



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

**CORREDORES DO ARCO NORTE AMAZÔNICO PARA A SOJA DO MATO
GROSSO EM UM MODELO DE TRANSPORTE *FUZZY* TRAPEZOIDAL
INTERVALAR**

TATIANA DE OLIVEIRA RUSSO

**Belém – PA
Junho/2022**

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

CORREDORES DO ARCO NORTE AMAZÔNICO PARA A SOJA DO MATO GROSSO EM UM MODELO DE TRANSPORTE *FUZZY* TRAPEZOIDAL INTERVALAR

TATIANA DE OLIVEIRA RUSSO

Dissertação de Mestrado Submetida ao Corpo Docente do Programa de Pós-Graduação em Engenharia Naval da Universidade Federal do Pará, como requisito para obtenção do título de Mestra em Engenharia Naval.

Área de Concentração: Transporte Aquaviário.

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

Coorientação: Prof.^a Dra. Maisa S. Gama Tobias.

Belém – PA

Junho/2022

TATIANA DE OLIVEIRA RUSSO

CORREDORES DO ARCO NORTE AMAZÔNICO PARA A SOJA DO MATO GROSSO EM UM MODELO DE TRANSPORTE *FUZZY* TRAPEZOIDAL INTERVALAR

Dissertação de Mestrado Submetida ao Corpo Docente do Programa de Pós-Graduação em Engenharia Naval da Universidade Federal do Pará, como requisito para obtenção do título de Mestra em Engenharia Naval.

Belém-PA, 09 de junho de 2022.

BANCA EXAMINADORA

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

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

Prof. Dr. Valcir João da Cunha Farias
(Membro Interno – PPGENAV/ITEC/UFPA)

Prof.^a Dra. Andréa Leda Ramos de Oliveira
(Membro Externo – FEAGRI/UNICAMP)

Prof. Dr. Marcus Vinícius Guerra Seraphico de Assis Carvalho
(Membro Externo – FEC/ITEC/UFPA)

FICHA CATALOGRÁFICA

Russo, Tatiana de Oliveira.

Modelo de Análise de corredores do Arco Norte Amazônico para a soja do Mato Grosso em Ambiente *Fuzzy* / Tatiana de Oliveira Russo -; orientador – Marcus Pinto da Costa da Rocha - Belém, 2022.

- __ f.

Dissertação de Mestrado – Universidade Federal do Pará, Belém, 2022.

Orientação: Prof. Dr. Marcus Rocha.

1. Soja. 2. Arco norte. 3. Logística. 4. Programação Linear Fuzzy.
UFPA / BC

DEDICATÓRIA

Dedico esse trabalho com todo meu amor e gratidão a minha avó e mãe Maria José, pois ao longo de minha vida, foi minha principal incentivadora para que eu pudesse estudar e alcançar os meus sonhos.

AGRADECIMENTO

Agradeço ao meu bom, Deus, o autor da minha fé, por guiar os meus passos e me permitir chegar até aqui, sem Ele, eu jamais conseguiria. À minha amada mãe Maria José, que sempre torceu, me apoiou e orou por mim, pedindo a Deus que me ajudasse em todas às minhas dificuldades (obrigada mãezinha!). Ao meu amado esposo Neto Russo, por todo o apoio, disponibilidade e paciência.

Ao meu professor e orientador Marcus Pinto da Costa da Rocha, que durante o mestrado foi um mentor e incentivador me fazendo acreditar que desistir não era uma opção e que eu conseguiria chegar até aqui, obrigada professor, o senhor é um ser humano incrível. A minha coorientadora professora Maisa Sales Gama Tobias, por sua colaboração e apoio. A todo corpo docente da PPGENAV, em especial aos professores Valcir Farias, Hito Braga e Nélio Figueiredo por todo conhecimento a mim repassado.

Aos amigos que a PPGENAV me presenteou, em especial ao Matheus Melo, um amigo que eu serei eternamente grata por todo apoio e colaboração, sempre esteve disponível a me ajudar (valeu Matheus!). A Carol, Nayrama, Karina, Ariel, Paulo, Thiago, Gustavo e Neydson por toda ajuda e colaboração.

A todos que não foram citados, mas que de alguma forma contribuíram direto ou indiretamente para que eu concluísse esta etapa em minha vida. Recebam os meus mais sinceros agradecimentos e desejo que Deus possa abençoar a cada um.

“Suba o primeiro degrau com fé. Não é necessário que você veja toda a escada. Apenas dê o primeiro passo.”

- Martin Luther King

RESUMO

No cenário atual, o Brasil se consolidou como o maior exportador de soja do mundo, sendo o estado do Mato Grosso o que mais contribuiu para esse resultado. Partindo da possibilidade de escoamento dessa soja para os portos do Arco Norte, torna-se imperativo investigar as possíveis rotas logísticas considerando os graus de incerteza das variáveis envolvidas no transporte (valor de frete, ofertas e demandas dos portos), na busca de qual seria a melhor rota alternativa do ponto de vista econômico e logístico para obter-se um transporte mais eficiente. Portanto, esta pesquisa se propôs a desenvolver um Modelo de Transporte *Fuzzy* Trapezoidal Intervalar (MTFTI), otimizando o transporte envolvendo três rotas alternativas com diferentes cenários, além de proporcionar ao tomador de decisão valores de fretes aproximados aos valores determinísticos (*crisp*). No presente contexto a metodologia adotada foi aplicada para avaliar o desempenho das alternativas de transporte da produção de soja do estado do Mato Grosso em direção aos portos do Arco Norte. Os resultados obtidos no primeiro e segundo cenários foram os mesmos, tanto em relação ao custo de frete, quanto à logística. O terceiro cenário que envolve as rotas da BR-163 e a Hidrovia Araguaia-Tocantins, foi o cenário que apresentou o maior custo no transporte da soja e, no quarto cenário, que engloba as três rotas em estudo, o modelo otimizou a logística pelas rotas da BR-364, Ferrogrão (EF-170) e Hidrovia Araguaia-Tocantins, resultando no melhor cenário com os menores custos no transporte. Dentre os resultados, conclui-se que o modelo aplicado na pesquisa apresentou resultados satisfatórios, possibilitando ao tomador de decisão analisar os valores de fretes aproximados, podendo ter a opção de outras rotas, devido os valores de fretes estarem bem próximos.

Palavras-chave: Soja. Arco Norte. Logística. Modelo de Transporte *Fuzzy*.

ABSTRACT

In the current scenario, Brazil has consolidated itself as the largest exporter of soybeans in the world, with the state of Mato Grosso being the largest contributor to this result. Starting from the possibility of flowing this soybean to the ports of the Arco Norte, it becomes imperative to investigate the possible logistic routes considering the degrees of uncertainty of the variables involved in transport (freight rates, offers and demands of the ports), in the search for what would be the best alternative route from the economic and logistical point of view to obtain a more efficient transport. Therefore, this research proposed to develop a Fuzzy Trapezoidal Interval Transport Model (MTFTI), optimizing the transport involving three alternative routes with different scenarios, in addition to providing the decision maker with freight values close to the deterministic values (crisp). In the present context the adopted methodology was applied to evaluate the performance of the transportation alternatives of soybean production from the state of Mato Grosso towards the Arco Norte ports. The results obtained in the first and second scenarios were the same, both in relation to freight cost and logistics. The third scenario, which involves the BR-163 routes and the Araguaia-Tocantins Waterway, was the scenario that presented the highest cost in soybean transportation. In the fourth scenario, which encompasses the three routes under study, the model optimized the logistics via the BR-364, Ferrogrão (EF-170) and Araguaia-Tocantins Waterway routes, resulting in the best scenario with the lowest transportation costs. Among the results, it is concluded that the model applied in the research presented satisfactory results, enabling the decision maker to analyze the approximate freight values, and may have the option of other routes, due to the freight values being very close.

Keywords: Soybeans. Arco Norte. Logistics. Fuzzy Transportation Model.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 – Volume de Produção de soja entre 1974 e 2016.....	31
Figura 2 – Área de soja por estado e região entre 1974 e 2016.....	32
Figura 3 – Arco Norte.....	34
Figura 4 – Portos e Estações de Transbordos de Cargas do Arco Norte.....	34
Figura 5 – Logística da distribuição de grão no Brasil.....	38
Figura 6 – Logística de grãos no ano de 2020.....	39
Figura 7 – Corredores Multimodais do Arco Norte.....	40
Figura 8 – BR-163 (MT-PA)	44
Figura 9 – Projeto Ferrogrão.....	45
Figura 10 – Bacia Tocantins-Araguaia, Brasil.....	47
Figura 11 – Transformações e Formulações.....	51
Figura 12 – Taxonomia para problema de fluxo.....	55
Figura 13 – Caracterização do fluxo no problema de transporte.....	56
Figura 14 – Problema de transporte no formato de fluxo de rede.....	56
Figura 15 – Exemplo de Problema de Transporte.....	58
Figura 16 – O fluxo de Problema de Transbordo não capacitado.....	59
Figura 17 – Funções de pertinências <i>Fuzzy</i>	64
Figura 18 – Gráfico de Número <i>Fuzzy</i> Trapezoidal Intervalar.....	70
Figura 19 – Fluxograma das etapas metodológicas.....	76
Figura 20 – Localização do estado do Mato Grosso.....	77
Figura 21 – Macro e Microrregiões produtoras de soja do Mato Grosso.....	79
Figura 22 – Municípios produtores de soja (origem)	80
Figura 23 – Rotas de escoamento da soja.....	82
Figura 24 – Grafo do cenário 1.....	91
Figura 25 – Grafo do cenário 2.....	92
Figura 26 – Grafo do cenário 3.....	94
Figura 27 – Grafo do cenário 4	95
Figura 28 – 1º e 2º cenário – Frete Fuzzificado (Querência-Vila do Conde)	115
Figura 29 – 1º e 2º cenário – Frete Fuzzificado (Sorriso-Santarém)	116
Figura 30 – 1º e 2º cenário – Frete Fuzzificado (Sinop-Santarém)	116
Figura 31 – 1º e 2º cenário – Frete Fuzzificado (Diamantino-Santarém)	117

Figura 32 – 1º e 2º cenário – Frete Fuzzificado (Campo Novo do Parecis-Itacoatiara)	118
.....	
Figura 33 – 1º e 2º cenário – Frete Fuzzificado (Sapezal-Itacoatiara)	118
Figura 34 – Rotas logísticas obtidas no 1º e 2º Cenário <i>Fuzzy</i>	119
Figura 35 – 3º cenário – Frete Fuzzificado (Querência-Vila do Conde)	120
Figura 36 – Rotas logísticas obtidas no 3º Cenário <i>Fuzzy</i>	121
Figura 37– 4º cenário – Frete Fuzzificado (Campo Novo do Parecis-Santarém)	122
.....	
Figura 38 – 4º cenário – Frete Fuzzificado (Sorriso-Santarém)	122
Figura 39 – 4º cenário – Frete Fuzzificado (Sinop-Santarém)	123
Figura 40 – 4º cenário – Frete Fuzzificado (Diamantino-Santarém)	124
Figura 41 – Rotas logísticas obtidas no 4º Cenário <i>Fuzzy</i>	124
Figura 42 – Rotas logísticas do 2º cenário de Programação Linear.....	125

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 – Estimativa da produção e exportação mundial de soja para a safra 21/22.	29
Tabela 2 – Potencial e Movimentação dos portos exportadores de grãos em 2020.	30
Tabela 3 – Magro e Microrregião Geográfica do Mato Grosso.	78
Tabela 4 – Municípios de origem com áreas plantadas e produção.	86
Tabela 5 – Demandas dos Portos do Arco Norte no ano de 2020.	86
Tabela 6 – Origens, destinos e valores de frete.	88
Tabela 7 – Valores de Fretes Intermodais	89
Tabela 8 – Cenários e Rotas.	90
Tabela 9 – Otimização (BR – 163 MT-PA)	90
Tabela 10 – Otimização (BR – 163 MT-PA e Ferrogrão)	92
Tabela 11 – Otimização (BR – 163 MT-PA e Hidrovia Araguaia - Tocantins)	93
Tabela 12 – Otimização (BR – 163 MT-PA e Hidrovia Araguaia – Tocantins e Ferrogrão)	94
Tabela 13 – Valores de custo total em cada cenário	97
Tabela 14 – Ofertas fuzzificadas	104
Tabela 15 – Demandas fuzzificadas.	105
Tabela 16 – Valores de fretes fuzzificados (Origens-Porto de Itacoatiara)	107
Tabela 17 – Valores de fretes fuzzificados (Origens-Porto de Santarém)	107
Tabela 18 – Valores de fretes fuzzificados (Origens-Porto de Vila do Conde)	108
Tabela 19 – Valores de fretes fuzzificados (Origens-Porto de Itaqui)	108
Tabela 20 – Valores de fretes fuzzificados (Origens-ETC Porto Velho)	109
Tabela 21 – Valores de fretes fuzzificados (Origens-ETC Miritituba)	109
Tabela 22 – Valores de fretes fuzzificados (Origens-ETC Porto Nacional)	110
Tabela 23 – Valores de fretes fuzzificados (Origens-ETC Nova Xavantina)	110
Tabela 24 – Valores de fretes fuzzificados (Origens-ETC Sinop-Ferrogrão)	111
Tabela 25 – Valores de fretes fuzzificados (Transbordo-Porto de Itacoatiara)	111
Tabela 26 – Valores de fretes fuzzificados (Transbordo-Porto de Santarém)	112
Tabela 27 – Valores de fretes fuzzificados (Transbordo-Porto de Vila do Conde)	112
Tabela 28 – Valores de fretes fuzzificados (Transbordo-Porto de Itaqui)	113
Tabela 29 – Valores de fretes fuzzificados (1º e 2º cenário)	115
Tabela 30 – Valores de fretes fuzzificados (1º e 2º cenário)	115
Tabela 31 – Valores de fretes fuzzificados (1º e 2º cenário)	116

Tabela 32 – Valores de fretes fuzzificados (1º e 2º cenário)	117
Tabela 33 – Valores de fretes fuzzificados (1º e 2º cenário)	117
Tabela 34 – Valores de fretes fuzzificados (1º e 2º cenário)	118
Tabela 35 – Valores de fretes fuzzificados (3º cenário)	120
Tabela 36 – Valores de fretes fuzzificados (4º cenário)	121
Tabela 37 – Valores de fretes fuzzificados (4º cenário)	122
Tabela 38 – Valores de fretes fuzzificados (4º cenário)	123
Tabela 39 – Valores de fretes fuzzificados (4º cenário)	123
Tabela 40 – Custo total fuzzificado (1º e 2º cenário)	128
Tabela 41 – Custo total fuzzificado (3º cenário)	129
Tabela 42 – Custo total fuzzificado (4º cenário)	130

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

ABCR – Associação Brasileira de Concessionárias de Rodovias
AHITAR – Administração das Hidrovias do Tocantins e Araguaia
ANTAQ – Agência Nacional de Transportes Aquaviários
ANTT – Agência Nacional de Transportes Terrestres
CNA – Confederação da Agricultura e Pecuária do Brasil
CNT – Confederação Nacional de Transporte
CONAB – Companhia Nacional de Abastecimento
CEDECL – Centro de Estudo e Debates Estratégicos Consultoria Legislativa
CNP – Campo Novo do Parecis
DIA - Diamantino
DNIT – Departamento Nacional de Infraestrutura de Transporte
EMBRAPA – Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária
ESALQ – Escola Superior de Agricultura Luiz de Queiroz
ETC – Estação de Transbordo de Carga
FIC – Fictício
GAMS – General Algebraic Modelling System
IBGE – Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística
IMEA – Instituto Mato-grossense de Economia Agropecuária
ITC - Itacoatiara
ITQ - Itaquí
MAPA – Ministério da Agricultura, Pecuária e Abastecimento
MRT - Miritituba
MTFTI – Modelo de Transporte *Fuzzy* Trapezoidal Intervalar
NXA – Nova Xavantina
PIB – Produto Interno Bruto
PL – Programação Linear
PPI – Programa de Parcerias de Investimentos
PPL – Problema de Programação Linear
PTN – Porto Nacional
PTV – Porto Velho
SAP – Sapezal
SIN – Sinop

SNP - Ferrogrão

SOR – Sorriso

STR - Santarém

TCU – Tribunal de Contas da União

TUP – Terminal de Uso Privado

TUP – Terminal de Uso Privado

QUE – Querência

VDC – Vila do Conde

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO.....	18
1.1	JUSTIFICATIVA.....	23
1.2	HIPÓTESE.....	24
1.3	OBJETIVOS.....	25
1.3.1	Objetivo geral.....	25
1.3.2	Objetivos específicos.....	25
1.4	ESTRUTURA DO TRABALHO.....	26
2	FORMALISMO TEORICO.....	27
2.1	SOJA – COMMODITY DE OURO DO BRASIL.....	27
2.1.1	Histórico.....	28
2.1.2	Cenário Atual.....	29
2.1.3	Os principais portos brasileiros exportadores de grãos.....	30
2.1.4	O crescimento territorial da soja no Brasil.....	31
2.2	ARCO NORTE.....	33
2.2.1	Definição.....	33
2.2.2	Composição.....	33
2.2.3	Principais Portos e Estações de Transbordo de Cargas do Arco Norte..	33
2.3	LOGÍSTICA DE GRÃOS NO BRASIL.....	38
2.3.1	Corredores Logísticos do Arco Norte.....	40
2.3.2	Corredores em Estudo.....	42
2.3.2.1	Concessão da BR-163 (MT-PA).....	42
2.3.2.2	Implantação da Ferrogrão (EF – 170).....	44
2.3.2.3	Revitalização da Hidrovia Araguaia-Tocantins.....	46
2.4	PROGRAMAÇÃO LINEAR.....	48

2.4.1	Definição e Contextualização	48
2.4.2	Características do Modelo de Programação Linear.....	49
2.4.3	Formulação algébrica geral	49
2.4.4	Formulação Equivalentes	50
2.4.5	Modelando problemas através da Programação Linear.....	52
2.4.6	Fluxos em Redes e Logística de Distribuição.....	52
2.4.7	Modelos especiais em redes	56
2.5	PROGRAMAÇÃO LINEAR FUZZY.....	62
2.5.1	Teoria dos Conjunto Fuzzy.....	62
2.5.2	Número Fuzzy e α – níveis	64
2.5.3	Sistema baseado em regras Fuzzy.....	66
2.5.4	Número Fuzzy Trapezoidal Intervalar	67
2.5.5	Problema de Transporte de Número Fuzzy Trapezoidal Intervalar	71
3	METODOLOGIA.....	74
3.1	UNIVERSO E OBJETO DE ESTUDO.....	74
3.2	TIPO DE PESQUISA E MÉTODO	74
3.3	COLETA DE DADOS.....	75
3.4	ANÁLISE DOS DADOS	75
4	ESTUDO DE CASO.....	77
4.1	CARACTERIZAÇÃO DA ÁREA DE ESTUDO	77
4.2	MODELAGEM.....	82
4.2.1	Modelo de Programação Linear	82
4.2.2	Dados de entrada.....	85
4.2.3	Análise dos Cenários	89
4.2.4	Resultados da Programação Linear.....	96

4.3 MODELO DE PROGRAMAÇÃO LINEAR FUZZY	98
4.3.1 Modelo de Transporte <i>Fuzzy</i> Trapezoidal Intervalar.....	98
4.3.2 Dados de entrada de Programação Linear <i>Fuzzy</i>	103
4.3.3 Análise dos Cenários	114
4.3.4 Resultados obtidos de Programação Linear <i>Fuzzy</i>.....	125
5. CONCLUSÕES E SUGESTÕES PARA PESQUISA FUTURA.....	130
REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	132

1 INTRODUÇÃO

O agronegócio tem sido reconhecido como vetor crucial no crescimento econômico brasileiro. Em 2019, a soma de bens e serviços gerados no agronegócio chegou a R\$ 1,55 trilhões ou 21,4% do PIB brasileiro. Já em janeiro de 2021, o valor chegou aos 30% e estima-se que esses valores aumentem ainda mais para os próximos anos. No ramo agrícola, a soja é o principal responsável pelo valor bruto da produção nos períodos de 2019 e 2020, com valores respectivos em R\$ 155,36 bilhões e R\$ 175,63 bilhões (CNA, 2020). Tais resultados destacam a importância do agronegócio no crescimento e no desenvolvimento econômico no país.

A soja é considerada um dos principais produtos agrícolas do Brasil e, vem ganhando cada vez mais notoriedade com o passar dos anos com os avanços tecnológicos de produção (NETO *et al.*, 2019). Na safra de julho de 2021, o Brasil alcançou o seu recorde em produção de soja estimada em 135,9 milhões de toneladas, 11 milhões de toneladas superior a produção da safra de 2019/2020, posicionando o Brasil como o maior produtor e exportador de soja no mundo (CONAB, 2021). Portanto, sabe-se que o Brasil tem um grande potencial na produção de soja, e existe a possibilidade de escoamento dessa soja do centro-oeste pelos portos do Arco Norte e a ausência de uma alternativa logística eficaz torna o custo da soja muito elevado para competir no mercado consumidor. Com isso, se faz o seguinte questionamento: Qual seria a melhor rota alternativa do ponto de vista econômico e logístico para o escoamento de soja pelos portos do Arco norte Amazônico?

O Arco Norte pode ser definido como um plano estratégico que compreende o sistema de transportes em seus vários modos, responsável pelo escoamento de cargas e insumos com a utilização dos portos ou estações de transbordos ao norte e nordeste do Brasil, desde o porto de Porto Velho no estado de Rondônia, Itacoatiara no Amazonas, Miritituba, Santarém e Vila do Conde no Pará, Santana no Amapá, São Luís e Itaqui no Maranhão e o porto de Salvador na Bahia, sendo estes portos localizados acima do Paralelo 16°S (SOUZA, 2021; ANTAQ, 2019; CEDECL, 2016).

Nesta perspectiva, tem-se como possível alternativa o escoamento de grãos via Arco Norte. O mesmo já definido como a zona de exportação pelos terminais de transbordo e uso privado nos portos de Porto Velho (RO), Miritituba (PA), Porto Nacional (TO) e Nova Xavantina (MT) com destino aos portos do Norte e Nordeste do país, congregando os portos de Itacoatiara (AM), Santarém (PA), Vila do Conde (PA)

e Itaqui (MA), (SOUZA, 2021; FERREIRA, 2017; BRASIL, 2016; SOLIANI, 2015), sendo tais portos delimitados no desenvolvimento desta pesquisa, com o objetivo de estudar a logística mais viável em relação as três rotas envolvendo: a BR- 163 (Cuiabá-Santarém), a Ferrogrão (EF-170) e da Hidrovia Araguaia-Tocantins.

Segundo Macedo (2010), a soja é o *commodity* que apresentou maior expansão de área plantada, avançando desde a sua origem na região sul do país, especificamente, no Rio Grande do Sul e Paraná, atingindo o centro-oeste como os estados de Mato Grosso, Mato Grosso do Sul e Goiás e, progressivamente, para o cerrado nordestino entre o oeste baiano e o sul do Piauí e Maranhão; além de avançar em direção a região norte como no Estado do Pará, razão pela qual a área plantada mais do que duplicou no Brasil entre 1990 e 2008. E a tendência é de ampliação de áreas destinada à cultura da soja, tanto na região pioneira (Sul) quanto, em especial, regiões de fronteira, como o centro-oeste, Norte e Nordeste do País (Basso *et al*, 2021).

Entre os estados brasileiro que mais se destacam na produção de soja e milho, o estado do Mato Grosso, localizado no centro-oeste do país, é o maior produtor, devido sua produção alcançar 34,6 milhões de toneladas em 2021, representando 26,6% do total nacional (IBGE, 2021). Nesse aspecto, o estado mato-grossense é o único estado que exporta carga para todos os principais portos, além disso, muitos municípios possuem mais de um porto de destino e o principal critério é o menor custo no transporte (EMBRAPA, 2016).

No ano de 2015, 18,5% da soja produzida no Mato Grosso foi escoada pelos principais portos do Arco Norte como: Itaqui (MA), Itacoatiara (AM), Santarém (PA) e Vila do Conde (PA) e 81,5% da soja produzida nessa região foi transportada para os portos do sul e do sudeste do país, como: Santos (SP), Paranaguá (PR), Rio Grande (RS), São Francisco do Sul (SC), Vitória (ES) e Salvador (BA) (MDIC, 2015). Embora, a região do Mato Grosso possua um grande potencial agrícola, contrária a situação esperada, não detém um cenário ideal para transporte de grãos, visto que, grande parte dessa produção é escoada para os portos do sul e do sudeste do país (SILVA *et al*, 2020). Apesar da capacidade técnica e operacional desses portos, o transporte da soja do centro-oeste para os portos do sul e sudeste, torna-se inviável devido à grandes distâncias percorridas, considerando que o modo rodoviário não é eficiente para grandes distâncias, incorrendo em altos custos nos fretes, além do problema dos congestionamentos ocasionados pelas filas de espera nesses portos.

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). O termo logística é definido como uma ferramenta de planejamento do transporte, controle, armazenagem e distribuição de itens, matérias-primas, produtos acabados ou não, e serviços utilizados em um processo produtivo desde a sua origem (entrada), a manufatura (processo) até a saída, (cliente/ externo) (PEREIRA et al, 2019). Processo este que envolve a utilização eficiente e eficaz dos recursos disponíveis como, por exemplo, adequação do layout, padronização de processos, otimização no transporte, minimização do custo no transporte, enfim, busca sempre a melhoria contínua.

Apesar disso, o Brasil ainda enfrenta sérios problemas de infraestrutura logística, o que prejudica fortemente o escoamento da produção do grão, principalmente, pela precariedade de suas matrizes de transporte, especialmente quando considerado os principais modais de transportes (MONTEIRO *et al*, 2021). Como por exemplo, no modal rodoviário, que ainda existem muitos trechos que não foram asfaltados; as hidrovias, por sua vez, necessitam de sinalização e apresentam trechos não navegáveis e, ainda, a malha ferroviária é pouco concentrada, fazendo com que os veículos rodoviários de carga tenham que se deslocar por longas distâncias para encontrar um terminal ferroviário e hidroviário, de modo a executar o transbordo das cargas (CONAB, 2017). Para Petrov e Turygin (2011), o crescimento e o desenvolvimento do Brasil podem ser comprometidos pelo problemático sistema logístico de escoamento da sua produção agrícola.

No estado do Mato Grosso, o escoamento da soja é realizado majoritariamente pelo modal rodoviário (SOUZA, 2021), onde as cargas destinadas aos portos são transportadas pela combinação entre modais rodo-hidroviário e rodo-ferroviário. Essa combinação é denominada como intermodalidade, que é caracterizada pela utilização de dois ou mais modais de transporte (hidroviário, rodoviário e ferroviário) em uma mesma solução logística. Quando utilizada de maneira racional, a intermodalidade pode até reduzir os custos no transporte, como no caso estudado por Monteiro *et al* (2021) *apud* Melo *et al* (2018), cuja modelagem possibilitou identificar que as rotas mais eficientes no Brasil utilizam somente dois modais, cuja a introdução de três ou mais modais induziram a ineficiência do transporte da soja.

Em um estudo realizado por Souza (2021), foi definido o custo de transporte da soja como objeto de pesquisa, com base no modelo da Programação Linear, otimizando a distribuição logística da soja para os principais portos brasileiros, adotando o problema de transbordo para modelar o custo das rotas, considerando as rotas atuais e propondo duas novas rotas, a Ferrogrão e a Hidrovia Araguaia-Tocantins. No desenvolvimento deste estudo, adicionalmente às rotas estudadas por Souza, propõe-se a investigação do transporte de soja da região do estado do Mato Grosso, também, pela rota da BR-163, Ferrogrão (EF-170) e Hidrovia Araguaia-Tocantins.

Entre os projetos em infraestrutura na logística da soja do Mato Grosso para os portos do Arco Norte pode-se destacar o projeto que visa consolidar o novo corredor ferroviário de exportação. A ferrovia Ferrogrão, que conta com uma extensão de 933 km, conectando a região produtora de grãos do Centro-Oeste ao Estado do Pará, no Porto de Miritituba (PPI, 2021). Atualmente, o projeto está em andamento.

Outro empreendimento considerado por Souza (2021) é a Hidrovia Araguaia-Tocantins. A mesma é uma das principais vias de transporte do corredor Centro-Norte brasileiro, e por estar localizada no Cerrado, tem potencial para se transformar numa das mais importantes hidrovias do país. É uma via navegável até a hidrovia do Amazonas, desde Barra do Garças (MT), no rio Araguaia, ou Peixe (TO), no rio Tocantins, até o porto de Vila do Conde, próximo de Belém (PA), privilegiadamente localizado em relação aos mercados da América do Norte, da Europa e do Oriente Médio. Possui potencial navegável em aproximadamente 3.000 km (DNIT, 2021).

Com o advento da pavimentação da BR- 163, que liga o estado do Mato Grosso ao Pará, como rota alternativa, foi possível identificar uma redução dos custos de transporte de grãos em até 26%, admitindo o envio desses produtos para os portos do Arco Norte. Vale ressaltar que, a produção de grãos em novas fronteiras agrícolas foi de 8,4 milhões de toneladas por ano, enquanto que a de exportação foi de 3,2 milhões de toneladas ao ano: é como se a cada ano fosse criada a necessidade de ampliar um terminal com capacidade de 5 milhões de toneladas, havendo necessidade de analisar a melhor logística para atender a demanda dessa crescente produção anual (CNA, 2021).

A expectativa é de que os investimentos do governo federal e da iniciativa privada na conclusão do asfaltamento, duplicação e concessão da rodovia BR-163, ligando o Estado do Mato Grosso ao Estado do Pará, a construção da Ferrogrão e a

revitalização da Hidrovia Araguaia-Tocantins, poderão viabilizar um grande fluxo no escoamento da soja com destino aos portos do Arco Norte para a exportação (TORRES et al, 2017).

Desse modo, torna-se imperativo investigar as possíveis rotas que irão se constituir desses investimentos e definir qual a rota mais viável para dar vazão ao escoamento de soja do Mato Grosso com destinos aos portos da região Norte. Além disso, um ponto relevante para avaliar são os possíveis arranjos dessas infraestruturas dos corredores logísticos, mediante a possibilidade de se estar frente à grandes incertezas das variáveis envolvidas (valor de frete, ofertas e capacidade portuária) e, por conseguinte, das eficiências logísticas. Isto importa na modelagem do processo de escolha modal do transporte com o objetivo de se obter o menor custo.

Portanto, ao se obter uma solução única para um problema onde algum ou todos os coeficientes possuem imprecisões, o analista dos resultados fica sem a opção de analisar outros resultados possíveis. Com isso, bem mais do que simplesmente indicar um resultado, o Modelo de Transporte *Fuzzy* Trapezoidal Intervalar (MTFTI) quantifica através da construção de uma função de pertinência, valores variados de aproximação dos valores *crisp* a serem analisados.

Desta forma, o método aqui empregado apresenta um conjunto de soluções onde tanto os valores das variáveis quanto o valor de custo total fornecem um conjunto de possíveis soluções factíveis, que possam atender a diferentes cenários. Além de fornecer ao tomador de decisões uma ferramenta de análise mais poderosa, permitindo que sejam analisadas outras soluções possíveis antes de se escolher uma solução em particular.

Portanto, até onde se sabe, não há nenhum método em trabalhos anteriores que se concentre em solucionar um Problema de Transporte *Fuzzy* onde todos os parâmetros (custos dos fretes, a oferta da produção e capacidade portuária) são representados com Número *Fuzzy* Trapezoidal com Valor Intervalar. Nesta dissertação, a análise para os corredores propostos, foi através do emprego deste método, que é capaz de viabilizar processos de hierarquização que envolve tanto aspectos técnicos quanto econômicos, e apresenta como benefícios o tratamento de variáveis quantitativas e lineares, o que contribui para a análise de eficiência do problema proposto. No presente contexto a metodologia adotada será aplicada para avaliar o desempenho das alternativas logísticas no transporte da soja do estado do Mato Grosso em direção aos portos do Arco Norte, visando menor custo no transporte.

1.1 JUSTIFICATIVA

Devido às perspectivas no aumento e no crescimento da produção que o setor agrícola tem representado no desenvolvimento econômico do Brasil com uma participação de 68% no PIB brasileiro (CNA, 2020), torna-se imperativo realizar estudos de viabilidade logística e econômica para propor soluções em fase das ineficiências que tem sido apresentadas em estudos anteriores sobre o transporte de *commodities* agrícola para os portos exportadores. Esta pesquisa tem como principal motivação encontrar soluções que possibilite aos tomadores de decisão, um planejamento eficaz e de menor custo no transporte.

Para isso, um estudo de viabilidade de rotas da região Amazônica, tida como região em expansão de fronteiras (BECKER, 1992, TOBIAS, 2000), conduz a diversos arranjos logísticos sob grande variabilidade dos indicadores envolvidos, gerando um ambiente de modelagem de grande incerteza. Para realizar esta análise logística, considerando as incertezas (custo do frete, produção dos municípios e capacidade portuária), uma ferramenta indicada para solucionar essa problemática é o modelo de Transporte *Fuzzy* Trapezoidal Intervalar proposto pelo matemático Ebrahimnejad (2015).

Para tal propósito, será aplicado o modelo de Transporte *Fuzzy* Trapezoidal Intervalar, que quantifica os valores de fretes variados de aproximação dos valores determinísticos, apresentando um conjunto de soluções factíveis ao tomador de decisão, que possam atender a diferentes cenários e proporcionando aos mesmos a inserção de corredores logísticos, propondo rotas alternativas e mais viáveis economicamente.

Este trabalho se faz relevante para auxiliar no processo de decisão quanto às medidas de desempenho das rotas alternativas, principalmente, sobre os aspectos logísticos e econômicos que estão diretamente relacionados entre si.

1.2 HIPÓTESE

A inserção dos corredores logísticos pode proporcionar aos tomadores de decisão, rotas alternativas com o menor custo no transporte de grãos para os portos do Arco norte.

1.3 OBJETIVOS

1.3.1 Objetivo geral

Analisar se existem corredores logísticos capazes de trazer maior viabilidade econômica para integrar as regiões produtoras de grãos do Centro-oeste com destino aos portos do Arco norte Amazônico.

1.3.2 Objetivos específicos

- a) Aplicar o método proposto para testar os quatro cenários em estudo (rotas atuais + Br-163, rotas atuais + Br-163 + Ferrogrão, rotas atuais + Br-163 + Hidrovia Araguaia-Tocantins e rotas atuais + Br-163 + Ferrogrão + Hidrovia Araguaia-Tocantins);
- b) *Fuzzificar* os custos do transporte, ofertas e capacidade portuária (oferta e demanda);
- c) Aplicar o modelo de Transporte *Fuzzy* Trapezoidal Intervalar considerando às incertezas inerentes ao custo de transporte;
- d) Comparar os resultados, de modo a obter a melhor tomada de decisão em relação à escolha da melhor alternativa logística.

