

UNIVERSIDADE FEDERAL DO MARANHÃO
PROGRAMA DE PÓS GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA ELÉTRICA

JOSÉ ARTUR LIMA CABRAL MARQUES

OTIMIZAÇÃO DE TRANSPORTE MULTIMODAL DE GRÃOS: caso do arco norte
brasileiro

São Luís
2025

JOSÉ ARTUR LIMA CABRAL MARQUES

OTIMIZAÇÃO DE TRANSPORTE MULTIMODAL DE GRÃOS: caso do arco norte
brasileiro

Tese de Doutorado apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica da Universidade Federal do Maranhão para obtenção do título de Doutor em Engenharia Elétrica.

Orientador: Prof. Dr. Allan Kardec Duailibe Barros Filho

São Luís
2025

Ficha gerada por meio do SIGAA/Biblioteca com dados fornecidos pelo(a) autor(a).
Núcleo Integrado de Bibliotecas/UFMA

MARQUES, José Artur Lima Cabral

Otimização de transporte multimodal de grãos: caso do arco norte brasileiro / José Artur Lima Cabral Marques. - 2024.

125 f.

Orientador: Allan Kardec Duailibe Barros

Tese (Doutorado) - Programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica/PPGEE, Universidade Federal do Maranhão, São Luís/MA, 2024.

1. Transporte multimodal de cargas. 2. Logística. 3. Otimização matemática. 4. Fluxo em redes. 5. Métodos de solução em rede. 6. Agronegócio. 7. Região do arco norte. I. Barros, Allan Kardec Duailibe. II. Título.

JOSÉ ARTUR LIMA CABRAL MARQUES

**OTIMIZAÇÃO DE TRANSPORTE MULTIMODAL DE GRÃOS: caso do arco norte
brasileiro**

Tese de Doutorado apresentada ao Programa de Pós-graduação em Engenharia Elétrica da Universidade Federal do Maranhão para obtenção do título de Doutor em Engenharia Elétrica.

Aprovada em: / / 2025

BANCA EXAMINADORA

Prof. Dr. Sérgio Sampaio Cutrim (UFMA)

Doutor em Engenharia Naval e Oceânica
Universidade de São Paulo - USP

Prof. Dr. Ewaldo Eder Carvalho Santana (UFMA)

Doutor em Engenharia Elétrica
Universidade Federal de Campina Grande - UFCG

Prof. Dr. Antônio Fernando Lavareda Jacob Junior (UFMA)

Doutor em Engenharia Elétrica
Universidade Federal do Maranhão - UFMA

Profª. Dra. Marta de Oliveira Barreiros (UEPA)

Doutora em Engenharia Elétrica
Universidade Federal do Maranhão - UFMA

Prof. Dr. Jonathan Araújo Queiroz (UEMA)

Doutor em Engenharia Elétrica
Universidade Federal do Maranhão - UFMA

Dedico este trabalho aos meus pais e a meus filhos, que me inspiram a cada dia a evoluir como ser humano e profissional, e a meus colegas do PPGEE/UFMA que sempre me apoiaram nas horas difíceis e no trabalho árduo da pesquisa acadêmica.

AGRADECIMENTOS

Agradeço, ao meu orientador Prof. Dr. Allan Kardec Duailibe Barros pela paciência e a ajuda em perseverar nas dificuldades. Aos colegas e professores do PPGE/UFMA que me ajudaram com sugestões e orientações a este trabalho. A minha família, e em especial a meu pai Prof. Dr. José Maria Cabral Marques (*in memoriam*), um incentivador de minha carreira acadêmica e uma inspiração de vida, e a todos colegas profissionais que convivi ao longo de minha carreira e que compartilharam conhecimentos comigo.

Vir a ser é melhor do que ser.

Nilton Bonder – Rabino

RESUMO

O Problema do Caminho Mais Curto (*Short Path Problem* – SPP) é um clássico em problemas de rede cujas soluções teóricas vêm sendo estudadas como consequência do crescimento da complexidade das cadeias logísticas globais. O aumento vertiginoso da produção de grãos na região denominada Arco Norte brasileiro nas últimas décadas, gerou a necessidade de uma infraestrutura logística multimodal complexa para escoamento da produção agrícola até os portos marítimos exportadores. A carência de uma infraestrutura logística que atenda adequadamente a região resulta em custos elevados do transporte retirando parte da competitividade da local lavoura de alta produtividade. Para contribuir nas tomadas de decisão quanto ao percurso de menor custo no transporte de grãos até o porto de destino, é proposto um modelo de otimização de transporte multimodal utilizando como método de solução o algoritmo de Dijkstra, com uma representação baseada em um sistema real de uma topologia de grafos, considerando as restrições do sistema real analisado. Uma comparação qualitativa de métodos clássicos para solução em redes (grafos) é apresentada baseada na pesquisa bibliográfica, justificando o método de solução adotado. Os resultados de simulações com dados de um sistema real são apresentados como validação do modelo proposto.

Palavras-chaves: transporte multimodal de cargas; logística; otimização combinatória; métodos de solução em rede; algoritmo de Dijkstra; agronegócio; região do arco norte.

ABSTRACT

The Short Path Problem (SPP) is a classic problem in network problems whose theoretical solutions have been studied because of the increasing complexity of global logistics chains. The rapid increase in grain production in the region known as the Brazilian Northern Arc in recent decades has generated the need for a complex multimodal logistics infrastructure to transport agricultural production to exporting seaports. The lack of a logistics infrastructure that adequately serves the region results in high transportation costs, reducing part of the competitiveness of local high-productivity crops. To contribute to decision-making regarding the lowest-cost route for transporting grains to the destination port, a multimodal transportation optimization model is proposed using the Dijkstra algorithm as a solution method, with a representation based on a real system of a graph topology, considering the constraints of the real system analyzed. A qualitative comparison of classical methods for solving networks (graphs) is presented based on the bibliographic research, justifying the solution method adopted. The results of simulations with data from a real system are presented as validation of the proposed model.

Keywords: multimodal freight transport; logistics; combinatorial optimization; network solution methods; Dijkstra's algorithm; agribusiness; northern arc region.

LISTA DE ILUSTRAÇÕES

Figura 1 – Portos do Brasil	13
Figura 2 – Metodologia de desenvolvimento do trabalho	17
Figura 3 – Macrocargas 2017 (Mi ton).....	24
Figura 4 – Mapa multimodal do Brasil.....	25
Figura 5 – Comparação entres os modais rodoviário e ferroviário	27
Figura 6 – Malha Ferroviária Brasileira 2023	28
Figura 7 – Plano Nacional de Investimentos em Ferrovias no Brasil.....	29
Figura 8 – Regiões hidrográficas – Brasil	31
Figura 9 – Infraestrutura logística dos grãos	32
Figura 10 – Principais portos de exportação do agronegócio – Brasil	33
Figura 11 – Exportação portuária de grãos – soja e milho (2023).....	35
Figura 12 – Destino da produção agrícola do Mato Grosso	36
Figura 13 – Rotas e modais do transporte de grãos	37
Figura 14 – Produção x rotas transporte de grãos – Brasil	41
Figura 15 – Bacias Logísticas 2015/2025 – Brasil	42
Figura 16 – Corredores logísticos estratégicos – exportação	43
Figura 17 – Etapas do processo de modelagem matemático	48
Figura 18 – Representação de grafos e árvores	49
Figura 19 – Topologia do problema	51
Figura 20 – Fluxo em rede.....	51
Figura 21 – Representação matricial	52
Figura 22 – Problema de transbordo capacitado.....	53
Figura 23 – Grafo de um PCFM	55
Figura 24 – Algoritmo BFS/ Diagrama conceitual.....	61
Figura 25 – Diagrama esquemático do algoritmo Dijkstra.....	63
Figura 26 – Fluxograma do algoritmo genético	65
Figura 27 – Gráfico de vértices e nós	66
Figura 28 – Topologia do caso teste	68

LISTA DE SIGLAS

ANTT	Agência Nacional de Transportes Terrestre
BFS	<i>Bread-First Search</i>
BRICS	Brasil, Rússia, Índia, China e África do Sul
EFC	Estrada de Ferro Carajás
EMBRAER	Empresa Brasileira de Aeronáutica S.A
EMBRAPA	Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária
EUA	Estados Unidos da América
FAF	<i>Freight Analysis Framework</i>
FICO	Ferrovia de Integração Centro-Oeste
FIOL	Ferrovia de Integração Oeste-Leste
FNS	Ferrovia Norte-Sul
FTL	Ferrovia Transnordestina
GAs	<i>Genetic Algorithms</i>
GNL	Gás Natural Liquefeito
GSA	Graneis Sólidos Agrícolas
IDH	Índice de Desenvolvimento Humano
ITA	Instituto Tecnológico da Aeronáutica
MAPA	Ministério da Agricultura, Pecuária e Abastecimento
MCDA	<i>Multicriteria Decision Analysis</i>
MINFRA	Ministério da Infraestrutura
MTPA	Milhões de Toneladas por Ano
OCDE	Cooperação e Desenvolvimento Econômico
PCFM	Problema de Custo de Fluxo Mínimo
PCV	Problema do Caixeiro Viajante
PIB	Produto Interno Bruto
PNL	Plano Nacional de Logística
PNLT	Plano Nacional de Logística de Transporte
SOMA	<i>Self Organizing Migrating Algorithm</i>
TGL	Terminal de Granel Líquido
TMU	Terminal de Uso Múltiplo
TNL	Transnordestina Logística
VPB	Valor Bruto de Produção

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO	12
2	OBJETIVOS.....	16
2.1	Objetivo geral	16
2.2	Objetivos específicos	16
3	METODOLOGIA	17
4	REVISÃO BIBLIOGRÁFICA.....	19
5	A INFRAESTRUTURA LOGÍSTICA DE TRANSPORTE	24
5.1	O modal rodoviário	26
5.2	O modal ferroviário	27
5.3	O modal hidroviário.....	30
5.4	A infraestrutura portuária	33
5.5	Análise comparativa dos modais de transporte	36
5.6	Custos de fretes, tarifas portuárias e transbordos de cargas	37
5.6.1	Dados do Observatório Nacional (Panorama dos Transportes Set/2023).....	38
5.6.2	Dados da operadora ferroviária Rumo Logística – Malha Central (GO/TO)	38
5.6.3	Dados da CONAB (frete rodoviário)	39
5.6.4	Dados do Departamento de Agricultura dos Estados Unidos – (United States Department of Agriculture).....	39
5.6.5	Dados da INFRA SA	40
6	OS CORREDORES LOGÍSTICOS ESTRATÉGICOS	41
7	O PROBLEMA DA OTIMIZAÇÃO DO TRANSPORTE	46
7.1	A modelagem do problema.....	49
7.2	A solução do problema	59
7.2.1	A solução por programação dinâmica.....	60
7.2.2	A solução pelo algoritmo de Dijkstra	62
7.2.3	A solução por algoritmo genético	63
7.3	O caso teste.....	66
7.3.1	Exemplo de aplicação do algoritmo Dijkstra	66
7.3.2	Exemplo de aplicação do algoritmo Dijkstra com dados reais	67
8	CONCLUSÃO	74
	REFERÊNCIAS	75

APÊNDICE A – HISTÓRICO POLÍTICO-ECONÔMICO DA REGIÃO DO	
ARCO NORTE.....	83
APÊNDICE B – O AGRONEGÓCIO NA REGIÃO DO ARCO NORTE.....	114

1 INTRODUÇÃO

A Pesquisa Operacional é a área de conhecimento que estuda, desenvolve e aplica métodos analíticos avançados para auxiliar na tomada de melhores decisões. Ao lado da ciência da computação, busca com fundamentos teóricos as técnicas práticas que visam, entre outros temas, melhorar a eficiência do trabalho a ser realizado. O Problema do Caminho Mais Curto (SPP) em cadeias logísticas vêm sendo estudado em consequência do aumento da complexidade das redes de transporte em todo o mundo devido a globalização do comércio de mercadorias. A gestão do transporte de cargas se tornou foco da pesquisa acadêmica, principalmente na otimização da multimodalidade, devido a sua importância econômica crescente para a economia de um país. O papel da ciência aplicada é buscar, com apoio da ciência pura, as soluções para os problemas que a sociedade enfrenta na busca de ganhos sociais e econômicos.

