras do Tocantins					
Palmeirópolis					
Paraíso do Tocantins					
Pedro Afonso					
Peixe					
Pequizeiro					
Piraquê					
Pium					
Porto nacional					
Pugmil					
Rio dos Bois					
Rio Sono					
Sandolândia					
Santa fé do Araguaia					
Santa Maria do Tocantins					
Santa Rita do Tocantins					
Silvanópolis					
Sucupira					
Tabocão					
Talismã					
Tocantínia					
Tupirama					
Tupiratins					
Wanderlândia					
Xambioá					

Terminais que os municípios escoaram a produção (Tocantins) - 2019.3

Municípios	T. Ferro. - Santana d.	TF. - Porto Nacional	T. Hidrov. - Marabá	T. Hidrov. - Sta. Isabel
Abreulândia				
Aliança do Tocantins				
Alvorada				
Ananás				
Aparecida do Rio Negro				
Aragominas				
Araguacema				
Araguaçu				
Araguaína				
Arapoema				
Babaçulândia				
Bandeirantes do Tocantins				
Barra do Ouro				
Bom Jesus do Tocantins				
Brasilândia do Tocantins				
Brejinho de Nazaré				
Campos Lindos				
Cariri do Tocantins				
Caseara				
Centenário				
Chapada de Areia				
Couto Magalhães				
Cristalândia				
Crixás do Tocantins				
Darcinópolis				
Divinópolis do Tocantins				
Dois irmãos do Tocantins				
Dueré				
Fátima				
Figueirópolis				
Formoso do Araguaia				
Goianorte				
Goiatins				
Guaraí				
Gurupi				
Ipueiras				
Itacajá				
Itapiratins				
Jaú do Tocantins				
Lagoa da Confusão				
Lagoa do Tocantins				
Lizarda				
Luzinópolis				

Terminais que os municípios escoaram a produção (Tocantins) - 2019.3

Municípios	T. Ferro. – Santana d.	TF. - Porto Nacional	T. Hidrov. - Marabá	T. Hidrov. - Sta. Isabel
Marianópolis do Tocantins				
Mateiros				
Miracema do Tocantins				
Miranorte				
Monte do Carmo				
Monte Santo do Tocantins				
Muricilândia				
Nova Olinda				
Nova Rosalândia				
Novo acordo				
Oliveira de Fátima				
Palmas				
Palmeirante				
Palmeiras do Tocantins				
Palmeirópolis				
Paraíso do Tocantins				
Pedro Afonso				
Peixe				
Pequizeiro				
Piraquê				
Pium				
Porto nacional				
Pugmil				
Rio dos Bois				
Rio Sono				
Sandolândia				
Santa fé do Araguaia				
Santa Maria do Tocantins				
Santa Rita do Tocantins				
Silvanópolis				
Sucupira				
Tabocão				
Talismã				
Tocantínia				
Tupirama				
Tupiratins				
Wanderlândia				
Xambioá				

Terminais que os municípios escoaram a produção (Tocantins) - 2019.4

Municípios	T. Hidrov. - Sta. Isabel	TH. - Sta. Fé do A.	T. Hidrov. - Concei.	TH. - Sta. Maria das B.	TH. - Santana d.
Abreulândia					
Aliança do Tocantins					
Alvorada					
Ananás					
Aparecida do Rio Negro					
Aragominas					
Araguacema					
Araguaçu					
Araguaína					
Arapoema					
Babaçulândia					
Bandeirantes do Tocantins					
Barra do Ouro					
Bom Jesus do Tocantins					
Brasilândia do Tocantins					
Brejinho de Nazaré					
Campos Lindos					
Cariri do Tocantins					
Caseara					
Centenário					
Chapada de Areia					
Couto Magalhães					
Cristalândia					
Crixás do Tocantins					
Darcinópolis					
Divinópolis do Tocantins					
Dois irmãos do Tocantins					
Dueré					
Fátima					
Figueirópolis					
Formoso do Araguaia					
Goianorte					
Goiatins					
Guaraí					
Gurupi					
Ipueiras					
Itacajá					
Itapiratins					
Jaú do Tocantins					
Lagoa da Confusão					
Lagoa do Tocantins					
Lizarda					
Luzinópolis					
Marianópolis do Tocantins					