1.4 ESTRUTURA DO TRABALHO

O desenvolvimento deste trabalho está estruturado da seguinte forma:

No capítulo 1, apresenta introdução contextualizando do tema explorado, problemática, justificativa, as hipóteses, os objetivos e a estrutura do trabalho.

O capítulo 2, apresenta o Formalismo Teórico utilizando revisões bibliográficas de autores correlatos ao tema e ao método aplicado do desenvolvimento da pesquisa, conceituando as definições dos métodos aplicados.

No capítulo 3, apresenta as metodologias que serão empregadas na pesquisa do estudo de caso. Sendo que a priori, será aplicando a Programação Linear e na segunda etapa, a Programação Linear *Fuzzy*.

O capítulo 4, é apresentado o estudo de caso, a modelagem do problema de transporte, análise dos cenários e os resultados obtidos.

E por fim, no capítulo 5, apresenta as conclusões e sugestão para pesquisa futura.

2 FORMALISMO TEORICO

Este capítulo apresenta o arcabouço teórico pertinente ao cenário de produção da soja no Mato Grosso e no Brasil como um todo, e sua rede logística atual. Além disso, tem-se a formalização do problema de programação linear e a introdução da análise empregando a teoria dos conjuntos *fuzzy*, em particular o problema do tipo trapezoidal intervalar.

2.1 SOJA – COMMODITY DE OURO DO BRASIL

A soja (*Glycine max*) é uma das mais importantes culturas na economia mundial. Seus grãos são muito usados pela agroindústria (produção de óleo vegetal e ração para alimentação animal), indústria química e de alimentos e atualmente vem crescendo como fonte alternativa de biocombustível (FREITAS, 2011 *apud* COSTA NETO & ROSSI, 2000).

É a oleaginosa de maior importância na atualidade e de maior relevância no mercado internacional. É produzida principalmente em três países: Brasil, Estados Unidos e Argentina, que atualmente juntos correspondem por 81,5% da produção mundial (EMBRAPA, 2021).

A soja é uma *commodity*, palavra que significa “mercadoria”, e é usada para mercadorias em estado bruto, ou seja, é um produto agrícola primário. É uma mercadoria negociada nos mercados nacionais e internacionais. A formação do preço interno está relacionada com a Bolsa de Chicago e o preço doméstico depende de descontos, ou acréscimos, do prêmio de exportação e transporte. Além disso, o valor do dólar comercial também reflete no mercado doméstico, pois a soja é cotada nessa moeda, devendo, portanto, ser convertida para a moeda local (CONTESSA, 2020).

Na safra de 2020/21, houve a produção mundial de soja de 362,95 milhões de toneladas numa área plantada de 127,8 hectares, sendo que desse valor, o Brasil alcançou um recorde em sua produção de 135,9 milhões de toneladas em uma área de 38,5 milhões de hectares. Posicionando-o como o maior produtor e exportador de soja no mundo (CONAB, 2021). Com uma participação na exportação em grão de 74,1 milhões de toneladas, com valores de U\$ 28,56 bilhões (EMPRAPA, 2021).

Diante disso, podemos dizer que a exploração de soja foi a atividade agrícola que mais se expandiu no mundo. O Brasil tem grande participação quanto a produção, plantio e comercialização de grão e mantém taxas de crescimento significativas, ano após ano. O Brasil tem grande potencial, pois possui áreas para a expansão do cultivo de soja. Fica claro que a soja é muito importante para economia brasileira (FERREIRA, 2011).

2.1.1 Histórico

A soja tem a sua origem atribuída ao continente asiático. Sabe-se que, em seus primórdios, foi uma planta rasteira que habitava a costa leste da Ásia, principalmente a região da Manchúria, na China (CONTESSA, 2020)

No Brasil, o primeiro relato sobre o surgimento da soja através de seu cultivo foi em 1882, no estado da Bahia e em seguida foi levada por japoneses para São Paulo, e somente, em 1914, a soja foi introduzida no estado do Rio Grande do Sul, considerada como região pioneira na produção (FREITAS, 2011).

Em 1973 aconteceu o “boom” da soja, combinando boa colheita com excelentes preços para a oleaginosa. Este fenômeno provocou inicialmente uma acelerada expansão do cultivo da soja no Rio Grande do Sul e no Paraná e, em período mais recente, para o Centro-Oeste brasileiro (BASSO et al, 2021).

No estado do Mato Grosso, o primeiro cultivo comercial de soja foi feito no ano agrícola de 1977/78, quando foram cultivados 5.566 hectares e obtida uma produção de 7.269 toneladas. E a partir de então, o crescimento foi impressionante, sendo até hoje, o estado onde se concentra a maior taxa anual de crescimento da cultura (EMBRAPA, 1987).

Uma outra fronteira que está se tornando cada vez mais promissora no norte e nordeste brasileiro para a produção de soja, é a região chamada de MATOPIBA, região do cerrado que engloba o sul do Maranhão, sul do Piauí, norte do Tocantins e o oeste da Bahia. A alta produtividade nessas regiões se dá graças às boas condições climática e a adoção de tecnologia no cultivo da soja (FREITAS, 2011).

2.1.2 Cenário Atual

Um levantamento realizado pela Companhia Nacional de Abastecimento (CONAB, 2021), constatou que no período de julho de 2021 houve a produção recorde estimada em 135,9 milhões de toneladas na produção de soja no Brasil, 8,9% ou 11 milhões de toneladas superior à produção da safra 2019/20. Colocando o Brasil na posição do maior produtor mundial da leguminosa. Podemos assim observar, conforme a Tabela 1.

Tabela 1 – Estimativa da soja para a safra 21/22

Produção mundial (milhões de t)					Exportação mundial (milhões de t)				
Países	Safras		Variação		Países	Safras		Variação	
	20/21	21/22	Abs	%		20/21	21/22	Abs	%
Brasil	136,0	144,0	8,0	5,9	Brasil	86,0	93,0	7,0	8,1
EUA	112,5	119,9	7,3	6,5	EUA	62,1	56,5	-5,6	-9,0
Argentina	47,0	52,0	5,0	10,6	Argentina	6,6	6,5	-0,1	-1,5
China	19,6	19,0	-0,6	-3,1	China	6,4	6,4	0,0	0,0
Demais	47,8	50,6	2,8	5,9	Demais	10,4	10,6	0,2	2,1
Mundo	362,9	385,5	22,6	6,2	Mundo	171,4	172,9	1,5	0,9

Fonte: Elaboração própria, a partir de dados da FIESP (2021).

O bom desempenho do setor está diretamente ligado às exportações, devendo-se considerar os seguintes cenários: a alta dos preços internacionais das commodities, predominância da exportação brasileira, em função do aumento da demanda mundial por alimentos, e a forte desvalorização do real frente ao dólar. Ambos os fatores, contribuíram para o aumento da produção e valorização do preço da soja (ESALQ, 2021).

2.1.3 Os principais portos brasileiros exportadores de grãos

Em relação as exportações do ano de 2020, o Brasil exportou 133 milhões de toneladas de soja e milho. E os portos do Arco Norte responderam por 42,3 milhões de toneladas, o que representa 31,9% do total, enquanto os portos das regiões sul e sudeste exportaram 90,4 milhões de toneladas ou 68,1% do total (CNA, 2021).

Os portos que mais embarcaram grãos em 2020 foram Santos com 42,2 milhões de toneladas, representando 31,8% do total, Paranaguá/Antonina, com 22,5 milhões de toneladas e Rio Grande com 12,1 milhões de toneladas nas regiões Sul e Sudeste. No Arco Norte, o porto de Vila do Conde embarcou 13,7 milhões de toneladas, de São Luís/Itaqui/PDM foi responsável por 13,1 milhões de toneladas, de Santarém exportou 7 milhões de toneladas e Itacoatiara 4,5 milhões de toneladas (CNA, 2021), como pode-se observar na Tabela 2.

Tabela 2 – Potencial e Movimentação dos Portos exportadores de grãos em 2020

Item	Porto	Potencial (Milhões/ton)	Movimentação (Milhões/ton)
1	Santos – SP	45	42,2
2	Paranaguá – PR	25	22,5
3	Rio Grande – RS	18	12,1
4	Vila do Conde – PA	16	13,7
5	São Luís/Itaqui – MA	13	13,1
6	São Francisco do Sul - SC	8	6,5
7	Vitória – ES	8	5,7
8	Santarém – PA	7	7
9	Salvador – BA	5	4,6
10	Itacoatiara/Manaus - AM	5	4,5
11	Santana – AP	2,5	0,4
12	Porto de Imbituba - SC	2	1,4

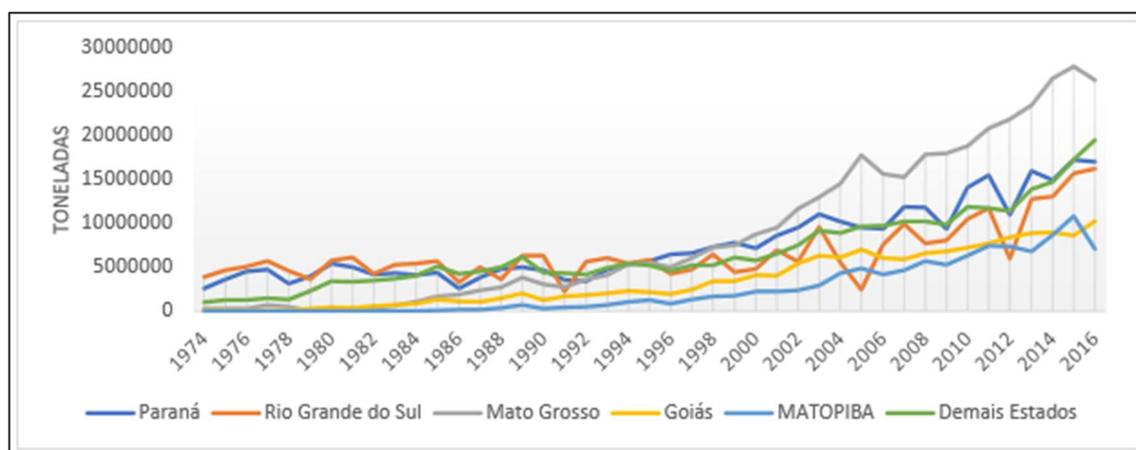
Fonte: Elaboração própria, a partir de dados da CNA (2021).

O porto de Itaqui foi o único no país a movimentar soja e milho acima do seu potencial em 2020, conforme pode-se observar na Tabela 2, o potencial de movimentação anual do porto é de 13 milhões de toneladas de soja e milho e o porto fechou o ano em 13,1 milhões de toneladas. Nesse mesmo ano o porto de Santarém movimentou os grãos no limite máximo do seu potencial, que é de 7 milhões de toneladas (CNA, 2021). Seguindo o exemplo de sucesso do Porto de Itaqui, em São Luís no Maranhão, onde o Terminal de grão (Tegram) alcançou plena capacidade de embarque, onde investimentos têm sido feitos a fim de buscar aumento da eficiência logística. Apenas evidenciando a importância de estudos para projeções futuras e capacidade portuária dos principais portos exportadores de grãos no Arco Norte.

2.1.4 O crescimento territorial da soja no Brasil

A grande expansão da soja no Brasil, começa a partir de 2005, superando os 15 milhões de toneladas e os 30 milhões em 2015 (Figura 1). Para o comportamento em termos de volumes de produção de soja dos principais estados produtores, podemos destacar o estado do Mato Grosso e os demais estados acompanham progressivamente a grosso modo, o ritmo de expansão da área cultivada e colhida (Basso *et al*, 2021).

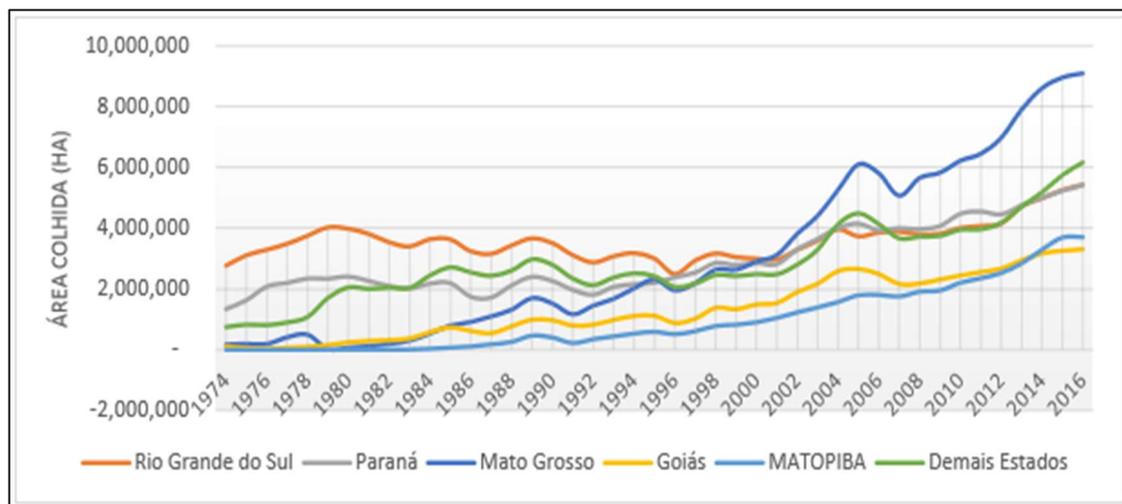
Figura 1 – Volume de Produção de soja entre 1974 e 2016



Fonte: SIDRA/IBGE (2021).

O movimento mais surpreendente na trajetória de expansão da soja é apresentado pelo estado de Mato Grosso que, até meados da década de 80, tem uma produção de soja insignificante, mas chega a 4 milhões de hectares cultivados em 2003 e a mais de 9 milhões em 2016 (Basso *et al*, 2021), como se pode observa na Figura 2.

Figura 2 – Área colhida de soja por Estado e Regiões entre 1974 e 2016



Fonte: SIDRA/IBGE (2021).

Analisando a expansão do agronegócio para as regiões Centro-oeste e Norte, Coy (2020) refere-se ao estado do Mato Grosso como uma das regiões mais importantes não só para o Brasil, mas também para a América Latina e para o mundo, em função de sua produção de soja e outras commodities agrícolas, com sistema de produção caracterizados com alto grau de mecanização, implicando em um nível muito elevado de capitalização e orientado, antes de mais nada, aos mercados internacionais.

2.2 ARCO NORTE

2.2.1 Definição

Conceitualmente o termo Arco Norte é definido como “Plano estratégico que compreende portos ou estações de transbordos dos estados de Rondônia, Amazonas, Pará, Amapá e Maranhão” (Ministério da Infraestrutura, 2016). Vide Figura 3. Segundo MAPA (2017), Arco Norte pode ser definido também “Por uma linha imaginária que atravessa o território brasileiro no paralelo 16º Sul, passando próximo as cidades de Ilhéus (BA), Brasília (DF) e Cuiabá (MT)”.

2.2.2 Composição

O complexo portuário que compõem o sistema Arco Norte são: o porto de Porto Velho em Rondônia, porto de Manaus/Itacoatiara no Amazonas, porto de Santarém no Pará, porto de Itaituba/Miritituba no Pará, porto de Belém/Vila do Conde no Pará, porto de Santana no Amapá e porto de São Luís/Itaqui no Maranhão (ANTAQ, 2021).

2.2.3 Principais Portos e Estações de Transbordo de Cargas do Arco Norte

O sistema Arco Norte é formado pelos seguintes portos: Itacoatiara, localizado no estado do Amazonas; Santarém e Vila do Conde, no Pará; São Luís e Itaqui, disposto no Maranhão; e Santana, no Amapá. As plataformas portuárias de apoio, são as Estações de Transbordo de Carga (ETC), que são suporte operacional para os corredores multimodais como: Porto Velho, em Rondônia; e Miritituba, localizada no Pará, entre outras (CONAB, 2017). Como ilustrado na Figura 4.

Figura 3 – Arco Norte



Fonte: Elaboração própria, adaptado do Ministério da Infraestrutura (2016).

Figura 4 – Portos e Estações de Transbordo de Cargas do Arco Norte



Fonte: Elaboração própria (2021)

O **Porto do Itaqui – MA** tem conexão direta com a Estrada de Ferro Carajás (EF-315), operada pela Companhia Vale do Rio Doce até Açailândia – MA, distando 513 quilômetros. Para se aproximar do estado de Mato Grosso, é preciso conectar-se com a Ferrovia Norte-Sul (EF-151), operada pela VALEC – Engenharia Construções e Ferrovias S.A. até o Porto Nacional – TO e são mais 720 quilômetros (DNIT, 2018 *apud* Bucker, 2019. p. 78).

A localização do porto de Itaqui é estratégica, tem proximidade com os mercados internacionais sendo o primeiro porto de entrada e o último porto da saída para o mercado asiático onde a rota é via Canal do Panamá. Além de que o porto encurta aproximadamente sete dias de viagem no comparativo com os outros portos das regiões Sudeste e Sul do Brasil, esses fatores favorecem a competitividade do Arco Norte (SILVA *et al*, 2020).

O **Porto de Santarém - PA** localiza-se na cidade de Santarém, PA, à margem direita do rio Tapajós a cerca de 3 quilômetros da confluência com o rio Amazonas. Ele é administrado pela Companhia Docas do Pará (CDP) desde a sua inauguração em 1974. Constitui-se em um porto estratégico entre os modais rodoviário e hidroviário para as cargas que escoam pela BR-163 e pelos rios Tapajós-Teles Pires. O porto de Santarém abrange uma área territorial de 500 mil m², possui 12 instalações acostáveis compostas por píer, delfins de atracação, cais fluvial, terminal de granéis sólidos, três terminais de granéis líquidos e rampa roll-on. Existem quatro áreas arrendadas, uma dessas áreas foi para empresa Cargil Agrícolas S/A que ocupa 93,6 mil m² e opera na movimentação de grãos com capacidade de 1500 toneladas. O acesso marítimo se dá pelos rios Tapajós e Amazonas. O acesso rodoviário pela BR-163 (Cuiabá-Santarém), pela avenida Cuiabá, e pela BR-230 (Transamazônica) (EMBRAPA, 2021).

O **Porto de Vila do Conde - PA** está situado na Ponta Grossa, município de Barcarena, estado do Pará, à margem direita do rio Pará, a uma distância fluvial de 55km de Belém. O Porto está integrado ao Complexo Portuário Industrial de Vila do Conde, o mesmo se conecta ao Porto de Itaituba – PA, que fica no distrito de Miritituba - PA, por meio da hidrovia do rio Tapajós, a uma distância de 1.107 quilômetros (DNIT, 2018b). Nesse contexto, o porto de Barcarena, vem se tornando uma rota bastante atrativa para o escoamento para o mercado externo da soja produzida nas regiões Norte, Nordeste e Centro-oeste, se consolidando como uma nova alternativa de transporte marítimo (NETO *et al*, 2019).

O **Porto de Itacoatiara – AM** localiza-se no estado do Amazonas, à margem esquerda do rio Negro distante, 13 km da confluência com o rio Solimões, o porto é a principal porta de entrada para o estado. Tem uma área total de 94,5 mil m², incluindo o flutuante de 16,8 mil m² e com uma profundidade de 11 m. O acesso ao porto se dá também pelas rodovias AM-010 e rodovias BR-174 e BR-319, ligando aos estados de Roraima e Rondônia. Os principais produtos agrícolas exportado no porto são a soja via Terminal Graneleiro Hermasa e trigo importado pela TUP Ocrim (EMBRAPA, 2018).

O **terminal de transbordo de Miritituba (PA)** está situado a margem direita do rio Tapajós, no distrito de Miritituba, pertencente ao município de Itaituba/PA, é atualmente uma das rotas logísticas mais importantes para o escoamento de commodities agrícola do estado do Mato Grosso. Sua operação iniciou-se em 2016 e foi concebido, inicialmente, para o escoamento de grãos. A operação de transbordo consiste na recepção de caminhões e carregamento em barcaças realizada via sugador. Ao transportar os grãos entre Miritituba e Vila do Conde para exportação, os caminhões e embarcações, que voltariam pela mesma rota vazios, passam a transportar fertilizantes na prática do frete retorno (DNIT, 2018 *apud* Bucker, 2019).

Hibernon Filho et al (2016) verificaram em seu estudo que, aproximando-se do potencial e dificuldades para a exportação de soja pelos portos da região Norte, constatou uma falta atual de capacidade portuária para atender à demanda regional de exportação, o que é preocupante ao considerar previsão de crescimento da produção e exportação.

O **terminal de transbordo de Porto Velho (RO)** é o Terminal de Uso Privado (TUP) da empresa Cargill Agrícola S/A que é considerada um ponto estratégico para escoamento de grãos no Arco Norte. A empresa está operante desde 2003 na capital do estado de Rondônia, localizada na margem direita do rio Madeira e tem capacidade de movimentação de 2 milhões de toneladas anuais de grãos. A unidade recebe granéis sólidos (soja e milho) produzidos no estado de Rondônia e na região do Oeste do Mato Grosso, de onde são transportados pelo modal rodoviário até Porto Velho, que recebe esse produto e posteriormente realiza o transbordo para as barcaças, com destino ao porto de Itacoatiara (AM) ou diretamente para o porto de Santarém (PA) com destino aos mercados mundial (CARGILL, 2021).

O **terminal de transbordo de Porto Nacional (TO)**, fica localizado no Estado do Tocantins, a 20 km de Palmas, onde existem empresas como a VLI, que é

responsável por realizar o transbordo da produção de soja do Mato Grosso, através do modal rodoviário (BR-158) para o ferroviário (Ferrovia Norte Sul – EF - 151) com destino ao Porto de Itaqui no Maranhão (VLI, 2021).

A maior demanda, relacionada ao aumento da produção de grãos em regiões dos estados de Mato Grosso, Tocantins, Goiás, Bahia, e Piauí, exige a ampliação da capacidade operacional do Porto de Itaqui (MA), que possui vantagens locais para a exportação em relação aos portos de Santos (SP) e porto de Vitória (ES), por serem mais distantes dos mercados asiáticos e europeus (CASTILHO e ARRAIS, 2017).

O **terminal de transbordo de Nova Xavantina (MT)**, fica localizado no estado do Mato Grosso, onde possibilita duas opções de rotas multimodais, a primeira pelo modo rodo-ferroviário de Nova Xavantina até o Porto de Santos (SP), e a segunda opção que envolve os corredores multimodais do Arco Norte, utilizando o modo hidroviário entre os municípios de Nova Xavantina até Xambioá (TO), de lá segue pelo modo rodoviário por 130 km até a ferrovia Norte-sul (EF-151), com destino a porto de Itaqui no Maranhão (RESENDE *et al*, 2007).

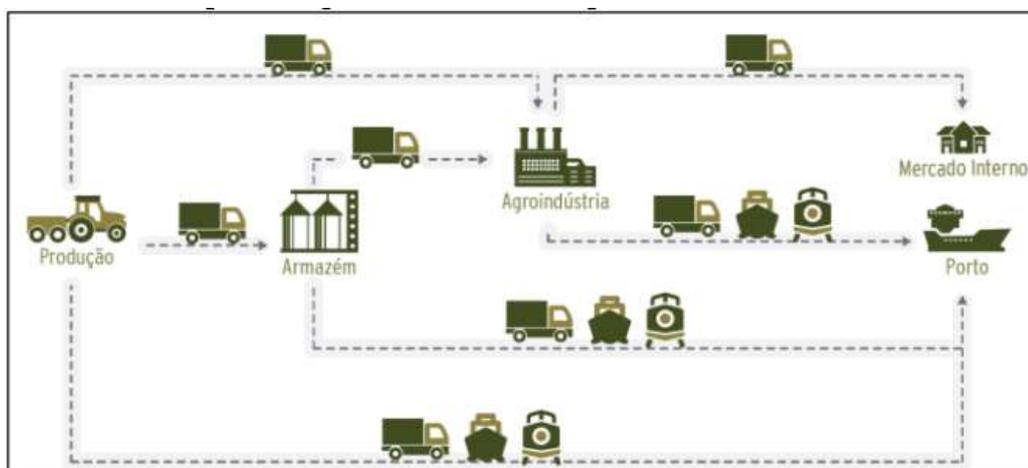
2.3 A LOGÍSTICA DE GRÃOS NO BRASIL

No Brasil o transporte da soja é realizado tanto pelo modo unimodal (utilizando apenas um modo de transporte, geralmente o rodoviário), quanto pelo modo intermodal (utilizando mais de um modo de transporte, seja rodoviário, ferroviário ou hidroviário).

Segundo dados do Ministério da Infraestrutura (2019), o modal de transporte mais utilizado na logística da soja é o rodoviário (67%), que percorrendo longas distâncias se torna o modo muito mais caro que o ferroviário e mais ainda, que o hidroviário, que respondem apenas por (28%) e (5%), respectivamente, do total da soja transportada no país.

Como forma de tornar o escoamento da soja mais econômico, surgiu a alternativa de transportar o produto por meio de intermodalidades, porém, vale ressaltar que além de se obter uma eficiência no transporte intermodal é necessário a presença de alguns suportes como, alguns armazéns e terminais intermodais de apoio (SOUZA et al, 2019). Portanto, a Figura 5 demonstra o fluxograma desta logística. Segundo Pereira (2017), o escoamento da produção agrícola ocorre em duas etapas distintas. Uma destinada diretamente das lavouras para os armazéns públicos, de propriedades rurais, de cooperativas ou de *tradings* caracterizada pelo transporte rodoviário fragmentado e de custos elevados. A outra pelo transporte dos produtos desde a lavoura até as indústrias de processamento ou diretamente aos portos de exportação.

Figura 5 – Logística da distribuição de grãos no Brasil



Fonte: CNT (2015).

Recentemente foi realizado pela Confederação da Agricultura e Pecuária do Brasil (CNA, 2021), um estudo que permitiu identificar dados referentes a exportação de soja e milho pelos principais portos exportadores de grão do país e constatou que as exportações de soja e milho pelos portos do Arco Norte totalizou 42,3 milhões de toneladas em 2020, um aumento de 487,5% em relação a 2009. A pavimentação da BR-163, que vai do Mato Grosso ao Pará, permitiu a redução dos custos de transportes de grãos em 26%, contribuindo para o envio desses produtos para os portos do Arco Norte (vide Figura 6).

Além disso, o mapa contém, ainda, informações sobre a matriz de transporte brasileira, a movimentação de produtos pelas ferrovias, o uso dos rios nos transportes de cargas e o potencial de exportação dos portos, bem como, a quantidade que cada porto exportou no ano de 2020 (CNA, 2021).

Figura 6 – Logística de grãos no ano de 2020



Fonte: CNA (2021).

2.3.1 Corredores Logísticos do Arco Norte

São vários os corredores multimodais utilizados no sistema Arco Norte, entre eles podemos destacar os modais rodoviário, hidroviário e ferroviário. Basicamente, a sua origem está localizada na zona de produção agrícola do país e segue um eixo de transporte destinado a uma plataforma exportadora. Pela disponibilidade do sistema fluvial amazônico, o principal fluxo de transporte utilizado é o hidroviário, e o modo rodoviário serve de suporte, deslocando a produção dos centros produtores para as unidades de transbordo entre caminhões e barcaças ou entre caminhões e o modo ferroviário (CONAB, 2017). A Figura 7 apresenta os principais corredores multimodais logísticos da soja do centro oeste para o norte do país.

Figura 7 – Corredores multimodais do Arco Norte



Fonte: Elaboração própria (2021).

Entre esses corredores, podemos destacar os corredores operantes como:

1) **Corredor Madeira** – É o corredor que vem sendo utilizado desde 1997 por empresas como a Amaggi para escoar a safra de grãos do noroeste do estado de Mato Grosso (LEANDRO e SILVA, 2016). Os produtos são transportados via modal rodoviário pela BR- 364 (MT-RO), percorrendo uma distância de 853 km, desde Sapezal/MT até a Estação de Transbordo no porto da cidade de Porto Velho/RO. De lá os grãos são transportados por barcaças graneleiras pela hidrovia madeira,

seguindo pelo rio Amazonas até chegar ao porto de Itacoatiara/AM, podendo seguir ainda de Porto Velho para o porto de Santarém/PA, onde os produtos são exportados para o mercado internacional (CONAB, 2017).

2) **Corredor Tapajós** – É formado pela BR-163 (Cuiabá-Santarém), que utiliza o modal rodoviário para transportar a produção de grão da região central do Mato Grosso (Sinop, Sorriso, entre outras) até a estação de transbordo de Miritituba/PA a uma distância de aproximadamente 995 km ou diretamente para o porto de Santarém/PA a 1.293 km de distância. A BR-163 é uma rodovia federal longitudinal, extremamente estratégica para a logística do Arco Norte, ao integrar a região do centro-oeste do país aos portos do Arco Norte (Banco Mundial, 2019). Recentemente, a BR-163 foi completamente pavimentada (1009,5 km) e concessionada para a empresa Via Brasil BR-163, que por meio da cobrança de pedágio, irá operá-la por um prazo de 10 anos de concessão (PPI, 2021).

3) **Corredor Tocantins** – O suporte deste corredor é o rio Tocantins. Contudo, pelas inúmeras barragens hidrelétricas existentes na via fluvial e a falta de eclusa para transposição, a principal via passou a ser a Ferrovia Norte-Sul, que atende ao nordeste do Mato Grosso (Querência, entre outras), o norte de Goiás e a região do MATOPIBA, onde os produtos são transportados pelo modal rodoviário até os terminais de Porto Nacional (TO), ou em Porto Franco/MA, onde se realiza o transbordo para a ferrovia, que segue então para aos portos de São Luís ou Itaqui no Maranhão (PEREIRA, 2017).

Corredores Projetados:

4) **Corredor Ferrogrão (EF-170)** – É um corredor projetado que visa consolidar o novo corredor ferroviário de exportação do Brasil pelo Arco Norte. A ferrovia conta com uma extensão de 933 km, conectando a região produtora de grãos do Centro-Oeste ao Estado do Pará, desembocando no Porto de Miritituba. Por ser um projeto previsto para ser implantado paralelamente à BR-163, a ferrovia poderá cumprir importante fator inibidor ao desmatamento, uma vez que, sua construção será paralela a BR-163 (PPI, 2021).

5) **Corredor Hidrovia Araguaia-Tocantins** – É uma das principais vias de transporte do corredor Centro-Norte do país, estar localizada no Cerrado brasileiro, a maior região de grãos do país. Possui um potencial navegável em aproximadamente 3.000 km. Porém, necessita realizar obras de melhorias, como, construção de eclusa, dragagem, sinalização e principalmente o derrocamento do Pedral do Lourenço, para que assim, se possa explorar o seu máximo potencial de exportação de grãos para os portos de Vila do Conde/PA e São Luís/ Itaqui/MA (ANTAQ, 2013).

2.3.2 Corredores em Estudo

O sistema Arco Norte, é composto principalmente por três principais rodovias (BR-158, BR-163 e BR-364.), que asseguram a acessibilidade da produção agrícola do Mato Grosso aos seguintes portos: Itacoatiara, no Amazonas; Santarém, Vila do Conde, no Pará e Itaqui no Maranhão. E as plataformas portuárias de transbordo disponíveis nos corredores multimodais são: Porto Velho, em Rondônia; Miritituba, no Pará, Nova Xavantina, no Mato Grosso e Porto Nacional em Tocantins. Os três corredores logísticos abordados nesta pesquisa são: BR-163 (MT-PA), Ferrogrão (EF-170) e Hidrovia Araguaia-Tocantins, que serão o objeto de estudo no desenvolvimento desta pesquisa e estão classificados abaixo:

2.3.2.1 Concessão da BR-163 (MT-PA)

No Brasil, o transporte da soja é feito pelos três modais, porém o modal rodoviário prevalece. As limitações estão relacionadas à péssima qualidade da infraestrutura, reduzindo as vantagens na área da produção em virtude da ineficiência logística, sendo um dos gargalos da soja brasileira, limitando a lucratividade, custos que provocam engarrafamento de caminhões nos portos brasileiros e de espera dos navios que acabam por não cumprir com os prazos de entrega no exterior (CONTESSA, 2020).

Com a finalidade de melhorar a trafegabilidade de veículos e especialmente promover maior competitividade aos setores econômicos no escoamento da produção e, assim, superar o gargalo logístico, o governo federal transferiu para a iniciativa

privada, por meio de concessão pública, a operação, recuperação, manutenção, ampliação e a duplicação de trechos da BR-163 localizado no estado de Mato Grosso até o estado do Pará (TORRES et al, 2017).

Portanto, a concessão representa primeiramente as melhorias, sendo na pavimentação, sinalização e geometria das estradas, em segundo lugar a contraprestação aos concessionários se dará mediante cobrança de pedágios do usuário do serviço público (TORRES et al, 2017).

A cobrança de pedágios pela BR-163 tem gerado discussões quanto ao seu impacto econômico na economia local. Existe o temor de que o preço do pedágio encareça o custo final das mercadorias, especialmente daquelas que têm pouco valor agregado. No caso específico da soja, quem absorve o custo do transporte é o produtor, visto que, mesmo nos casos em que o comprador se responsabiliza pelo transporte, ele acaba por pagar um valor inferior na saca em regiões distantes, como em Mato Grosso comparativamente às regiões como Paraná ou Rio Grande do Sul (TORRES et al, 2017).