O Brasil enfrenta desafios gigantescos em sua infraestrutura logística que ficaram mais evidentes com o crescimento vertiginoso de suas exportações de commodities agrícolas nas últimas décadas.

A região brasileira acima do paralelo 16S, denominada de Arco Norte, composta dos estados das regiões Nordeste, Norte, e os estados do Centro-Oeste, com exceção do estado do Mato Grosso do Sul, tem se destacado como a nova fronteira agrícola do país.

O crescimento da produção agrícola, seja pelo aumento de produtividade com uso intensivo de tecnologia, seja pelo aumento da área cultivada, retira em grande parte a população da produção de alimentos com baixa produtividade (economia de subsistência) gerando um problema e uma oportunidade. Historicamente, tem sido o desenvolvimento da agricultura que oportuniza a disponibilização de mão-de-obra para outras atividades produtivas causando um efeito combinado de crescimento em áreas de indústria e serviços (Diamond, 2020).

Smith (*apud* Sachs, 2005) enfatizava que fatores como a geografia física pode ser decisivo no desenvolvimento econômico, sem que se caia na armadilha do determinismo geográfico, e considerava fundamental a proximidade do comércio marítimo de baixo custo, e nos dizia:

Por meio do transporte aquático um mercado mais amplo se abre para toda espécie de indústria de que o transporte terrestre sozinho pode dar conta; assim, é junto a costa marítima e ao longo das margens dos rios navegáveis que a indústria de todo tipo naturalmente começa a se subdividir e se aperfeiçoar, com frequência, não demora muito para que esses aperfeiçoamentos se estendam para o interior do país (Smith *apud* Sachs, 2005, p. 87).

Com uma extensão aproximada de 3.000 km, o litoral do Nordeste é o maior do Brasil, e tem em operação pelo menos três dos maiores complexos portuários do país: Itaqui

(MA), Suape (PE) e Pecém (CE). Adentrando a região Norte, temos ainda os portos de média e alta capacidade de movimentação de cargas, como os de Belém/Barcarena, Santarém (PA), Itaituba (PA), Porto Velho (RO), Itacoatiara/Manaus (AM) e Macapá (AP) (Figura 1).

Figura 1 – Portos do Brasil



Fonte: Azeredo (2015).

Estes portos, devido sua proximidade aos principais mercados consumidores: América do Norte, Europa e Ásia (via Canal do Panamá) tiveram sua importância relativa aumentada consideravelmente na última década, seja pela exportação de commodities agrícolas, seja pela exportação de commodities minerais como ferro, alumínio e alumina; ou ainda pela importação de derivados de petróleo de outros países.

O escoamento da produção de grãos da região do Arco Norte está sendo progressivamente direcionada para os portos da região Norte/Nordeste, abandonando o modelo tradicional de exportação via portos de região Sul/Sudeste, principalmente para os portos de Santos (SP) e Paranaguá (PR). O transporte de grãos das áreas produtoras até os portos do Arco Norte está sendo feito por modais variados seja por meio hidroviário, seja por ferrovias, ou por rodovias. Este processo tem ocorrido de forma quase instintiva pelos agentes exportadores que analisam os custos imediatos de transporte até os portos e os custos de frete marítimo até seus destinos.

Apesar do alto índice tecnológico empregado nas culturas dentro das propriedades rurais, os fatores conhecidos como “pós-porteira” trazem ineficiência à cadeia e reduzem sua competitividade e margem de lucro (Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária, 2017).

Com seu rápido desenvolvimento as cadeias globais de suprimento se tornaram mais complexas, e a competição estimula a busca da redução de custo de transporte de produtos. Sendo assim, o problema do transporte multimodal de cargas é o de minimizar custos com a seleção das diversas rotas de transportes da cadeia logística disponíveis até o embarque de grãos. Ressalta-se que clássico Problema de Caminho mais Curto (SPP) não está só relacionado com a menor distância, mas também com o tempo e o custo do transporte.

O estado do Mato Grosso (o maior produtor de grãos do país) tem o mais baixo custo de produção “da porteira pra dentro”, US\$ 384,93/t (US Department of Agriculture, 2023), mas sua competitividade é impactada pelos custos logísticos no escoamento da produção até os portos, já que o estado não tem costa litorânea, e utiliza diversos modais até o porto exportador.

Diante desta problemática, é proposto um modelo de otimização dos custos do transporte multimodal de grãos, qualificando a escolha dos corredores logísticos para escoamento de produção da “porteira” até o porto de destino (comprador) buscando assim minimizar os custos de comercialização e, portanto, a rentabilidade do produtor, considerando hipótese de que seja possível modelar adequadamente a rede de corredores logísticos de escoamento de grãos do Arco Norte de acordo com as características físicas reais, para uma simulação em algoritmo de otimização.

Foi realizada pesquisa bibliográfica de trabalhos que realizaram a comparação de diversos métodos de solução problemas com características similares ao estudado, sendo que o algoritmo de Dijkstra se destacou como o mais adequado para sistemas de pequena dimensionalidade (poucos pontos na rede topológica) e com alta eficiência computacional.

A validação do modelo proposto foi realizada em software usual de simulação com um caso teste baseado em dados reais de fretes e distâncias da região do Arco Norte.

O que se busca, principalmente, é abrir horizontes para desenvolvimento de ferramentas específicas, ou utilização de ferramentas de simulações computacionais para identificação de corredores estratégicos ótimos para cada região produtora de grãos.

Importante ressaltar que já há softwares comercialmente disponíveis para realização de simulações de logística, e este trabalho se propõe a explorar novos caminhos metodológicos do ponto de vista de otimização de transporte, com a proposição de um modelo matemático de relativa facilidade de implementação em plataformas comerciais.

O trabalho está dividido em três partes. Na parte introdutória temos introdução, objetivos, metodologia e revisão bibliográfica. Nos Capítulos 5 e 6 são abordados a infraestrutura de transportes brasileira e os corredores logísticos estratégicos, na última parte temos no Capítulo 7 a modelagem do sistema logístico para otimização, com a discussão dos possíveis métodos de cálculo e a simulação de um caso teste para validação do modelo adotado. Um resumo histórico da economia dos estados da região do Arco Norte está no Apêndice A, o Apêndice B descreve o desenvolvimento do agronegócio na área em estudo nas últimas décadas.

2 OBJETIVOS

Os objetivos desta pesquisa são destacados como geral e específicos para melhor destacar os pontos que se pretende alcançar e os avanços que podem ser introduzidos em um contexto específico do trabalho.

2.1 Objetivo geral

Desenvolver um modelo matemático que possibilite a otimização de custos do transporte multimodal de cargas, em especial o de grãos, representando as características dos corredores logísticos da região do Arco Norte brasileiro, e com o uso de método de solução bem-sucedido em casos similares.

A hipótese a ser comprovada: é possível modelar matematicamente a rede de corredores logísticos de escoamento de grãos do Arco Norte de acordo com as características físicas reais, com o uso de método de solução (algoritmo) já tradicionalmente usado em casos de natureza similar.

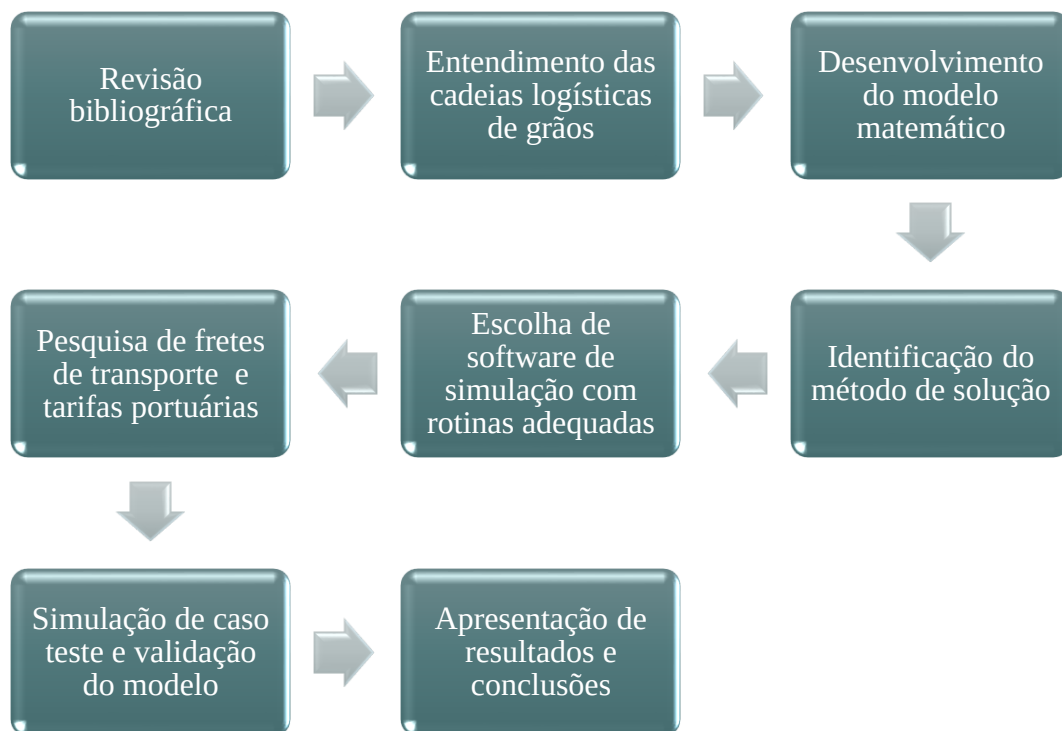
2.2 Objetivos específicos

- a) Compreender as características da logística de escoamento de grãos do Arco Norte;
- b) Identificar dos corredores logísticos e as multimodalidades inerentes;
- c) Modelar das características quantificáveis dos corredores logísticos;
- d) Determinar o método de solução mais adequado;
- e) Simular um caso teste com dados reais para validação do modelo de otimização e do método utilizado;
- f) Apresentar os resultados das simulações.

3 METODOLOGIA

A metodologia do trabalho foi construída considerando as melhores práticas de pesquisas acadêmicas, cujas etapas estão descritas na Figura 2:

Figura 2 – Metodologia de desenvolvimento do trabalho



Fonte: Elaborado pelo autor

- Pesquisa bibliográfica sobre o histórico socioeconômico da região estudada com ênfase no entendimento das cadeias produtivas no passado da região desde o século XIX até os dias atuais;
- Pesquisa bibliográfica sobre a produção acadêmica em logística de transporte de cargas multimodal, com ênfase em modelos de otimização;
- Pesquisa para entendimento das cadeias (corredores) logísticas voltadas ao agronegócio, desde as zonas de produção nos estados da região do Arco Norte até os portos de exportação;
- Modelagem matemática representativa da cadeia logística da região, a fim de produzir a função objetivo de otimização;

- e) Identificação de rotinas em softwares de simulação que usem o método de solução escolhido;
- f) Pesquisa sobre valores de fretes aquaviários, ferroviários, rodoviários e tarifas portuárias na região; e tempo de espera (*waiting time*) para descarga nos terminais portuários.
- g) Simulação do caso teste com dados reais para validação do modelo.
- h) Apresentação dos resultados das simulações com conclusões.