Terminais que os municípios escoaram a produção (Tocantins) - 2019.4

Municípios	T. Hidrov. - Sta. Isabel	TH. - Sta. Fé do A.	T. Hidrov. - Concei.	TH. - Sta. Maria das B.	TH. - Santana d.
Mateiros					
Miracema do Tocantins					
Miranorte					
Monte do Carmo					
Monte Santo do Tocantins					
Muricilândia					
Nova Olinda					
Nova Rosalândia					
Novo acordo					
Oliveira de Fátima					
Palmas					
Palmeirante					
Palmeiras do Tocantins					
Palmeirópolis					
Paraíso do Tocantins					
Pedro Afonso					
Peixe					
Pequizeiro					
Piraquê					
Pium					
Porto nacional					
Pugmil					
Rio dos Bois					
Rio Sono					
Sandolândia					
Santa fé do Araguaia					
Santa Maria do Tocantins					
Santa Rita do Tocantins					
Silvanópolis					
Sucupira					
Tabocão					
Talismã					
Tocantínia					
Tupirama					
Tupiratins					
Wanderlândia					
Xambioá					

ANEXO B

Figura 22a): Custo por tonelada transportada dos municípios do Tocantins - 2019

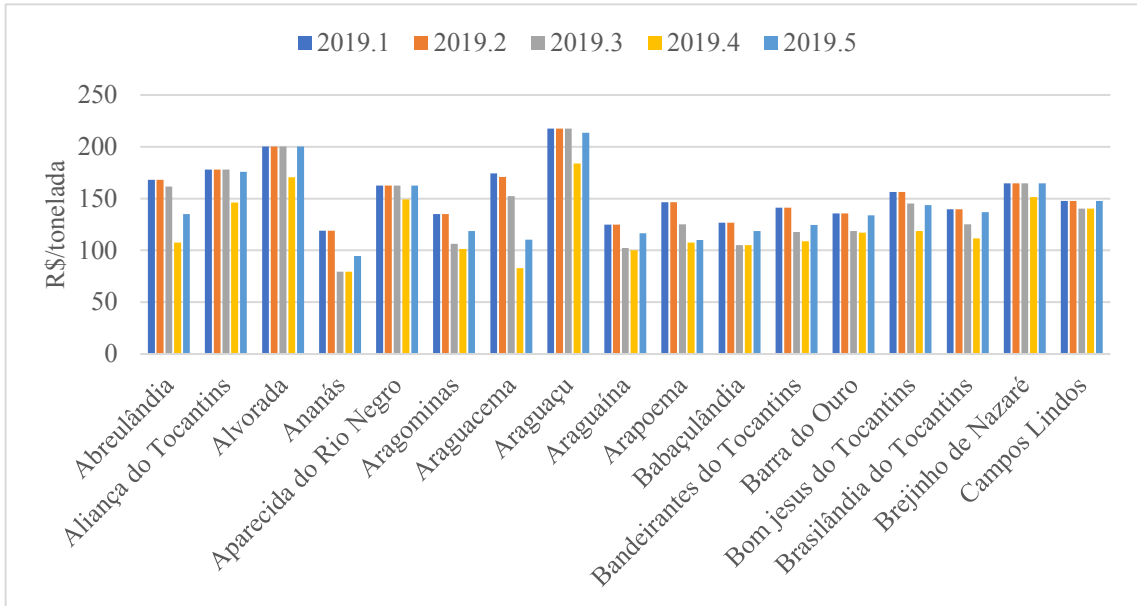


Figura 22b): Custo por tonelada transportada dos municípios do Tocantins - 2019

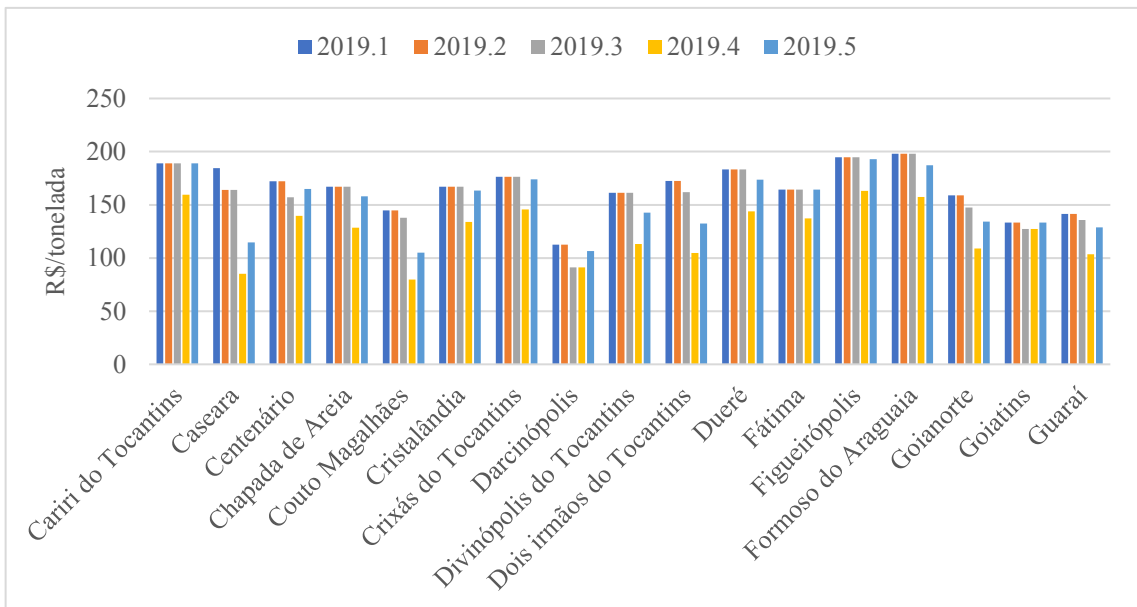


Figura 22c): Custo por tonelada transportada dos municípios do Tocantins - 2019

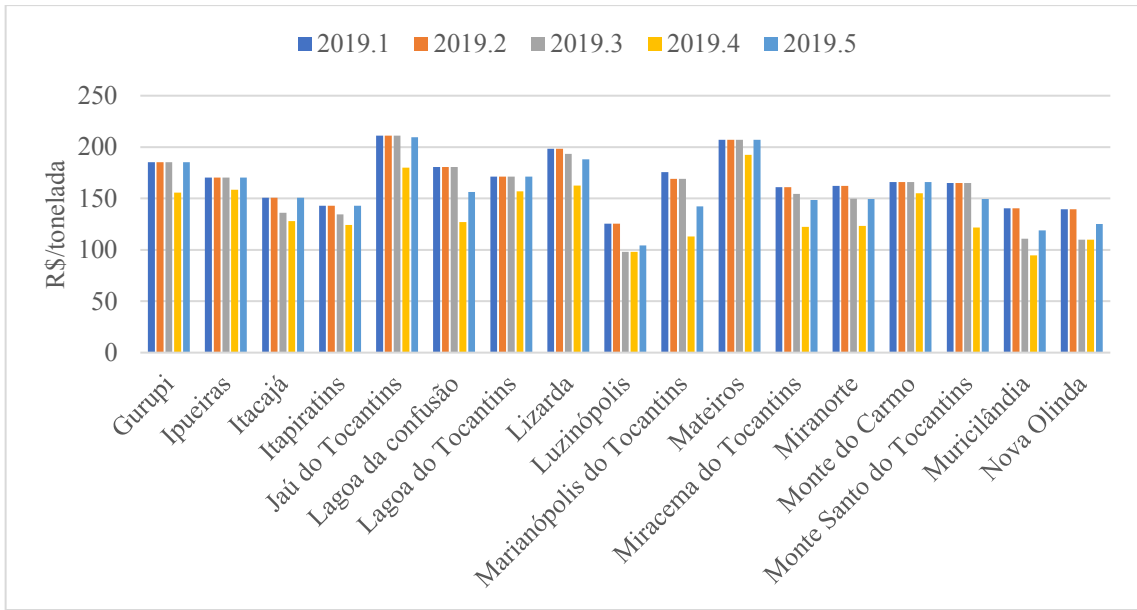


Figura 22d): Custo por tonelada transportada dos municípios do Tocantins - 2019

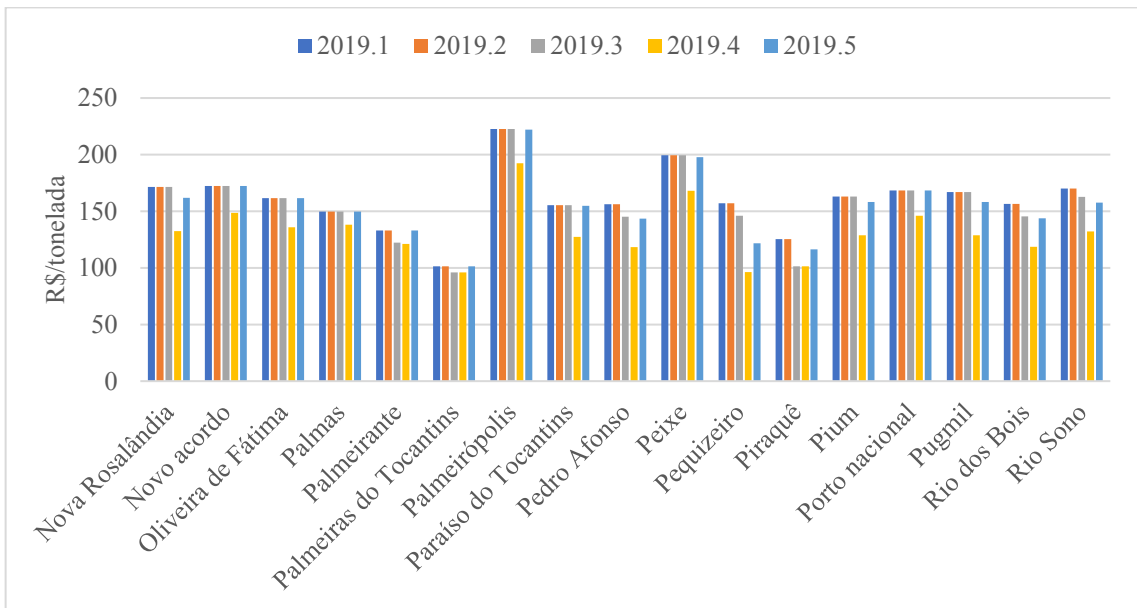
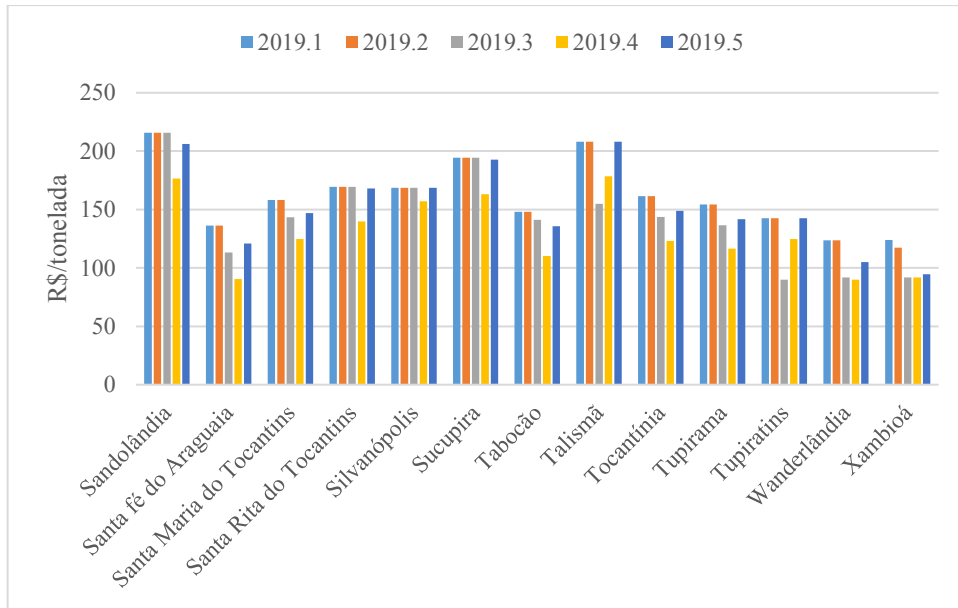