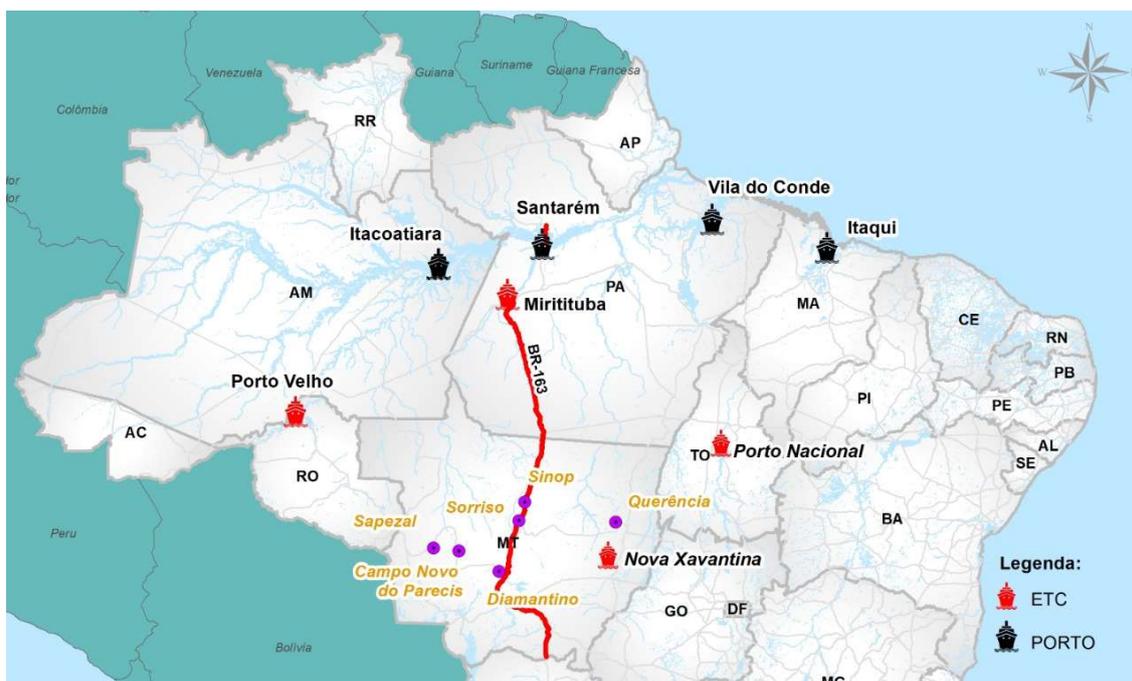
Segundo o Relatório Anual da Associação Brasileira de Concessionárias de Rodovias (ABCR, 2016), ressalta a importância de investir na construção de uma malha rodoviária baseada em autoestradas – rodovias duplicadas com estrutura de ponta, para garantir segurança, produtividade e competitividade, pois o setor de concessões é essencial para o desenvolvimento do país, melhorando a infraestrutura e gerando empregos.

De acordo com a Secretária de Transporte do Estado de São Paulo, os fretes representam em média 3,2% do custo das mercadorias e a tarifa de pedágio corresponde a 8,6% do valor do frete, o que significa 0,3% do valor da mercadoria, em média. Isso no estado onde as concessões de rodovias incluem a obrigatoriedade da execução de obras de ampliação e melhorias, assim como o pagamento do ônus da concessão, cujos valores são aplicados na manutenção das rodovias secundárias (ABCR, 2010).

A BR – 163 possui 3.477,7 quilômetros de extensão e passa pelos estados do Pará, Mato Grosso, Mato Grosso do Sul, Paraná, Santa Catarina e Rio Grande do Sul. O Departamento Nacional de Infraestrutura de Transportes (DNIT, 2020) e o Exército Brasileiro concluíram as obras de pavimentação dos 51 km localizados entre os municípios de Moraes Almeida (PA) e Novo Progresso (PA), último trecho que faltava para interligar, definitivamente, os estados de Mato Grosso ao estado do Pará.

Atualmente, a BR- 163 que liga o município de Sinop no estado do Mato Grosso a Miritituba no estado do Pará, está 100% pavimentada e a função dessa via é o transporte de grãos para os portos de Miritituba e Santarém, no estado do Pará (Vide Figura 8).

Figura 8: BR-163 (MT-PA)



Fonte: Elaboração própria (2021).

2.3.2.2 Implantação da Ferrogrão (EF – 170)

A EF-170, também chamada de Ferrogrão, é um projeto que ainda está em andamento e visa consolidar o novo corredor ferroviário de exportação do Brasil pelo Arco Norte. A ferrovia conta com uma extensão de 933 km, conectando a região produtora de grão do Centro-Oeste em Sinop até no Porto de Miritituba no Estado do Pará e terá capacidade inicial de transportar até 42 milhões de toneladas por ano (PPI, 2020). Na Figura 9 é possível observar a rota da Ferrogrão, de Sinop até Miritituba:

Figura 9 – Projeto Ferrogrão



Fonte: Elaboração própria (2021).

Crecca (2019) realizou uma pesquisa, onde verificou que, quando instalada a Ferrogrão trará alta capacidade de transporte e promoverá o corredor logístico Norte (Eixo Tapajós), o qual já está em consolidação pela rodovia BR-163 que liga o estado de Mato Grosso ao estado do Pará. O projeto aliás, aliviará as condições de tráfego nessa rodovia, diminuindo o fluxo de caminhões pesados que transportam grãos, reduzindo ainda, os custos com a conservação e a manutenção da infraestrutura rodoviária existente.

O projeto é um importante fator de desenvolvimento da infraestrutura logística das áreas agricultáveis localizada no Mato Grosso, possibilitando a região uma maior eficiência no escoamento da produção, a menor custo logístico, promovendo ganhos significativos de produtividade e reduzindo a necessidade de abertura de novas áreas (PPI, 2020).

De acordo com Machado, *et al* (2016), [...] as concessões visam uma maior intermodalidade e melhoria na ligação entre portos e centros produtores. A Ferrogrão é considerada um projeto prioritário do Programa de Parcerias de Investimentos (PPI) do Governo Federal. A construção e operação do empreendimento será concedida pela Agência Nacional de Transporte Terrestres (ANTT) para um empreendedor privado pelo período de 69 anos. Atualmente, o plano de concessão se encontra sob análise no TCU (PPI, 2021).

Dionísio *et al* (2015) *apud* Melo *et al* (2018), afirmam que o modal ferroviário pode tornar o escoamento da soja mais eficiente, visto a sua grande capacidade de

transporte de carga, principalmente aquelas de baixo valor agregado e que percorrem maiores distâncias, como é o caso da soja oriunda do centro-oeste, maior região produtora do Brasil.

Por fim, Crecca (2019) *apud* Bellini e Lucas (2016), enfatizam a importância da revitalização do transporte ferroviário de cargas no Brasil como fator decisivo para o desenvolvimento da economia diante das características geográficas e econômicas do país.

2.3.2.3 Revitalização da Hidrovia Araguaia-Tocantins

Segundo Almeida (2004), a Hidrovia Araguaia-Tocantins é constituída pelos rios das Mortes, rio Araguaia e rio Tocantins. No rio das Mortes, abrange 580 km entre Nova Xavantina (MT) e a sua foz no rio Araguaia. No rio Araguaia, compreende cerca de 1.230 km, entre Aruanã (GO) e Xambioá (TO). No rio Tocantins, associam-se 420 km entre Palmas (TO) e Estreito (MA), No rio Tocantins, de Peixe (TO) a Estreito (MA), são 700 km, de Estreito à Marabá (PA), 321 km, e de Marabá (PA) até sua foz, 500 km. Juntos esses trechos possuem potencial navegável em aproximadamente 3.000 km, atendendo aos estados de Mato Grosso, Goiás, Tocantins, Pará e Maranhão (DNIT, 2018). De acordo com o relatório executivo da ANTAQ (2013), a Hidrovia é gerida pela Administração das Hidrovias do Tocantins e Araguaia (AHITAR).

A hidrovia é uma das principais vias de transporte do corredor Centro-Norte brasileiro. Por estar localizada no Cerrado, a maior região produtora de grãos do País, tem potencial para se transformar numa das mais importantes vias de águas navegáveis do País. É uma via navegável até a hidrovia do Amazonas, desde Barra do Garças (MT), no rio Araguaia, ou Peixe (TO), no rio Tocantins, até o porto de Vila do Conde, próximo a Belém (PA), privilegiadamente localizado em relação aos mercados da América do Norte, da Europa e do Oriente Médio (DNIT, 2018).

No período de cheias, é possível navegar até 2.000 km pelas águas do rio Tocantins, neste percurso a embarcação utiliza uma eclusa existente na barragem da Usina Hidrelétrica de Tucuruí no estado do Pará (SOUZA, 2021). No período de seca, a navegação fica comprometida a partir do lago de Tucuruí devido ao Pedral do Lourenço, um trecho de 43 km de afloramento rochosos que impede a navegação comercial de grande porte entre o final do reservatório da hidrelétrica e a cidade de Marabá (PA). Na Figura 10 é possível ver o percurso da hidrovia Araguaia – Tocantins.

Figura 10 – Hidrovia Araguaia - Tocantins, Brasil



Fonte: Elaboração própria (2022).

2.4 PROGRAMAÇÃO LINEAR

2.4.1 Definição e Contextualização

Goldbarg e Luna (2005), define a Programação Linear, como modelo matemático, em que as variáveis são contínuas e apresentam comportamento linear, tanto em relação às restrições como a função objetivo. Caso extremamente importante devido à eficiência dos algoritmos de solução existentes e à possibilidade da transformação dos modelos de Programação Não-Linear em modelos de Programação Linear.

Para (Ravindran *et al*, 1987), a Programação Linear é uma ferramenta para solução de problemas de otimização. Em 1947, George Dantzig desenvolveu o algoritmo Simplex, extremamente eficiente na solução de Problemas de Programação Linear. A partir de então, PL passou a ser uma ferramenta utilizada em diversos segmentos inclusive em planejamento de transporte.

Problemas de Programação Linear compõem uma subclasse de problemas nos quais a modelagem é expressada em termos de equações lineares. Parece intuitivo que para ser possível a solução de um dado problema através da Programação Linear, o problema deve ser, inicialmente, formulado em termos matemáticos.

A construção de um modelo de Programação Linear segue praticamente três passos básicos (Ravindran *et al*, 1987):

Passo 1. Identifique as variáveis desconhecidas a serem determinadas (são denominadas variáveis de decisão) e são representadas através de símbolos algébricos (por exemplo, x e y ou x_1 e x_2);

Passo 2. Listar as restrições do problema e expressar as equações (=) ou inequações (\leq , \geq) lineares em termos das variáveis de decisão.

Passo 3. Identifique o objetivo (*maximizar* ou *minimizar*) otimização do problema, representando-o como uma função linear das variáveis de decisão.

2.4.2 Características do Modelo de Programação Linear

Os modelos de Programação Linear constituem um tipo especial de modelos de otimização. Para que um determinado sistema possa ser representado por meio de um modelo de PL, ele deve possuir as seguintes características:

Proporcionalidade: a quantidade de recurso consumido por uma dada atividade deve ser proporcional ao nível dessa atividade na solução final do problema. Além disso, o custo de cada atividade é proporcional ao nível de operação da atividade.

Não Negatividade: deve ser sempre possível desenvolver dada atividade em qualquer nível não negativo, e qualquer proporção de um dado recurso deve sempre poder ser utilizado.

Aditividade: o custo total é a soma das parcelas associadas a cada atividade.

Separabilidade: pode-se identificar de forma separada o custo (ou consumo de recursos) específico das operações de cada atividade.

Um modelo de Programação Linear é um modelo matemático de otimização no qual todas as funções são lineares da variável contínua x .

2.4.3 Formulação algébrica geral

Podemos formular de uma forma geral o Problema de Programação Linear (PPL) como se segue:

Otimizar

$$z = \sum_{j=1}^n c_j x_j \quad (1)$$

sujeito a

$$\sum_{j=1}^n a_{ij} x_j \geq b_i \quad i = 1, 2, \dots, p \quad (2)$$

$$\sum_{j=1}^n a_{ij}x_j = b_i \quad i = p + 1, p + 2, \dots, m \quad (3)$$

$$x_j \geq 0, j = 1, 2, \dots, q \quad (4)$$

$$x_j \in \mathfrak{R}, j = q + 1, q + 2, \dots, n \quad (5)$$

Onde:

$M = \{1, 2, \dots, m\}$, o conjunto dos índices das restrições do problema;

$N = \{1, 2, \dots, n\}$, o conjunto dos índices das variáveis;

$M_1 \subset M$ e $N_1 \subset N$;

$A = \{a_{ij}\} \equiv$ matriz de restrições;

$a_j \equiv j$ -ésima coluna de A ;

$x = (x_j), j \in N$ / vetor coluna de n componentes;

$c = (c_j), j \in N$ / vetor linha de n componentes;

$d = (d_i), i \in M$ / vetor coluna de m componentes;

O termo otimizar é utilizado aqui para, genericamente, representar as possibilidades de maximizar ou minimizar a função objetivo. O problema consiste em, dados a matriz A e os vetores b e c , achar o vetor de variáveis contínuas x que satisfaça ao conjunto de restrições e que otimize o valor do critério z .

2.4.4 Formulação Equivalentes

Além da forma mista, existem mais duas formas distintas de se desenvolver um PPL:

Forma Canônica

Otimizar

$$z = cx \quad (6)$$

Sujeito a:

$$Ax \leq b \text{ ou } Ax \geq b \quad (7)$$

$$x \geq 0 \quad (8)$$

Forma Padrão

Otimizar

$$z = cx \quad (6)$$

Sujeito a:

$$Ax = b \quad (9)$$

$$x \geq 0 \quad (8)$$

Sendo

$$b \geq 0 \quad (10)$$

Onde:

A = matriz de incidência nó-arco

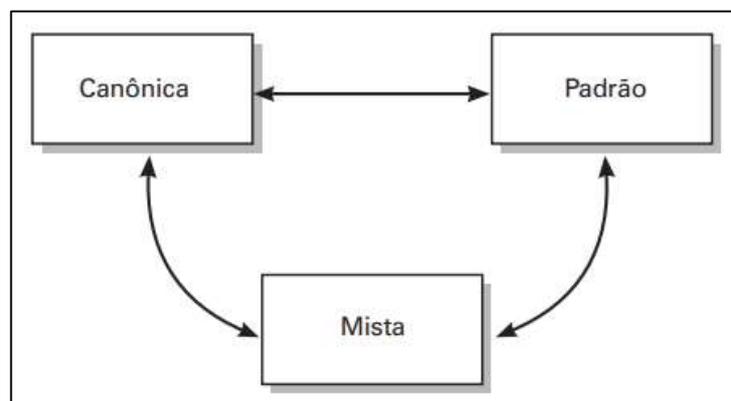
b = vetor de demanda nos arcos

x = vetor de fluxo nos arcos (incógnita)

c = vetor de custo nos arcos.

As formulações são absolutamente equivalentes pois através de operações elementares podemos transformá-las conforme a Figura 11.

Figura 11: Transformações de Formulações



2.4.5 Modelando problemas através da Programação Linear

O processo de organização de um modelo de Programação Linear pode ser decomposto nas seguintes etapas:

- **Definição das atividades**

Após a análise do problema, as atividades que o compõem são definidas. Normalmente, associada a cada atividade uma unidade de medida deve ser adotada.

- **Definição dos recursos**

Considerando os insumos disponíveis dentro de cada atividade, determinam-se os recursos que estão sendo usados e produzidos em cada uma.

- **Cálculo dos coeficientes de insumo/produção**

É indispensável estabelecer claramente como as atividades e os recursos estão relacionados em termos de recursos necessários por unidade de atividade produzida.

- **Determinação das condições externas**

Considerando que os recursos são limitados, cumpre determinar a quantidade de cada recurso disponível para o processo modelado. Essas são as denominadas condições externas do modelo.

- **Formalização do Modelo**

Consiste em associar quantidades não negativas x_1, x_2, \dots, x_n a cada uma das atividades, escrever as equações de balanceamento e indicar o uso de cada recurso.

2.4.6 Fluxos em Redes e Logística de Distribuição

Vários e importantes modelos de programação linear possuem uma estrutura especial que permite o desenvolvimento de algoritmos eficientes e especializados em sua solução. Nessa família de problemas, um dos mais tradicionais é o problema de transportes. De uma maneira geral, os denominados modelos em redes permitem a solução de importantes problemas reais e são de extraordinária aplicação prática (ver casos em Boorstyn e Frank [1977], Biros e Boros [1984], Carraresi e Gallo, [1984], Langevin et al. [1993], Phillips e Westbrook [1993]). Na dimensão da solução, esses modelos permitem o aperfeiçoamento de conhecidas e tradicionais técnicas, de modo a alcançarem uma enorme eficiência no seu processo de resolução.

2.4.6.1 Formulação Matemática do Problema de Fluxos em Redes

Definimos uma Rede $R = (E, V, F)$ como um grafo direcionado $G = (E, V)$ atravessado por um Fluxo $F = \{f_1, f_2, \dots, f_m\}$ que circula em suas m arestas. Em uma rede normalmente dois nós são destacados: o nó fonte e o nó sumidouro.

2.4.6.2 Restrições de Equilíbrio de Fluxo em cada Nó

Os nós da rede, com exceção dos nós fonte e sumidouro, são conservativos em relação ao fluxo, ou seja, o fluxo que chega ao nó é igual ao fluxo que deixa o nó. Os pontos de oferta e demanda podem ser também representados como pontos conservativos de fluxo, desde que associados artificialmente a um nó fonte (pontos de oferta) e a um nó sumidouro (nós de demanda). A equação de equilíbrio de fluxo é:

$$\{\text{Fluxo que chega ao nó } i\} = \{\text{Fluxo que sai do nó } i\} \quad (11)$$

Representando o fluxo que atravessa o arco $(i, j) \in E$ pela variável x_{ij} , podemos escrever as equações de equilíbrio de fluxo da seguinte forma:

Equilíbrio de fluxo nos nós

$$\sum_{(k,i) \in E} x_{ki} = \sum_{(i,j) \in E} x_{ij} \quad (12)$$

Fluxo de custo mínimo

Consiste que existe um custo unitário c_{ij} associado ao trânsito de cada unidade de fluxo pelo arco x_{ij} então a função objetivo pode ser escrita como:

$$\text{Minimizar } \sum_{(i,j) \in E} c_{ij} x_{ij} \quad (13)$$

2.4.6.3 Formulação Geral de Fluxos em Redes

Em muitas ocasiões é interessante considerar o equilíbrio de fluxo associado a um vetor de oferta ou de demanda em cada nó. A formulação assim elaborada não necessita da consideração explícita de um nó fonte e um nó sumidouro, bem como libera a necessidade da consideração de arcos artificiais que liguem os nós de oferta a uma fonte e os de demanda a um sumidouro. De fato, a essência da modelagem por fluxo em rede permanece preservada; contudo, para determinados fins, essa abordagem é mais eficiente. Nesse caso, a equação de equilíbrio de fluxos poderá ser reescrita como:

$$\begin{aligned} \{Fluxo\ que\ chega\ ao\ vértice\} + \{Fluxo\ produzido\ no\ vértice\} = \\ \{Fluxo\ que\ sai\ do\ vértice\} + \{Fluxo\ consumido\ no\ vértice\} \end{aligned} \quad (14)$$

Se denominarmos genericamente por d_i o balanço final entre o que é produzido e consumido dentro de cada nó, então podemos reescrever a formulação geral do problema de fluxo em rede da seguinte forma:

$$\text{Minimizar } z = \sum_{(i,j) \in E} c_{ij}x_{ij} \quad (15)$$

Sujeito a:

$$\sum_{(i,j) \in E} x_{ij} - \sum_{(k,i) \in E} x_{ki} = d_i \quad i = 1, \dots, n \quad (16)$$

$$l_{ij} \leq x_{ij} \leq L_{ij} \quad \forall (i,j) \in E \quad (17)$$

A escolha da formulação mais adequada será determinada pelas circunstâncias do problema e do algoritmo de solução adotado.

2.4.6.4 Formulação Restrita

De um modo geral, o problema de fluxo de custo mínimo em uma rede com $n = m + 2$ nós, onde m representa o número de nós reais e n o número de nós da rede equilibrada, poderá ser formulado também com:

$$\text{Minimizar } z = \sum_{(i,j) \in E} c_{ij} x_{ij} \quad (15)$$

Sujeito a:

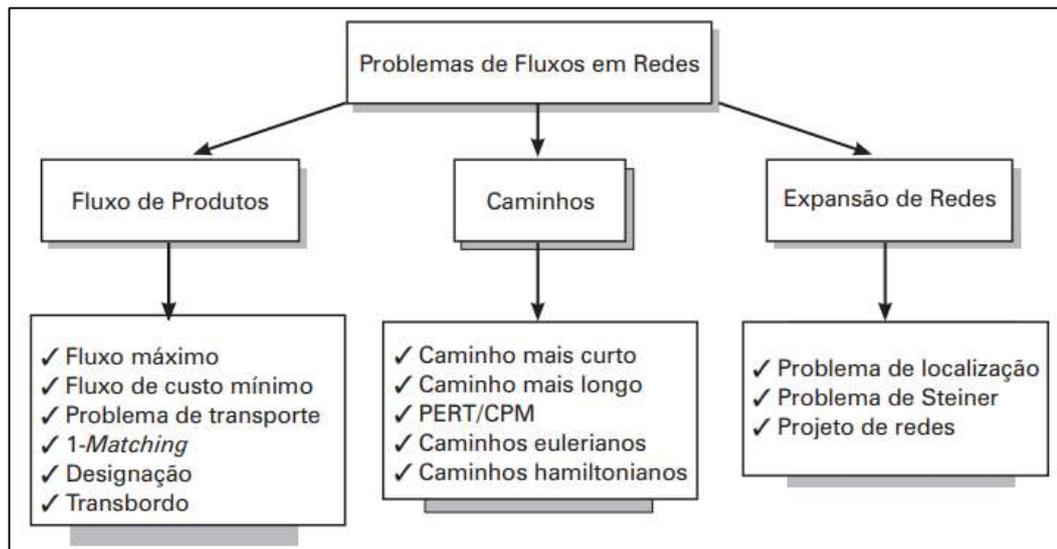
$$\sum_{(i,j) \in E} x_{ij} - \sum_{(k,i) \in E} x_{ki} = 0 \quad i = 1, \dots, n \quad (18)$$

$$l_{ij} \leq x_{ij} \leq L_{ij} \quad \forall (i,j) \in E \quad (17)$$

2.4.6.5 Uma Taxonomia para o Problema de Fluxo em Redes

Os problemas em redes podem ser classificados, de um modo geral, dentro da seguinte hierarquia da Figura 12.

Figura 12– Taxonomia para problemas de fluxo



Fonte: Goldbang e Luna (2005).

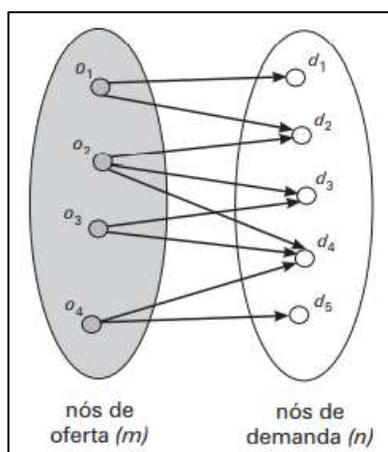
2.4.7 Modelos especiais em redes

2.4.7.1 O Problema de Transporte

O problema de transporte é um problema de fluxo em grafo bipartido, de modo que não existem nós intermediários de transbordo ou transição para o fluxo. Na visão clássica deste problema, os arcos não possuem limites de capacidade para o fluxo. De uma forma geral a descrição gráfica do problema pode ser resumida na Figura 13.

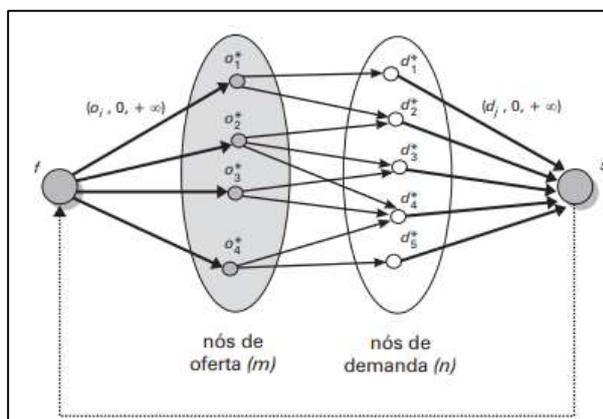
Os vértices da rede da Figura 13, onde os vértices da rede foram numerados de modo a destacar a condição de saída (vértice de oferta) e entrada de fluxo (vértices de demanda). O problema de transporte pode ser visto como um problema de fluxo em que o objetivo é minimizar globalmente os custos do fluxo através dos arcos de uma rede oferta x demanda semelhante à da Figura 14.

Figura 13 – Caracterização do fluxo no problema de transporte



Fonte: Goldbang e Luna (2005).

Figura 14 – O Problema de transporte no formato de fluxo em redes



Fonte: Goldbang e Luna (2005).

$$\left(\sum_{i=1}^m o_i = \sum_{j=1}^n d_j, 0, \infty \right) \quad (19)$$

2.4.7.2 Formulação Restrita para o Problema de Transporte

Podemos também considerar o problema de transporte como ocorrendo em uma rede de fluxo conservativo. Adicionando um nó fonte (f) e um nó sumidouro (s), e considerando limites inferiores para a oferta e a demanda iguais a o_i e d_j respectivamente, podemos formular o problema de transporte como um caso particular do problema de fluxos na rede da Figura 14. Nessa figura, os nós de oferta e demanda estão sendo marcados com * para serem distinguidos dos valores de limites de fluxo.

Considerando um problema com $R = \{1, 2, \dots, r\}$ nós e $|R| = m + n + 2$. Denominando por, $O, O = \{1, 2, \dots, m\}$ o conjunto dos nós de oferta, por $D, D = \{1, \dots, n\}$ o conjunto dos nós de demanda e por c_{ij} o custo de transporte de uma unidade de fluxos pelo arco $i - j$, temos:

$$\text{Minimizar } z = \sum_{i \in O} \sum_{j \in D} c_{ij} x_{ij} \quad (20)$$

Sujeito a:

$$\sum_{(i,j) \in E} x_{ij} - \sum_{(k,i) \in E} x_{ki} = 0 \quad i \in V \quad (21)$$

$$x_{fi} = o_i \quad i \in O \quad (22)$$

$$x_{js} = d_j \quad j \in D \quad (23)$$

$$x_{sf} = \sum_{j \in D} d_j = \sum_{i \in O} o_i \quad (24)$$

$$x_{ij} \geq 0, \quad (i,j) \in E \quad (25)$$

2.4.7.3 Formulação Clássica para o Problema de Transporte

Podemos formular o problema de transporte somente considerando as demandas e ofertas localizadas nos nós e sem os arcos e nós artificiais da seguinte forma:

$$\text{Minimizar } z = \sum_{i=1}^m \sum_{j=1}^n c_{ij} x_{ij} \quad (26)$$

Sujeito a:

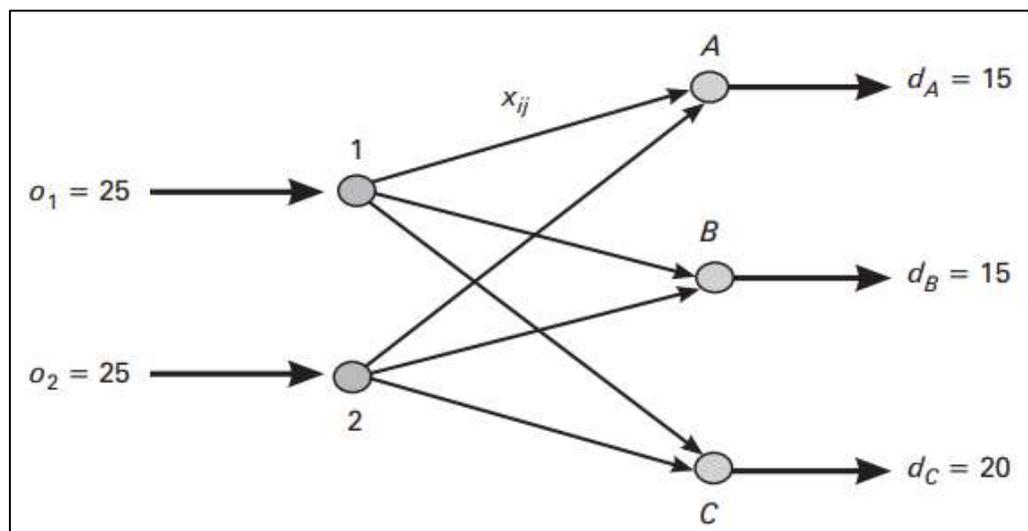
$$\sum_{j=1}^n x_{ij} = o_i \quad i = 1, \dots, m \quad (27)$$

$$\sum_{i=1}^m x_{ij} = d_j \quad j = 1, \dots, n \quad (28)$$

$$x_{ij} \geq 0 \quad i = 1, \dots, m; \quad j = 1, \dots, n \quad (29)$$

Observamos que, a matriz de restrições do problema de transporte na formulação clássica ainda mantém a propriedade da unimodularidade. Seja o exemplo numérico da Figura 15.

Figura 15 – Exemplo de problema de transporte

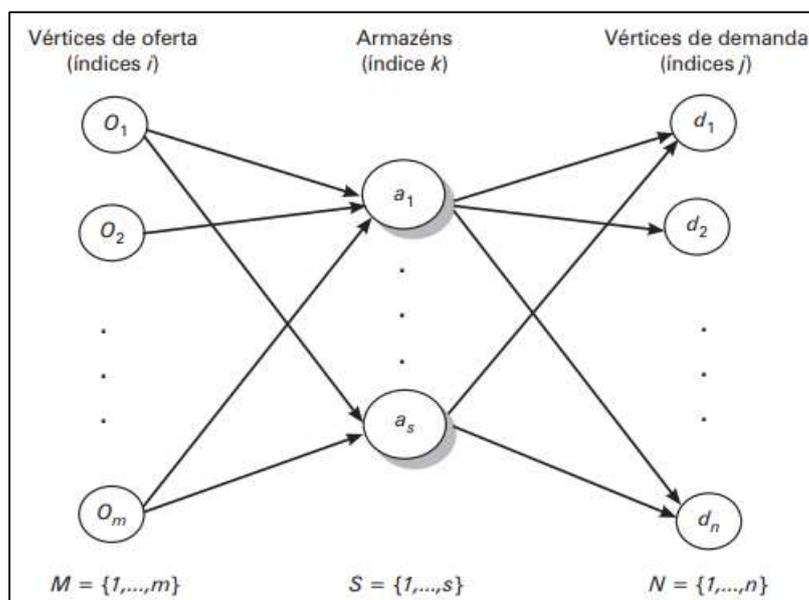


Fonte: Goldbang e Luna (2005).

2.4.7.4 O Problema de Transbordo

Um caso aparentado ao problema de transportes e de designação é o problema de alocação capacitado. Na verdade, esse problema une os dois anteriores ao modelar a possibilidade de um problema de transporte ser desenvolvido com um conjunto de nós intermediários entre os pontos de oferta e demanda. A Figura 16 descreve esse problema de fazer o fluxo dos pontos de oferta (pontos o) chegarem aos pontos de demanda (pontos d) passando por pontos intermediários de transbordo, ou chamados de pontos de armazenagem.

Figura 16 – O fluxo do problema de transbordo não capacitado



Fonte: Goldbang e Luna (2005).

Considerando:

$f_k \equiv$ custo fixo de se ativar um ponto de transbordo ou armazém k , $k \in S$, $S = \{1, \dots, s\}$, o conjunto dos pontos de oferta.

$v_k \equiv$ variável binária que assume o valor 1 se o ponto de transbordo é ativado e 0 em caso contrário.

$a_k \equiv$ capacidade de armazenagem disponibilizada pelo ponto de transbordo k .

$x_{ik} \equiv$ fluxo que percorre um arco $i-k$.

$y_{kj} \equiv$ fluxo que percorre um arco $k-j$.

$c_{ik} \equiv$ custo de percorre o arco $i-k$.

$w_{kj} \equiv$ custo de percorre o arco $k-j$.

Podemos formular o problema de transbordo não capacitado (PTNC):

$$(PTNC) \text{ Minimize } z = \sum_{i=1}^m \sum_{k=1}^s c_{ik} x_{ik} + \sum_{k=1}^s \sum_{j=1}^n w_{kj} y_{kj} + \sum_{k=1}^s f_k v_k \quad (30)$$

Sujeito a:

$$\sum_{i=1}^s x_{ik} \leq a_k v_k \quad k = 1, \dots, s \quad (31)$$

$$\sum_{k=1}^s y_{kj} = d_j \quad j = 1, \dots, n \quad (32)$$

$$\sum_{i=1}^m x_{ik} = \sum_{j=1}^n x_{kj} \quad k = 1, \dots, s \quad (33)$$

$$x_{ik} \geq 0 \quad i \in M, k \in S \quad (34)$$

$$y_{kj} \geq 0 \quad k \in S, j \in N \quad (35)$$

$$v_k \in \{0, 1\} \quad k \in S \quad (36)$$

A restrição (31) descreve o processo de criação (ou abertura) de armazéns, considerando o aspecto do atendimento do fluxo demanda x oferta. A restrição (32) garante o atendimento da demanda. Restrição (33) assegura a continuidade de fluxo. As demandas restrições atendem às exigências de não negatividade e da natureza das variáveis.

A formulação anterior descreve um problema não capacitado, ou seja, sem restrições associadas aos fluxos nos arcos. Em muitas situações reais, o problema de transporte com transbordo possui limites de fluxos em seus arcos, uma vez que as rodovias, ferrovias ou mesmo aerovias possuem limitações de tráfego.

2.4.7.5 O Problema de Designação e o 1- Matching Ponderado

O problema de 1- *matching* ponderado é o problema de obter, em um grafo G , um conjunto maximal independente de arestas a custo mínimo. Seja $G = (N, A)$, $N = \{1, \dots, 2n\}$, um grafo bipartido em dois conjuntos de nós com n componentes cada. Nesse caso o problema pode ser formulado do seguinte modo:

$$(1_{MAT}) \text{ Minimizar } z = \sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^n c_{ij} x_{ij} \quad (37)$$

Sujeito a:

$$\sum_{j=1}^n x_{ij} = 1 \quad i = 1, \dots, n \quad (38)$$

$$\sum_{i=1}^n x_{ij} = 1 \quad j = 1, \dots, n \quad (39)$$

$$x_{ij} \in \{0,1\} \quad \forall (i,j) \in A \quad (40)$$

Em que:

$$x_{ij} \equiv \begin{cases} 1 & \text{caso a aresta } (i,j) \text{ seja incluída na solução} \\ 0 & \text{caso contrário} \end{cases}$$

$c_{ij} \equiv 0$ custo da aresta (i,j) ser escolhida para integrar a solução.

2.5 PROGRAMAÇÃO LINEAR *FUZZY*

O método de Programação Linear *Fuzzy*, é um método que se aplica na solução de Problema de Transporte, propondo ao tomador de decisão valores “aproximados” que possibilite a otimização e minimização do custo do transporte, onde os valores *crisp* de custos, restrições e coeficientes possuem imprecisões inerentes ao processo de negociação. E para solucionar essa problemática, buscou-se desenvolver um modelo utilizando um novo método baseado na abordagem de Programação Linear *Fuzzy* com número *fuzzy* trapezoidal com valor intervalar. Com esse objetivo, será apresentado conceito teórico sintetizado do método utilizado para um maior entendimento.

2.5.1 Teoria dos Conjunto *Fuzzy*

A teoria dos Conjuntos *Fuzzy* foi introduzida em 1965 pelo matemático Lotfi Asker Zadeh com a principal intenção de dar um tratamento matemático a certos termos linguísticos subjetivos, como “aproximadamente”, “em torno de”, dentre outros. Esse seria um primeiro passo no sentido de se programar e armazenar conceitos vagos em computador, tornando possível a produção de cálculos com informações imprecisas (Bassanezi, 2010).