4 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

Em anos recentes, a literatura sobre otimização de transporte de cargas tem tido muitas contribuições de pesquisadores da República Popular da China, provavelmente porque a logística se tornou um tema central de discussão e importância naquele país, desde que este se tornou o maior exportador do mundo, com a maior parcela do comércio exterior mundial. Artigos de autores chineses, principalmente na otimização de transporte de contêineres, têm sido publicados nos periódicos internacionais, e em publicações das universidades chinesas. A contribuição dos pesquisadores europeus continua relevante do ponto de vista de otimização, devido a complexa malha de transporte multimodal existente naquele continente.

Os problemas de fluxo em rede são extensivamente abordados por Ahuja *et al.* (1993) com os métodos clássicos de solução com programação linear. Sobre as possíveis abordagens do problema de otimização, Goldberg (1989) nos lembra que os métodos de otimização podem ser classificados em três tipos principais: baseado em cálculo, enumerativos e aleatórios ou randômicos; e que os métodos baseados em cálculo e os enumerativos tem fragilidades quanto ao gradiente da função objetivo, para alguns casos, ou quanto ao ponto ótimo local, ao contrário de um ótimo global. Nos afirma, também, que os métodos evolucionários, como o método de algoritmo genético, usam previsões probabilísticas dando robustez aos resultados, mesmo incorrendo em inexatidão.

Branco *et al.* (2012b), em estudo para otimização logística de transporte multimodal de cargas agrícolas no Nordeste utilizam um modelo de Fluxo de Custo Mínimo Multiproduto – *Multicommodity Minimum Cost Flow Problem* proposto por Ahuja *et al.* (1993), que pode ser solucionado por relaxação lagrangiana e métodos de decomposição. Os autores utilizaram método de solução de programação linear usando o solver CPLEX, no *software* GAMS. O método Simplex de programação linear foi inicialmente implementado em linguagem C, com esta denominação CPLEX, e hoje está disponível em outras linguagens computacionais.

Branco *et al.* (2012a) realizaram estudo similar para o Corredor Centro-Norte que considera a região de influência do Porto do Itaqui (MA). Um modelo de Fluxo de Custo Mínimo Multiproduto – *Multicommodity Minimum Cost Flow Problem* proposto por Ahuja *et al.* (1993), também foi adotado o método Simplex por meio do solver CPLEX.

Uma modelagem de otimização de transporte de contêineres aborda o viés dinâmico, considerando as restrições de tempo máximo a ser percorrido pela carga em determinado caminho logístico (*time window*), utilizando para isto a programação dinâmica, e ressaltando que caso o tempo de transporte não seja considerado o modelo pode ter uma

abordagem de programação inteira-mista, isto é, com variáveis que podem assumir valores inteiros e reais (Congli; Yixiang, 2016).

Quanto aos métodos evolucionários, Dorigo e Garambella (1997) apresentam o método de Colônia de Formigas (*Ant Colonies*) baseado em modelo bioinspirado criado para o Problema do Caixeiro Viajante (PCV) e sinalizam a robustez dos resultados alcançados.

O método de otimização *Self Organizing Migrating Algorithm* (SOMA) também criado para o PCV, apresentado por Cickova *et al.* (2008), é baseado em algoritmos evolucionários e é focado em solucionar problemas de programação não-linear. É lembrado também pelos autores que a computação evolucionária usa métodos estocásticos e que os métodos meta-heurísticos (combinação de métodos determinísticos e heurísticos), entre eles Colônia de Formigas e Algoritmos Genéticos, consistem em procedimentos de busca cujos princípios permitem escapar do problema do ótimo local.

Sob a ótica da viabilidade e racionalidade, Zhang *et al.* (2014) analisaram os fatores de influência da otimização de corredores de transporte multimodal de grandes cargas. Foram consideradas na função objetivo: o tempo mínimo de transporte, a quilometragem e o custo. Nas condições de restrições foram considerados: o limite do modal, a capacidade de carga da ponte e a capacidade do equipamento de elevação. O modelo resultante foi resolvido usando algoritmo genético. Também foram feitas simulações utilizando o algoritmo de Simulated Annealing (recozimento simulado). Os melhores resultados foram obtidos com o algoritmo genético.

O problema da otimização em transporte sincronomodal sob incertezas foi devidamente abordado (Xu *et al.*, 2023). Os autores propõem um modelo misto de otimização de rotas com restrição de janela de tempo com o objetivo de minimizar o custo total de transporte, e sob certas premissas considerando três tipos de incertezas. Os autores apontam que na China há 690 linhas multimodais de transporte (dados de 2020). Afirmam que o problema de transporte multimodal é de otimização combinatória com foco em escolha de rotas e modais, e que as incertezas e dessincronismo causam custos de espera (*waiting time*). O modelo é solucionado por algoritmo genético, que do ponto de vista dos autores evitam a escolha de soluções ótimas locais, no *software* MATLAB.

Roulet, Caixeta-Filho e Yoshizaki (2016) propõem um modelo para tomadas de decisão com análise multicritério em coordenação vertical do transporte de commodities agrícolas no Brasil. Afirmam que o objetivo da coordenação vertical é a redução de custos, alertam que o setor de transporte rodoviário no Brasil é desorganizado e difícil de obter dados. Outros fatores importantes apontados são a sazonalidade dos preços de fretes, e a dificuldade

de medir custos. Os autores afirmam que a análise de decisão multicritério (*Multicriteria Decision Analysis* – MCDA) tem sido utilizada também em modelos de otimização em geral.

Zhou e Du (2018) construíram um modelo de otimização para transporte multimodal com janela de tempo (*time window*). O modelo leva em consideração o custo de transporte, o custo de transbordo, o custo de armazenagem, e o custo dos riscos (excluídos os riscos por fatores naturais) assumidos no transporte, custos totais de transporte e a linha de tempo são fundamentais na formulação. O modelo é solucionado por algoritmo genético no software MATLAB, e é apropriado para cargas em contêineres.

O problema de roteamento de veículos em uma janela de tempo, ou o clássico problema do caixeiro viajante com janela de tempo, tem uma proposta de solução por métodos heurísticos por Bräysy e Gendreau (2005). Os autores discutem como métodos heurísticos de solução diferentes podem ser analisados utilizando o conceito de optimalidade de Pareto. Além disso, métodos de busca local (*local search*) são abordados. Mesmo não sendo o problema básico utilizado aqui a abordagem por janela de tempo (*time window*) agrega contribuições. Diversos métodos de busca local são abordados e comparados quantitativamente.

Moraes Neto e Faccioni Filho (2017) utilizaram algoritmo genético para otimização de rotas em um problema de caixeiro viajante (Travel Salesman Problem – TSP) com resultados considerados adequados.

A dissertação de mestrado de Malaquias (2006) também em um problema de otimização de rotas de distribuição com TSP para produtos farmacêuticos utilizando a linguagem de programação OCaml Leroy em um ambiente Linux.

Silva e Miranda (2019) propuseram uma metodologia para priorização de trajetos no transporte de grãos pelo método *Technique for Order Preference by Similarity to Ideal Solution* (TOPSIS) cujo principal objetivo é criar indicadores de regionais de transporte de carga, com uma coleta robusta de dados reais de tarifas de frete de transporte na região do norte do Mato Grosso.

Nos últimos anos, com o desenvolvimento de métodos bioinspirados, como algoritmos genético, colônia de formiga e outros, ficou bem estabelecido a robustez destes métodos em situações de problemas em rede, como em transportes multimodais. O uso de algoritmos genéticos tem se consolidado como uma robustez adequada e com rotinas bem estabelecidas em *softwares* como MATLAB e Python.

A programação dinâmica parece ser, a princípio, adequada para tratar o problema onde há uma sequência de estágios da origem ao destino, típico em transportes multimodais de cargas, mas para conjuntos maiores de caminhos (arcos) da porteira ao porto, pode se tornar

computacionalmente inviável, e as combinações não viáveis de segmentos de caminho não podem ser detectadas a priori (Bellman, 2003). Os diversos algoritmos desenvolvidos nesta linha teórica para a busca do caminho mais curto (ou de menor custo): Bellman-Ford, Floyd-Warshall, e Dijkstra, não tratam adequadamente as anomalias matemáticas como um caminho que termine e comece no mesmo nó (*dicycle*), ou um caminho com comprimento ou custo negativo – *negative dicycle* (Rardin, 1998).

Quanto ao uso do algoritmo genético para otimização (otimização), após a publicação da dissertação de De Jong em 1975 surgiram diversos desenvolvimentos para soluções de caminhos mais curtos, entre elas Wetzel (1983) – TSP via GA; e Dolan e Dyer (1987) entre outros (Goldberg, 1989).

Problemas de otimização clássicos como o do Caixeiro Viajante, tem solução por algoritmos genéticos como apresenta Reina *et al.* (2020).

A comparação entre um método já consagrado de programação dinâmica pelo algoritmo de Dijkstra e uma solução por um método heurístico bioinspirado como o algoritmo genético é feita por Sharma *et al.* (2012). Os resultados numéricos para redes de roteamento dinâmico e estático são iguais, mas o algoritmo genético tem melhor desempenho em tempo de computação, o que pode ser bastante vantajoso para redes com muitos nós. Além disso, no caso de uma rede de roteamento dinâmico (todos os nós interligados) pode haver problemas de dimensionalidade da matriz no espaço de estado.

Manikandan (2015) fez a comparação do desempenho de algoritmos heurísticos para um problema de caminho mais curto similar ao do Caixeiro Viajante. Comparou os métodos de Busca Tabu (*Tabu Search*), Recozimento Simulado (*Simulated Annealing*), Algoritmo Genético e Colônia de Formigas (*Ant Colony*). O melhor desempenho se deu para a Busca Tabu e o pior desempenho se deu para Algoritmo Genético deixando claro que dependendo do tipo de problema o desempenho dos algoritmos variam.

A abordagem da natureza randômica dos valores dos arcos entre nós nas redes sob análise, que sofrem variações devido a considerações de tráfego e clima em situações reais, realizada pela lógica fuzzy (Lin *et al.*, 2021). Os autores descrevem um modelo fuzzy que introduz dois caminhos alternativos a partir de um nó de origem gerados com a técnica de integração de média classificada de números fuzzy triangulados, considerando tempo de viagem e custo de viagem entre dois nós. O algoritmo proposto para um método de algoritmo genético modificado tem seu desempenho comparado com uma solução pela programação linear fuzzy, com vantagens em desempenho computacional para o algoritmo genético proposto chamado de *Fuzzy Shortest Path Problem* (FSSP).

Uma comparação entre os desempenhos de algoritmo genético e algoritmo Simulated Annealing foi realizado por Yang *et al.* (2020) e com instigações comparativas entres os métodos heurísticos e os métodos de Dijkstra e Floyd para solucionar Problema de caminho mais curto (SPP).