Figura 22e): Custo por tonelada transportada dos municípios do Tocantins - 2019

ANEXO C

Reduções de frete para escoar a produção no Tocantins

Município	2019.2	2019.3	2019.4	2019.5
Abreulândia	0,00%	3,86%	36,02%	19,57%
Aliança do Tocantins	0,00%	0,00%	17,76%	1,15%
Alvorada	0,00%	0,00%	14,78%	0,02%
Ananás	0,00%	33,36%	33,36%	20,64%
Aparecida do Rio Negro	0,00%	0,00%	8,23%	0,00%
Aragominas	0,00%	21,29%	24,93%	12,13%
Araguacema	2,09%	12,59%	52,57%	36,72%
Araguaçu	0,00%	0,00%	15,45%	1,86%
Araguaína	0,00%	17,97%	19,80%	6,67%
Arapoema	0,00%	14,58%	26,70%	25,03%
Babaçulândia	0,00%	17,27%	17,27%	6,52%
Bandeirantes do Tocantins	0,00%	16,47%	22,92%	11,71%
Barra do Ouro	0,00%	12,47%	13,58%	1,30%
Bom Jesus do Tocantins	0,00%	7,08%	24,20%	8,04%
Brasilândia do Tocantins	0,00%	10,40%	20,02%	1,91%
Brejinho de Nazaré	0,00%	0,00%	7,97%	0,00%
Campos Lindos	0,00%	5,03%	5,03%	0,00%
Cariri do Tocantins	0,00%	0,00%	15,70%	0,07%
Caseara	11,13%	11,13%	53,90%	37,89%
Centenário	0,00%	8,74%	18,82%	4,13%
Chapada de Areia	0,00%	0,00%	23,01%	5,30%
Couto Magalhães	0,00%	4,75%	44,88%	27,42%
Cristalândia	0,00%	0,00%	19,82%	2,13%
Crixás do Tocantins	0,00%	0,00%	17,39%	1,39%
Darcinópolis	0,00%	18,81%	18,81%	5,33%
Divinópolis do Tocantins	0,00%	0,00%	29,96%	11,65%
Dois irmãos do Tocantins	0,00%	6,04%	39,27%	23,23%
Dueré	0,00%	0,00%	21,43%	5,30%
Fátima	0,00%	0,00%	16,51%	0,00%
Figueirópolis	0,00%	0,00%	16,18%	1,00%
Formoso do Araguaia	0,00%	0,00%	20,41%	5,48%
Goianorte	0,00%	7,30%	31,44%	15,54%
Goiatins	0,00%	4,46%	4,46%	0,00%
Guaraí	0,00%	4,13%	26,76%	8,89%
Gurupi	0,00%	0,00%	16,01%	0,06%
Ipueiras	0,00%	0,00%	6,94%	0,00%
Itacajá	0,00%	9,76%	15,11%	0,00%
Itapiratins	0,00%	5,96%	13,03%	0,00%
Jaú do Tocantins	0,00%	0,00%	14,68%	0,67%
Lagoa da Confusão	0,00%	0,00%	29,77%	13,42%

Reduções de frete para escoar a produção no Tocantins

Município	2019.2	2019.3	2019.4	2019.5
Lagoa do Tocantins	0,00%	0,00%	8,32%	0,00%
Lizarda	0,00%	2,54%	17,97%	5,23%
Luzinópolis	0,00%	21,74%	21,74%	16,95%
Marianópolis do Tocantins	3,72%	3,72%	35,71%	18,88%
Mateiros	0,00%	0,00%	6,95%	0,00%
Miracema do Tocantins	0,00%	3,89%	23,83%	7,68%
Miranorte	0,00%	7,55%	23,95%	7,76%
Monte do Carmo	0,00%	0,00%	6,65%	0,00%
Monte Santo do Tocantins	0,00%	0,00%	26,15%	9,39%
Muricilândia	0,00%	21,12%	32,66%	15,33%
Nova Olinda	0,00%	21,18%	21,18%	10,32%
Nova Rosalândia	0,00%	0,00%	22,84%	5,61%
Novo acordo	0,00%	0,00%	13,82%	0,00%
Oliveira de Fátima	0,00%	0,00%	16,01%	0,00%
Palmas	0,00%	0,00%	7,71%	0,00%
Palmeirante	0,00%	8,11%	9,07%	0,00%
Palmeiras do Tocantins	0,00%	5,40%	5,40%	0,00%
Palmeirópolis	0,00%	0,00%	13,55%	0,27%
Paraíso do Tocantins	0,00%	0,00%	18,05%	0,26%
Pedro Afonso	0,00%	7,06%	24,24%	8,05%
Peixe	0,00%	0,00%	15,70%	0,88%
Pequizeiro	0,00%	7,14%	38,73%	22,65%
Piraquê	0,00%	19,13%	19,13%	7,04%
Pium	0,00%	0,00%	20,96%	2,82%
Porto nacional	0,00%	0,00%	13,20%	0,00%
Pugmil	0,00%	0,00%	22,89%	5,19%
Rio dos Bois	0,00%	7,08%	24,20%	8,04%
Rio Sono	0,00%	4,29%	22,25%	7,39%
Sandolândia	0,00%	0,00%	18,12%	4,42%
Santa fé do Araguaia	0,00%	17,04%	33,73%	11,33%
Santa Maria do Tocantins	0,00%	9,25%	21,08%	7,16%
Santa Rita do Tocantins	0,00%	0,00%	17,45%	0,70%
Silvanópolis	0,00%	0,00%	6,82%	0,00%
Sucupira	0,00%	0,00%	16,08%	0,89%
Tabocão	0,00%	4,76%	25,55%	8,49%
Talismã	0,00%	25,49%	14,23%	0,03%
Tocantínia	0,00%	11,04%	23,87%	7,79%
Tupirama	0,00%	11,60%	24,52%	8,15%
Tupiratins	0,00%	36,86%	12,43%	0,00%
Wanderlândia	0,00%	25,85%	27,31%	15,06%
Xambioá	5,26%	25,94%	25,94%	23,58%