Embora a teoria dos conjuntos *fuzzy* estude casos de incertezas, vale lembrar que tal teoria é muito bem definida. Para Gandolpho *et al* (2003), o que é incerto é a propriedade que define o conjunto em questão (*crisp*). Para obter a formalização matemática de um conjunto *fuzzy*, Zadeh baseou-se no fato de que qualquer conjunto *crisp* pode ser caracterizado por uma função característica, ou seja, o conjunto *crisp* indicam o começo das incertezas representada por cada conjunto *fuzzy*.

2.5.1.1 – Definição dos Conjunto *Fuzzy*

Se um conjunto *crisp* de objetos, onde X é denotado por universo, cujos elementos genéricos são denotados por x . A pertinência de x num subconjunto *crisp* A de X é visto como uma função característica μ_A tal que:

$$\mu_A = \begin{cases} 0 & \text{se } x \notin A \\ 1, & \text{se } x \in A \end{cases} \quad (41)$$

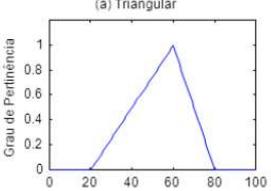
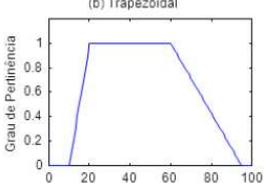
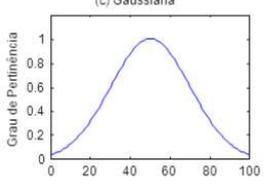
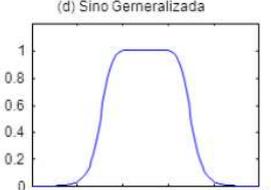
onde $(0, 1)$ é chamado conjunto de avaliação.

Se um conjunto de avaliação é permitido estar num intervalo real $[0, 1]$, \tilde{A} é denominado de conjunto *fuzzy*. A função μ_A , é a função de pertinência de x ao conjunto \tilde{A} . Quanto mais próximo de 1 estiver μ_A mais x pertence ao conjunto \tilde{A} . Portanto, x é completamente caracterizado pelo par ordenado, onde μ_A , mapeia o espaço de pertinência entre os intervalos fechados de $[0, 1]$. Os elementos com grau de pertinência 0, em geral não aparecem na lista de pares ordenados. Assim, a função *fuzzy* \tilde{A} de x elementos, onde a função de pertinência de $\mu_A(x)$, sendo o x pertencente ao universo X , descrita como:

$$\tilde{A} = \{(x, \mu_A(x)) \mid x \in X\} \quad (42)$$

Um conjunto *fuzzy* é totalmente caracterizado por sua função de pertinência $\mu_A(x)$. Essa função de pertinência é caracterizada por funções matemáticas que fornecem um significado numérico para um conjunto *fuzzy* (Dill e Borba, 2009). As funções mais utilizadas são demonstradas na Figura 17:

Figura 17- Função de pertinência *Fuzzy*

(a)Triangular	$\text{trimf}(x; a, b, c) = \max \left(0, \min \left[\frac{(x - a)}{(b - a)}, \frac{(c - x)}{(c - b)} \right] \right)$	
(b)Trapezoidal	$\text{trimf}(x; a, b, c, d) = \max \left(0, \min \left[\frac{(x - a)}{(b - a)}, \frac{(d - x)}{(d - c)} \right] \right)$	
(c)Gaussiana	$\text{gaussmf}(x; s, c) = \exp \left\{ -\frac{(x - c)}{s} \right\}, 2$	
(d)Sino Generalizada	$\text{gbellmf}(x; a, , c) = \frac{1}{1 + \exp[-a(x - c)]}$	

Fonte: Adaptada de Dill e Borba (2009).

2.5.2 Número *Fuzzy* e α – níveis

Em relação ao número *fuzzy*, existem diferentes noções para conceituá-lo. Uma dessas definições é descrita no livro *Tópicos de Lógica Fuzzy e Biomatemática* do professor Bassanezi (2010), da Universidade de Campinas, onde define o Número *Fuzzy* como um subconjunto *fuzzy* \tilde{A} , quando o conjunto universo no qual a função de pertinência μ_A está definida, é o conjunto de números reais \mathbb{R} e satisfaz às condições:

- I. Todos os α – níveis de \tilde{A} são vazios, com $0 \leq \alpha \leq 1$;
- II. Todos os α – níveis de \tilde{A} são intervalos fechados de \mathbb{R} ;
- III. $\text{Supp } \tilde{A} = \{x \in \mathbb{R}: \mu_A(x) > 0\}$ é limitado.

Denotar os α – *níveis* do número *fuzzy* \tilde{A} em um universo X , onde o α – *níveis* pertence ao intervalo fechado $[0, 1]$, definido como:

$$[\tilde{A}]^\alpha = \{x \in X: \mu_A(x) \geq \alpha\} \text{ para } 0 < \alpha \leq 1 \quad (43)$$

Onde:

$$[\tilde{A}] = [a_{inf}^\alpha, a_{sup}^\alpha], \forall \alpha \in [0, 1]. \quad (44)$$

Em que a_{inf}^α e a_{sup}^α correspondem respectivamente ao extremo inferior e superior do intervalo.

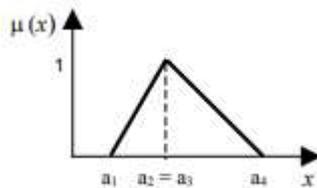
Observando que todo número real r é um número *fuzzy* cuja função de pertinência é a sua função característica:

$$X_r(x) = \begin{cases} 1 & \text{se } x = r \\ 0 & \text{se } x \neq r \end{cases} \quad (45)$$

A família dos números *fuzzy* será indicada por $\mathcal{F}(\mathbb{R})$ e, de acordo com o observado acima, o conjunto de números reais \mathbb{R} é um subconjunto (*crisp*) de $\mathcal{F}(\mathbb{R})$.

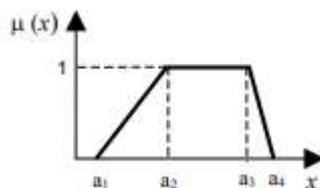
Os números *fuzzy* mais comuns são triangular, trapezoidal e entre outros:

a) Triangular, se sua função de pertinência é dada da seguinte forma;



$$\mu(x) = \begin{cases} 0 & \text{se } x \leq a_1 \\ \frac{x - a_1}{a_2 - a_1} & \text{se } a_1 < x \leq a_2 \\ \frac{x - a_4}{a_2 - a_4} & \text{se } a_2 \leq x < a_4 \\ 0 & \text{se } x \geq a_4 \end{cases}$$

b) Trapezoidal, se sua função de pertinência é da seguinte forma;



$$\mu(x) = \begin{cases} \frac{x - a_1}{a_2 - a_1} & \text{se } a_1 \leq x < a_2 \\ 1 & \text{se } a_2 \leq x \leq a_3 \\ \frac{a_4 - x}{a_4 - a_3} & \text{se } a_3 \leq x < a_4 \\ 0 & \text{caso contrário} \end{cases}$$

O Princípio de Extensão são as operações aritmética aplicadas em número *fuzzy*. Como por exemplo em dois número *fuzzy* trapezoidal, descritos abaixo:

$$A_1 = (a_{11}, a_{12}, a_{13}, a_{14}) \text{ e } A_2 = (a_{21}, a_{22}, a_{23}, a_{24})$$

- Adição: $A_1 \oplus A_2 = \{a_{11} + a_{21}, a_{12} + a_{22}, a_{13} + a_{23}, a_{14} + a_{24}\}$;
- Produto: $A_1 \otimes A_2 = \{a_{11} \times a_{21}, a_{12} \times a_{22}, a_{13} \times a_{23}, a_{14} \times a_{24}\}$;
- Produto por número real: $\lambda \cdot A_1 = \{\lambda a_{11}, \lambda a_{12}, \lambda a_{13}, \lambda a_{14}\}$.

2.5.3 Sistema baseado em regras *Fuzzy*

Os sistemas baseados em regras *fuzzy* consistem de um estágio de entrada (*crisp*), um estágio de processamento e um estágio de saída. O estágio de entrada mapeia dados de entrada de maneira apropriada às funções consecutivas e valores verdadeiros. O estágio de processamento é aquele em que se procura alcançar a solução para os problemas, podendo ser dividido em três passos básicos:

- **Fuzzificação:** Corresponde à conversão das entradas dos valores *crisp* (valores determinísticos) por conjuntos *fuzzy*. A Fuzzificação determina o grau de pertinência de cada entrada no antecedente da regra. Se o antecedente tem mais de um componente (proposição), os operadores *fuzzy* E (min) e OU (max) são utilizados para combinar os efeitos como descrito abaixo:

$$a_r = \min_{i=1, \dots, n} \{\mu_i(u_i)\} \text{ ou } a_r = \max_{i=1, \dots, n} \{\mu_i(u_i)\} \quad (46)$$

Onde:

a_r = combinação do grau de pertinência dos antecedentes da regra;

$\mu_i(u_i)$ = grau de pertinência do i – ésimo antecedente para o valor da i – ésima entrada (u_i).

- **Base de Regras:** uma base de regras pode ser considerada com um conjunto de proposições linguísticas (*fuzzy*) como por exemplo:

SE “(estado, condição)” ENTÃO “(resposta, ação)”.

- **Inferência:** Método baseado em técnicas da teoria de conjuntos *fuzzy* que permite obter uma saída (*fuzzy*) a partir de cada entrada *fuzzy*. Cada proposição *fuzzy* é traduzida matematicamente.

O método do conjunto *Fuzzy Trapezoidal* é uma característica que tenta modelar transição suave entre fronteiras de dois conjuntos. A ideia é transformar os dados subjetivos em um modelo matemático, onde esses dados serão processados por um programa computacional fornecendo dados mais acurados.

2.5.4 Número Fuzzy Trapezoidal Intervalar

Nesta seção será apresentado algumas definições básicas em relação as operações aritméticas e comparação do nível inferior e superior respectivamente (w^I, w^S) , dos números *fuzzy* trapezoidais com valores intervalares.

Definição 1

Um conjunto *fuzzy* \tilde{A} , definido no conjunto universo dos números reais \mathbb{R} é dito ser um número *fuzzy* se sua função de pertinência tem as seguintes características:

1. $\mu_{\tilde{A}} : \mathbb{R} \rightarrow [0, w]$ é *contínuo*;
2. $\mu_{\tilde{A}}(x) = 0$ para todos $x \in (-\infty, a_1] \cup [a_4, \infty)$;
3. $\mu_{\tilde{A}}(x)$ é *estritamente crescente* em $[a_1, a_2]$ e *estritamente decrescente* em $[a_3, a_4]$;
4. $\mu_{\tilde{A}}(x) = w$ para todos $x \in [a_2, a_3]$, onde $0 < w \leq 1$.

Definição 2

1. Um número *fuzzy* trapezoidal é denominado por $\tilde{A} = (a_1, a_2, a_3, a_4; w)$, $0 < w \leq 1$, é um número *fuzzy* com a função de pertinência da seguinte forma:

$$\mu_{\tilde{A}}(x) = \begin{cases} w \frac{x - a_1}{a_2 - a_1}, & a_1 \leq x \leq a_2, \\ w, & a_2 \leq x \leq a_3, \\ w \frac{a_4 - x}{a_4 - a_3}, & a_3 \leq x \leq a_4, \\ 0 & \text{caso contrário.} \end{cases} \quad (47)$$

Onde $F_{NT}(w)$ será a família de todos os w – níveis números *fuzzy* trapezoidais, ou seja,

$$F_{NT}(w) = \{\tilde{A} = (a_1, a_2, a_3, a_4; w), a_1 \leq a_2 \leq a_3 \leq a_4\}, 0 < w \leq 1. \quad (48)$$

Definição 3

Sendo $\tilde{A}^I \in F_{TN}(w^I)$ e $\tilde{A}^S \in F_{TN}(w^S)$. Um nível (w^I, w^S) e \tilde{A} um número *fuzzy* trapezoidal com valor intervalar, denominado por $\tilde{A} = [\tilde{A}^I, \tilde{A}^S] = \langle (a_1^I, a_2^I, a_3^I, a_4^I; w^I), (a_1^S, a_2^S, a_3^S, a_4^S; w^S) \rangle$ é um conjunto *fuzzy* com valor intervalar em \mathbb{R} com número *fuzzy* trapezoidal inferior \tilde{A}^I expresso por

$$\mu_{\tilde{A}^I}^I(x) = \begin{cases} w^I \frac{x - a_1^I}{a_2^I - a_1^I}, & a_1^I \leq x \leq a_2^I, \\ w^I, & a_2^I \leq x \leq a_3^I, \\ w^I \frac{a_4^I - x}{a_4^I - a_3^I}, & a_3^I \leq x \leq a_4^I, \\ 0 & \text{caso contrário.} \end{cases} \quad (49)$$

E o número *fuzzy* trapezoidal superior \tilde{A}^S expresso por:

$$\mu_{\tilde{A}^S}^S(x) = \begin{cases} w^S \frac{x - a_1^S}{a_2^S - a_1^S}, & a_1^S \leq x \leq a_2^S, \\ w^S, & a_2^S \leq x \leq a_3^S, \\ w^S \frac{a_4^S - x}{a_4^S - a_3^S}, & a_3^S \leq x \leq a_4^S, \\ 0 & \text{caso contrário.} \end{cases} \quad (50)$$

Onde

$$a_1^I \leq a_2^I \leq a_3^I \leq a_4^I, a_1^U \leq a_2^U \leq a_3^U \leq a_4^U, 0 < w^I \leq w^S \leq 1, a_1^S \leq a_1^I \quad \text{e} \quad a_4^I \leq a_4^S.$$

Além disso, $\mu_{\tilde{A}^I}^I(x) \leq \mu_{\tilde{A}^S}^S(x)$.

Isso significa o grau de pertinência de x pertence ao intervalo $\tilde{A} = [\mu_{\tilde{A}^I}^I(x), \mu_{\tilde{A}^S}^S(x)]$, o mais recente e melhor grau de pertinência em x são $\mu_{\tilde{A}^I}^I(x)$ e $\mu_{\tilde{A}^S}^S(x)$ respectivamente.

Sendo $F_{IVTN}(w^I, w^S)$ da família de todos os níveis do número *fuzzy* trapezoidais com valor intervalar, isto é;

$$\begin{aligned}
F_{IVTN}(w^I, w^S) &= \{ \tilde{A} = [\tilde{A}^I, \tilde{A}^S] = \\
&\langle (a_1^I, a_2^I, a_3^I, a_4^I; w^I), (a_1^S, a_2^S, a_3^S, a_4^S; w^S) \rangle : \tilde{A}^I \in F_{TN}(w^I), \tilde{A}^S \in \\
&F_{TN}(w^S), a_1^S \leq a_1^I, a_4^I \leq a_4^S \}, 0 < w^I \leq w^S \leq 1.
\end{aligned} \tag{51}$$

Definição 4

Um (w^I, w^S) número *fuzzy* trapezoidal com valor intervalar $\tilde{A} = [\tilde{A}^I, \tilde{A}^S] = \langle (a_1^I, a_2^I, a_3^I, a_4^I; w^I), (a_1^S, a_2^S, a_3^S, a_4^S; w^S) \rangle$ é dito não negativo (w^I, w^S) se e somente se $a_1^S \geq 0$. O conjunto de todos os não negativos do número *fuzzy* com valor intervalar (w^I, w^S) é indicado por $F_{IVTN}^+(w^I, w^S)$.

Definição 5

Dois números *fuzzy* trapezoidal de valor intervalar $\tilde{A} = \langle (a_1^I, a_2^I, a_3^I, a_4^I; w^I); (a_1^S, a_2^S, a_3^S, a_4^S; w^S) \rangle$ e $\tilde{B} = \langle (b_1^I, b_2^I, b_3^I, b_4^I; w^I); (b_1^S, b_2^S, b_3^S, b_4^S; w^S) \rangle$ são ditos iguais, ou seja, $\tilde{A} = \tilde{B}$ se somente se $a_i^I = b_i^I$ ($i = 1, 2, 3, 4$) e $a_i^S = b_i^S$ ($i = 1, 2, 3, 4$).

Definição 6

Se $r, 0 \in \mathbb{R}$. A distância de r para 0 é definido com $d(r, 0) = r$.

Definição 7

Se $\tilde{A} \in F_{IVTN}(w^I, w^S)$. O conjunto de α – corte de \tilde{A} é denotado por $\tilde{A}(\alpha)$, e definido como:

$$\begin{aligned}
\tilde{A}(\alpha) &= [\tilde{A}^I(\alpha), \tilde{A}^S(\alpha)] \\
&= \begin{cases} [\tilde{A}_l^S(\alpha), \tilde{A}_l^I(\alpha)] \cup [\tilde{A}_r^I(\alpha), \tilde{A}_r^S(\alpha)] & 0 \leq \alpha \leq w^I \\ [\tilde{A}_l^S(\alpha), \tilde{A}_r^S(\alpha)] & w^I \leq \alpha \leq w^S \end{cases} \tag{52}
\end{aligned}$$

Onde

$$\tilde{A}_l^I(\alpha) = a_1^I + (a_2^I - a_1^I) \frac{\alpha}{w^I}, \quad \tilde{A}_r^I(\alpha) = a_4^I + (a_4^I - a_3^I) \frac{\alpha}{w^I} \tag{53}$$

$$\tilde{A}_l^S(\alpha) = a_1^S + (a_2^S - a_1^S) \frac{\alpha}{w^S}, \quad \tilde{A}_r^S(\alpha) = a_4^S + (a_4^S - a_3^S) \frac{\alpha}{w^S} \quad (54)$$

Teorema 1.0. Sendo $\tilde{A} \in F_{IVTN}(w^I, w^S)$. A distância de \tilde{A} para O_1 (eixo y) é dado da seguinte forma:

$$d(\tilde{A}, O_1) = \frac{1}{4} [a_1 + a_2 + a_3 + a_4], \quad \tilde{A}^I = \tilde{A}^S = \tilde{A} \quad (55)$$

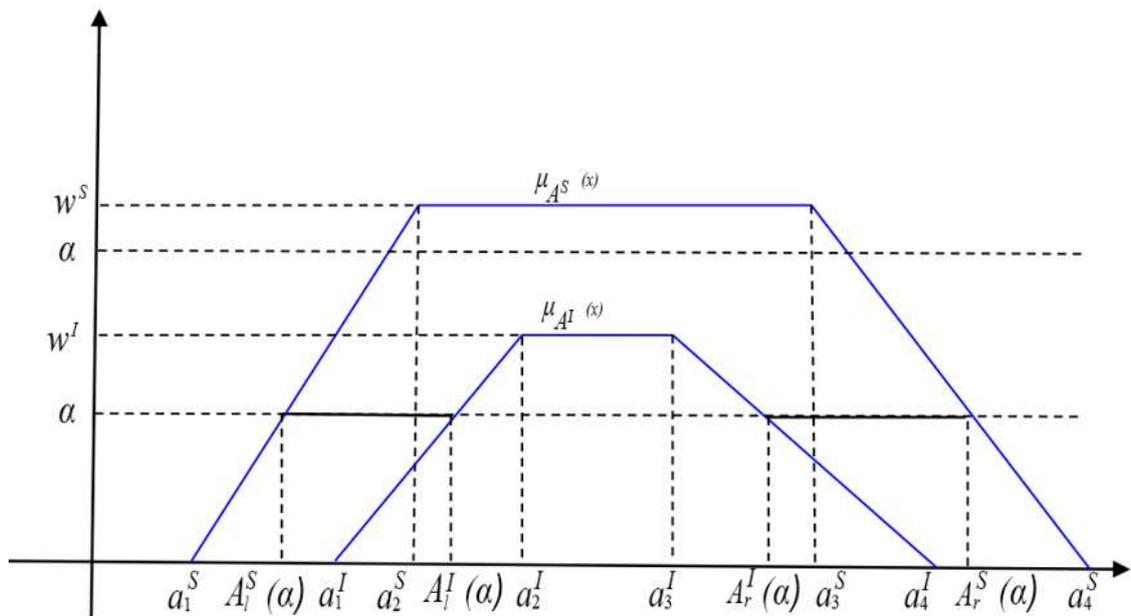
$$d(\tilde{A}, O_1) = \frac{1}{8} [a_1^I + a_2^I + a_3^I + a_4^I + a_1^S + a_2^S + a_3^S + a_4^S], \quad (56)$$

$$0 < w^I = w^S \leq 1$$

$$d(\tilde{A}, O_1) = \frac{1}{8} \left[a_1^I + a_2^I + a_3^I + a_4^I + 4a_1^S + 2a_2^S + 2a_3^S + 4a_4^S + 3(a_2^S + a_3^S - a_1^S - a_4^S) \frac{w^I}{w^S} \right], \quad 0 < w^I < w^S \leq 1 \quad (57)$$

Na Figura 18 tem-se o gráfico do Método *Fuzzy Trapezoidal Intervalar*.

Figura 18 – Gráfico de Número *Fuzzy Trapezoidal Intervalar*



Fonte: Ali Ebrahimnejad (2015).

2.5.5 Problema de Transporte de Número *Fuzzy* Trapezoidal Intervalar

Nesta seção, serão demonstradas as formulações de Programação Linear de um Problema de Transporte em ambiente *crisp* e em número *fuzzy* trapezoidal com valor intervalar $F_{IVTN}(w^I, w^S)$.

2.5.5.1 Problema de Transporte em ambiente *crisp*

O objetivo central no problema de transporte é encontrar o menor custo total de transporte de uma mercadoria para satisfazer as demandas nos destinos, usando os suprimentos disponíveis em suas origens. Este problema pode ser enunciado matematicamente da seguinte forma:

$$\min \sum_{i=1}^m \sum_{j=1}^n c_{ij} x_{ij} \quad (58)$$

$$\sum_{j=1}^n x_{ij} = a_i, \quad i = 1, 2, \dots, m, \quad (59)$$

$$\sum_{i=1}^m x_{ij} = b_j, \quad j = 1, 2, \dots, n, \quad (60)$$

$$x_{ij} \geq 0, \quad i = 1, 2, \dots, m, \quad j = 1, 2, \dots, n. \quad (61)$$

Onde

A variável \tilde{x}_{ij} representa a quantidade da mercadoria a ser transportada da origem i para o destino j , c_{ij} é o custo associado ao transporte de uma unidade de mercadoria da sua origem i para o destino j , a_i representa a oferta da mercadoria em i origem e b_j representa a demanda da mercadoria em j destino. Sendo assim, deduz-se que:

$$a_i > 0 \forall i, b_j > 0 \forall j, c_{ij} \geq 0 \forall i, j \text{ e}$$

$$\sum_{i=1}^m a_i = \sum_{j=1}^n b_j \quad (62)$$

2.5.5.2 Problema de Transporte em ambiente de Programação Linear *Fuzzy* com número trapezoidal de valor intervalar

Nesta seção será apresentado uma nova formulação com base no método proposto por (Ebrahimnejad, 2015), para solucionar o Problema de Transporte.

Suponha-se que todos os parâmetros (custo, oferta, demanda e quantidade de mercadoria) sejam representados por números *fuzzy* trapezoidais com valores intervalares. Então o Problema de Transporte em ambiente *fuzzy* é detalhado:

$$\min \sum_{i=1}^m \sum_{j=1}^n \tilde{c}_{ij} \otimes \tilde{x}_{ij} \quad (63)$$

Ou seja

$$\sum_{j=1}^n \tilde{x}_{ij} = \tilde{a}_i, \quad i = 1, 2, \dots, m, \quad (64)$$

$$\sum_{i=1}^m \tilde{x}_{ij} = \tilde{b}_j, \quad j = 1, 2, \dots, n, \quad (65)$$

$$\tilde{x}_{ij} \in F_{IVTN}^+(w^L, w^S), \quad i = 1, 2, \dots, m, \quad j = 1, 2, \dots, n. \quad (66)$$

Com

$$\sum_{i=1}^m \tilde{a}_{ij} = \sum_{j=1}^n \tilde{b}_{ij} \quad (67)$$

Onde

$$\tilde{a}_i = \langle (a_{i1}^L, a_{i2}^L, a_{i3}^L, a_{i4}^L; w^L), (a_{i1}^S, a_{i2}^S, a_{i3}^S, a_{i4}^S; w^S) \rangle \in F_{IVTN}^+(w^L, w^S), \quad (68)$$

$$i = 1, 2, \dots, m,$$

$$\begin{aligned} \tilde{b}_j &= \langle (b_{j1}^I, b_{j2}^I, b_{j3}^I, b_{j4}^I; w^I), (b_{j1}^S, b_{j2}^S, b_{j3}^S, b_{j4}^S; w^S) \rangle \in F_{IVTN}^+(w^I, w^S), \\ & j = 1, 2, \dots, n, \end{aligned} \quad (69)$$

$$\begin{aligned} \tilde{c}_{ij} &= \langle (c_{ij1}^I, c_{ij2}^I, c_{ij3}^I, c_{ij4}^I; w^I), (c_{ij1}^S, c_{ij2}^S, c_{ij3}^S, c_{ij4}^S; w^S) \rangle \\ & \in F_{IVTN}^+(w^I, w^S), i = 1, 2, \dots, m, \quad j = 1, 2, \dots, n, \end{aligned} \quad (70)$$

E

$$\begin{aligned} \tilde{x}_{ij} &= \langle (x_{ij1}^I, x_{ij2}^I, x_{ij3}^I, x_{ij4}^I; w^I), (x_{ij1}^S, x_{ij2}^S, x_{ij3}^S, x_{ij4}^S; w^S) \rangle \\ & \in F_{IVTN}^+(w^I, w^S), i = 1, 2, \dots, m, \quad j = 1, 2, \dots, n. \end{aligned} \quad (71)$$

3 METODOLOGIA

3.1 UNIVERSO E OBJETO DE ESTUDO

A área selecionada para realização desta pesquisa foram os municípios de Querência, Sorriso, Sapezal, Sinop, Diamantino e Campo Novo do Parecis, que estão localizados no Estado do Mato Grosso, considerado o maior estado produtor de soja do Brasil. Os corredores logísticos como a BR - 163, a Hidrovia Araguaia – Tocantins e a Ferrogrão foram tomados como objeto de estudo por onde se planeja o escoamento desta soja para os portos do Arco Norte, em particular os portos de (Itacoatiara, Santarém, Vila do Conde e Itaquí).

No primeiro momento será identificado a distribuição espacial dos seis municípios produtores de soja e suas respectivas demandas de produção, foi também contextualizado o fluxo da logística da soja mato-grossense a partir da sua origem (região produtora) até aos portos de destino do Arco norte.

3.2 TIPO DE PESQUISA E MÉTODO

A pesquisa desenvolvida é do tipo explicativa, que segundo Lakatos e Marconi (1992), visa estabelecer relações de causa-efeito por meio de manipulação direta das variáveis de decisão relativas ao objeto de estudo, buscando identificar as causas do fenômeno. Este é o tipo de pesquisa que mais aprofunda o conhecimento da realidade, porque explica a razão, o porquê das causas e resultados obtidos (GIL, 2008).

No decorrer desta pesquisa decidiu-se usar dois tipos de métodos para solucionar e comparar os resultados de um Problema de Transporte. Na primeira etapa usou-se o método de Programação Linear, onde a modelagem foi feita usando o software do GAMS, uma ferramenta ideal para otimizar problemas lineares e não-lineares, usando uma linguagem simples e de fácil compreensão dos resultados. Na segunda etapa aplicou-se o método de Programação Linear *Fuzzy*, um método que é capaz de otimizar e proporcionar ao tomador de decisão mais de uma solução, diferente dos modelos determinísticos, que geralmente apresenta como solução um único resultado.

3.3 COLETA DE DADOS

No processo de coletas dos dados, a princípio recorreu-se a pesquisa bibliográfica que especificamente interessa a este trabalho, pois trata-se do levantamento de toda bibliografia já publicada, em forma de livros, revistas, artigos científicos, dissertações e teses sobre autores correlacionados ao tema. Também buscou-se coletar dados em órgãos oficiais, tais como: ANTT, ANTAQ, CNA, CONAB, EMPRAPA, IMEA, entre outros, com a finalidade de se obter os valores das variáveis de decisão (valores de frete, oferta dos municípios produtores de soja e a capacidade dos portos em receber essa demanda).

Após o processo de coleta dos dados, foi elaborada a tabulação dos mesmos através do *software excel*, para realizar a fuzzificação das variáveis (custos de fretes, ofertas e demandas), utilizando porcentagens de graus de incertezas com valores dos trapézios superiores e inferiores de 8% e 4% respectivamente. Os dados fuzzificados foram importados para construção do modelo no software GAMS (*General Algebraic Modelling System*), o qual gerou os resultados *fuzzy*.

3.4 ANÁLISE DOS DADOS

Após a problematização e o levantamento de dados, a análise dos corredores na busca das minimizações de custos ocorreu sob duas abordagens: determinística, utilizando a Programação Linear simples e, outra tratando os mesmos dados, admitindo ambiente *Fuzzy*. A proposta é testar cenários diferentes para às rotas sobre estudo e verificar a sensibilidade das variáveis envolvidas no processo. Tais variáveis estão associadas a função de custo dos fretes e restrições. Desta forma, com a intenção de encontrar uma faixa de valores onde se encontram os resultados factíveis para o problema de programação linear *fuzzy*, buscou-se identificar o corredor logístico mais viável, seus respectivos custos e capacidade de escoamento dos corredores e terminais de transbordo, sendo os portos estudados.

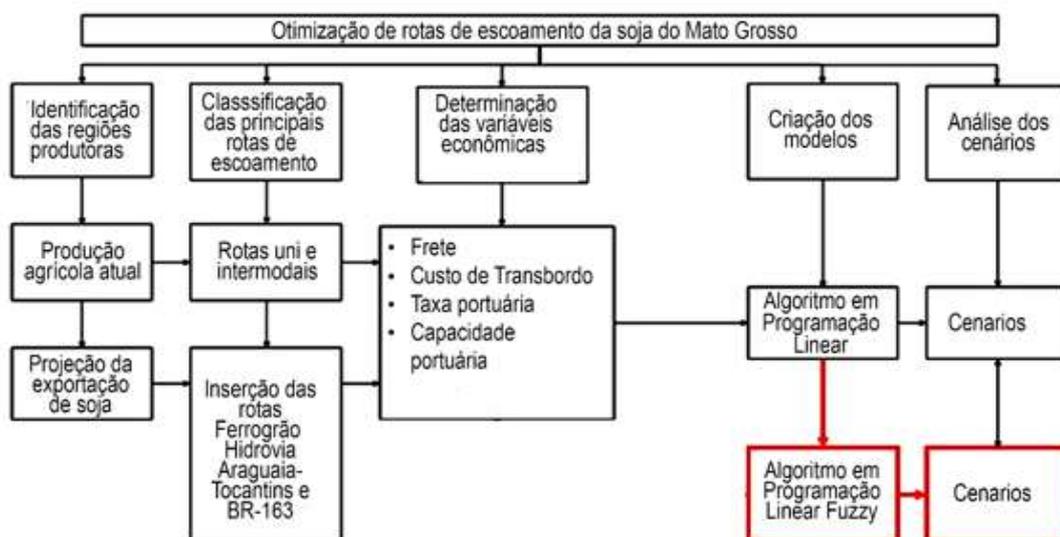
A ferramenta utilizada para desenvolver os modelos de programação foi o software GAMS (*General Algebraic Modelling System*). O GAMS é utilizado para a solução de problemas complexos, envolvendo programação linear, não linear, inteira e programação linear *fuzzy* com valores *crisp*. O software utiliza uma linguagem de alto nível com a finalidade de proporcionar uma representação compacta de modelos

grandes e complexos, desse modo a construção, bem como a resolução tornam-se mais direta para os programadores, e mais inteligível para usuários de outras disciplinas (BROOKE et al., 1995).

De tal modo, é possível que as descrições dos modelos independam dos algoritmos de solução, o que possibilita mudanças nas especificações do modelo de maneira bem simples. A vantagem do GAMS, portanto, é o aumento da produtividade do programador, além de expandir as aplicações da programação matemática para outras áreas do conhecimento (BROOKE et al., 1995; BARON, 2017).

Na Figura 19 observa-se o fluxograma das etapas metodológicas para a realização do estudo.

Figura 19 – Fluxograma das etapas metodológicas



Fonte: Adaptada de Souza (2021).

Na primeira etapa do trabalho, buscou-se coletar os dados das variáveis como: os valores de fretes, a quantidade de soja produzida pelos municípios no ano de 2019, a capacidade de exportação dos portos em estudo no ano de 2020, às distâncias percorridas em quilômetros (km), desde as origens até os portos de destinos. Com os valores dos dados, foi possível criar os modelos de Programação Linear e Programação Linear *Fuzzy* no software Gams, analisando a otimização de cada cenário e comparando os resultados dos dois modelos propostos.

4 ESTUDO DE CASO

4.1 CARACTERIZAÇÃO DA ÁREA DE ESTUDO

O Estado do Mato Grosso localiza-se na região do Centro-oeste do Brasil e faz fronteira com os estados de Rondônia, Amazonas, Pará, Tocantins, Goiás, Mato Grosso do Sul e com a Bolívia. De acordo com o último censo do IBGE (2020), o estado do Mato-grossense tem uma área territorial de 903.207,05 km², considerado o terceiro maior estado da federação. Possui uma população estimada em 3.526.220 habitantes, sendo que 85% da população reside em zona urbana e 15% em zona rural. Na Figura 20 é possível visualizar a localização do estado do Mato Grosso.

Figura 20– Localização do estado do Mato Grosso



Fonte: Elaboração própria (2021).

Atualmente, sua divisão geográfica compreende em 142 municípios, sete Macrorregiões Geográficas (Noroeste, Norte, Nordeste, Médio-Norte, Oeste, Centro-sul e Sudeste) e vinte e duas Microrregiões Geográficas. Dada a vasta distribuição do agronegócio no território de Mato Grosso, o IMEA realizou um estudo para segmentar

o estado do ponto de vista agro econômico, com a finalidade de facilitar os levantamentos de dados e dimensionar a sua economia agropecuária (IMEA, 2017).

Na Tabela 3, é possível visualizar alguns municípios pertencentes a essas Macro e Microrregiões com as suas respectivas áreas plantadas e sua Produção em milhões de toneladas no ano de 2019.