Portanto, estão em andamento diversos trabalhos acadêmicos de otimização de transporte de cargas, baseados na multimodalidade, com busca de melhores modelos e algoritmos de solução. Nesta linha de pesquisa, este trabalho busca desenvolver um modelo de otimização de transporte multimodal de cargas usando como referência os últimos desenvolvimentos que vem ocorrendo nesta linha de pesquisa acadêmica, e com ênfase nas características do sistema logístico da região do Arco Norte brasileiro voltado a exportação.

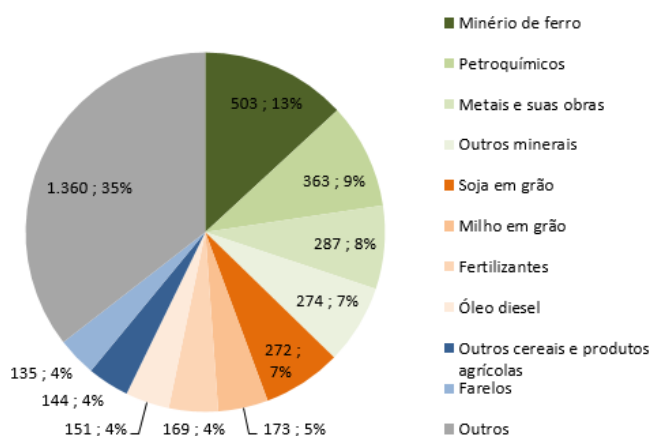
5 A INFRAESTRUTURA LOGÍSTICA DE TRANSPORTE

A infraestrutura de transporte de grãos no Brasil está, atualmente, se consolidando por meio de rotas em que, ora se usa as rodovias, ora as ferrovias, ou a navegação em rios (hidrovias) tanto na região do Arco Norte com na região Centro-Sul.

O Plano Nacional de Logística e Transporte (PNLT) 2035, que utiliza o conceito metodológico desenvolvido pelo Departamento de Transporte do EUA (*US Department Transportation*) conhecido com *Freight Analysis Framework* (FAF) (Federal Highway Administration, 2023), aponta para a integração dos diversos modais existentes como um dos princípios a serem seguidos no planejamento nacional de logística de cargas (Empresa de Planejamento de Logística, 2021). Neste aspecto, as obras já iniciadas da Ferrovia de Integração Oeste-Leste (FIOL) e Ferrovia de Integração Centro-Oeste (FICO) irão fortalecer a logística de escoamento de cargas em grãos do Arco Norte, fortalecendo a integração de modais, e criando corredores logísticos estratégicos, assim como a conclusão da Ferrovia Norte-Sul (FNS) no trecho que liga Ouro Verde (GO) a Estrela D'Oeste (SP), ocorrida em meados de 2023, que através da malha ferroviária paulista conecta o porto de Santos (SP) ao Porto de Itaqui (MA).

O PNL 2035 identifica os corredores naturais de transporte para a geração da chamada matriz origem-destino de cargas (OD) que mostram a quantidade de cargas movimentadas entre duas zonas de tráfego, que se constitui aqui na base da metodologia proposta neste trabalho (Empresa de Planejamento de Logística, 2021). A EPL classifica as cargas por categorias, os chamados macroprodutos, e nesta classificação estão o de nosso interesse, os Grãos Sólidos Agrícolas (GSA). Estes produtos representam 12% do total de cargas transportada no Brasil, com destaque para a soja e o milho (Figura 3).

Figura 3 – Macrocargas 2017 (Mi ton)

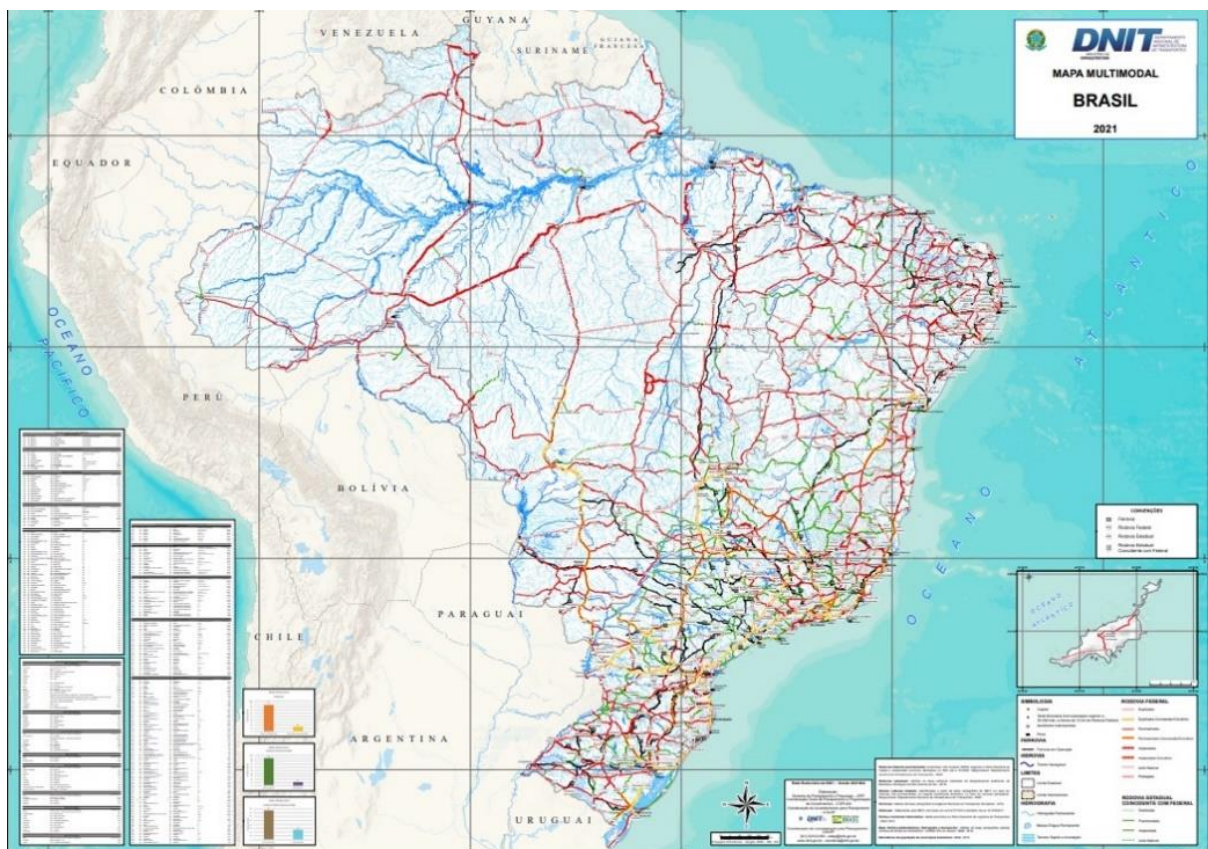


Fonte: Empresa de Planejamento de Logística (2021).

O PNLT 2035 busca identificar o crescimento potencial de transporte de cargas em cada corredor estratégico, realizando uma projeção de crescimento em função dos dados coletados na época da elaboração do estudo.

Verifica-se no Mapa de Transporte Modal do Brasil, Figura 4, que na Baía de São Marcos a infraestrutura rodoviária e ferroviária que ligam os portos desta baía aos estados próximos nas regiões Nordeste, Norte e Centro-Oeste, faz desta localização uma área privilegiada para esta operação, sem que as outras possibilidades de embarques nos portos da região amazônica sejam desprezadas.

Figura 4 – Mapa multimodal do Brasil



Fonte: Brasil (2022a).

Esta área portuária tem ligações ferroviárias e rodoviárias com a região Norte (Pará), Nordeste (Piauí, Ceará, Bahia e Pernambuco) e Centro-Oeste (Tocantins), além de ser extremidade do maior eixo ferroviário do país (Ferrovia Norte-Sul), e ter proximidade a portos próximos e estratégicos de Barcarena (PA) e de Pecém (CE).

O porto público deste complexo, o Porto do Itaqui, começa a se destacar no embarque de grãos, já se posicionando entre os cinco maiores do país neste tipo de carga, mas

o crescimento dos outros portos da região amazônica projeta um crescimento equilibrado de todos os portos da região do Arco Norte, onde parece apontar que a estrutura de logística (corredores estratégicos) e as capacidades de movimentação portuárias serão os elementos de restrição a seus crescimentos.

O PNLT 2035 aponta o porto de Ilhéus (Bahia) como a instalação logística que irá se beneficiar da conclusão das ferrovias FICO e FIOI, ignorando as restrições operativas e ambientais deste porto, e ignorando o potencial de crescimento dos portos da Baía de São Marcos (MA) e do complexo portuário Barcarena/Belém (PA).

5.1 O modal rodoviário

Há uma dependência histórica do Brasil quanto ao uso do modal rodoviário como principal meio de transporte de cargas, mesmo havendo uma infraestrutura de estradas de rodagem inadequada. Este modal domina 87% do transporte de produtos de maior valor agregado.

É recomendável a utilização deste modal rodoviário para distâncias de até 300 km, sendo que em uma configuração de multimodalidade haveria transbordo para uma ferrovia ou uma hidrovia, mas no Brasil este modal tem servido para transporte de cargas em distâncias superiores a 2.000 km.

As rodovias têm investimento inicial menor quando comparado ao custo de construção de uma ferrovia ou uma hidrovia, mas isto não é totalmente uma vantagem ao longo da vida útil do empreendimento uma vez que este modal depende fortemente, para sua viabilidade, do preço do combustível, variando conforme as cotações internacionais do petróleo, e os valores de pedágio, havendo uma ingerência por parte do governo na manutenção de estradas em ótimas condições de uso, utilizando das concessões como forma de melhorar a qualidade das mesmas.

O Relatório Executivo do Plano Nacional de Logística e Transporte (PNLT) 2011 apresenta dados do estado de conservação das rodovias e tipos de pavimentos e indicando os trechos já duplicados (Brasil, 2014). Estes dados deixam claro as deficiências do principal modal de transporte de cargas no Brasil, gerando impactos direto na produtividade do país quanto aos custos logísticos tanto para o mercado interno quanto para o comércio exterior.

As rodovias são o modal mais importante de transporte de grãos no Brasil, e em especial do Arco Norte. As rodovias federais BR – 316, BR- 135, BR -222, BR – 153, BR –158, BR – 163 e BR -164, estão entre os corredores rodoviários mais importantes do Arco Norte.

5.2 O modal ferroviário

As ferrovias estão fortemente relacionadas ao transporte de cargas com menor valor agregado, alto peso específico e utilização para grandes distâncias, sempre com grandes volumes de cargas para absorver os seus altos custos fixos. As dimensões continentais do Brasil deveriam gerar um cenário propício ao desenvolvimento de uma malha ferroviária que suportasse o desenvolvimento do país, mas isto não tem ocorrido até agora.

O Brasil, atualmente, possui 29.000 km de extensão de malha ferroviária cedidas ao setor privado por meio de concessão, e que é regulamentada e fiscalizada pela Agência Nacional de Transportes Terrestre (ANTT) (Brasil, 2017).

Quando se compara com as demais economias emergentes que compõem os países do BRICS (Brasil, Rússia, Índia, China e África do Sul) – e os Estados Unidos, a diferença é muito grande pois a extensão da malha ferroviária nacional não alcança nem a metade da malha do país daquele bloco econômico que tem a menor extensão de malha ferroviária.