Tabela 3 – Macro e Microrregião geográfica do Mato Grosso

Macrorregião	Microrregião	Área Plantada (milhões de ha)	Produção (milhões de toneladas)
Noroeste	Brasnorte	0.23	0.77
	Porto dos Gaúchos	0.18	0.59
Norte	Marcelândia	0.065	0.20
	Itaúba	0.048	0.15
	Querência	0.36	2.28
	Canarana	0.27	0.87
Nordeste	São Félix do Araguaia	0.22	0.83
	Gaúcho do Norte	0.22	0.67
	Água Boa	0.16	0.53
	Sinop	0.15	1.65
	Sorriso	0.61	2.71
Médio-Norte	Lucas do Rio Verde	0.24	0.79
	Nova Mutum	0.40	1.32
	Nova Ubiratã	0.37	1.28
	Nova Maringá	0.20	0.65
	Tapurah	0.18	0.58
Oeste	Campo Novo do Percis	0.38	1.55
	Sapezal	0.36	0.92
	Campos de Júlio	0.20	0.67
Centro-Sul	Diamantino	0.35	0.77
Sudeste	Primavera do Leste	0.27	0.84
	Paranatinga	0.26	0.79
	TOTAL	5.72	21.41

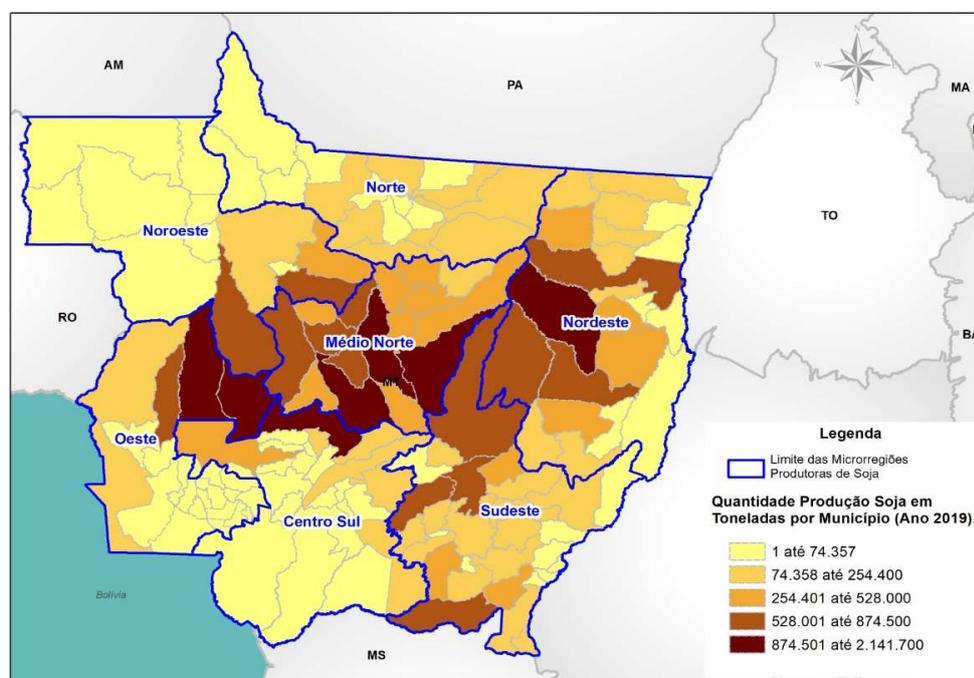
Fonte: Elaboração própria, a partir de dados do IBGE (SIDRA, 2019).

Na página do IBGE (<https://www.ibge.gov.br>) é possível acessar a plataforma do Sistema IBGE de Recuperação Automática (Sidra), que possibilita obter dados das pesquisas municipais (anuais) e dos censos agropecuários, disponibilizando dados de produção (quantidade e valor), área plantada e colhida, bem como a produtividade da soja (IBGE, 2019).

No mapa da Figura 21, é possível visualizar a classificação dos municípios segundo a metodologia de concentração descrita por Garagorry *et al* (2014), um método simples que tem sido adotado para fazer análise de mudanças na distribuição geográfica ao longo do tempo, priorizando representação visual das variações temporais ocorridas no espaço geográfico estudado. Esses municípios destacam-se

pela representatividade na quantidade de soja produzida em milhões de toneladas, como ilustrado na Figura 21.

Figura 21 – Macro e Microrregiões produtoras de soja do Mato Grosso

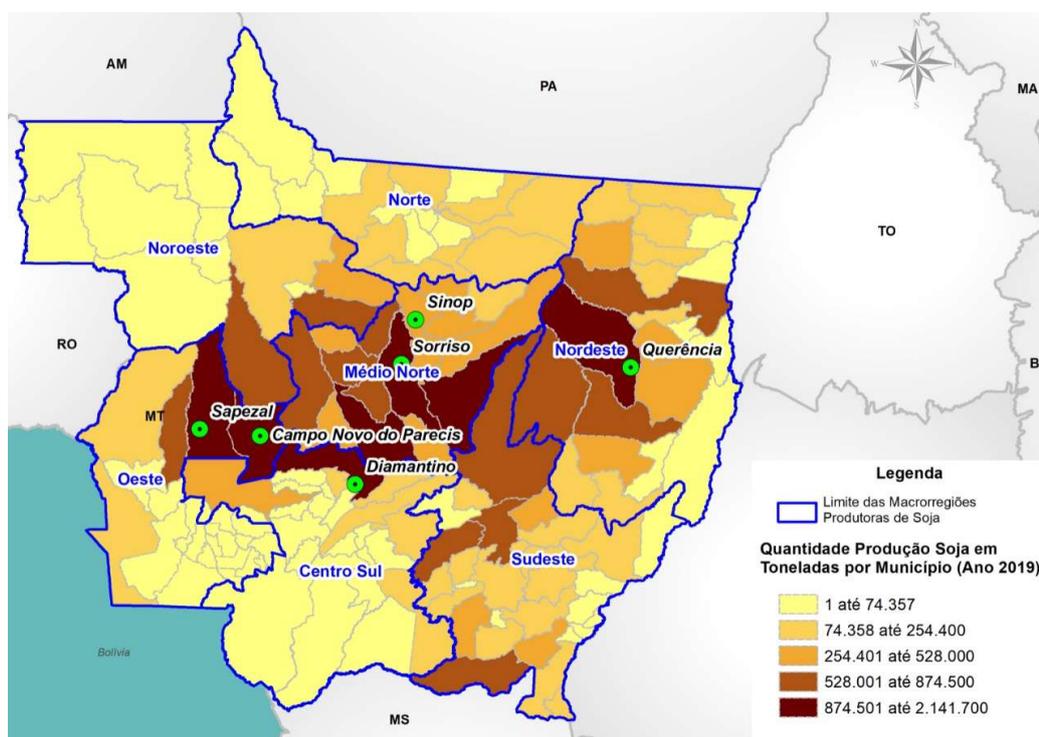


Fonte: Elaboração própria, a partir de dados do IBGE (SIDRA, 2019).

No desenvolvimento deste estudo, os métodos da Programação Linear e Programação Linear *Fuzzy* foi inicialmente aplicado na otimização em relação as três rotas estudadas (BR-163, Ferrogrão e Hidrovia Araguaia-Tocantins). Definindo-se como origem, seis municípios do Estado do Mato Grosso, tais como: Campo Novo do Parecis, Sorriso, Sapezal, Querência, Sinop e Diamantino e as Estações de Transbordo de Carga, tais como: Porto Velho, Miritituba, Porto Nacional e Nova Xavantina. O critério utilizado na escolha destes municípios foi: sua vultosa produção de soja e sua localização geográfica, por estarem inseridas nas macroregiões (Oeste, Médio Norte, Nordeste e Centro Sul), próximas aos corredores logísticos do Arco Norte Amazônico.

Na Figura 22, é possível identificar os seis municípios de origem, inseridos nas regiões de maior produção de soja do Estado mato-grossense:

Figura 22 – Municípios produtores de soja (origem)



Fonte: Elaboração própria, a partir de dados do IBGE (SIDRA, 2019).

As rotas de escoamento da soja são classificadas como objeto de estudo desta pesquisa, são determinadas pelas distâncias percorridas em quilômetros (km), desde a origem (municípios produtores) até os destinos (estações de transbordo de cargas e portos). E em relação ao Estado do Mato Grosso, é possível observar na Figura 23 que às rodovias BR – 364 e BR – 163, são rodovias federais mais utilizadas para o escoamento da soja, visto que as mesmas já são corredores logísticos estabelecidos e conectam o estado do Mato Grosso com os estados de Rondônia e Pará.

No modo rodoviário, as quatro principais rodoviárias envolvidas nesta logística são: BR – 364 que liga Mato Grosso a Porto Velho (Rondônia) a uma distância média de 951 km, a BR – 163 que liga Mato Grosso a estação de transbordo em Miritituba (Pará) a uma distância média de 1.075 km, a BR- 158 que liga o município de Querência (Mato Grosso) ao porto de Vila do Conde (Pará) a uma distância média de 1.561 km e a BR – 242, que liga o município de Querência (Mato Grosso) a Estação de transbordo em Porto Nacional (Tocantins) a uma distância de 657 km. Além disso, acredita-se que, com a concessão da BR - 163 (MT-PA) que liga Sinop (MT) a Miritituba (PA), haverá uma melhoria contínua das condições da via, resultando numa

maior e melhor trafegabilidade em decorrência dos investimentos, e por consequência, menor custo de transporte (SOUZA, 2021).

Os dados das distâncias percorridas, foram obtidos por meio do aplicativo gratuito do *google Maps*, onde, através de imagens de satélites foi possível obter essas distancias, considerando a menor distância possível.

A rota de escoamento da soja do Mato Grosso através do modo ferroviário é realizada de maneira intermodal, entre rodo – ferroviário, onde a soja mato-grossense sai do município de Querência (MT), percorrendo a BR - 242 até Porto Nacional (TO), realizando o transbordo para a ferrovia Norte-sul (EF-151), seguindo por 700 km até o município de Açailândia (MA), onde se conecta com a Estrada de Ferro-Carajás (EF-315), seguindo diretamente até o porto de Itaqui no Maranhão.

Quando a Ferrogrão for implantada, terá uma segunda opção de transporte ferroviário para a exportação de soja via corredor Arco Norte, com uma logística de aproximadamente 933 km e com capacidade inicial de 42 milhões de toneladas até a Estação de Transbordo em Miritituba no Pará.

Em relação ao transporte Hidroviário, as principais rotas de escoamento da soja do Mato Grosso, envolve a Hidrovia do Rio Madeira com uma extensão hidroviária de aproximadamente 1007,7 km e, que é a principal rota por onde se escoam a soja do centro-oeste mato-grossense para os portos de Itacoatiara (AM) e Santarém (PA).

Outra hidrovia muito importante no escoamento da soja do Mato Grosso, e a Hidrovia do Rio Tapajós com uma extensão hidroviária de aproximadamente 469,48 km, por onde transporta a soja por meio de barcaças até o porto de Santarém ou porto Vila do Conde no Pará. Esse trajeto é realizado de modo intermodal, através da BR – 163 até as Estações de Transbordo em Miritituba, administrada pela empresa HBSA.

A grande maioria dos terminais pertence às empresas privadas, a exemplo de grandes *tradings* como Bungee, Hidrovias do Brasil (HBSA), Cargill, e já possuem em seus contratos o transporte do terminal de transbordo até os terminais de uso privados e de lá até os portos finais nos mercados consumidores. Desse modo, na prática a iniciativa privada exporta a maior parte da soja brasileira, utilizando as instalações dos complexos portuários (SOUZA, 2021). Na Figura 23, é possível identificar todas essas rotas.

4.2 MODELAGEM

4.2.1 Modelo de Programação Linear

Com base na teoria de Programação Linear, em especial o problema do transporte, foi desenvolvido um modelo de otimização linear, com o objetivo de minimização do custo total do transporte, agregando-se, assim, os custos de transporte terrestre, taxas de transbordo e as taxas portuárias.

4.2.1.1 Função objetivo

A função objetivo é composta de cinco somatórios respectivamente, o primeiro somatório é concernente ao transporte rodoviário diretamente aos portos, o segundo ao transporte até os terminais de transbordo, o terceiro corresponde aos custos de transbordo até os terminais, o quarto se refere ao transporte dos terminais até os portos e o quinto é relativo a taxa portuária ou a taxa de transbordo nos portos.

$$\begin{aligned}
 \text{Custo} = & \sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^m R_i \cdot FR_{ij} + \sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^r P_{ik} \cdot FP_{ik} \\
 & + \sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^r P_{ik} \cdot CT_k + \sum_{i=1}^r \sum_{j=1}^m I_{kj} \cdot FI_{kj} + \sum_{i=1}^n \sum_{k=1}^r (R_{ij} + I_{kj}) \cdot CE_j
 \end{aligned} \tag{72}$$

4.2.1.2 Restrições

Foram consideradas as seguintes restrições:

- Restrição que garante o escoamento da oferta:

$$\sum_{j=1}^m R_{ij} + \sum_{j=1}^m P_{ik} = OFT_i, \text{ para todo } i \tag{73}$$

A soma dos fluxos originados nos centros produtores i , transportados através do modal rodoviário diretamente aos portos exportadores, mais a soma dos fluxos originados nos mesmos centros destinados aos terminais de transbordo, deve ser

igual a oferta de grãos para exportação nos centros i . Tal restrição garante que toda a produção será escoada por meio do modal rodoviário diretamente ou através do terminal de transbordo.

- Restrição que garante a continuidade do escoamento que chega ao terminal de transbordo:

$$\sum_{i=1}^n P_{ik} - \sum_{k=1}^r I_{kj} = 0, \quad \text{para todo } k \quad (74)$$

Ou seja, a soma do volume de grãos oriundos dos centros produtores i , com destino aos terminais de transbordo k deve ser igual ao fluxo de saída dos terminais k . Portanto, os terminais obrigatoriamente escoam toda a produção recebida, atuando apenas como pontos intermediários.

- Restrição da demanda nos portos exportadores:

$$\sum_{i=1}^n P_{ik} + \sum_{k=1}^r I_{kj} \leq DEM_j \quad \text{para todo } k \quad (75)$$

Tal restrição garante que a soma dos fluxos de origem nos pontos de transbordo k e destino aos portos exportadores j mais a soma dos fluxos de origem nos centros i e destino aos portos j devem ser menor ou igual à demanda do porto j . Tal premissa garante que a capacidade operacional dos portos não seja violada no modelo. Nesse problema em questão, os valores da origem são menores que os valores do destino, logo, foram criadas "origens fantasmas" que suprem a demanda não atendida a um custo igual a 0.

4.2.1.3 Parâmetros

A descrição dos parâmetros, índices e variáveis de decisão utilizados no modelo será listada a seguir:

- Parâmetros:

OFT_i : oferta de grãos destinados à exportação no centro de produção i em toneladas por ano.

DEM_j : demanda de embarque dos portos exportadores j em toneladas por ano.

FR_{ij} : frete rodoviário em reais por tonelada com origem no centro produtor i e destino ao porto exportador j .

FP_{ik} : frete intermodal em reais por tonelada com origem no centro produtor i e destino ao terminal de transbordo k .

FI_{kj} : frete intermodal em reais por tonelada com origem no terminal k e destino no porto exportador j .

OFT_i : oferta de grãos destinados à exportação no centro produtor i em toneladas por ano.

CT_k : custo para efetivação do transbordo no terminal k em reais por tonelada.

CE_j : custo de elevação portuária no porto exportador j por tonelada.

- Variáveis de decisão:

R_{ij} : fluxo rodoviário em toneladas com origem no centro produtor i e destino ao porto exportador j .

P_{ik} : fluxo rodoviário em toneladas com origem no centro produtor i e destino ao terminal de transbordo k .

I_{kj} : fluxo intermodal em toneladas com origem no terminal de transbordo k e destino ao porto exportador j .

- Índices:

i : centro produtor de grãos de soja.

j : porto exportador de grãos de soja.

k : terminal de transbordo intermodal de grãos de soja, com possibilidade de ser rodoferroviário ou rodo-hidroviário.

n : número total de centros produtores.

m : número total de portos exportadores.

r : número total de terminais de transbordo.

4.2.2 Dados de entrada

4.2.2.1 Oferta da produção de soja dos municípios

Uma das variáveis de decisão utilizada no método da PL, foi a oferta de produção de soja desses municípios em estudo, usando como parâmetros os dados disponíveis no site do SIDRA (IBGE, 2019), onde foi possível obter dados das áreas plantadas e da produção de soja do Mato Grosso, no ano de 2019.

Na Tabela 4, é possível observar esses dados em relação aos seis municípios tomados como referência de origem:

Tabela 4 – Municípios de origem, áreas plantadas e produção

Macrorregião	Origem	Área Plantada (milhões de ha)	Produção (milhões de toneladas)
Oeste	Campo Novo do Parecis	0.38	1.55
Médio Norte	Sorriso	0.61	2.71
Oeste	Sapezal	0.36	0.92
Nordeste	Querência	0.36	2.28
Médio Norte	Sinop	0.15	1.65
Centro Sul	Diamantino	0.35	0.77
TOTAL		2.21	9,88

Fonte: Elaboração própria, a partir dos dados do SIDRA (IBGE, 2019).

4.2.2.2 Demanda dos portos em estudo

Outra variável de decisão muito importante utilizada no modelo, foi a demanda dos portos e estações de transbordo de cargas, como descritas na Tabela 5.

Tabela 5 – Demanda dos Portos do Arco Norte no ano de 2020

Item	Porto	Movimentação (Milhões de toneladas)
1	Vila do Conde - PA	13,7
2	São Luís/Itaqui - MA	13,1
3	Santarém - PA	7
4	Itacoatiara/Manaus - AM	4,5
TOTAL		38,3

Fonte: Elaboração própria, dados da CNA (2020).

4.2.2.3 Os custos de Fretes

Os dados referentes aos valores de fretes foram divididos em transporte rodoviário e transporte intermodal, visto que a soja pode ser escoada pelo modal rodoviário diretamente aos portos ou utilizando combinação de modais.

Em relação ao frete rodoviário, os valores foram baseados na pesquisa de Rocha (2020), que estimou as curvas de fretes por corredores logísticos. As distâncias entre origens e destinos foram obtidas através do software Google Maps. A tabela 6 demonstra os fretes por corredor.

É importante salientar que a determinação de fretes é um processo empírico, onde se observa o comportamento dos transportadores com base em coleta de dados, e a partir daí são feitos tratamentos estatísticos a fim de determinar correlações entre as variáveis e assim determinar certos padrões, como fretes por certas distâncias.

Rocha (2020) obteve um modelo de um conjunto de valores de fretes rodoviários para os portos brasileiros exportadores de soja no ano de 2017 com coeficiente de determinação da versão linear igual a 88,47%. Os fretes foram estimados para a mesma combinação origem-destino (OD) entre os terminais de transbordo e os portos.

$$\text{Frete} = e^{-0,072183367} \cdot d_{od}^{0,733679018} \quad (76)$$

Baseado nos valores encontrados pela equação (76), os valores de referência para os fretes hidroviários e ferroviários foram obtidos por meio de descontos no valor do frete rodoviário para a mesma combinação entre localidades de origem e destino. Tais percentuais foram obtidos da seguinte forma: o frete hidroviário corresponde a 40% do valor do frete rodoviário, para uma mesma combinação de origem e destino. Já o frete ferroviário corresponde a 70% do valor do frete rodoviário, também para uma mesma combinação de origem e destino.

Tabela 6 – Origens, destinos e valores de fretes

Item	Origem	Destino	Maps (Set, 2021)	Rocha (2020)
			Distância. (km)	Frete R\$/t.km
1		Porto de Santarém/PA	1.747	222,56
2		Porto de Vila do Conde/PA	2.372	278,55
3		Porto de Itaquí/MA	2.677	304,40
4	Campo Novo do Parecis	ETC – Miritituba/PA	1.448	193,93
5		ETC – Porto Velho/RO	1.053	153,51
6		ETC – Porto Nacional/TO	1.534	202,31
7		ETC – Nova Xavantina/MT	1.012	149,10
8		ETC – Sinop/MT	457	83,21
9		Porto de Santarém/PA	1.376	186,81
10		Porto de Vila do Conde/PA	2.001	245,87
11		Porto de Itaquí/MA	2.306	272,84
12	Sorriso	ETC – Miritituba/PA	1.077	156,07
13		ETC – Porto Velho/RO	1.407	189,88
14		ETC – Porto Nacional/TO	1.220	171,02
15		ETC – Nova Xavantina/MT	738	118,27
16		ETC – Sinop/MT	85	24,22
17		Porto de Santarém/PA	1.855	232,58
18		Porto de Vila do Conde/PA	2.481	287,88
19		Porto de Itaquí/MA	2.786	313,45
20	Sapezal	ETC – Miritituba/PA	1.557	204,53
21		ETC – Porto Velho/RO	946	141,91
22		ETC – Porto Nacional/TO	1.673	215,61
23		ETC – Nova Xavantina/MT	1.159	164,70
24		ETC – Sinop/MT	565	97,22
25		Porto de Santarém/PA	1.675	215,80
26		Porto de Vila do Conde/PA	1.561	204,92
27		Porto de Itaquí/MA	1.923	238,80
28	Querência	ETC – Miritituba/PA	1.376	186,81
29		ETC – Porto Velho/RO	1.969	242,98
30		ETC – Porto Nacional/TO	657	108,60
31		ETC – Nova Xavantina/MT	293	60,05
32		ETC – Sinop/MT	791	124,45
33		Porto de Santarém/PA	1.294	178,57
34		Porto de Vila do Conde/PA	1.862	233,22
35		Porto de Itaquí/MA	2.224	265,69
36	Sinop	ETC – Miritituba/PA	995	147,26
37		ETC – Porto Velho/RO	1.363	185,51
38		ETC – Porto Nacional/TO	1.138	162,51
39		ETC – Nova Xavantina/MT	870	133,45
40		ETC – Sinop/MT	2	1,55
41		Porto de Santarém/PA	3.012	331,91
42		Porto de Vila do Conde/PA	2.528	291,88
43		Porto de Itaquí/MA	2.374	278,72
44	Diamantino	ETC – Miritituba/PA	1.362	185,41
45		ETC – Porto Velho/RO	1.284	177,56
46		ETC – Porto Nacional/TO	1.538	202,70
47		ETC – Nova Xavantina/MT	830	128,92
48		ETC – Sinop/MT	371	71,41

Fonte: Elaboração própria (2021).

Conforme já foi citado acima, os dados de tarifas de transbordo, frete ferroviário e frete hidroviário utilizados neste trabalho são oriundos da pesquisa de Rocha (2020), obtidos através de coleta de informações junto aos agentes envolvidos nas respectivas operações. O custo intermodal das rotas propostas de (Miritituba – Santarém e Vila do Conde), (Nova Xavantina – Vila do Conde) e (Porto Velho – Itacoatiara) foi baseado no valor de corredores com características semelhantes já existentes, a exemplo da rota Porto Nacional-Itaqui no caso do modal ferroviário e a rota Miritituba-Vila do Conde no caso do modal hidroviário.

Em relação as rotas intermodais dos corredores do Arco Norte é evidente a predominância do potencial hidrográfico que a região possui, e que talvez por falta de interesse por parte dos tomadores de decisão em investir nesses corredores, se perde a oportunidade de se obter uma logística mais eficaz, obtendo fretes mais baratos, com maior capacidade de transporte de carga e com a diminuição dos impactos ambientais. A tabela 7 abaixo ilustra a intermodalidade, distâncias e os valores de fretes intermodais:

Tabela 7 – Valores de Fretes Intermodais

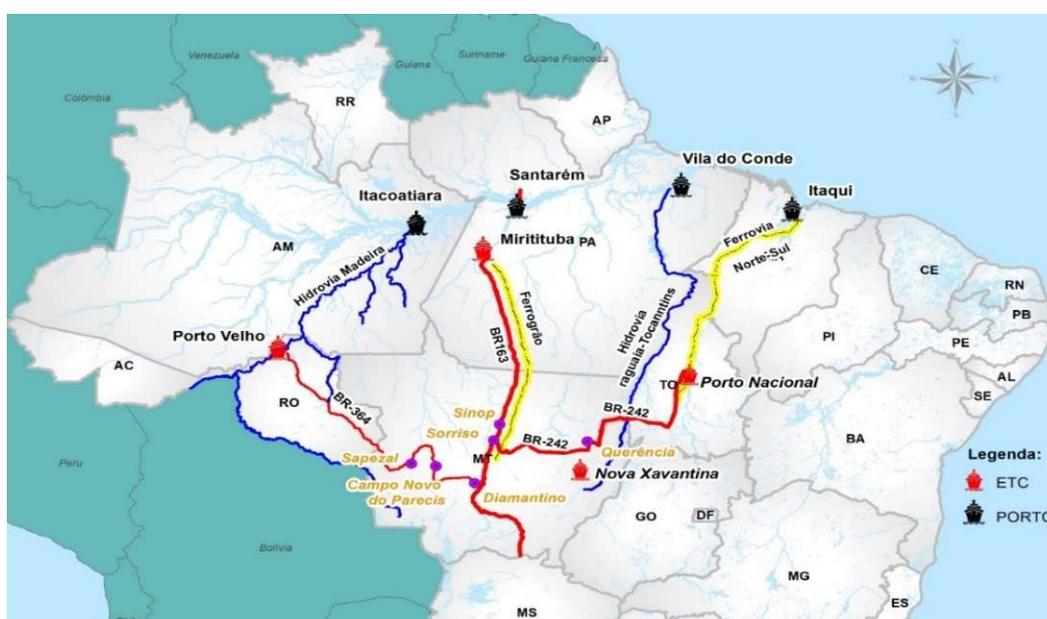
Tipo	Terminal	Porto	Distância (km)	(R\$/t.km)
Rodo-Hidro	ETC Miririruba	Vila do Conde	1274,62	R\$ 70,64
Rodo-Hidro	ETC Miririruba	Santarém	363,74	R\$ 28,15
Rodo-Hidro	ETC Miririruba	Itacoatiara	776,27	R\$ 49,10
Rodo-Hidro	ETC Porto Velho	Vila do Conde	2433,14	R\$ 113,52
Rodo-Hidro	ETC Porto Velho	Santarém	1640	R\$ 84,99
Rodo-Hidro	ETC Porto Velho	Itacoatiara	1098,25	R\$ 63,33
Rodo-Hidro	ETC Nova Xavantina	Vila do Conde	2656,75	R\$ 121,08
Rodo-Hidro	ETC Nova Xavantina	Itacoatiara	3212,25	R\$ 319,31
Rodo-Hidro	ETC Sinop	Vila do Conde	2207,62	R\$ 168,97
Rodo-Ferro	ETC Sinop	Santarém	1296,74	R\$ 126,48
Rodo-Hidro	ETC Sinop	Itacoatiara	2617,25	R\$ 264,19
Rodo-Ferro	ETC Sinop	Miritituba	933	98,33
Rodo-Hidro	ETC Porto Nacional	Itacoatiara	3996,25	R\$ 385,97
Rodo-Ferro	ETC Porto Nacional	Itaqui	1249,46	R\$ 121,83

Fonte: Autoria própria (2021).

4.2.3 Análise dos Cenários

Neste trabalho foram considerados quatro Cenários baseados no ano de 2020, no Cenário 1 foram considerados as rotas atuais com ênfase na BR-163; no Cenário 2 foram considerados a BR - 163 mais a Ferrogrão; no Cenário 3 foram considerados a BR – 163 mais a Hidrovia Araguaia - Tocantins e o Cenário 4 foram considerados todas as rotas, sendo, a BR – 163, Ferrogrão e a Hidrovia Araguaia-Tocantins, como apresentado na Figura 23. Na Tabela 8 estão ilustrados cada Cenários.

Figura 23 – Rotas de escoamento da soja



Fonte: Autoria própria (2021).

Tabela 8 – Cenário e Rotas

Cenários	Rotas
1	Atuais (BR-163)
2	Atuais (BR-163) + Ferrogrão
3	Atuais (BR-163) + Hidrovia Araguaia-Tocantins
4	Atuais (BR-163) + Ferrogrão+ Hidrovia Araguaia-Tocantins

Fonte: Autoria própria (2021).

No Cenário 1 considerou-se apenas a Rota da BR- 163 (MT-PA), onde o modelo de PL otimizou a logística de origem – transbordo – destino, conforme a

Tabela 9 abaixo, gerando um total de custo mínimo de frete de R\$ 1.94 bilhões de reais, com suas respectivas quantidades transportada em milhões de toneladas.

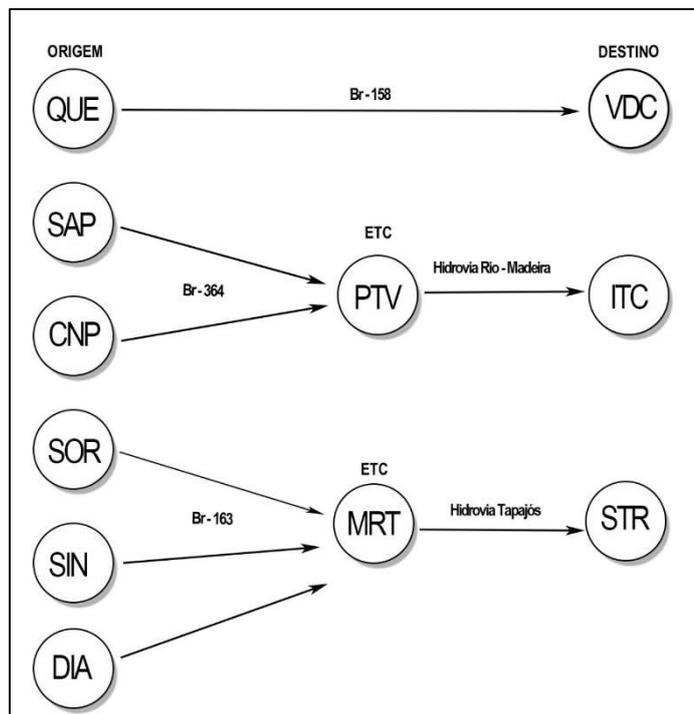
Tabela 9 – Otimização (BR-163 MT-PA)

Cenário 1 – (BR-163)				
Origem	Quant. (Milhões de ton)	ETC	Porto	Quant. Total (Milhões de ton)
CNP	1.55	Porto Velho	Itacoatiara	2.47
SAP	0.92			
SOR	2.71			
SIN	1.65			
DIA	0.77	Miritituba	Santarém	5.13
QUE	2.28	-	Vila do Conde	2.28
Custo Total			R\$ 1.94 (Bilhões de reais)	

Fonte: Autoria própria (2021).

Observa-se que no Cenário 1 os centros de produção dos municípios de Sorriso, Sinop e Diamantino, realizaram a intermodalidade (Rodo-Hidro), percorrendo a BR-163 (MT-PA), até a estação de transbordo em Miritituba, de lá realizando o transporte dos grãos através de barcaças pela hidrovía do rio Tapajós até o porto de Santarém (PA). Outra intermodalidade ocorrida neste Cenário, foi do transporte dos centros de produção dos municípios de Sapezal e Campo Novo do Parecis via BR – 364 (MT-RO), até a estação de Transbordo em Porto Velho, realizando o transbordo dos produtos para as barcaças com destino ao porto de Itacoatiara (AM) através da hidrovía do rio Madeira. Enquanto no município de Querência, transportou toda sua produção diretamente para o Porto de Vila do Conde, tendo sua rota pela BR-158. Esta logística está ilustrada no grafo de fluxo na Figura 24.

Figura 24 – Grafo do cenário 1



Fonte: Autoria própria (2021).

No Cenário 2 considerou-se apenas as Rotas da BR - 163 (MT-PA) e da Ferrogrão, onde o modelo de otimização forneceu um custo mínimo de frete de R\$ 1.75 bilhões de reais, para realizar o transporte da oferta de produção dos municípios para os portos de destinos. A logística de transporte e a quantidade transportada, estão ilustradas na Tabela 10.

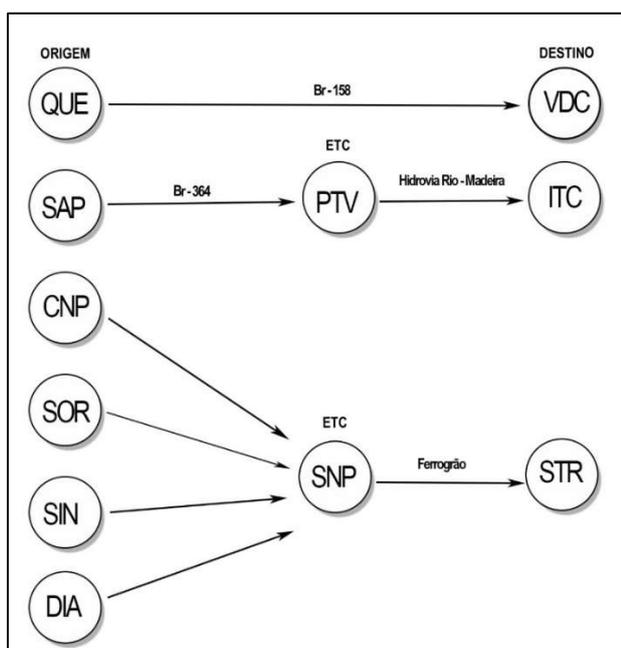
No cenário 2 é possível observar que ocorreram duas intermodalidades, a primeira do município de Sapezal para a estação de transbordo em Porto Velho (RO) e de lá para o porto de Itacoatiara (AM) pela hidrovia do rio Madeira. A segunda intermodalidade ocorreu dos municípios de Campo Novo do Parecis, Sorriso, Sinop e Diamantino com destino a estação de transbordo da ferrovia projetada (Ferrogrão) com destino ao porto de Santarém (PA), como ilustrado na Figura 25:

Tabela 10 – Otimização (BR-163 MT-PA e Ferrogrão)

Cenário 2 – (BR-163 e Ferrogrão)				
Origem	Quant. (Milhões de ton)	ETC	Porto	Quant. Total (Milhões de ton)
SAP	0.92	Porto Velho	Itacoatiara	0.92
CNP	1.55			
SOR	2.71			
SIN	1.65	Sinop (Ferrogrão)	Santarém	6.68
DIA	0.77			
QUE	2.28	-	Vila do Conde	2.28
Custo Total			R\$ 1.75 (Bilhões de reais)	

Fonte: Autoria própria (2021)

Figura 25 – Grafo do cenário 2



Fonte: Autoria própria (2021).

Em relação ao transbordo, foram transportados de Porto Velho para o porto de Itacoatiara 0.92 milhões de toneladas, ou seja, toda a produção do município de Sapezal. E 6.68 milhões de toneladas proveniente dos municípios de Campos Novo do Parecis, Sorriso, Sinop e Diamantino, escoaram toda a sua produção pela Ferrogrão com destino ao porto de Santarém.