De acordo com a ANTT, a frota nacional de locomotivas é composta em sua maioria por locomotivas diesel-elétricas e os tipos de cargas transportadas estão concentradas em grãos sólidos (minério de ferro, soja, milho e açúcar) (Brasil, 2022b).

Segundo Castanheira *et al.* (2012), vários são os aspectos e as características de cargas a serem transportadas que interferem na escolha do modal. Entre estas estão o peso e a distância percorrida, que apresentam influência direta na definição da sistemática de transporte conforme é apresentado na Figura 5.

Figura 5 – Comparação entres os modais rodoviário e ferroviário

	Abaixo de 0,5t	0,5 – 4,5t	4,5 – 13,5t	13,5 – 27t	27 – 40t	Acima de 40t
Abaixo de 180 km						
160-320 km						
320-480 km						
480-800 km						
800-1600 km						
1600-2400 km	Rodoviário		COMPETIÇÃO		Ferroviário	
Acima de 2400 km						

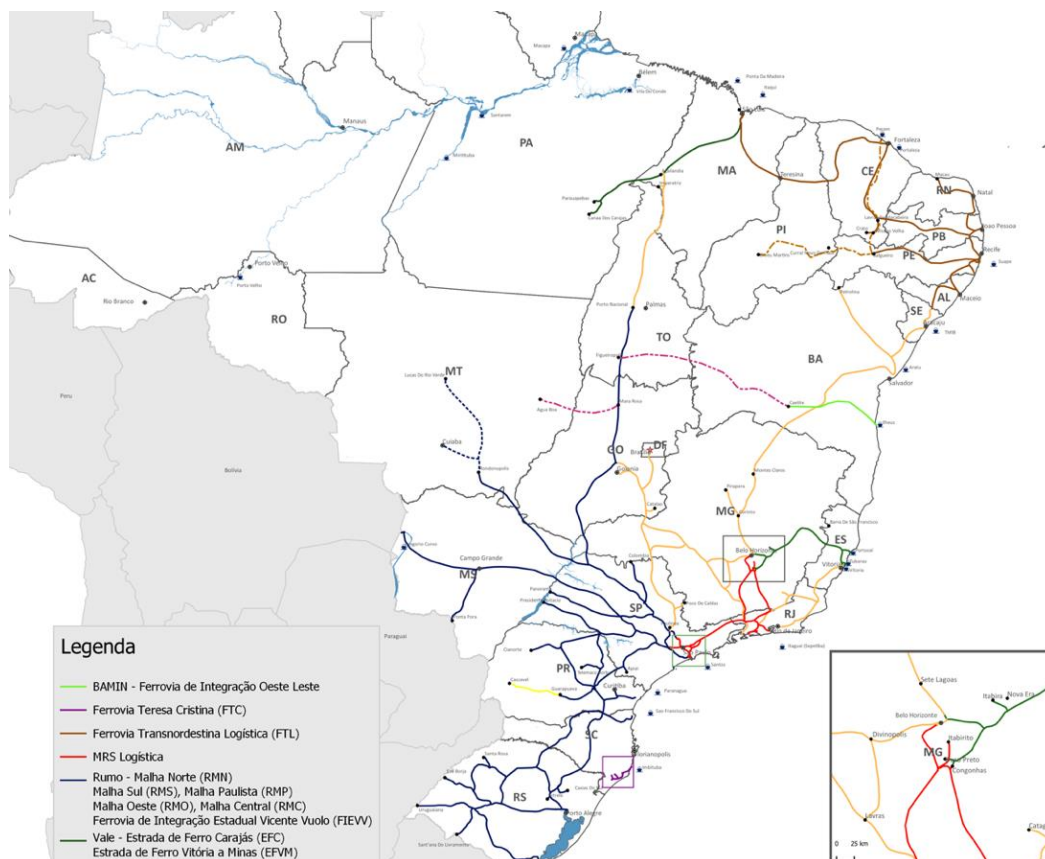
Fonte: Castanheira *et al.* (2012)

O modal rodoviário apresenta vantagens na movimentação de cargas quando apresenta peso total menor que 27 toneladas, já o modal ferroviário demonstra vantagens no transporte acima de 40 toneladas, considerando que, conforme a Figura 5, entre estes valores há uma área de competição entre os dois modais. Quanto maior a distância, maior a vantagem da utilização do transporte ferroviário, ainda que apresente menor flexibilidade na comparação com o rodoviário.

Em relação ao transporte ferroviário na região em estudo, a Estrada de Ferro Carajás (EFC) liga a mina de ferro da Vale na Serra de Carajás, no sul do estado do Pará, ao porto de Ponta da Madeira localizado na Ilha de São Luís, é uma ferrovia de bitola larga, atualmente duplicada para atender uma demanda de até 230 milhões de toneladas/ ano (MTPA) de minério de ferro.

A Ferrovia Norte Sul – FNS liga Estrela D'Oeste (SP) a Açailândia (MA), que é o ponto de conexão com a ferrovia EFC, e propicia a ligação ferroviária entre os portos de Santos (SP) a Itaqui (MA) através da malha ferroviária paulista (Figura 6).

Figura 6 – Malha Ferroviária Brasileira 2023



Fonte: Associação Nacional dos Transportadores Ferroviários (2024).

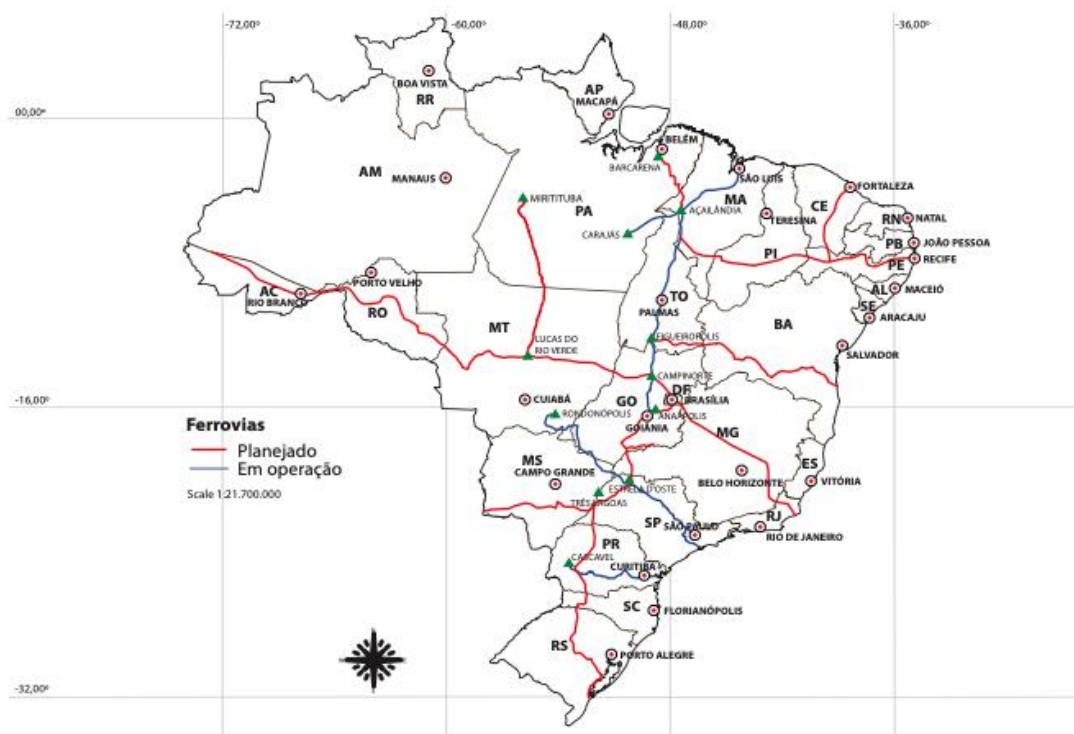
A cidade de São Luís (MA) também se conecta por via férrea à cidade de Teresina (PI) e as outras capitais da região Nordeste pela Ferrovia Transnordestina Logística (FTL), com a característica de bitola métrica.

A cidade de Belém (PA), assim como o porto de Barcarena (PA) que a serve, não é atualmente assistida por linhas ferroviárias, mas há a indicação governamental da construção de um ramal ferroviário de Marabá (PA) até o porto de Barcarena (PA).

O modal ferroviário destaca-se por menores custos ambientais, menor emissão de poluentes, nível elevado de segurança e economia de escala (diminuição natural do custo fixo quando do aumento do volume de cargas movimentadas). As cargas costumam ser de baixo valor agregado, como commodities agrícolas e minerais.

Os investimentos projetados na malha ferroviária (Plano Nacional de Investimentos PPI) são da ordem de R\$ 86,4 bilhões. Na região do Arco Norte ou correlacionada há investimentos em: Ferrovia Norte-Sul serão investidos R\$ 7,8 bilhões nos trechos de Palmas (TO) a Anápolis (GO) e de Barcarena (PA) a Açailândia (MA); e R\$ 4,9 bilhões entre Anápolis (GO), Estrela D'Oeste (SP) e Três Lagoas (MS). A concessão da ferrovia entre Lucas do Rio Verde (MT) e Miritituba (PA) será de R\$ 9,9 bilhões (Figura 7) (Brasil, 2024a).

Figura 7 – Plano Nacional de Investimentos em Ferrovias no Brasil



Fonte: Vieira Filho (2015).

Somada a estes investimentos, apresenta-se a projeção de R\$ 40,0 bilhões para o trecho brasileiro da ferrovia Bioceânica (Rota Biocenica Mato Grosso do Sul, 2024), que interligará o Centro-Oeste e o Norte ao país vizinho Peru. Temos ainda em construção a Ferrovia de Integração Centro-Oeste (FICO) que irá conectar o norte do Mato Grosso a Ferrovia Norte-Sul (Brasil, 2024b), e a Ferrovia de Integração Oeste Leste (FIOL), que irá conectar o porto de Ilhéus (BA) à Ferrovia Norte-Sul (Brasil, 2024c).

5.3 O modal hidroviário

O transporte hidroviário tem custo mais baixo de operação quando comparado aos modais rodoviário e ferroviário, devido sua capacidade para transporte de carga a grandes distâncias. O transporte hidroviário pode ser do tipo fluvial utilizando rios navegáveis, e o marítimo que utiliza a costa oceânica.

O sistema de hidrovias do Brasil fica aquém do potencial do país e, mesmo com sua grande extensão hidrográfica, não possui todos os rios navegáveis em função de sua geografia. A região amazônica possui as condições adequadas para navegação e tem sido utilizada para escoamento de parte da produção agrícola do Mato Grosso, além de derivados de petróleo. Este tipo de modal requer utilização de mão de obra especializada para a navegação, e tem custos elevados iniciais para tornar os rios navegáveis. A Figura 8 mostra as regiões hidrográficas brasileiras se destacando a grande região amazônica.