No Cenário 3 considerou-se apenas as Rotas da BR - 163 (MT-PA) e da Hidrovia Araguaia - Tocantins, onde o modelo de otimização forneceu um custo total mínimo de frete de R\$ 1.89 bilhões de reais para realizar o transporte da produção

dos municípios até aos portos de destino. A logística de transporte e a quantidade transportada, estão ilustradas na Tabela 11 abaixo.

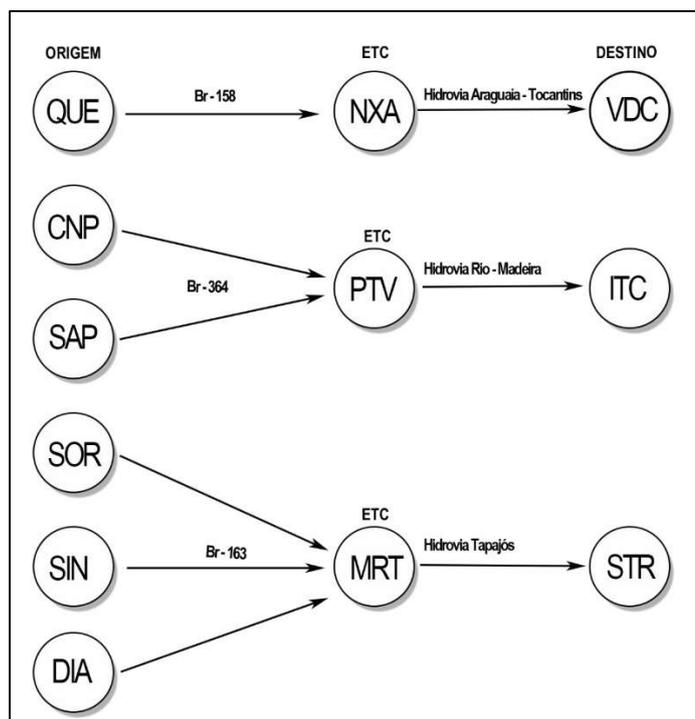
Tabela 11 – Otimização (BR-163 MT-PA e Hidrovia Araguaia-Tocantins)

Cenário 3 – (BR-163 e Hidrovia Araguaia-Tocantins)				
Origem	Quant. (Milhões de ton)	ETC	Porto	Quant. Total (Milhões de ton)
CNP	1.55	Porto Velho	Itacoatiara	2.47
SAP	0.92			
SOR	2.71			
SIN	1.65			
DIA	0.77	Miritituba	Santarém	5.13
QUE	2.28	Nova Xavantina	Vila do Conde	2.28
Custo Total			R\$ 1.89 (Bilhões de reais)	

Fonte: Autoria própria (2021).

No Cenário 3 é possível observar que o modelo otimizou três intermodalidades, sendo a primeira dos municípios de Campo Novo do Parecis e Sapezal para a estação de transbordo em Porto Velho e lá para o porto de Itacoatiara. A segunda intermodalidade ocorreu dos municípios de Sorriso, Sinop e Diamantino para estação de transbordo de Miritituba pela via da BR-163, e de Miritituba para o porto de Santarém pela hidrovia Tapajós. E por fim, do município de Querência para a estação de transbordo de Nova Xavantina com destino ao porto de Vila do Conde (PA) pela Hidrovia Araguaia-Tocantins. A Figura 26 demonstra esta logística.

Figura 26 – Grafo do Cenário 3



Fonte: Autoria própria (2021).

E por fim, no Cenário 4 considerou-se os três corredores logísticos como: BR-163 (MT-PA), Ferrogrão e a Hidrovia Araguaia - Tocantins, onde o modelo de otimização apresentou um custo mínimo de frete de R\$ 1.69 bilhões de reais, para realizar o transporte da produção dos municípios para os portos de destino. Logo, a logística realizada e as quantidades transportadas são apresentadas na Tabela 12.

Tabela 12 – Otimização (BR-163 MT-PA, Ferrogrão e Hidrovia Araguaia - Tocantins)

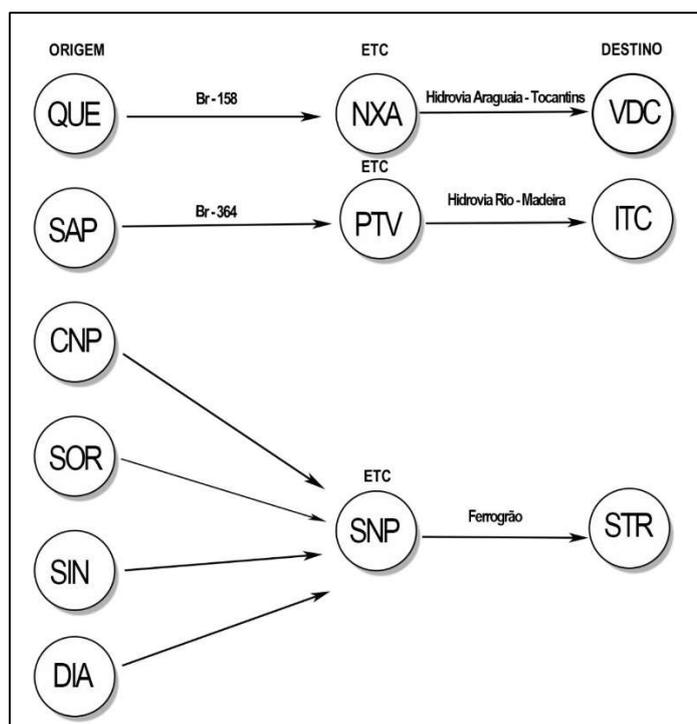
Cenário 4 – (BR-163, Ferrogrão e Hidrovia Araguaia-Tocantins)

Origem	Quant. (Milhões de ton)	ETC	Porto	Quant. Total (Milhões de ton)
SAP	0.92	Miritituba	Itacoatiara	0.92
CNP	1.55			
SOR	2.71			
SIN	1.65			
DIA	0.77			
QUE	2.28	Nova Xavantina	Vila do Conde	2.28
Custo Total			R\$ 1.69 (Bilhões de reais)	

Fonte: Autoria própria (2021).

No Cenário 4 o modelo otimizou três intermodalidade, a primeira considerando a logística do município de Querência para a estação de transbordo em Nova Xavantina, e de Nova Xavantina diretamente para o porto de Vila do Conde pela hidrovía Araguaia-Tocantins. A segunda intermodalidade, ocorreu do município de Sapezal para a estação de transbordo em Porto Velho pela BR - 364, e de Porto Velho os grãos são transportados por barcaças pela hidrovía Madeira até o porto de destino em Itacoatiara. E por fim, a terceira intermodalidade ocorreu dos municípios de Campo Novo do Parecis, Sorriso, Sinop e Diamantino para a estação de transbordo em Sinop (Ferrogrão), utilizando a via projetada da Ferrogrão até o porto de Santarém (PA). Essas intermodalidades estão ilustradas na Figura 27.

Figura 27 – Grafo do cenário 4



Fonte: Autoria própria (2021)

4.2.4 Resultados da Programação Linear

O método de Programação Linear aplicado na otimização logística desta pesquisa, apresentou resultados distintos, onde se conclui que, no primeiro Cenário considerou-se somente o corredor da BR-163, no qual modelo forneceu o maior custo de frete na logística de grãos para os portos do arco norte, concluindo-se que foi o pior Cenário.

No Cenário 2, considerou-se os corredores da BR-163 e da via projetada da Ferrogrão (EF-179), no qual o modelo apresentou um custo mais otimista se comparado ao cenário um. Isto apenas evidência o custo-benefício que a inserção da Ferrogrão trará na logística da soja para os portos do Norte no país.

No Cenário 3, considerou-se os corredores da BR-163 e da Hidrovia Araguaia-Tocantins, no qual o modelo de PL apresentou o segundo maior custo de frete, mesmo ocorrendo a intermodalidade rodo-hidroviário, o que comprova que a logística pela ferrovia apresenta um custo ainda menor.

Finalmente, o Cenário 4 considerou-se todas as três rotas em estudo e apresentou o melhor cenário com menor custo de frete. No qual, as intermodalidades ocorreram via rodo-hidroviário pelas hidrovias do rio Madeira e do rio Araguaia – Tocantins e rodo-ferroviário pelo ferrovia projetada da Ferrogrão (EF-170). O transporte pelo modo rodoviário dos municípios em estudo pela via da BR-163 até Miritituba não apresentou um resultado satisfatório neste cenário. A Tabela 13, sintetiza a logística e os custos de cada cenário.

Tabela 13 – Valores de custo total em cada cenário

Cenário	Origem	ETC	Porto	Custo Total (Bilhões de R\$)
1	Sorriso, Sinop e Diamantino	Miritituba	Santarém	1.94
	Sapezal e Campo Novo do Parecis	Porto Velho	Itacoatiara	
	Querência	-	Vila do Conde	
2	Sapezal	Porto Velho	Itacoatiara	1.75
	Querência	-	Vila do Conde	
	Campo Novo do Parecis, Sorriso, Sinop e Diamantino	Ferrogrão	Santarém	
3	Querência	Nova Xavantina	Vila do Conde	1.89
	Campo Novo do Parecis e Sapezal	Porto Velho	Itacoatiara	
	Sorriso, Sinop e Diamantino	Miritituba	Santarém	
4	Querência	Nova Xavantina	Vila do Conde	1.69
	, Campo Novo do Parecis, Sorriso, Sinop e Diamantino	Ferrogrão	Santarém	
	Sapezal	Porto Velho	Itacoatiara	

Fonte: Autoria própria (2021).

4.3 MODELO DE PROGRAMAÇÃO LINEAR FUZZY

4.3.1 Modelo de Transporte Fuzzy Trapezoidal Intervalar

Conforme a pesquisa desenvolvida por Ebrahimnejad (2015), o novo método aplicado nesta pesquisa baseia-se na formulação de Programação Linear Fuzzy, e é proposto para obter a solução ótima fuzzy trapezoidal de valores intervalares de número fuzzy trapezoidal de valor intervalar, na qual todos os parâmetros (custo, oferta e demanda), bem como as variáveis de decisão são representados por números fuzzy trapezoidais com valor intervalar (w^I, w^S) . Sendo que, nesse método o número fuzzy trapezoidal de valor intervalar deve ser balanceado e explorado no algoritmo proposto.

Para encontrar uma solução ótima fuzzy com números fuzzy trapezoidal com valor intervalar, o conjunto fuzzy trapezoidal de valor intervalar deve satisfazer os seguintes critérios:

- i. A quantidade de mercadoria transportada $\{\tilde{x}_{ij}\}$ é um número fuzzy trapezoidal com valor de intervalo não negativo;
- ii. $\sum_{j=1}^n \tilde{x}_{ij} = \tilde{a}_i, i = 1, 2, \dots, m$ e $\sum_{i=1}^m \tilde{x}_{ij} = \tilde{b}_j, j = 1, 2, \dots, n$.
- iii. Se existir qualquer outro conjunto de números fuzzy trapezoidais não negativos com valores intervalares $\{\tilde{x}'_{ij}\}$, tal que:

$$\sum_{j=1}^n \tilde{x}'_{ij} = \tilde{a}_i, \quad i = 1, 2, \dots, m \text{ e } \sum_{i=1}^m \tilde{x}'_{ij} = \tilde{b}_j, \quad (77)$$

$$j = 1, 2, \dots, n.$$

Então,

$$d\left(\sum_{i=1}^m \sum_{j=1}^n \tilde{c}_{ij} \otimes \tilde{x}_{ij}, O_1\right) < d\left(\sum_{i=1}^m \sum_{j=1}^n \tilde{c}_{ij} \otimes \tilde{x}'_{ij}, O_1\right) \quad (78)$$

Onde:

\tilde{x}_{ij} = Quantidade de mercadoria transportada, de um conjunto fuzzy trapezoidal com valor intervalar;

\tilde{x}'_{ij} = Quantidade de mercadoria transportada, de um conjunto *fuzzy* trapezoidal com valor intervalar não negativo;

\tilde{a}_i = oferta com número *fuzzy* trapezoidal com valor intervalar;

\tilde{b}_j = demanda com número *fuzzy* trapezoidal com valor intervalar;

d = distância.

Para a aplicação do método proposto, será descrito às várias etapas para encontrar a solução de um problema de transporte de número *fuzzy* trapezoidal com valores intervalares:

Passo 1: Encontre a oferta *fuzzy* \tilde{a}_i com valor intervalar total $\sum_{i=1}^m \tilde{a}_i$ e a demanda *fuzzy* com valor intervalar total $\sum_{j=1}^n \tilde{b}_j$.

Seja $\sum_{i=1}^m \tilde{a}_i = \langle (m_1^l, m_2^l, m_3^l, m_4^l; w^l), (m_1^s, m_2^s, m_3^s, m_4^s; w^s) \rangle$ e $\sum_{j=1}^n \tilde{b}_j = \langle (n_1^l, n_2^l, n_3^l, n_4^l; w^l), (n_1^s, n_2^s, n_3^s, n_4^s; w^s) \rangle$. Verifique se o problema está balanceado ou seja, $\sum_{i=1}^m \tilde{a}_i = \sum_{j=1}^n \tilde{b}_j$, caso não esteja $\sum_{i=1}^m \tilde{a}_i \neq \sum_{j=1}^n \tilde{b}_j$, consulte o artigo de Ali Ebrahimnejad (2015), para solucionar o problema.

Passo 2: Formule o problema de transporte de número *fuzzy* trapezoidal com valor intervalar balanceado, obtido no Passo 1, para o seguinte problema de programação linear *fuzzy* com valor intervalar:

$$\min \sum_{i=1}^p \sum_{j=1}^q \tilde{c}_{ij} \otimes \tilde{x}_{ij} \quad (79)$$

Sendo,

$$\sum_{j=1}^q \tilde{x}_{ij} = \tilde{a}_i, \quad i = 1, 2, \dots, p; p = morn + 1 \quad (80)$$

$$\sum_{i=1}^p \tilde{x}_{ij} = \tilde{b}_j, \quad j = 1, 2, \dots, q; q = norn + 1 \quad (81)$$

$$\tilde{x}_{ij} \in F_{IVTN}^+(w^I, w^S), i = 1, 2, \dots, p, \quad j = 1, 2, \dots, q. \quad (82)$$

Onde p e q são os números totais de origens e destinos, respectivamente.

Passo 3: O objetivo é encontrar a quantidade de mercadoria transportada $\{\tilde{x}_{ij}\}$ que satisfaça as propriedades na definição, ou seja:

$$\min d \left(\sum_{i=1}^p \sum_{j=1}^q \tilde{c}_{ij} \otimes \tilde{x}_{ij}, O_1 \right) = \sum_{i=1}^p \sum_{j=1}^q d(\tilde{c}_{ij} \otimes \tilde{x}_{ij}, O_1) \quad (83)$$

Sendo:

$$\sum_{j=1}^q \tilde{x}_{ij} = \tilde{a}_i, \quad i = 1, 2, \dots, p, \quad (84)$$

$$\sum_{i=1}^p \tilde{x}_{ij} = \tilde{b}_j, \quad j = 1, 2, \dots, q, \quad (85)$$

$$\tilde{x}_{ij} \in F_{IVTN}^+(w^I, w^S), \quad i = 1, 2, \dots, p, \quad j = 1, 2, \dots, q. \quad (86)$$

Passo 4: O problema de Programação Linear de Números *Fuzzy* Trapezoidais de Valores Intervalares (83), pode ser reescrito como segue:

$$\min d \left(\sum_{i=1}^m \sum_{j=1}^n \tilde{c}_{ij} \otimes \tilde{x}_{ij}, O_1 \right) = \sum_{i=1}^m \sum_{j=1}^n d(\tilde{c}_{ij} \otimes \tilde{x}_{ij}, O_1) \quad (87)$$

Sendo:

$$\left(\sum_{j=1}^n x_{ij1}^l, \sum_{j=1}^n x_{ij2}^l, \sum_{j=1}^n x_{ij3}^l, \sum_{j=1}^n x_{ij4}^l \right) = (a_{i1}^l, a_{i2}^l, a_{i3}^l, a_{i4}^l), \quad (88)$$

$$i = 1, 2, \dots, m,$$

$$\left(\sum_{j=1}^n x_{ij1}^s, \sum_{j=1}^n x_{ij2}^s, \sum_{j=1}^n x_{ij3}^s, \sum_{j=1}^n x_{ij4}^s \right) = (a_{i1}^s, a_{i2}^s, a_{i3}^s, a_{i4}^s), \quad (89)$$

$$i = 1, 2, \dots, m,$$

$$\left(\sum_{i=1}^m x_{ij1}^l, \sum_{i=1}^m x_{ij2}^l, \sum_{i=1}^m x_{ij3}^l, \sum_{i=1}^m x_{ij4}^l \right) = (b_{j1}^l, b_{j2}^l, b_{j3}^l, b_{j4}^l), \quad (90)$$

$$j = 1, 2, \dots, n,$$

$$\left(\sum_{i=1}^m x_{ij1}^s, \sum_{i=1}^m x_{ij2}^s, \sum_{i=1}^m x_{ij3}^s, \sum_{i=1}^m x_{ij4}^s \right) = (b_{j1}^s, b_{j2}^s, b_{j3}^s, b_{j4}^s), \quad (91)$$

$$j = 1, 2, \dots, n$$

$$\tilde{x}_{ij} \in F_{IVTN}^+(w^l, w^s), \quad i = 1, 2, \dots, p, \quad j = 1, 2, \dots, q. \quad (92)$$

Passo 5: O problema de *Fuzzy* de valor Intervalar, obtido no Passo 4, deve ser convertido no seguinte problema de programação linear *crisp*:

$$\min d \left(\sum_{i=1}^m \sum_{j=1}^n \tilde{c}_{ij} \otimes \tilde{x}_{ij}, O_1 \right) = \sum_{i=1}^m \sum_{j=1}^n d(\tilde{c}_{ij} \otimes \tilde{x}_{ij}, O_1) \quad (93)$$

Ou seja:

$$\sum_{j=1}^n x_{ij1}^l = a_{i1}^l, \sum_{j=1}^n x_{ij2}^l = a_{i2}^l, \sum_{j=1}^n x_{ij3}^l = a_{i3}^l, \sum_{j=1}^n x_{ij4}^l = a_{i4}^l, \quad (94)$$

$$i = 1, 2, \dots, m,$$

$$\sum_{j=1}^n x_{ij1}^S = a_{i1}^S, \sum_{j=1}^n x_{ij2}^S = a_{i2}^S, \sum_{j=1}^n x_{ij3}^S = a_{i3}^S, \sum_{j=1}^n x_{ij4}^S = a_{i4}^S, \quad (95)$$

$$i = 1, 2, \dots, m,$$

$$\sum_{i=1}^m x_{ij1}^L = b_{j1}^L, \sum_{i=1}^m x_{ij2}^L = b_{j2}^L, \sum_{i=1}^m x_{ij3}^L = b_{j3}^L, \sum_{i=1}^m x_{ij4}^L = b_{j4}^L, \quad (96)$$

$$j = 1, 2, \dots, n,$$

$$\sum_{i=1}^m x_{ij1}^S = b_{j1}^S, \sum_{i=1}^m x_{ij2}^S = b_{j2}^S, \sum_{i=1}^m x_{ij3}^S = b_{j3}^S, \sum_{i=1}^m x_{ij4}^S = b_{j4}^S, \quad (97)$$

$$j = 1, 2, \dots, n,$$

$$\begin{aligned} x_{ij1}^S \geq 0, x_{ij1}^L - x_{ij1}^S \geq 0, x_{ij2}^L - x_{ij1}^L \geq 0, x_{ij3}^L - x_{ij2}^L \geq 0, x_{ij4}^L - x_{ij3}^L \\ \geq 0, \quad i = 1, 2, \dots, m, \quad j = 1, 2, \dots, n, \end{aligned} \quad (98)$$

$$\begin{aligned} x_{ij2}^S - x_{ij1}^S \geq 0, x_{ij3}^S - x_{ij2}^S \geq 0, x_{ij4}^S - x_{ij3}^S \geq 0, x_{ij4}^S - x_{ij4}^L \\ \geq 0, \quad i = 1, 2, \dots, m, \quad j = 1, 2, \dots, n. \end{aligned} \quad (99)$$

Passo 6: Encontre a solução ótima $x_{ij1}^L, x_{ij2}^L, x_{ij3}^L, x_{ij4}^L, x_{ij1}^S, x_{ij2}^S, x_{ij3}^S, x_{ij4}^S$ resolvendo o problema de programação linear *crisp*, obtido no passo 5.

Passo 7: Encontre a solução ótima *fuzzy* $\{\tilde{x}_{ij}\}$ inserindo os valores ótimos

$$x_{ij1}^L, x_{ij2}^L, x_{ij3}^L, x_{ij4}^L, x_{ij1}^S, x_{ij2}^S, x_{ij3}^S, x_{ij4}^S$$

em

$$\tilde{x}_{ij} = \langle (x_{ij1}^L, x_{ij2}^L, x_{ij3}^L, x_{ij4}^L; w^L), (x_{ij1}^S, x_{ij2}^S, x_{ij3}^S, x_{ij4}^S; w^S) \rangle.$$

Passo 8: Encontre o custo de transporte dos números *fuzzy* trapezoidais com valores intervalares total, inserindo os valores das opções \tilde{x}_{ij} em

$$\sum_{i=1}^m \sum_{j=1}^n \tilde{c}_{ij} \otimes \tilde{x}_{ij}$$

4.3.2 Dados de entrada de Programação Linear *Fuzzy*

4.3.2.1 Oferta Fuzzificada da produção de soja dos municípios

Para aplicação deste método, se faz necessário *fuzzificar* todas as variáveis de decisão como: oferta, demanda e os custos de fretes. Os valores das ofertas fuzzificadas neste modelo, são os mesmos valores *crisp* ilustrado na Tabela 4 de Programação Linear, estes valores estão disponíveis no site do SIDRA (IBGE, 2019).

No processo de fuzzificação das ofertas, utilizou-se a ferramenta do software excel, onde considerou-se valores de grau de incertezas de 8% e 5% para os trapézios superiores e inferiores respectivamente, levando em consideração 25% na variação das distâncias entre os trapézios. Na Tabela 14, é possível observar esses dados fuzzificados, considerados nos quatros cenários em estudo.

4.3.2.2 Demanda Fuzzificada dos portos e estações de transbordo.

Outra variável muito importante na modelagem e que deve-se *fuzzificar*, são as demandas ou capacidade tanto dos portos de destino, quanto das estações de transbordo de cargas. Sendo também utilizado o software excel como uma ferramenta para realizar o processo de fuzzificação. Como exemplificado na Tabela 15.

Tabela 14 – Ofertas Fuzzificadas

Item	Origem	Ofertas Fuzzificadas (milhões de toneladas)									
		Superior					Inferior				
		A1	A2	A3	A4	α - nível	A1	A2	A3	A4	α - nível
1	Campo Novo do Parecis	1.42	1.48	1.60	1.67	1	1.47	1.50	1.58	1.62	0,67
2	Sorriso	2.49	2.60	2.82	2.92	1	2.57	2.64	2.78	2.84	0,67
3	Sapezal	0.84	0.88	0.95	0.98	1	0.87	0.89	0.93	0.96	0,67
4	Querência	2.09	2.18	2.36	2.45	1	2.16	2.22	2.33	2.39	0,67
5	Sinop	1.52	1.58	1.71	1.78	1	1.57	1.61	1.69	1.73	0,67
6	Diamantino	0.71	0.74	0.80	0.83	1	0.73	0.75	0.79	0.81	0,67
7	Fictício	26.15	27.28	29.56	30.69	1	27.00	27.71	29.13	29.84	0,67

Fonte: Autoria própria (2021).

Tabela 15 – Demandas Fuzzificadas

Item	Destino	Demandas Fuzzificadas (milhões de toneladas)									
		Superior					Inferior				
		A1	A2	A3	A4	α - nível	A1	A2	A3	A4	α - nível
1	Itaqui	12.05	12.57	13.62	14.14	1	12.44	12.77	13.42	13.75	0,67
2	Vila do Conde	12.60	13.15	14.24	14.79	1	13.01	13.35	14.04	14.38	0,67
3	Santarém	6.44	6.72	7.28	7.56	1	6.65	6.82	7.17	7.35	0,67
4	Itacoatiara	4.14	4.32	4.68	4.86	1	4.27	4.38	4.61	4.72	0,67
5	Porto Velho	1.81	1.89	2.05	2.13	1	1.87	1.92	2.02	2.07	0,67
6	Miritituba	1.81	1.89	2.05	2.13	1	1.87	1.92	2.02	2.07	0,67
7	Porto Nacional	3.48	3.63	3.93	4.09	1	3.59	3.69	3.88	3.97	0,67
8	Nova Xavantina	1.81	1.89	2.05	2.13	1	1.87	1.92	2.02	2.07	0,67
9	Sinop	38.64	40.32	43.68	45.36	1	39.90	40.95	43.05	44.10	0,67

Fonte: Autoria própria (2021).

4.3.2.3 Valores de Fretes Fuzzificados

Todos os valores de fretes foram fuzzificados, considerando os mesmos com um grau de incerteza de 8% e 4% para as funções trapezoidais superiores e inferiores respectivamente, levando-se em consideração 26% na variação das distâncias entre os trapezoidais.

Os valores de fretes foram fuzzificados e classificados em:

Origem – destino: Quando o transporte de grãos ocorre de sua origem diretamente para os portos exportados. Geralmente, usa-se apenas um modo de transporte, nesse caso usou-se o modo rodoviário. Os valores de fretes fuzzificados de origem-destino são apresentados nas Tabelas 16 a 19.

Origem – transbordo: Quando o transporte de grãos ocorre da origem de produção e necessita realizar um transbordo de sua carga para outro modal, seja rodo-hidro ou rodo-ferro, com a finalidade de transportar toda carga até ao porto exportador. Os valores de fretes fuzzificados da origem a uma estação de transbordo de carga são apresentados nas Tabelas de 20 a 24.

Transbordo – destino: É considerada a etapa final desta logística, pois toda a produção que saiu de sua origem para uma estação de transbordo é transportada para um porto exportador. Esses custos de fretes fuzzificados do transbordo para um porto de destino, são apresentados nas Tabelas 25 a 28.

Todo o processo de fuzzificação das ofertas, demandas e valores de fretes foram realizado através da ferramenta do software excel. Os valores de custos fuzzificados foram obtidos usando a Equação (57), das distâncias sinalizadas, conforme o método proposto por Ebrahimnejad (2015).

Nas Tabelas de 16 a 28 são apresentados todos os custos de fretes fuzzificados.

Tabela 16 – Valores de frete fuzzificados (R\$) – (Origens – Porto de Itacoatiara)

Item	Origem	Frete Fuzzificado – (Origens – Porto de Itacoatiara)									
		Superior					Inferior				
		A1	A2	A3	A4	α -nível	A1	A2	A3	A4	α -nível
1	Campo Novo do Parecis	200,38	209,44	226,16	235,22	1	209,09	213,62	221,98	226,51	0,67
2	Sorriso	235,59	246,25	265,91	276,57	1	245,84	251,16	261,00	266,32	0,67
3	Sapezal	189,73	198,31	214,15	222,73	1	197,98	202,27	210,19	214,48	0,67
4	Querência	282,63	295,41	319,01	331,79	1	294,92	301,31	313,11	319,50	0,67
5	Sinop	243,05	254,05	274,33	285,33	1	253,62	259,12	269,26	274,76	0,67
6	Diamantino	222,46	232,51	251,09	261,14	1	232,13	237,16	246,44	251,47	0,67
7	Fictício	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0,67

Fonte: Autoria própria (2021).

Tabela 17 – Valores de frete fuzzificados (R\$) – (Origens – Porto de Santarém)

Item	Origem	Frete Fuzzificado – (Origens – Porto de Santarém)									
		Superior					Inferior				
		A1	A2	A3	A4	α -nível	A1	A2	A3	A4	α -nível
1	Campo Novo do Parecis	204,76	214,01	231,11	240,36	1	213,66	218,29	226,83	231,46	0,67
2	Sorriso	171,87	179,64	193,98	201,75	1	179,34	183,22	190,40	194,28	0,67
3	Sapezal	213,97	223,65	241,51	251,19	1	223,28	228,11	237,05	241,88	0,67
4	Querência	198,54	207,51	224,09	233,06	1	207,17	211,66	219,94	224,43	0,67
5	Sinop	164,28	171,71	185,43	192,86	1	171,43	175,14	182,00	185,71	0,67
6	Diamantino	305,36	319,16	344,66	358,46	1	318,63	325,54	338,28	345,19	0,67
7	Fictício	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0,67

Fonte: Autoria própria (2021).

Tabela 18 – Valores de frete fuzzificados (R\$) – (Origens – Porto de Vila do Conde)

Item	Origem	Frete Fuzzificado – (Origens – Porto de Vila do Conde)									
		Superior					Inferior				
		A1	A2	A3	A4	α -nível	A1	A2	A3	A4	α -nível
1	Campo Novo do Parecis	256,27	267,85	289,25	300,83	1	267,41	273,20	283,90	289,69	0,67
2	Sorriso	226,20	236,43	255,31	265,54	1	236,04	241,15	250,59	255,70	0,67
3	Sapezal	264,85	276,83	298,93	310,91	1	276,36	282,35	293,41	299,40	0,67
4	Querência	188,53	197,05	212,79	221,31	1	196,72	200,99	208,85	213,12	0,67
5	Sinop	214,56	224,26	242,18	251,88	1	223,89	228,74	237,70	242,55	0,67
6	Diamantino	268,53	280,67	303,09	315,23	1	280,20	286,28	297,48	303,56	0,67
7	Fictício	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0,67

Fonte: Autoria própria (2021).

Tabela 19 – Valores de frete fuzzificados (R\$) – (Origens – Porto de Itaquí)

Item	Origem	Frete Fuzzificado – (Origens – Porto de Itaquí)									
		Superior					Inferior				
		A1	A2	A3	A4	α -nível	A1	A2	A3	A4	α -nível
1	Campo Novo do Parecis	280,05	292,71	316,09	328,75	1	292,22	298,56	310,24	316,58	0,67
2	Sorriso	251,01	262,36	283,32	294,67	1	261,93	267,60	278,08	283,75	0,67
3	Sapezal	288,37	301,41	325,49	338,53	1	300,91	307,43	319,47	325,99	0,67
4	Querência	219,70	229,63	247,97	257,90	1	229,25	234,22	243,38	248,35	0,67
5	Sinop	244,43	255,49	275,89	286,95	1	255,06	260,59	270,79	276,32	0,67
6	Diamantino	256,42	268,02	289,42	301,02	1	267,57	273,37	284,07	289,87	0,67
7	Fictício	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0,67

Fonte: Autoria própria (2021).

Tabela 20 – Valores de frete fuzzificados (R\$) – (Origens – ETC em Porto Velho)

Item	Origem	Frete Fuzzificado – (Origens – ETC em Porto Velho)									
		Superior					Inferior				
		A1	A2	A3	A4	α -nível	A1	A2	A3	A4	α -nível
1	Campo Novo do Parecis	141,23	147,62	159,40	165,79	1	147,37	150,56	156,46	159,65	0,67
2	Sorriso	174,69	182,59	197,17	205,07	1	182,28	186,23	193,53	197,48	0,67
3	Sapezal	130,56	136,46	147,36	153,26	1	136,23	139,19	144,63	147,59	0,67
4	Querência	223,54	233,65	252,31	262,42	1	233,26	238,31	247,65	252,70	0,67
5	Sinop	170,67	178,39	192,63	200,35	1	178,09	181,95	189,07	192,93	0,67
6	Diamantino	163,36	170,74	184,38	191,76	1	170,46	174,15	180,97	184,66	0,67
7	Fictício	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0,67

Fonte: Autoria própria (2021).

Tabela 21 – Valores de frete fuzzificados (R\$) – (Origens – ETC em Porto de Miritituba)

Item	Origem	Frete Fuzzificado – (Origens – ETC em Porto de Miritituba)									
		Superior					Inferior				
		A1	A2	A3	A4	α -nível	A1	A2	A3	A4	α -nível
1	Campo Novo do Parecis	178,42	186,48	201,38	209,44	1	186,17	190,21	197,65	201,69	0,67
2	Sorriso	143,58	150,08	162,06	168,56	1	149,83	153,07	159,07	162,31	0,67
3	Sapezal	188,17	196,68	212,38	220,89	1	196,35	200,60	208,46	212,71	0,67
4	Querência	171,87	179,64	193,98	201,75	1	179,34	183,22	190,40	194,28	0,67
5	Sinop	135,48	141,61	152,91	159,04	1	141,37	144,43	150,09	153,15	0,67
6	Diamantino	170,58	178,29	192,53	200,24	1	177,99	181,85	188,97	192,83	0,67
7	Fictício	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0,67

Fonte: Autoria própria (2021).

Tabela 22 – Valores de frete fuzzificados (R\$) – (Origens – ETC em Porto Nacional)

Item	Origem	Frete Fuzzificado – (Origens – ETC em Porto Nacional)									
		Superior					Inferior				
		A1	A2	A3	A4	α -nível	A1	A2	A3	A4	α -nível
1	Campo Novo do Parecis	186,13	194,54	210,08	218,49	1	194,22	198,43	206,19	210,40	0,67
2	Sorriso	157,34	164,45	177,59	184,70	1	164,18	167,74	174,30	177,86	0,67
3	Sapezal	198,36	207,33	223,89	232,86	1	206,99	211,47	219,75	224,23	0,67
4	Querência	99,91	104,43	112,77	117,29	1	104,26	106,11	110,69	112,94	0,67
5	Sinop	149,51	156,27	168,75	175,51	1	156,01	159,39	165,63	169,01	0,67
6	Diamantino	186,48	194,92	210,48	218,92	1	194,59	198,81	206,59	210,81	0,67
7	Fictício	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0,67

Fonte: Autoria própria (2021).

Tabela 23 – Valores de frete fuzzificados (R\$) – (Origens – ETC em Nova Xavantina)

Item	Origem	Frete Fuzzificado – (Origens – ETC em Nova Xavantina)									
		Superior					Inferior				
		A1	A2	A3	A4	α -nível	A1	A2	A3	A4	α -nível
1	Campo Novo do Parecis	137,17	143,37	154,83	161,03	1	143,14	146,24	151,96	155,06	0,67
2	Sorriso	108,65	113,56	122,64	127,55	1	113,38	115,83	120,37	122,82	0,67
3	Sapezal	151,52	158,38	171,02	177,88	1	158,11	161,54	167,86	171,29	0,67
4	Querência	55,25	57,74	62,36	64,85	1	57,65	58,90	61,20	62,45	0,67
5	Sinop	122,77	128,33	138,57	144,13	1	128,11	130,89	136,01	138,79	0,67
6	Diamantino	118,61	123,97	133,87	139,23	1	123,76	126,44	131,40	134,08	0,67
7	Fictício	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0,67

Fonte: Autoria própria (2021).

Tabela 24 – Valores de frete fuzzificados (R\$) – (Origens – ETC em Sinop (Ferrogrão))

Item	Origem	Frete Fuzzificado – (Origens – ETC em Sinop (Ferrogrão))									
		Superior					Inferior				
		A1	A2	A3	A4	α -nível	A1	A2	A3	A4	α -nível
1	Campo Novo do Parecis	76,55	80,01	86,41	89,87	1	79,88	81,61	84,81	86,54	0,67
2	Sorriso	22,28	23,29	25,15	26,16	1	23,25	23,75	24,69	25,19	0,67
3	Sapezal	89,44	93,49	100,95	105,00	1	93,33	95,35	99,09	101,11	0,67
4	Querência	114,49	119,67	129,23	134,41	1	119,47	122,06	126,84	129,43	0,67
5	Sinop	1,43	1,49	1,61	1,67	1	1,49	1,52	1,58	1,61	0,67
6	Diamantino	65,70	68,67	74,15	77,12	1	68,55	70,04	72,78	74,27	0,67
7	Fictício	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0,67

Fonte: Autoria própria (2021).

Tabela 25 – Valores de frete fuzzificados (R\$) – (Transbordo – Porto de Itacoatiara)

Item	Origem	Frete Fuzzificado – (Transbordo – Porto de Itacoatiara)									
		Superior					Inferior				
		A1	A2	A3	A4	α -nível	A1	A2	A3	A4	α -nível
1	ETC – Porto Velho	58,26	60,90	65,76	68,40	1	60,80	62,11	64,55	65,86	0,67
2	ETC - Miritituba	45,17	47,21	50,99	53,03	1	47,14	48,16	50,04	51,06	0,67
3	ETC – Porto Nacional	355,09	371,15	400,79	416,85	1	370,53	378,56	393,38	401,41	0,67
4	ETC – Nova Xavantina	293,77	307,05	331,57	344,85	1	306,54	313,18	325,44	332,08	0,67
5	ETC – Sinop (Ferrogrão)	243,05	254,05	274,33	285,33	1	253,62	259,12	269,26	274,76	0,67

Fonte: Autoria própria (2021).

Tabela 26 – Valores de frete fuzzificados (R\$) – (Transbordo – Porto de Santarém)

Item	Origem	Frete Fuzzificado – (Transbordo – Porto de Santarém)									
		Superior					Inferior				
		A1	A2	A3	A4	α -nível	A1	A2	A3	A4	α -nível
1	ETC – Porto Velho	78,19	81,73	88,25	91,79	1	81,59	83,36	86,62	88,39	0,67
2	ETC - Miritituba	25,90	27,07	29,23	30,40	1	27,02	27,61	28,69	29,28	0,67
3	ETC – Porto Nacional	209,21	218,67	236,13	245,59	1	218,30	223,03	231,77	236,50	0,67
4	ETC – Nova Xavantina	216,34	226,12	244,18	253,96	1	225,74	230,64	239,66	244,56	0,67
5	ETC – Sinop (Ferrogrão)	116,36	121,62	131,34	136,60	1	121,42	124,05	128,91	131,54	0,67

Fonte: Autoria própria (2021).

Tabela 27 – Valores de frete fuzzificados (R\$) – (Transbordo – Porto de Vila do Conde)

Item	Origem	Frete Fuzzificado – (Transbordo – Porto de Vila do Conde)									
		Superior					Inferior				
		A1	A2	A3	A4	α -nível	A1	A2	A3	A4	α -nível
1	ETC – Porto Velho	104,44	109,16	117,88	122,60	1	108,98	111,34	115,70	118,06	0,67
2	ETC - Miritituba	64,99	67,93	73,35	76,29	1	67,81	69,28	72,00	73,47	0,67
3	ETC – Porto Nacional	156,11	163,16	176,20	183,25	1	162,89	166,42	172,94	176,47	0,67
4	ETC – Nova Xavantina	111,39	116,43	125,73	130,77	1	116,24	118,76	123,40	125,92	0,67
5	ETC – Sinop (Ferrogrão)	155,45	162,48	175,46	182,49	1	162,21	165,73	172,21	175,73	0,67

Fonte: Autoria própria (2021).

Tabela 28 – Valores de frete fuzzificados (R\$) – (Transbordo – Porto de Itaquí)

Item	Origem	Frete Fuzzificado – (Transbordo – Porto de Itaquí)									
		Superior					Inferior				
		A1	A2	A3	A4	α -nível	A1	A2	A3	A4	α -nível
1	ETC – Porto Velho	307,13	321,02	346,66	360,55	1	320,49	327,43	340,25	347,19	0,67
2	ETC - Miritituba	208,01	217,42	234,78	244,19	1	217,06	221,76	230,44	235,14	0,67
3	ETC – Porto Nacional	112,08	117,15	126,51	131,58	1	116,96	119,49	124,17	126,70	0,67
4	ETC – Nova Xavantina	235,75	246,41	266,09	276,75	1	246,00	251,33	261,17	266,50	0,67
5	ETC – Sinop (Ferrogrão)	235,75	246,41	266,09	276,75	1	246,00	251,33	261,17	266,50	0,67

Fonte: Autoria própria (2021).

4.3.3 Análise dos Cenários

Na análise dos Cenários do Modelo de Transporte *Fuzzy* Trapezoidal Intervalar, considerou-se os mesmo Cenários de PL (ver a Tabela 8).

Os resultados de Programação Linear *Fuzzy* Trapezoidal Intervalar, além de serem apresentados com valores numéricos, foram também classificados em termos linguísticos, identificando-se os estilos de tomadores de decisão de acordo com a classificação de Driver *et al* (1990), onde os mesmos considerou cinco estilos de tomadores de decisão, sendo empregado nesta pesquisa apenas três deles, como:

- O sistemático: o tomador de decisão que planeja a curto e longo prazo, valoriza informações e é cuidadoso com os resultados;
- O decisivo: o tomador de decisão que utiliza poucas informações, pouco se planeja e é orientado por resultados imediatos;
- O flexível: o tomador de decisão que utiliza poucas informações e decide conforme decisão em grupo.

Os quatros Cenários são analisados pelos resultados dos valores das variáveis fuzzificadas, o estilo de tomadores de decisão e a logística de cada cenário.

Nas Figuras de 28, 29, 30, 31, 32 e 33 estão apresentados os gráficos com os resultados obtidos no Primeiro e Segundo Cenários respectivamente, observa-se que os resultados apresentados foram os mesmos. Na Figura 34 está ilustrada a rota logística dos Cenários citados.

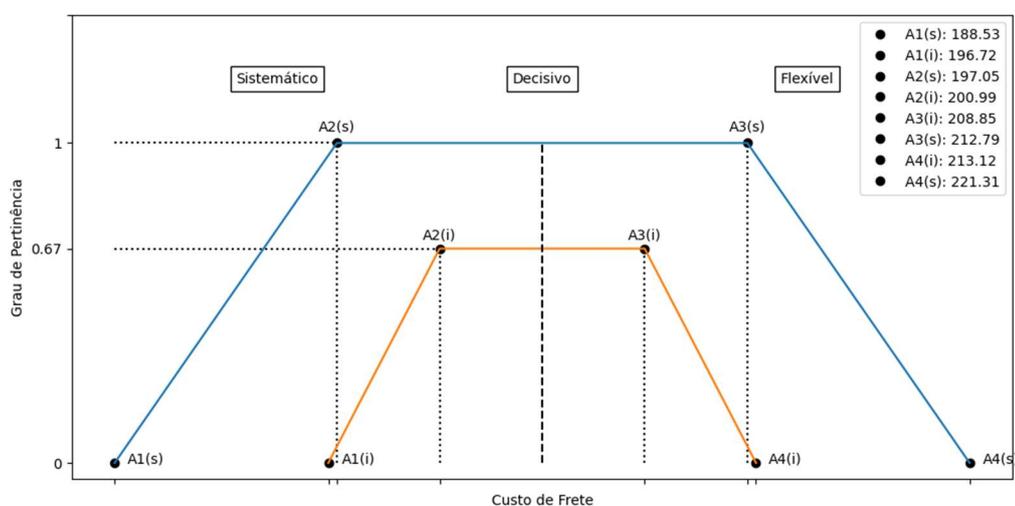
Tabela 29 – Valores de frete fuzzificados (R\$) – (1º e 2º cenário)

Origem /	Porto de Vila do Conde								
Destino	A1 ^S	A1 ^I	A2 ^S	A2 ^I	<i>Crisp</i>	A3 ^I	A3 ^S	A4 ^I	A4 ^S
Querência	188,53	196,72	197,05	200,99	204,92	208,85	212,79	213,12	221,31

Fonte: Autoria própria (2021).

Figura 28 – 1º e 2º cenário - Fretes fuzzificados (Querência-Vila do Conde)

Querência - Porto de Vila do Conde



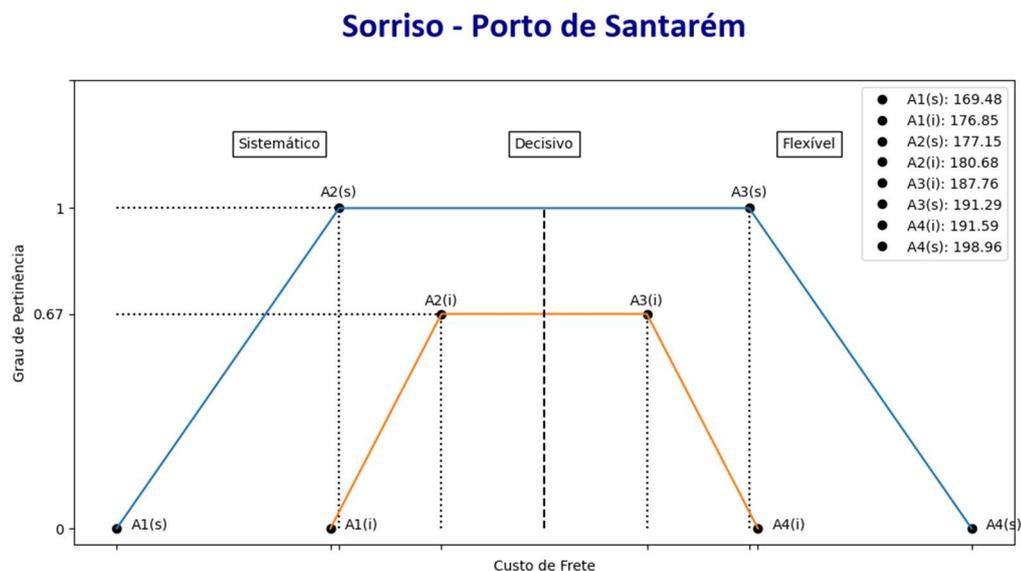
Fonte: Autoria própria (2021).

Tabela 30 – Valores de frete fuzzificados (R\$) – (1º e 2º cenário)

Origem /	Porto de Santarém								
Destino	A1 ^S	A1 ^I	A2 ^S	A2 ^I	<i>Crisp</i>	A3 ^I	A3 ^S	A4 ^I	A4 ^S
Sorriso	169,48	176,85	177,15	180,68	184,22	187,76	191,29	191,59	198,96

Fonte: Autoria própria (2021).

Figura 29 – 1º e 2º cenário - Fretes fuzzificados (Sorriso-Santarém)



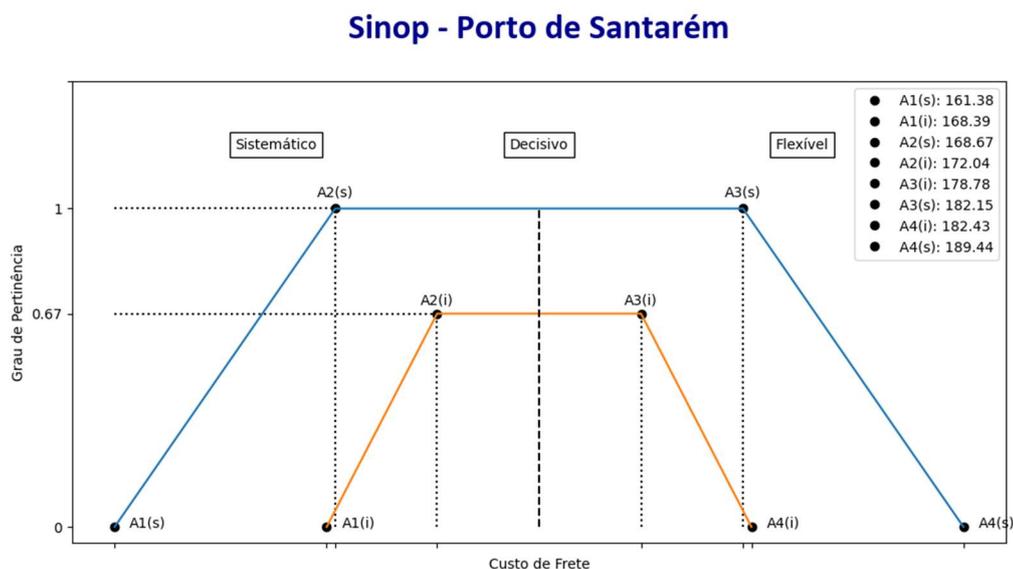
Fonte: Autoria própria (2021).

Tabela 31 – Valores de frete fuzzificados (R\$) – (1º e 2º cenário)

Origem / Destino	Porto de Santarém								
	A1 ^S	A1 ^I	A2 ^S	A2 ^I	<i>Crisp</i>	A3 ^I	A3 ^S	A4 ^I	A4 ^S
Sinop	161,38	168,39	168,67	172,04	175,41	178,78	182,15	182,43	189,44

Fonte: Autoria própria (2021)

Figura 30 – 1º e 2º cenário - Fretes fuzzificados (Sinop-Santarém)



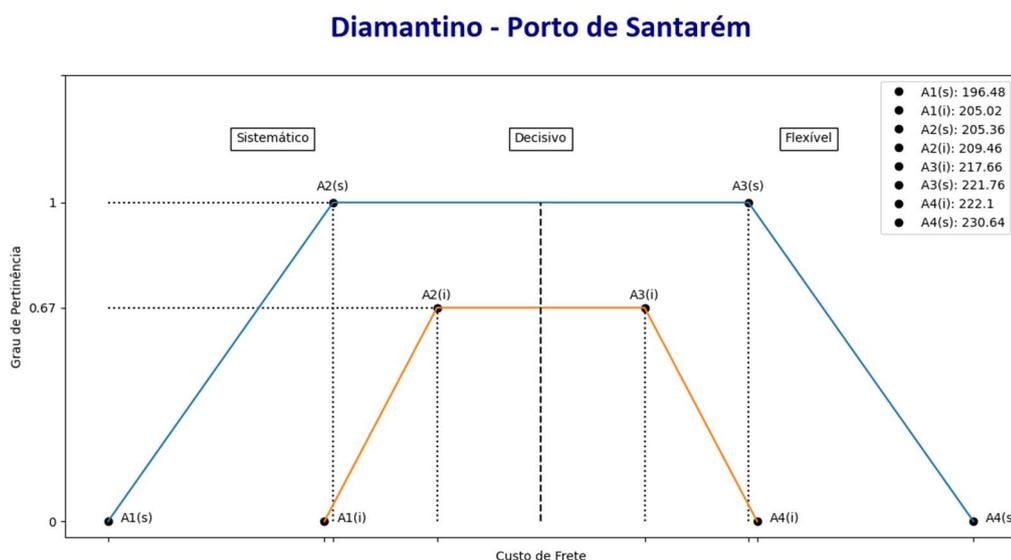
Fonte: Autoria própria (2021).

Tabela 32 – Valores de fretes fuzzificados (R\$) – (1º e 2º cenário)

Origem / Destino	Porto de Santarém								
	A1 ^S	A1 ^I	A2 ^S	A2 ^I	<i>Crisp</i>	A3 ^I	A3 ^S	A4 ^I	A4 ^S
Diamantino	196,48	205,02	205,36	209,46	213,56	217,66	221,76	222,10	230,64

Fonte: Autoria própria (2021).

Figura 31 – 1º e 2º cenário - Fretes fuzzificados (Diamantino-Santarém)



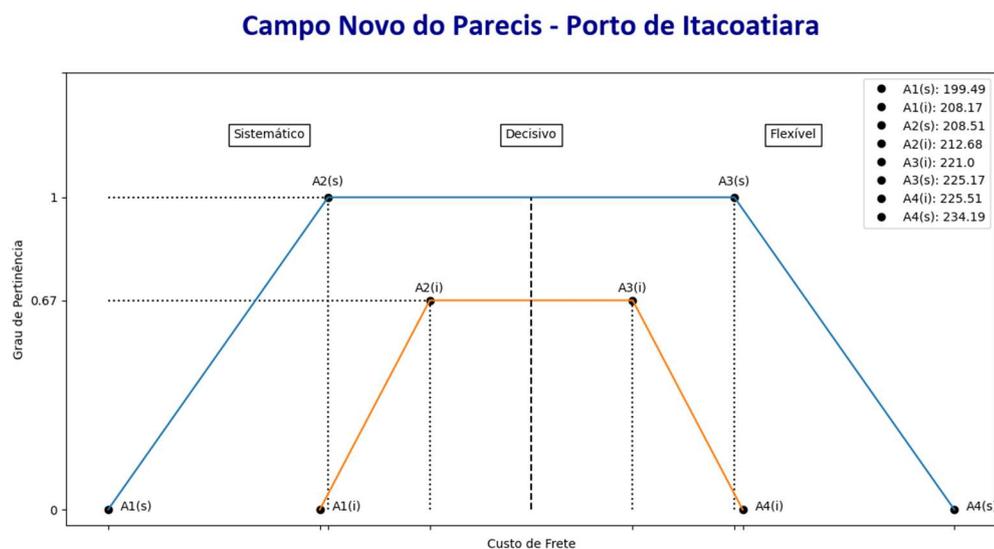
Fonte: Autoria própria (2021).

Tabela 33 – Valores de fretes fuzzificados (R\$) – (1º e 2º cenário)

Origem / Destino	Porto de Itacoatiara								
	A1 ^S	A1 ^I	A2 ^S	A2 ^I	<i>Crisp</i>	A3 ^I	A3 ^S	A4 ^I	A4 ^S
Campo Novo do Parecis	199.49	208.17	208.51	212.68	216.84	221.00	225.17	225.51	234.19

Fonte: Autoria própria (2021).

Figura 32 – 1º e 2º cenário - Fretes fuzzificados (Campo Novo do Parecis-Itacoatiara)



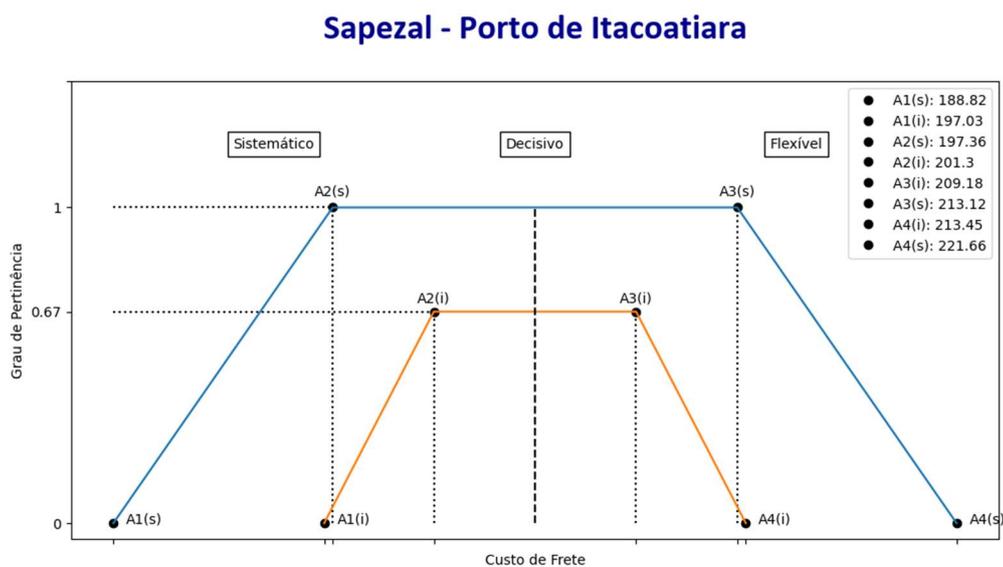
Fonte: Autoria própria (2021).

Tabela 34 – Valores de fretes fuzzificados (R\$) – (1º e 2º cenário)

Origem / Destino	Porto de Itacoatiara								
	A1 ^S	A1 ^I	A2 ^S	A2 ^I	<i>Crisp</i>	A3 ^I	A3 ^S	A4 ^I	A4 ^S
Sapezal	188.82	197.03	197.36	201.30	205,24	209.18	213.12	213.45	221.66

Fonte: Autoria própria (2021).

Figura 33 – 1º e 2º cenário - Fretes fuzzificados (Sapezal-Itacoatiara)



Fonte: Autoria própria (2021).

Em relação a logística, nota-se que o resultado obtido para o primeiro e segundo cenários foram os mesmo. O modelo otimizou a logística de Querência pela BR-158 diretamente para o porto de Vila do Conde.

Nos municípios de Sorriso, Sinop e Diamantino, ocorreu uma intermodalidade, no qual toda a produção desses municípios foi transportada no modo rodoviário pela BR-163 para a estação de transbordo de carga em Miritituba e de lá com destino ao porto de Santarém.

Para os municípios de Sapezal e Campo Novo do Parecis, o modelo otimizou a rota pela BR-364 em direção a estação de transbordo de carga em Porto Velho e de Porto Velho para o porto de Itacoatiara.

No primeiro e segundo cenário é possível observar que o modelo otimizou as mesmas rotas e conseqüentemente, atribuindo os mesmo custos de fretes que foi apresentado no primeiro cenário, sendo que, no segundo cenário foi atribuído tanto às rotas da BR-163 quanto da Ferrogrão (EF-170).

Figura 34 – Rotas logística obtidas no 1º e 2º Cenário Fuzzy



Fonte: Karina Pingarilho (2022)

No terceiro cenário se atribuem às rotas da BR-163 e da Hidrovia Araguaia-Tocantins, o modelo apresentou somente um resultado diferenciado comparado aos cenários anteriores. Este resultado se apresenta na logística e no valor de frete fuzzificado para o município de Querência, como exemplificado na Figura do gráfico 35 e na logística apresentada na Figura 36.

Os gráficos abaixo são exemplificados os valores de fretes fuzzificados:

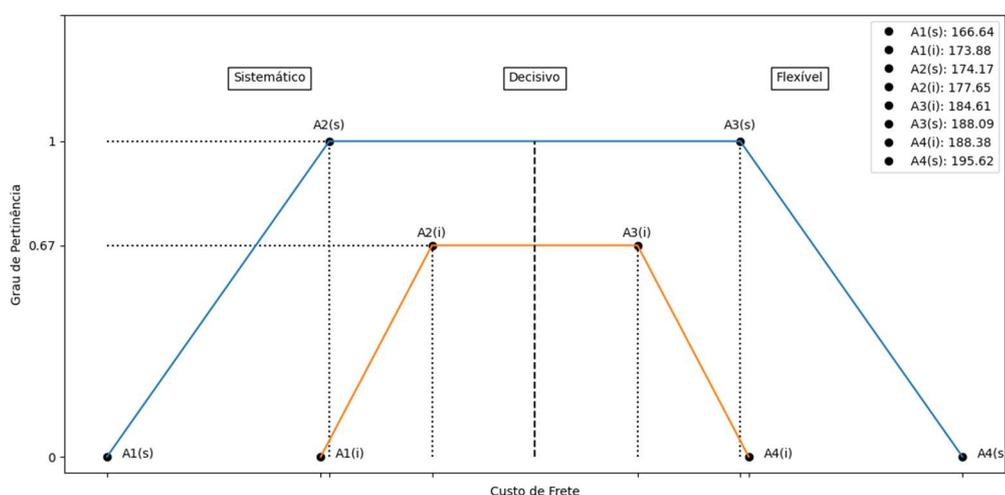
Tabela 35 – Valores de fretes fuzzificados (R\$) – (3º cenário)

Origem / Destino	Porto de Vila do Conde								
	A1 ^S	A1 ^I	A2 ^S	A2 ^I	<i>Crisp</i>	A3 ^I	A3 ^S	A4 ^I	A4 ^S
Querência	166,64	173,88	174,17	177,65	181,13	184,61	188,09	188,38	195,62

Fonte: Autoria própria (2021).

Figura 35 – 3º Cenário - Fretes fuzzificados (Querência-Vila do Conde)

Querência - Porto de Vila do Conde

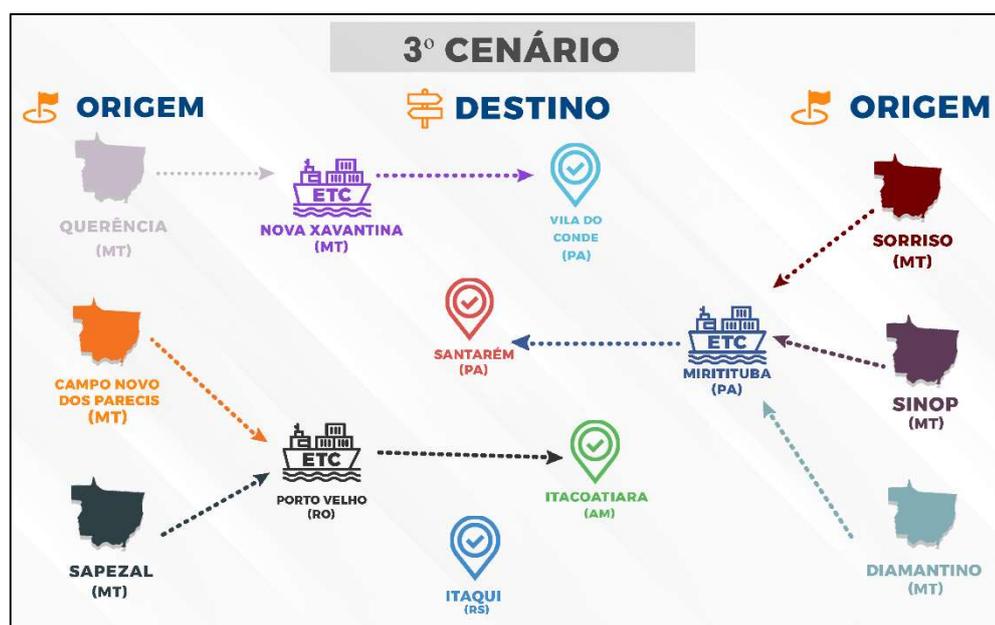


Fonte: Autoria própria (2021).

Em relação a logística, o modelo otimizou o transporte de grãos de Querência para a estação de transbordo em Nova Xavantina e de lá seguindo pela hidrovia Araguaia-Tocantins com destino ao porto de Vila do Conde.

Na Figura 36 apresenta-se a logística do terceiro cenário *fuzzy*. Para os demais municípios, a logística e os valores de frete fuzzificados são os mesmos dos cenários anteriores como demonstrado nas Figuras dos gráficos de 29 a 33.

Figura 36 – Rotas logística obtidas no 3º Cenário Fuzzy



Fonte: Karina Pingarilho (2022)

No quarto cenário se atribui as três rotas em estudo (BR-163, Ferrogrão e Hidrovia Araguaia-Tocantins), o modelo *fuzzy* otimizou o menor custo de frete fuzzificado e a melhor logística para os municípios de Campo Novo do Parecis, Sorriso, Sinop e Diamantino, transportando toda sua produção de grãos pela rota projetada da Ferrogrão (EF-170).

Nas Figuras dos gráficos de 37 a 40 estão exemplificados os valores de fretes fuzzificados:

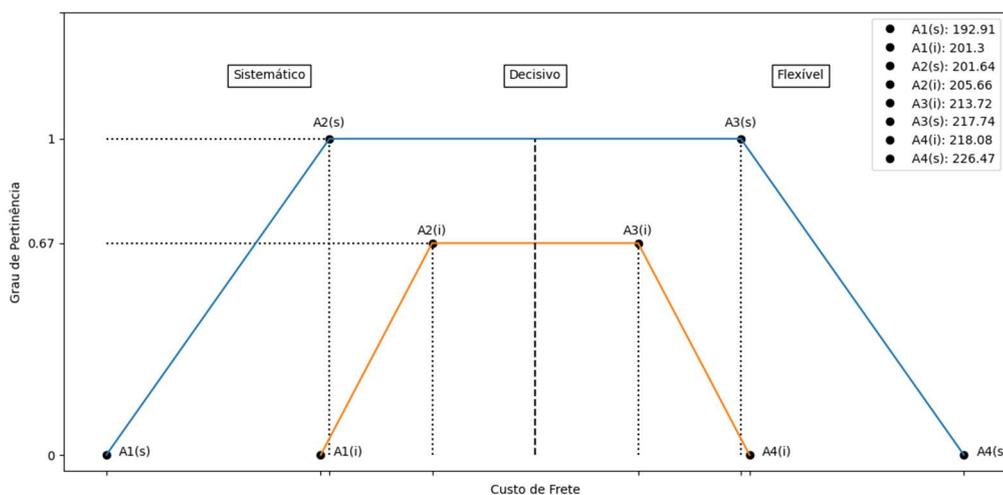
Tabela 36 – Valores de fretes fuzzificados (R\$) – (4º cenário)

Origem / Destino	Porto de Santarém								
	A1 ^S	A1 ^I	A2 ^S	A2 ^I	<i>Crisp</i>	A3 ^I	A3 ^S	A4 ^I	A4 ^S
Campo Novo do Parecis	192,91	201,30	201,64	205,66	209,69	213,72	217,74	218,08	226,47

Fonte: Autoria própria (2021).

Figura 37 – 4º cenário - Fretes fuzzificados (Campo Novo do Parecis-Santarém)

Campo Novo do Parecis - Porto de Santarém



Fonte: Autoria própria (2021).

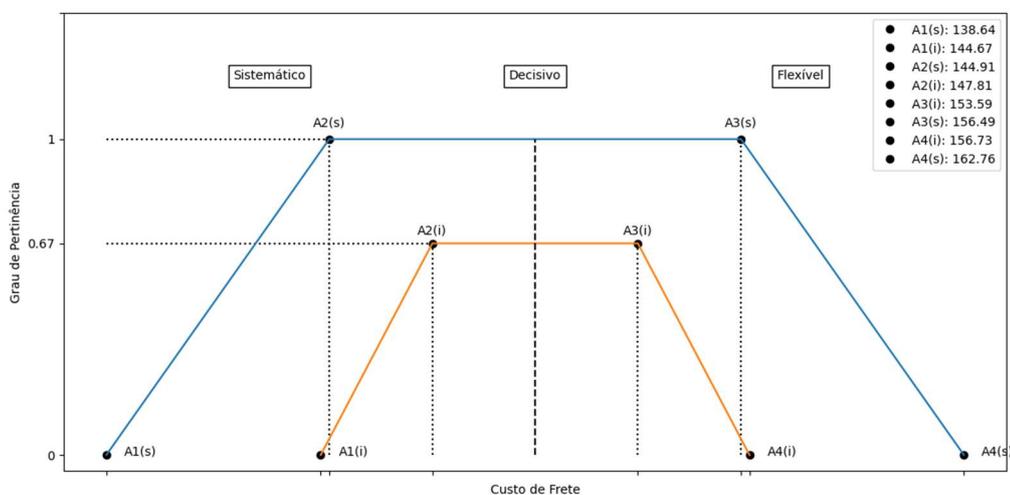
Tabela 37 – Valores de fretes fuzzificados (R\$) – (4º cenário)

Origem / Destino	Porto de Santarém								
	A1 ^S	A1 ^I	A2 ^S	A2 ^I	<i>Crisp</i>	A3 ^I	A3 ^S	A4 ^I	A4 ^S
Sorriso	138.64	144.67	144.91	147.81	150.70	153.59	156.49	156.73	162.76

Fonte: Autoria própria (2021).

Figura 38 – 4º cenário - Fretes fuzzificados (Sorriso-Santarém)

Sorriso - Porto de Santarém



Fonte: Autoria própria (2021).

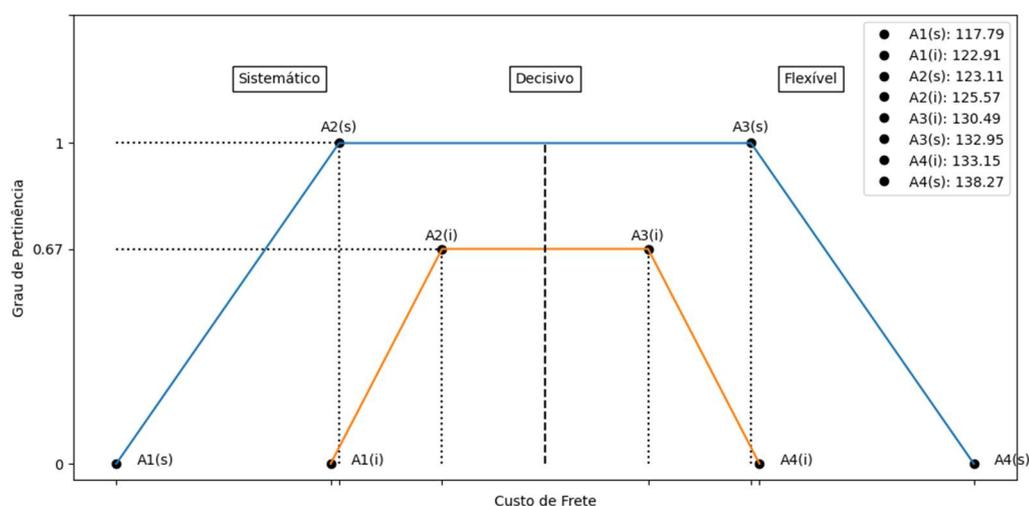
Tabela 38 – Valores de fretes fuzzificados (R\$) – (4º cenário)

Origem / Destino	Porto de Santarém								
	A1 ^S	A1 ^I	A2 ^S	A2 ^I	<i>Crisp</i>	A3 ^I	A3 ^S	A4 ^I	A4 ^S
Sinop	117,79	122,91	123,11	125,57	128,03	130,49	132,95	133,15	138,27

Fonte: Autoria própria (2021).