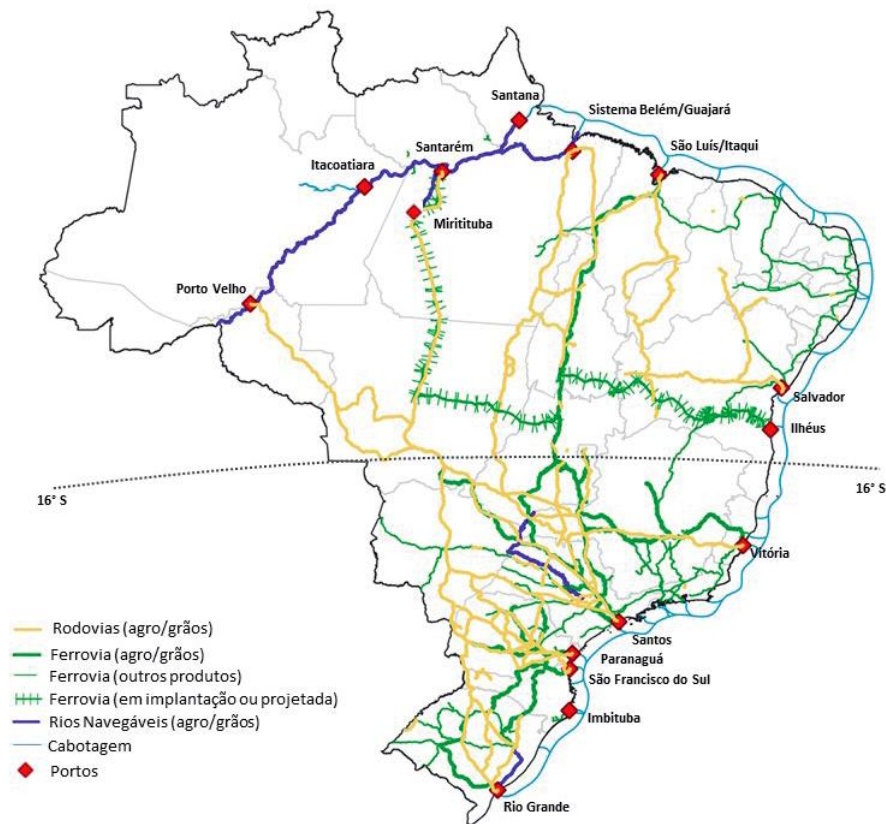
Figura 8 – Regiões hidrográficas – Brasil



Fonte: Fundação para o Ecodesenvolvimento da Amazônia (2021).

O rico sistema hidrográfico brasileiro é aproveitado abaixo do seu potencial para o transporte de cargas. Na região amazônica é parte fundamental para o transporte de passageiros e pequenas cargas, dada a carência de rodovias e ferrovias na região. Recentemente, o transporte de grãos da região Centro-Oeste iniciou as atividades nos corredores hidrográficos da região, destacando-se o Corredor Madeira, para os estados de Rondônia e Mato Grosso e o Corredor Tapajós/Tele-Pires para o estado do Mato Grosso; estes corredores estão convergindo para os portos de Itacoatiara (AM) e Santarém (PA). Os Corredores Tocantins e de Parnaíba carecem de investimentos em eclusas e dragagem para se viabilizarem (Figura 9).

Figura 9 – Infraestrutura logística dos grãos



Fonte: Caldeira, Lopes e Gasques (2023).

A hidrovia do Madeira possui extensão de 1.015 Km de Porto Velho (RO) a Itacoatiara (AM), no rio Amazonas. O rio Madeira é considerado um rio novo, sob o ponto de vista geológico, ou seja, seu leito ainda está em fase de definição. Desse modo, a cada ciclo hidrológico, o canal de navegação se altera. Além disso, outros fatores constituem problemas à navegação: os desbarrancamentos das margens, as atividades ilegais de garimpo, extração de seixo e lançamento de lixo nos barrancos. Os investimentos realizados em Itacoatiara pela empresa Hermasa S/A, sob controle do Grupo Maggi do Mato Grosso, tornaram este um corredor logístico viável.

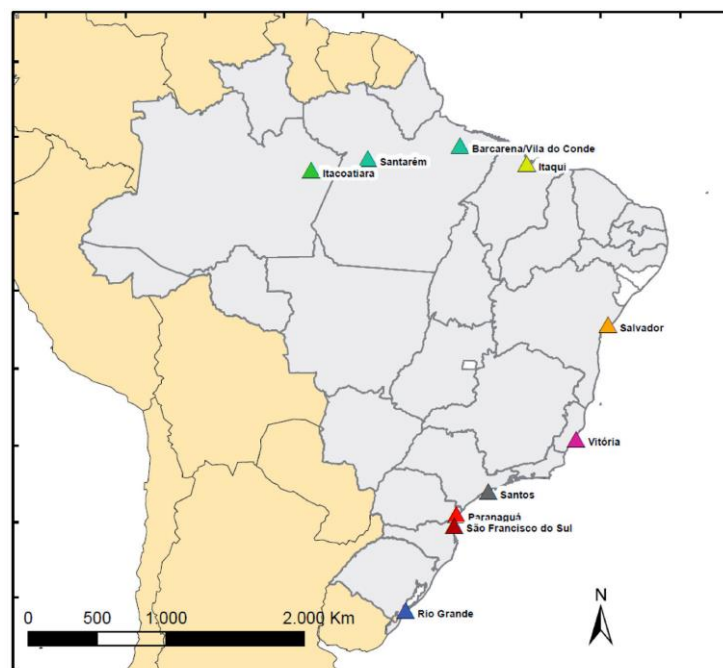
O projeto de transformar o rio Madeira numa hidrovia resultou num corredor de exportação de grãos e de importação de insumos agrícolas, transformando Itacoatiara (AM) em um centro de armazenamento e escoamento da produção de soja da Chapada dos Parecis, no Mato Grosso, Rondônia e municípios de Humaitá e Lábrea, no sul do Amazonas (SILVA, 2006). Este é hoje o corredor hidrográfico mais importante para a exportação de soja no Arco Norte. O transporte da soja pelas águas do Madeira e Amazonas economiza cerca de 30% do valor do frete, se comparado com o custo/Paranaguá. Maior rapidez no escoamento da soja

através da hidrovia do Madeira transformou o porto de Itacoatiara em um dos maiores portos brasileiros em movimentação de soja.

5.4 A infraestrutura portuária

Com o crescimento da produção de grãos na região do Arco Norte e a necessidade de redução de custos de transporte até os grandes mercados consumidores mundiais, foi iniciado o processo de progressiva transferência dos usuais canais logísticos de exportação via portos de Santos (SP) e Paranaguá (PR) para portos nas proximidades dos centros produtores do Centro-Oeste e da nova fronteira agrícola, o MATOPIBA. Neste processo, começaram a se destacar os portos de Itaqui (MA), Itacoatiara (AM), Santarém (PA) e Barcarena (PA), e já aparecendo como local estratégico o porto de Santana (AP). Os portos de Salvador (BA) e Ilhéus (BA) participam somente do escoamento da produção do oeste da Bahia (Figura 10).

Figura 10 – Principais portos de exportação do agronegócio – Brasil



Fonte: Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária (2017).

Os principais portos da região têm as seguintes características:

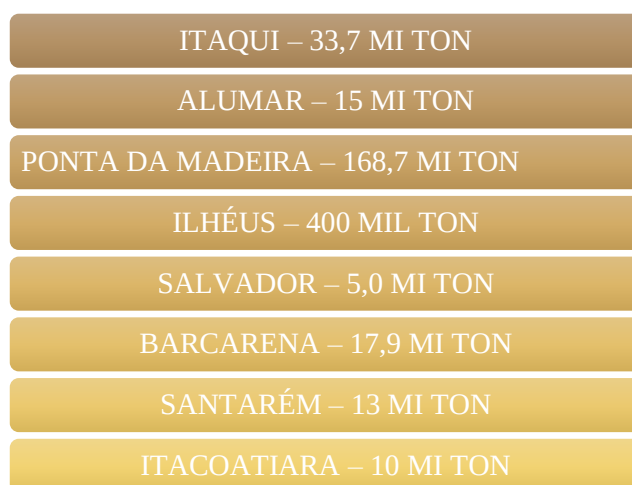
- a) Porto de Itaqui (MA): possui nove berços operacionais com profundidade de 12 a 19 m, canal de acesso com profundidade de 23 m, corredores de acesso pela ferrovia EFC conectada a ferrovia FNS, e a ferrovia Transnordestina (FTL); e

pelas rodovias BR-222 e BR-135. Em 2023 movimentou 36,6 milhões de toneladas (Empresa Maranhense de Administração Portuária, 2024). A VLI, operadora logística ligada a mineradora Vale, também utiliza um de seus berços para movimentação de grãos oriundos da operadora logística VLI;

- b) Porto de Vila do Conde/ Barcarena (PA): possui um terminal de granel líquido (TGL), um terminal rodo-fluvial para barcaças, e um terminal de uso múltiplo (TMU) com oito berços de atracação. O acesso é rodoviário pela BR-316 até a cidade de Belém (PA);
- c) Porto de Itacoatiara (AM): localizado à margem esquerda do Rio Negro distante, 13 km da confluência com o rio Solimões, o Porto de Manaus constitui a principal porta de entrada para o Estado do Amazonas. Tem uma área total de 94,5 mil m², incluindo o cais flutuante de 16,8 mil m²;
- d) Porto de Santarém (PA): está situado à margem direita do rio Tapajós a cerca de 3 km da confluência com o rio Amazonas e uma distância fluvial de 876 km de Belém. Constitui-se em um porto estratégico entre os modais rodoviário e hidroviário para as cargas que escoam pela rodovia BR-163 (Cuiabá- Santarém) e pelos rios Tapajós-Teles Pires. Possui 12 instalações acostáveis compostas por píer, dolphins de atracação, cais fluvial, terminal de granéis sólidos, e três terminais de granéis líquidos;
- e) ETC Miritituba/Itaituba (PA): parte importante na operação de transporte de grãos do Centro-Oeste até os portos do Arco Norte, a Estação de Transbordo de Cargas (ETC) de Miritituba (distrito de Itaituba) fica na margem direita do rio Tapajós, e via rodovia BR-163 (Cuiabá-Santarém) realiza o transbordo dos granéis agrícolas para barcaças e seguem via hidrovia do Tapajós-Amazonas até os portos de Santarém/PA, Barcarena/Belém/PA ou, mais recentemente, Santana/AP, de onde são embarcados para o exterior.

A Figura 11 apresenta os dados de exportação de grãos pelos principais portos brasileiros no ano de 2023 (Companhia Nacional de Abastecimento, 2023):

Figura 11 – Exportação portuária de grãos – soja e milho (2023)



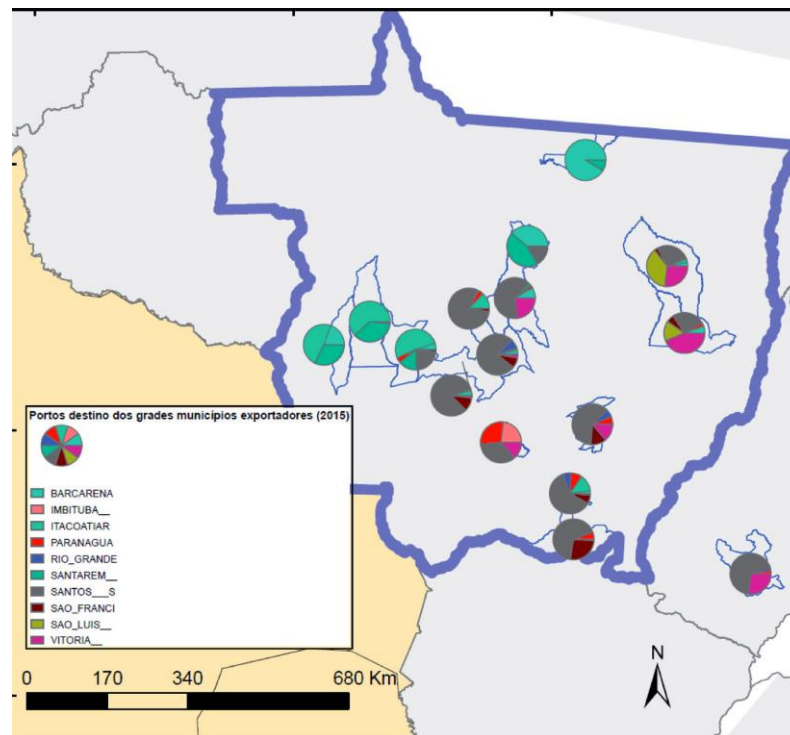
Fonte – Elaborado pelo autor com dados da Agência Nacional de Transportes Aquaviário (2024).