Figura 39 – 4º cenário - Fretes fuzzificados (Sinop-Santarém)

Sinop - Porto de Santarém



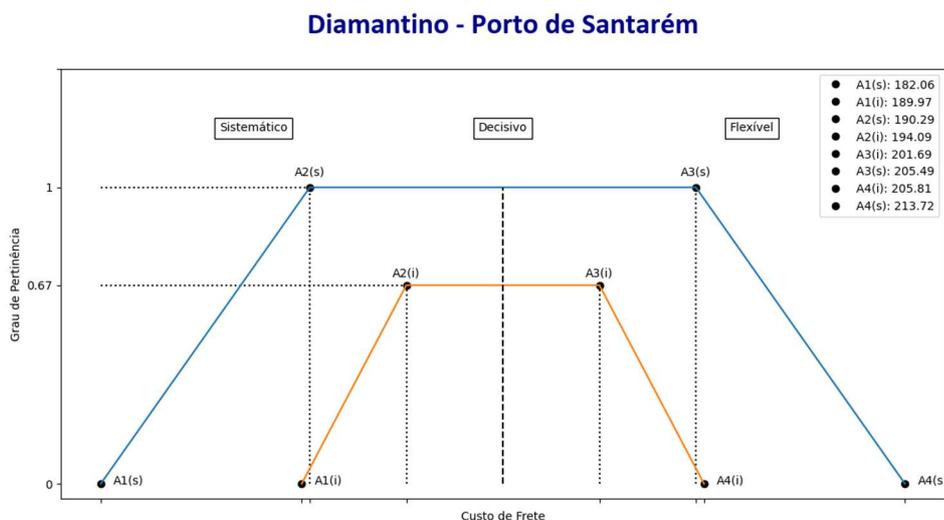
Fonte: Autoria própria (2021).

Tabela 39 – Valores de fretes fuzzificados (R\$) – (4º cenário)

Origem / Destino	Porto de Santarém								
	A1 ^S	A1 ^I	A2 ^S	A2 ^I	<i>Crisp</i>	A3 ^I	A3 ^S	A4 ^I	A4 ^S
Diamantino	182,06	189,97	190,29	194,09	197,89	201,69	205,49	205,81	213,72

Fonte: Autoria própria (2021).

Figura 40 – 4º cenário - Fretes fuzzificados (Diamantino-Santarém)

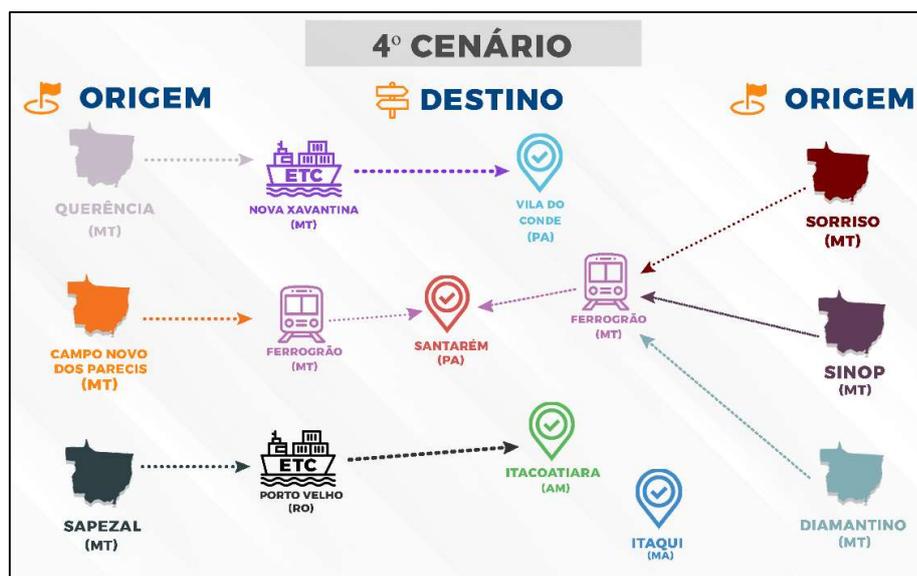


Fonte: Autoria própria (2021).

Os valores de fretes fuzzificados e as rotas otimizadas para o município de Querência foram os mesmo apresentados na Figura do gráfico 35 e para o município de Sapezal os valores de frete foram os mesmos do Primeiro e Segundo Cenários, como demonstrado na Figura do Gráfico 33.

Em relação a logística, o modelo otimizou o transporte de grãos dos municípios de Campo Novo do Parecis, Sorriso, Sinop e Diamantino pela rota projetada da Ferrogrão (EF-170), como ilustrado na Figura 41.

Figura 41 – Rotas logísticas obtidas no 4º Cenário Fuzzy

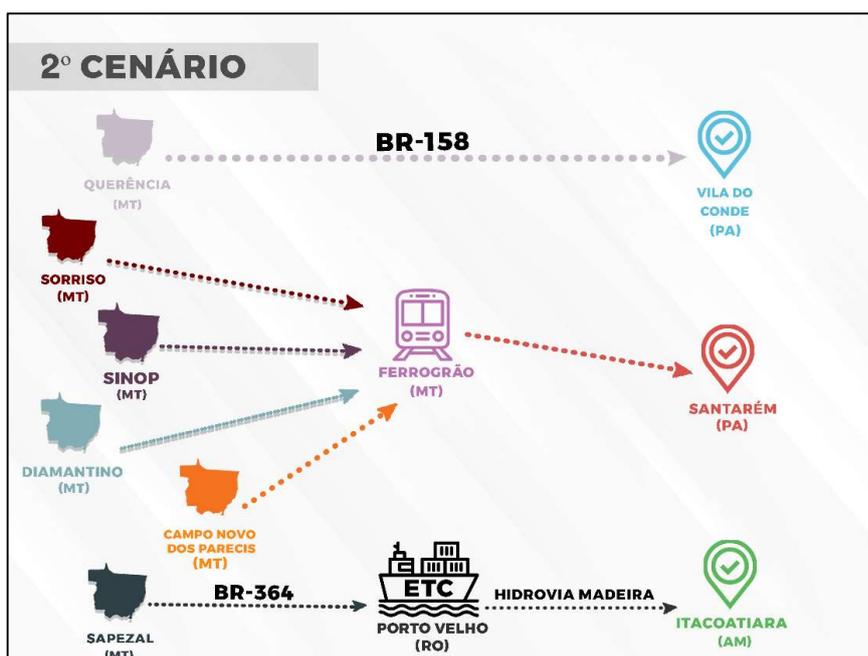


Fonte: Karina Pingarilho (2022)

Ao analisar os resultados do segundo cenário de Programação Linear e Programação Linear *Fuzzy*, nota-se que, variando os valores aproximados de frete *fuzzy*, o modelo possibilita mudanças de rotas, o que valida o modelo de Transporte *Fuzzy* Trapezoidal Intervalar.

Nas Figuras 42 e 34 é possível ver a comparação da logística deste dois métodos.

Figura 42 – Rotas logísticas do 2º Cenário de Programação Linear



Fonte: Karina Pingarilho (2022)

Figura 34 – Rotas logísticas obtidas no 1º e 2º Cenário *Fuzzy*



Fonte: Karina Pingarilho (2022)

4.3.4 Resultados obtidos de Programação Linear *Fuzzy*

O Modelo de Transporte *Fuzzy* Trapezoidal Intervalar aplicado na otimização do problema de transporte desta pesquisa, apresentou no Primeiro e Segundo Cenário os mesmos resultados, tanto em relação a custo de frete, quanto em relação a logística. No Primeiro Cenário definiu-se a rota pela BR-163 e no Segundo Cenário, tanto a rota da BR-163 quanto a rota projetada da Ferrogrão (EF-170).

E os resultados obtidos nestes dois Cenários, apresentaram valores de custos totais nos transportes satisfatórios, se comparado aos resultados do Primeiro e Segundo Cenários de Programação Linear.

No Terceiro Cenário, definiu-se os corredores da BR-163 e da Hidrovia Araguaia-Tocantins, no qual o modelo otimizou somente o município de Querência pela hidrovia Araguaia-Tocantins com destino ao porto de Vila do Conde, isso se faz pelo fato do município está mais próximo à estação de transbordo de Nova Xavantina e o custo de transporte ter o menor valor. Em relação aos outros municípios o modelo otimizou o transportes pela BR-163 para Miritituba com destino ao porto de Santarém e para a estação de transbordo de Porto Velho para o porto de Itacoatiara.

Apesar de muitos autores considerar o transporte hidroviário o mais barato comparado aos outros modais, o modelo de Transporte *Fuzzy* Trapezoidal Intervalar apresentou o Terceiro Cenário com o maior custo total na logística do escoamento de grãos para os portos do Arco Norte, mesmo ocorrendo somente a intermodalidade pelo modo rodo-hidroviário, o que resultou no Cenário de maior custo.

Por fim, no Quarto Cenário *fuzzy* considerou-se todas as três rotas em estudo e o modelo apresentou como o melhor Cenário, com o menor custo de frete total. No qual o modelo otimizou o transporte pelas três rotas propostas, ocorrendo em todas elas a intermodalidade. Sendo a logística de Querência para ETC em Nova Xavantina com destino ao porto de Vila do Conde, e de Sapezal para a estação de transbordo em Porto Velho com destino ao porto de Itacoatiara e de Campo Novo do Parecis, Sinop, Sorriso e Diamantino para o porto de Santarém, através da Ferrogrão(EF-170), o que evidencia o quanto esse modal trará custo-benefício para o escoamento da soja do Mato Grosso para os portos do Arco Norte.

Portanto, o Quarto Cenário *fuzzy* apresentou o melhor resultado satisfatório comparado aos outros Cenários. Nas Tabelas de 40 a 41, são apresentados os

resultados de custos totais *fuzzy*, propondo aos tomadores de decisão a escolha do custo *fuzzy* mais favorável para o transporte de sua produção.

Tabela 40 – Custo Total Fuzzificado – (1º e 2º Cenário)

Item	Origem-Destino	Custo Total de Frete Fuzzificado							
		Sistemático				Flexível			
		A1 ^S	A1 ^I	A2 ^S	A2 ^I	A3 ^I	A3 ^S	A4 ^I	A4 ^S
1	QUE-VDC	188,53	196,72	197,05	200,99	208,85	212,79	213,12	221,31
2	SOR-MIR-STR	169,48	176,85	177,15	180,68	187,76	191,29	191,59	198,96
3	SIN-MRT-STR	161,38	168,39	168,67	172,04	178,78	182,15	182,43	189,44
4	DIA-MRT-STR	196,48	205,02	205,36	209,46	217,66	221,76	222,10	230,64
5	CNP-PTV-ITC	199,49	208,17	208,51	212,68	221,00	225,17	225,51	234,19
6	SAP-PTV-ITC	188,82	197,03	197,36	201,30	209,18	213,12	213,45	221,66
Total (Bilhões de R\$)		R\$ 1.25	R\$ 1.34	R\$ 1.36	R\$ 1.41	R\$ 1.54	R\$ 1.59	R\$ 1.61	R\$ 1.72

Fonte: Autoria própria (2021).

Tabela 41 – Custo Total Fuzzificado – (3º Cenário)

Item	Origem-Destino	Custo Total de Frete Fuzzificado							
		Sistemático				Flexível			
		A1 ^S	A1 ^I	A2 ^S	A2 ^I	A3 ^I	A3 ^S	A4 ^I	A4 ^S
1	QUE-NXA-VDC	166,64	173,88	174,17	177,65	184,61	188,09	188,38	195,62
2	SOR-MIR-STR	169,48	176,85	177,15	180,68	187,76	191,29	191,59	198,96
3	SIN-MRT-STR	161,38	168,39	168,67	172,04	178,78	182,15	182,43	189,44
4	DIA-MRT-STR	196,48	205,02	205,36	209,46	217,66	221,76	222,10	230,64
5	CNP-PTV-ITC	199,49	208,17	208,51	212,68	221,00	225,17	225,51	234,19
6	SAP-PTV-ITC	188,82	197,03	197,36	201,30	209,18	213,12	213,45	221,66
Total (Bilhões de R\$)		R\$ 1.59	R\$ 1.72	R\$ 1.74	R\$ 1.80	R\$ 1.97	R\$ 2.04	R\$ 2.06	R\$ 2.20

Fonte: Autoria própria (2021).

Tabela 42 – Custo Total Fuzzificado – (4º Cenário)

Item	Origem-Destino	Custo Total de Frete Fuzzificado							
		Sistemático				Flexível			
		A1 ^S	A1 ^I	A2 ^S	A2 ^I	A3 ^I	A3 ^S	A4 ^I	A4 ^S
1	QUE-VDC	166,64	173,88	174,17	177,65	184,61	188,09	188,38	195,62
2	SOR-MIR-STR	138,64	144,67	144,91	147,81	153,59	156,49	156,73	162,76
3	SIN-MRT-STR	117,79	122,91	123,11	125,57	130,49	132,95	133,15	138,27
4	DIA-MRT-STR	182,06	189,97	190,29	194,09	201,69	205,49	205,81	213,72
5	CNP-PTV-ITC	192,91	201,30	201,64	205,66	213,72	217,74	218,08	226,47
6	SAP-PTV-ITC	188,82	197,03	197,36	201,30	209,18	213,12	213,45	221,66
Total (Bilhões de R\$)		R\$ 1.16	R\$ 1.25	R\$ 1.26	R\$ 1.31	R\$ 1.43	R\$ 1.48	R\$ 1.50	R\$ 1.60

Fonte: Autoria própria (2021).

5. CONCLUSÕES E SUGESTÕES PARA PESQUISA FUTURA

Diante do cenário exposto, referente aos problemas de infraestrutura logística que o Brasil enfrenta, prejudicando fortemente o escoamento dos produtos para os portos exportadores, e conseqüentemente o crescimento econômico do país, buscou-se realizar um estudo de caso relacionado ao transporte da soja mato-grossense para os portos do Arco Norte, com a finalidade de propor ao tomador de decisão uma rota alternativa mais eficiente economicamente, sob a análise de Cenários propostos.

Desta forma, o método aqui empregado tornou-se eficiente, apresentando um conjunto de possíveis soluções factíveis, para os vários tipos de tomadores de decisão, principalmente o sistemático, que busca informações de valores de frete mais precisos para que se possa planejar seu transporte a curto e longo prazo, visando o menor custo no transporte. Esta ferramenta de análise, permitiu analisar os resultados obtidos antes de se escolher uma solução em particular.

Portanto, concluiu-se que o método empregado no estudo de caso foi satisfatório, pois além de apresentar valores mínimos de fretes, o modelo apresentou rota alternativa, considerando um pequeno grau de incerteza ou margem de erro de 4% e 8% dos valores de fretes determinísticos, alterando assim, as rotas logísticas como no caso do segundo cenário de PL e do MTFTI, sendo que no segundo cenário de PL o modelo otimizou o escoamento da produção de soja pelo corredor da Ferrogrão diretamente para o porto de Santarém e no segundo cenário de MTFTI, o modelo otimizou o transporte da produção pela BR-163 para a estação de transbordo em Miritituba com destino ao porto de Santarém.

Se comparar os resultados obtidos pela Programação Linear e pelo Modelo de Transporte *Fuzzy* Trapezoidal Intervalar, chega-se à conclusão que a logística dos dois modelos são bem similares, isso se deve ao fato de aderir uma margem de erro muito pequena em relação aos valores de fretes.

Agora se consideramos uma margem de erro exorbitantes como de 26% e 30% ou mais, acredita-se que a logística dos cenários se alteram e os valores de fretes ficariam mais caros. Isto é apenas uma das propostas para futuros trabalhos.

Em todos os cenários do modelo de transporte, foi possível constatar o transporte intermodal, o que ratifica a pesquisa de Monteiro (2021), em que a intermodalidade reduz o custo do transporte e possibilita identificar rotas mais eficientes, como apresentado no Terceiro e Quarto Cenário, no qual a logística

otimizada para o município de Querência, foi do setor produtivo para a estação de transbordo em Nova Xavantina, escoando a produção pela hidrovia Araguaia-Tocantins com destino ao porto de Vila do Conde, neste Cenário apresentou-se os menores custos de fretes, se comparado ao custo de frete do Primeiro e Segundo Cenário, onde a produção foi transportada pelo modo rodoviário diretamente para o porto de Vila do Conde, pela BR-158.

Mediante a isso, pode-se concluir que, o melhor Cenário apresentado no Modelo de Transporte *Fuzzy* Trapezoidal Intervalar, foi o Quarto Cenário, pois economicamente apresentou os menores custos no transporte, utilizando os corredores da BR-364, Ferrogrão (EF-170) e Hidrovia Araguaia – Tocantins).

A única rota que o modelo não otimizou, foi a rota que transporta a soja para a estação de transbordo em Porto Nacional utilizando a ferrovia norte-sul com destino ao porto de Itaqui no Maranhão, isso se deve ao fato da maior distância da região mato-grossense e os valores de fretes serem os mais caros.

Outra proposta para trabalhos futuros é realizar uma análise dos dados utilizando função de agregação, que executa os cálculos aritméticos de determinados dados e retornam a um único valor de resultados.

REFERÊNCIA BIBLIOGRÁFICA

AGÊNCIA NACIONAL DE TRANSPORTE AQUAVIÁRIO (ANTAQ). **Plano Nacional de Integração Hidroviária**. Brasília, 2013. Disponível em: <<http://www.antaq.gov.br/portal/PNIH/BaciaTocantinsAraguaia.pdf>>. Acesso em 22 de setembro de 2021.

ALMEIDA, A. **Hidrovia Tocantins-Araguaia: Importância e Impactos Econômicos, Sociais e Ambientais segundo a percepção dos Agentes Econômicos Locais**. Tese de Doutorado. Escola Superior de Agricultura Luiz de Queiroz. São Paulo, 2004.

ALMENDÁRIZ, A. F. M. **Análise de Alternativas de Transporte Intermodal de cargas entre Manaus e o oceano pacífico no Peru**. Dissertação de Mestrado. Universidade Federal do Rio de Janeiro. Rio de Janeiro, 2007.

ANTUNES, A. C. L; NAZARÉ, T. B; BORGES, C. S; LIPPI, R. **A Logística de Transporte da soja no Brasil: comparação entre os modais e a atual situação do país**. IX Encontro de Engenharia de Produção Agroindustrial EEPA. Disponível em: <http://www.fecilcam.br/anais/ix_eepa/data/uploads/2-logistica/2-01.pdf>. Acesso em: 06 setembro 2021.

ASSIS, T. F; SCHMITZ, D. N. G; SILVA, M. A. V. **Avaliação de Desempenho de Alternativas de Transporte de Soja com Emprego da Lógica Fuzzy**. XXIX Congresso Nacional de Pesquisa em Transporte da ANPET, Ouro Preto. Disponível em: <http://146.164.5.73:20080/ssat/interface/content/anais_2015/TrabalhosFormatados/AC863.pdf>. Acesso em: 02 setembro 2021.

BALLOU, R. H. **Gerenciamento da cadeia logística - Logística Empresarial**. Porto Alegre: Ed. Bookman, 2005.

BASSANEZI, R. C; BARROS, L. C. **Tópicos de Lógica Fuzzy e Biomatemática**. São Paulo: Coleção IMECC. Volume 5, 2014.

BASSO, D; TRENNEPOHL, D; VIEIRA, E. L; MUENCHEN, J. V. **The Dynamics of occupation of natural area by the process of expansion of soy culture in Brazil**. Informe GEPEC, v. 25, n. 1, p. 10-26, jan/jun. 2021.

BOWERSOX, D. J.; CLOSS, D. J. (2001) **Logística Empresarial. O Processo de integração da cadeia de suprimento**. São Paulo: Atlas.

BUCKER, S. L. **Design da Cadeia de Suprimentos de Fertilizante. Aplicação do Modelo de Otimização**. Dissertação de Mestrado. Universidade Federal da Grande Dourados, Dourados, 2019.

CARGILL: **Estação de Transbordo de Cargas em Porto Velho**. Disponível em: <https://www.cargill.com.br/pt_BR/estação-de-transbordo-de-cargas-em-porto-velho>. Acesso em: 05 setembro 2021.

CASTILHO, D; ARRAIS, T. A. **The North-South Railway and the regional economy of Brazil's centre-north.** Informe Sociedade & Natureza, vol. 29, n. 2, p. 209-228, 2017.

CNA. **Confederação da Agricultura e Pecuária do Brasil.** Disponível em: <<https://www.cnabrasil.org.br/cna/panorama-do-agro>>. Acesso em: 19 julho 2021.

CNA. **Confederação da Agricultura e Pecuária do Brasil.** Disponível em: <<https://www.cnabrasil.org.br/mapa-da-logistica-da-soja-e-do-milho-no-brasil-2020>>. Acesso em: 28 julho 2021.

CONAB. Companhia Nacional de Abastecimento. **Competência de estudos CONAB.** Observatório Agrícola. v.6. Brasília, Distrito Federal. 2017.

CONAB. Companhia Nacional de Abastecimento. **10º Levantamento do Relatório de Acompanhamento da Safra Brasileira.** Disponível em: <<https://www.conab.gov.br/info-agro/safras/graos>>. Acesso em: 19 julho 2021.

CONTESSA, M. A. C. **A expansão do Complexo de Soja no Brasil.** Dissertação de Mestrado. Pontifícia Universidade Católica do Rio Grande do Sul. Porto Alegre, 2020.

COY, M.; BARROZO, J. C.; SOUZA, E. S. **Estratégias de expansão do agronegócio em Mato Grosso: os eixos da BR-163 e da BR-158 em perspectiva comparativa.** Brasília, Editora IABS, 2020, p. 13-23.

CRECCA, V. M. T. **Estudo sobre a implantação da Ferrovia Ferrogrão (EF-170) e os possíveis impactos sobre o setor agrícola e a logística do estado do Mato Grosso.** Connection Line revista eletrônica do Univag, Rio de Janeiro (RJ), v.8, n. 25 p. 146, 2019. ISS 1980-7341.

DANTIZG, G. B. **Linear Programming and Extensions.** Princeton University Press, Princeton, NJ, 1963.

DASKIN, M. S. **Logistics: an overview of the state of the art and perspectives on future research.** Transportation Research A, v.19, n.5/6. 1985. De Mato Grosso. Modal Hidroviário. Várzea Grande – MT - Projeto Integrador III do Curso de Tecnologia em Logística da Univag (Centro Univeristário). 2016.

DILL, R. P; BORBA, J. A. **Um Estudo Comparativo entre Metodologia Fuzzy e Programação Linear para Análise da Rentabilidade de Empresas.** II Encontro de Administração da Informaçõl. Disponível em:<<http://www.anpad.org.br/admin/pdf/EnADI231.pdf>>. Acesso em: 10 janeiro 2022.

DNIT – Departamento Nacional de Infraestrutura de Transporte. **Arco Norte receberá mais de R\$ 2,2 bilhões em investimentos do DNIT.** Disponível em: <<https://www.gov.br/dnit/pt-br/assuntos/noticias/arco-norte-recebera-mais-de-r-2-2-bi-em-investimentos-do-dnit>>. Acesso em 23 jul. 2021.

DNIT – Departamento Nacional de Infraestrutura de Transporte. **Hidrovia do Madeira, 2018a**. Disponível em: <<http://www.dnit.gov.br/modais-2/aquaviario/hidrovia-do-madeira>>. Acesso em: 7 ago. 2021.

DNIT – Departamento Nacional de Infraestrutura de Transporte. **Hidrovia do Tapajós-Teles Pires, 2018b**. Disponível em: <<https://www.dnit.gov.br/modais-2/aquaviario/hidrovia-do-tapajos-teles-pires>>. Acesso em 7 ago. 2021.

DNIT – Departamento Nacional de Infraestrutura de Transporte. **Hidrovia do Tocantins-Araguaia, 2021**. Disponível em: <<https://www.gov.br/dnit/pt-br/assuntos/aquaviario/hidrovia-do-tocantins-araguaia>>. Acesso em 12 ago. 2021.

DRIVER, M. J.; BROUSSEAU, K. R.; HUNSAKER, P. L.; HOONEY, G. **The dynamic decision-maker: five decision styles for executive and business success**. New York: Harper and Row, 1990.

EBRAHIMNEJAD, A. **Fuzzy linear programming approach for solving transportation problems with interval-valued trapezoidal fuzzy numbers**. Indian Academy of Sciences, v. 41, n. 3, pp.299-316/march 2016.

EMBRAPA. Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária. **A soja no Brasil: História e Estatística**. Londrina, Paraná, 1987.

EMBRAPA. Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária. **Macrologística da Agropecuária Brasileira: Delimitação das Bacias Logísticas**. Campinas, São Paulo, 2016.

EMBRAPA. Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária. **Porto de Itacoatiara**. Disponível em: <https://www.embrapa.br/macrologistica/exportacao/porto_manaus>. Acesso em: 24 julho 2021.

EMBRAPA. Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária. **Sistema de Inteligência Territorial Estratégica da Macrologística Agropecuária brasileira (SITE-MLog)**. Campinas, 2020. Disponível em: < www.embrapa.br/macrologistica >. Acesso em: 30 ago. 2021.

EMBRAPA. Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária. **Soja em números (safra 2020/2021)**. Disponível em: <<https://www.embrapa.br/soja/cultivos/soja1/dados-economicos>>. Acesso em: 19 julho 2021.

ESALQ. Escola Superior de Agricultura Luiz de Queiroz. **Agronegócio Brasileiro: Importância e Complexidade do Setor**. Disponível em: <<https://www.cepea.esalq.usp.br/br/opiniao-cepea/agronegocio-brasileiro-importancia-e-complexidade-do-setor.aspx>>. Acesso em: 06 setembro 2021.

FERREIRA, F. M. **A importância da soja e seus derivados para a economia brasileira a partir da década de 1970**. Monografia. Universidade Federal Rural do Rio de Janeiro. Rio de Janeiro, 2011.

FREITAS, M.C.M. Centro Científico Conhecer. **A CULTURA DA Soja no Brasil: O crescimento da Produção Brasileira e o Surgimento de uma nova Fronteira Agrícola**. Vol. 7, n.12, p.2, 2011. Goiânia 2017.

GANDOLPHO, A; TANSCHKEIT, R; VELLASCO, M; PIZZALATO, N. **A Programação Linear Fuzzy em Problemas de Misturas**. XXXVIII Simpósio Brasileiro de Pesquisa Operacional, Goiânia, Goiás. Disponível em: <<http://www.din.uem.br/~ademir/sbpo/sbpo2006/pdf/arq0109.pdf>>. Acesso em: 02 setembro 2021.

GIL, A. C. **Como Elaborar Projetos de Pesquisa**. - 4. Ed. - São Paulo: Atlas S.A, 2002.

GIL, A. C. **Métodos e Técnicas de Pesquisa Social**. - 6. Ed. - São Paulo: Atlas S.A, 2008.

GOLDBARG, M. C; LUNA, H. P. **Otimização Combinatória e Programação Linear – Modelos e Algoritmos**. 2.ed, Rio de Janeiro, Elsevier, 2005.

HIBERNON FILHO, H. M. CUTRIM, S. S.; ROBLES, L. T. & PEREIRA, N. N. **Potencial e limitações para o escoamento da soja pelos portos da Região Norte**. João Pessoa, PB, Brasil. Anuais do Enegep – Encontro Nacional de Engenharia de Produção, 2016.

HUMBERG, M. E. **PEDÁGIO Mitos e Fatos**. Editora CLA, 4. ed. São Paulo, 2015. Disponível em: <<https://abcr.org.br/institucional/biblioteca/mitos-e-fatos>>. Acesso em 22 de setembro de 2021.

IBGE. **Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística**. Disponível em: <<https://agenciadenoticias.ibge.gov.br/agencia-sala-de-imprensa/2013-agencia-de-noticias/releases/30062-em-janeiro-ibge-preve-safra-recorde-de-262-2-milhoes-de-toneladas-para-2021>>. Acesso em: 17 julho 2021.

IBGE. **Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística**. Disponível em: <<https://cidades.ibge.gov.br/brasil/mt/panorama>>. Acesso em: 02 agosto 2021.

IBGE. Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística. **Micrologística da Agropecuária Brasileira: estudo de caso das exportações de soja e milho**. Documento 118, Ano 2017, n.4, p. 11-12, 2017.

LAKATOS, E. M.; MARCONI, M. A. **Metodologia do Trabalho Científico**. 4.ed, São Paulo, Editora Atlas S.A, 1992.

LANDAU, E. C.; SILVA, G. A.; MOURA, L.; HIRSCH, A.; GUIMARAES, D. P. (Ed.). **Dinâmica da produção agropecuária e da paisagem natural no Brasil nas últimas décadas: cenário histórico, divisão política, características demográficas, socioeconômicas e ambientais**. Brasília, DF: Embrapa, 2020. v. 1, cap. 1, p. 21-28.

MACEDO, F. C. M. Redes. Revista do Desenvolvimento Regional: **Inserção comercial externa e dinâmica territorial no Brasil**. Santa Cruz do Sul, v. 15, n. 3, p. 89 – 114, set/dez. 2010.

MACHADO, Luiz Kennedy Cruz. et al. **Estrutura e dinâmica do sistema de transporte ferroviário no Brasil e análise da estrutura de governança adotada**. 16 p.. Artigo apresentado em: XXXVI Encontro Nacional de Engenharia de Produção. João Pessoa, PB, Brasil. 2016.

MAPA. Ministério da Agricultura, Pecuária e Abastecimento. **Infraestrutura e Logística**. Disponível em: <<https://www.gov.br/agricultura/pt-br/assuntos/politica-agricola/infraestruturs-e-logistica/infraestruturs-e-logistica>>. Acesso em: 08 setembro 2021.

MONTEIRO, M. G.; BRISOLA, M. V.; LEITÃO, F. O.; SILVA, W. H.: **Limitações e Problemas no Transporte da Soja no Brasil**. Informe GEPEC, v. 25, n. 1, p. 261-283, Toledo, jan./jun. 2021. ISSN: 1679-415X.

NETO, M. P. L; LOPES, H. S; SANTOS, M. L. P; SARDINHA, E. M; COUTINHO, R. M. **A evolução do Agronegócio na Amazônia: Estudo Exploratório da Produção e exportação da soja no Estado do Pará**. XXXIX Encontro Nacional de Engenharia de Produção. Santos, São Paulo, 15 a 18 de outubro de 2019.

OLIVEIRA, A. L. R; MASCARENHAS, C; LOPES, B. F. R; MORINI, C. **Aplicação de modelagem matemática para otimização da logística de exportação do milho do estado do Mato Grosso**. Revista em Agronegócio e Meio Ambiente, Maringá (PR), v.8, n. 3 p. 507, set./dez. 2015. ISS 1981-9951-e-ISSN 2176-9168.

OLIVEIRA, V. H. P; TOBIAS, M. V. G; ROCHA, M. P. C; FARIAS, V. J. C; NETO, M. C.A; FARIAS, V. J. C; SOUZA, M. M; ARAÚJO, L. F. **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, v.9, n. 07 p. 124, 01/jul. 2021. ISSN 2411-2933.

PEREIRA, D; SILVA, M. A. **Introdução a Logística**. Revista Gestão em Foco. Edição nº 9, p. 291, Ano 2017.

PEREIRA, V. L. G; ROCHA, V. P. S; BONACIM, C. A. G. **Corredor de Exportação Norte e a Viabilidade pela Logística de Transporte**. Nucleus, v.5, n. 2 p. 163, 19/set. 2019. ISSUE 10.3738/1982.2278.134.

PETROV, M. B; TURYGIN, O. M. **Increase of transport-logistic servicing efficiency of Sverdlovsk region's agroindustrial complex (on the example of grain cargoes transportation)**. Economy of Region, n 4, p. 68-78, 2011.

PPI. Programa de Parcerias e Investimentos. **Concessão das rodovias BR-163/230/MT/PA – Trecho entre Sinop/MT e Miritituba/PA**. Disponível em: <<https://www.ppi.gov.br/concessao-das-rodovias-br-163-230-mt-pa-trecho-entre-sinop-mt-e-miritituba-pa>>. Acesso em: 08 setembro 2021.

PPI. Programa de Parcerias e Investimentos. **Ferrovia EF-170 – MT/PA – Ferrogrão**. Disponível em: <<https://www.ppi.gov.br/ef-170-mt-pa-ferrograo>>. Acesso em: 08 setembro 2021.

RAVINDRAN, A., Phillips, D.T. and Solberg, J.J. (1987) **Operations Research Principles & Practice**. 2nd Edition, John Wiley, New York.

RESENDE, E. S; BONJOUR, S. C. M; FIGUEIREDO, A. M. R. **Análise de Rotas Alternativas de Transporte: O caso da soja do Mato Grosso**. Revista de Estudos Sociais, Ano 9, n. 1, 2007.

SILVA NETO, S. **Impactos de Investimentos em Infraestrutura Logística na Cadeia de Grãos do Brasil: Uma Aplicação de Programação Linear**. Dissertação de Mestrado. Escola Politécnica da Universidade de São Paulo. São Paulo, 2018.

SILVA, A. J; SOARES, L. M; LUCAS, M. J. **Análise do escoamento de grãos do Brasil pelo Arco Norte**. XI FATECLOG Os Desafios da Logística Real no Universo Virtual. Bragança Paulista, 2020.

SNA. **Sociedade Nacional de Agricultura**. Disponível em: (<<https://www.sna.agr.br/ranking-dos-10-maiores-exportadores-de-soja-do-mato-grosso/>>). Acesso em: 28 julho 2021.

SOUZA, A. B; SILVA, E. T; CAMPÃO, C. A. L. **Logística e Produção Agrícola: Uma análise comparativa da cadeia produtiva da soja em dois municípios localizados na região amazônica por período de 2014/2019**. XXI Encontro Nacional sobre Gestão Empresarial e Meio Ambiente (ENGEMA), Marabá/Pará. Disponível em:<<http://engemausp.submissao.com.br/21/anais/arquivos/31.pdf>>. Acesso em: 14 setembro 2021.

SOUZA, M. M. **Otimização de Rotas de Escoamento da Soja do Mato Grosso através do Arco Norte**. Dissertação de Mestrado. Universidade Federal do Pará. Pará, 2021.

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, v.8, n. 08 p. 2, 8/jan. 2020. ISS 2411-2933. Disponível em: (<<https://doi.org/10.31686/ijer.vol8.iss8.2502>>). Acesso em: 19 julho 2021.

TORRES, O; FAGUNDES, M. B. B; FIGUEIRE, A. M. R; TREDEZINI, C. A. O. **Impacto da Implantação do Custo do Pedágio na BR-163 em Relação ao Transporte de Soja do Estado do Mato Grosso**. Ed. RESR, Piracicaba-SP, v.55, n. 03 p. 533-550, Jul./Set. 2017, DOI: (<<http://dx.doi.org/10.1590/1234-56781806-94790550307>>).

USDA. United States Department of Agriculture. **Brazil Soybean Transportation Indicator Reports**. 2019. Disponível em: <<https://www.ams.usda.gov/services/transportation-analysis/brazil-archive>>. Acesso em: 19 julho 2021

VLI MULTIMODAL S.A: **Terminal Integrador Porto Nacional (TO)**. Disponível em: (<https://www.vli-logistica.com.br/conheca-a-vli/terminais/ti-porto-nacional/>). Acesso em: 05 setembro 2021.