Considerando-se somente a produção de grãos do maior estado produtor, Mato Grosso com safra 2021/2022 alcançando 86,4 Mi ton (Petroli, 2022), segundo a Companhia Nacional de Abastecimento (2022), a distribuição de volumes de exportação até os diversos portos brasileiros é como mostrada na Figura 12.

Como se vê no mapa da Figura 12, os portos de destino da produção de grãos do estado do Mato Grosso já são bastante diversificados. As regiões produtoras próximas às divisas dos estados do Pará e Rondônia tem como portos de destino Itacoatiara, Santarém e Vila do Conde/Barcarena. As regiões produtoras no centro-sul do estado têm como destino em sua maior parte os portos da região Sul-Sudeste, ao porto de Santos, principalmente. Na região produtora ao leste do estado, o porto de Itaquí já aparece como ator importante tomando espaço do porto de Vitória (ES), como destino principal.

Estes destinos naturais podem ser justificados pelas rotas existente, e são até agora mais influenciados por questões de capacidade dos corredores logísticos e das infraestruturas portuárias de embarque de grãos.

Figura 12 – Destino da produção agrícola do Mato Grosso



Fonte: Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária (2017).

5.5 Análise comparativa dos modais de transporte

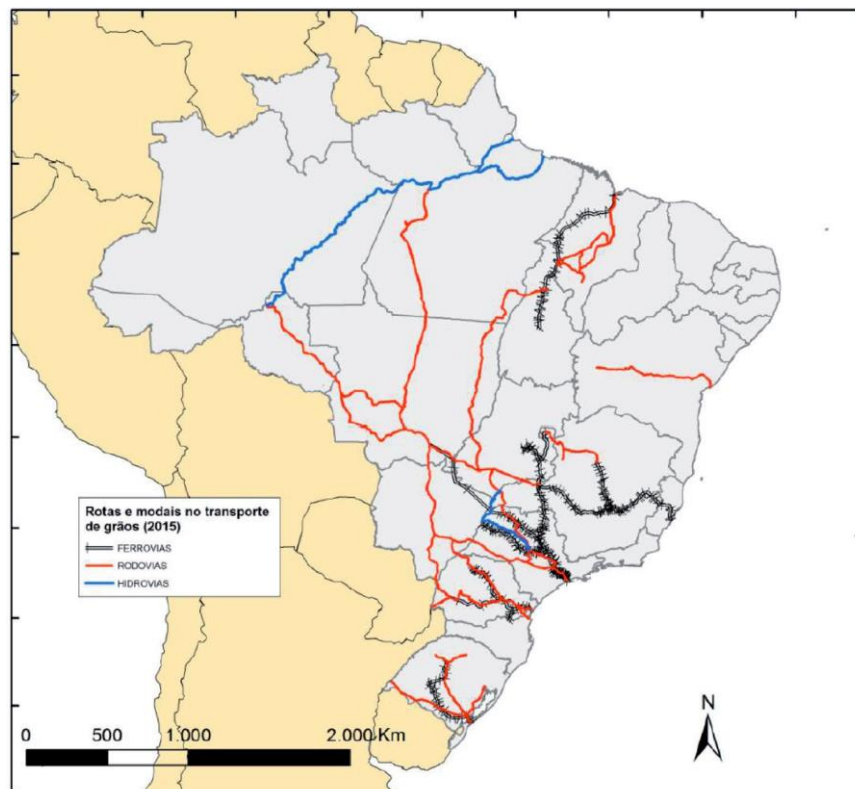
Na análise comparativa entre os diferentes modais, o modal ferroviário apresenta mais vantagens no escoamento de cargas em longas distâncias devido ao menor consumo de combustível (quatro vezes menor por tonelada) em comparação ao rodoviário. O modal hidroviário utiliza ainda menos da metade de combustível do modal ferroviário considerando o mesmo volume de carga e distância.

Ao analisarmos o grau de eficiência energética de um sistema logístico devemos considerar alguns fatores como o consumo de óleo diesel, o consumo de graxas e lubrificantes, o consumo da energia advinda da mão de obra, e fatores como a energia elétrica utilizada na manutenção dos diferentes modais (rodoviário, ferroviário e hidroviário). Para isto, deve-se considerar também índices que possam medir a quantidade de energia produzida para cada unidade investida no processo de produção. Logo, os fluxos energéticos de um sistema devem expressar unidades de calor em comparação a área, a massa ou ao tempo de produção.

No sistema de logística brasileiro há poucas rotas fluviais e de cabotagem, sendo este um dos principais gargalos da infraestrutura nacional que afeta a todos os setores

produtivos. Segundo estudos realizados o custo de transporte hidroviário no Brasil para movimentar uma tonelada por 1.000 km (1.000 TKU) em R\$ 66,00 (Custos no Transporte Rodoviário Brasileiro), e, em comparação o custo de transportar a mesma unidade no rodoviário custa R\$ 425,00 (Rodrigues, 2023). A Figura 13 mostra que com exceção das hidrovias do estado de São Paulo somente as hidrovias naturais dos rios Madeira e Amazonas/Rio Negro tem relevância na logística de grãos nacional.

Figura 13 – Rotas e modais do transporte de grãos



Fonte: Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária (2017).

De acordo com a Observatório Nacional de Transporte e Logística (ONTL), no ano de 2018 foram movimentadas em torno de 1,12 bilhão de toneladas de cargas nos portos do Brasil. Metade desta movimentação ocorreu em razão dos embarques de granéis não agrícolas, em geral os minérios (Brasil, 2023a).

5.6 Custos de fretes, tarifas portuárias e transbordos de cargas

Os valores de transportes de grãos no mercado interno brasileiro não são bem documentados, ou melhor, não há um sistema de gestão de dados centralizados por uma fonte

oficial, e se encontra informações diversas e dispersas em websites de órgãos ligados às organizações patronais de transportadoras. Os custos de transbordos de cargas não costumam serem de acesso público pelas operadoras ferroviárias. Os dados de tarifas portuárias adotados são os apresentados nos relatórios do US Department of Agriculture (USDA) para fins de uniformização. Aqui são apresentados dados que servirão para a simulação do caso teste com o fim de validação do modelo proposto.

De forma geral, estes dados estão bem documentados pelo Departamento de Agricultura dos Estados Unidos (USDA) que emite trimestralmente um relatório denominado “*Brazil Soybean Transportation*” e disponibiliza para o público em geral.

A Companhia Nacional de Abastecimento (CONAB), órgão estatal do governo federal, também publica um boletim mensal chamado “Boletim Logístico”.

A empresa estatal INFRA SA vinculada ao Ministério do Transporte em seu Observatório Nacional de Transporte e Logística também publica o relatório mensal “*Panorama dos Transportes*” dos valores de fretes médios praticados no país. Os dados destes relatórios servem como referência a este trabalho e são usados na simulação do caso base.

Quanto as tarifas para transbordo de cargas para modais diferentes, apesar de ser uma prática de incluir este custo na tarifa do modal a ser transbordado, será adotado os valores de transbordo praticados pela CODESP, segundo Silva e Miranda (2019).

5.6.1 Dados do Observatório Nacional (Panorama dos Transportes Set/2023)

Segundo a ONTL (Brasil, 2023b):

- a) Frete rodoviário médio: 0,32 R\$/TKU
- b) Frete ferroviário médio: 0,15 R\$/TKU
- c) Frete cabotagem médio: 0,08 R\$/TKU
- d) Nota: TKU = toneladas por quilometro útil.

Como se observa o frete ferroviário tem o valor médio de metade do frete rodoviário, mas isto não se aplica em todos os trechos.

5.6.2 Dados da operadora ferroviária Rumo Logística – Malha Central (GO/TO)

A operadora Rumo aplica uma fórmula para cálculo da tarifa de referência a ser adotada:

$$T_{ref} = P_f + P_v * Dist \quad (1)$$

Onde,

P_f = parcela fixa;

P_v = parcela variável;

$Dist$ = distância da origem ao destino da carga.

Para a Malha Central estes valores para grãos e farelos são:

$P_f = 33,01$ (R\$/ton)

$P_v = 0,1036$ (R\$/ton/dist)

5.6.3 Dados da CONAB (frete rodoviário)

Segundo o Boletim Logístico de dezembro/2023 (Companhia Nacional de Abastecimento, 2023):

- a) Querência (MT)/ Colinas (TO): R\$ 300,00/ton (1.194 km);
- b) Querência (MT)/ São Luís (MA): R\$ 470,00/ton (2.242 km);
- c) Sorriso (MT)/ Santarém (PA): R\$ 330,00/ton (1.380 km)
- d) Sorriso (MT)/ Miritituba (PA): R\$ 260,00/ton (1.017 km)

5.6.4 Dados do Departamento de Agricultura dos Estados Unidos – (United States Department of Agriculture)

Frete rodoviário 3º trimestre/ 2023 (US Department of Agriculture, 2023):

- a) Canarana (MT)/ São Luís (MA): 8,37 (USD/mt/100 mi), 1.177 mi
- b) Campos Lindos (TO)/ São Luís (MA): 8,13 (USD/mt/100 mi), 842 mi

Frete marítimo (inclui as tarifas portuárias) valores médios 2023 (US Department of Agriculture, 2023):

- a) São Luís (MA)/Hamburgo (ALE): US\$ 36/ton
- b) São Luís (MA)/Shangai (CHI): US\$ 40,00/ton
- c) Barcarena (PA)/Hamburgo (ALE): US\$ 31,00/ton
- d) Barcarena (PA)/Shangai (CHI): US\$ 40,00/ton

O USDA considera o transporte de grãos até o porto de Barcarena somente a partir de Itaituba (PA), que recebe cargas por meio hidroviário de Rondônia ou por meio rodoviário do norte do Mato Grosso, e Paragominas (PA) que é o centro da produção de grãos no Sudeste do Pará.

5.6.5 Dados da INFRA SA

Segundo a Valec (2022), tarifa de transportes de grãos prevista para 2023: R\$ 51,45/1000 *TKU*

- a) Capacidade da via diária: 25.872 *TU/dia* (Rumo Logística, 2024)
- b) Capacidade de armazenagem do Terminal Integrador de Palmeirante: 93 *mil/ton* (Rumo Logística, 2024)
- c) Capacidade estática de armazenagem do TEGRAM (Itaqui): 500 *mil ton* (Tegram Institucional, 2024).

6 OS CORREDORES LOGÍSTICOS ESTRATÉGICOS

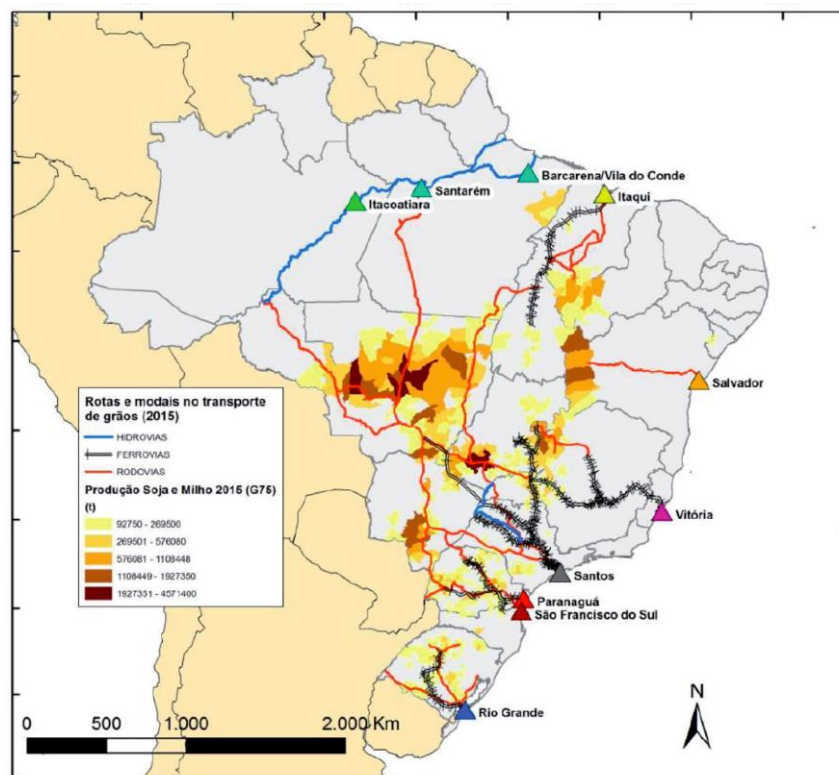
Um corredor de comércio e transporte tem três dimensões principais que se conectam: infraestrutura, serviços e instituições, e o resultado da sua performance final é consequência do funcionamento conjunto de tais dimensões e suas inter-relações (Brasil, 2017).

Para a caracterização dos corredores logísticos estratégicos identifica-se a rede e os nós a serem conectados. Nas redes; as malhas rodoviárias, ferroviárias e aquaviárias; e os nós: portos e terminais de transbordo. Sendo a origem as regiões produtoras de grãos, os nós intermediários são os terminais de transbordo e o destino os portos de exportação (Empresa de Planejamento de Logística, 2021).

Este trabalho utiliza a caracterização realizada pelo governo federal para corredores logísticos dos produtos fundamentais na economia brasileira, que no caso do agronegócio, os dois principais produtos são a soja e o milho (Brasil, 2017).

A junção do mapa da Figura 13 com o mapa de localização das principais regiões produtoras nacionais nos aponta o caminho para a caracterização das bacias logísticas do agronegócio brasileiro (Figura 14).

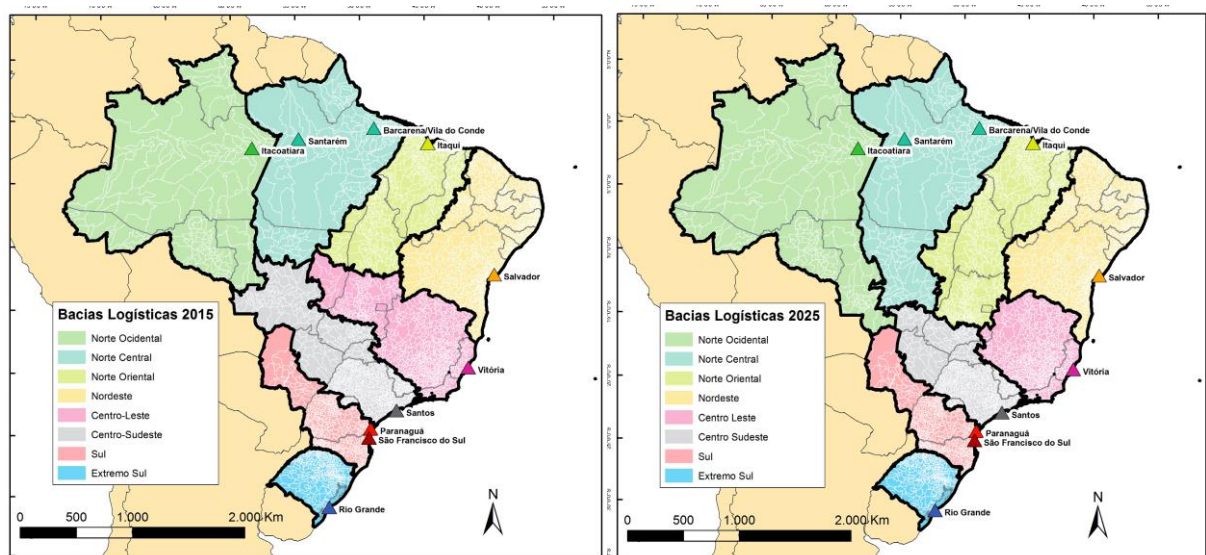
Figura 14 – Produção x rotas transporte de grãos – Brasil



Fonte: Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária (2017).

A partir daí veio a caracterização das bacias logísticas brasileiras pela EMBRAPA que realizou um estudo para definir as bacias logísticas brasileiras relacionadas com escoamento de grãos, e é esta caracterização que vai balizar este estudo até a definição dos corredores logísticos (Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária, 2017). Neste estudo, a EMBRAPA já identificava a mudança em andamento das bacias logísticas com o avanço da zona de influência dos portos do Arco Norte sobre as bacias conectadas aos portos de Vitória (ES) e Santos (SP) até 2025, e a consolidação das bacias dos portos de Itacoatiara, Santarém/Vila do Conde e Itaqui como as dominantes no escoamento de grãos do Arco Norte (Figura 15).

Figura 15 – Bacias Logísticas 2015/2025 – Brasil



Fonte: Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária (2017).

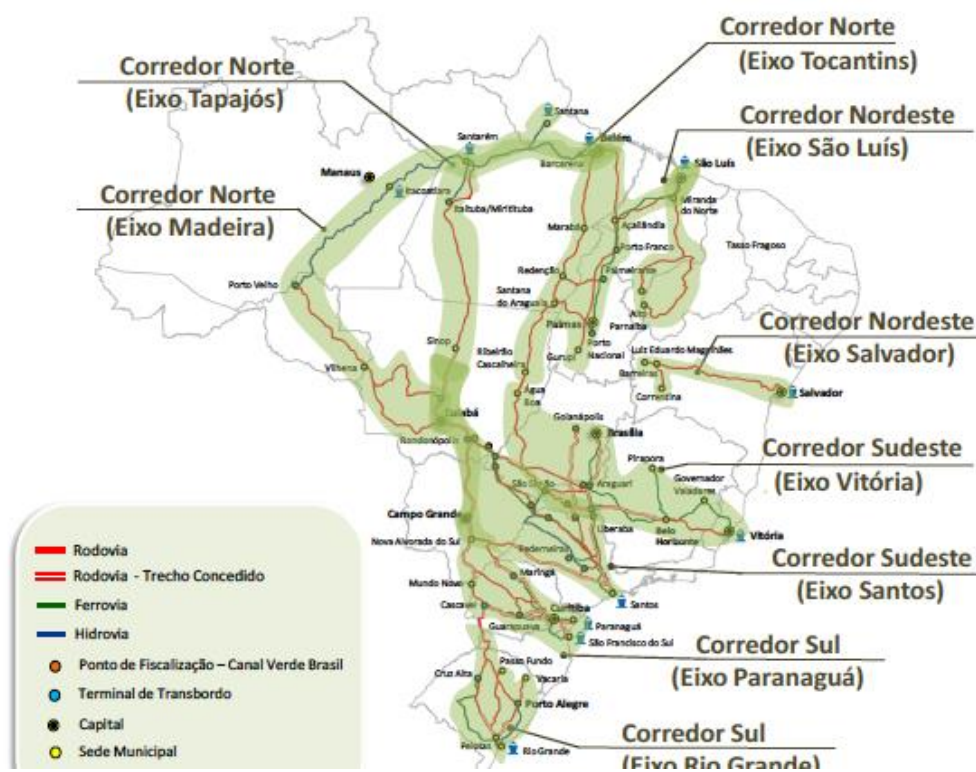
Os corredores logísticos foram caracterizados em função de seu uso para deslocamentos destes produtos a partir do volume de carga transportada e do valor da receita advinda da exportação, então foram caracterizados os seguintes corredores logísticos de exportação de grãos (Figura 16):

- a) CL Norte Eixo Madeira;
- b) CL Norte Eixo Tapajós;
- c) CL Norte Eixo Tocantins;
- d) CL Nordeste Eixo São Luís;
- e) CL Nordeste Eixo Salvador;
- f) CL Sudeste Eixo Vitoria;

- g) CL Sudeste Eixo Santos;
- h) CL Sul Eixo Paranaguá;
- i) CL Sul Eixo Rio Grande.

Para o objeto deste trabalho, são relevantes os Corredores Logísticos do Norte e Nordeste, ou seja: Madeira, Tapajós, Tocantins, São Luís e Salvador.

Figura 16 – Corredores logísticos estratégicos – exportação



Fonte: Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária (2017).

Estes corredores são compostos de “rotas de escoamento” de características unimodais ou multimodais. Nos portos da região do Arco Norte tem-se as seguintes rotas de escoamentos (Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária, 2017):

Eixo Madeira:

Rota 1: Cuiabá (MT)/Itacoatiara (AM) – (2.520 km) – tipo rodo-hidroviária.

Rodovias Cuiabá (MT)/Porto Velho (RO) – BR 364 (1.460 km); e

Hidrovia Rio Madeira – Porto Velho (RO)/ Itacoatiara (AM) (1.060 km).

Rota 2: Cuiabá (MT) – Santarém (PA) – (3.083 km) – tipo rodo-hidroviária.

Rodovias Cuiabá (MT)/Porto Velho (RO) – BR 364 (1.460 km); e

Hidrovia Rio Madeira – Porto Velho (RO)/ Santarém (PA) (1.623 km).

Rota 3: Cuiabá (MT) – Barcarena/Belém (PA) – (3.868 km) – tipo rodo-hidroviária.

Rodovias Cuiabá (MT)/Porto Velho (RO) – BR 364 (1.460 km); e
Hidrovia Rio Madeira – Porto Velho (RO)/ Santarém (PA) (2.408 km).

Eixo Tapajós:

Rota 1: Sorriso (MT) – Santarém (PA) – (1.376 km) – tipo rodoviária.

Rodovia Sorriso (MT)/Santarém (PA) – BR 163 (1.376 km).

Rota 2: Sorriso (MT) – Santarém (PA) – (1.334 km) – tipo rodo-hidroviária.

Rodovia Sorriso (MT)/Miritituba (PA) – BR 163 (1.075 km); e

Hidrovia Tapajós – Miritituba/Itaituba (PA) / Santarém (PA) (259 km).

Rota 3: Sorriso (MT) – Santana (PA) – (1.334 km) – tipo rodo-hidroviária.

Rodovia Sorriso (MT)/Miritituba (PA) – BR 163 (1.892 km); e

Hidrovia Tapajós – Miritituba/Itaituba (PA) / Santana (AP) (817 km).

Rota 4: Sorriso (MT) – Belém/Barcarena (PA) – (3.024 km) – tipo rodo-hidroviária.

Rodovia Sorriso (MT)/Miritituba (PA) – BR 163 (1.892 km); e

Hidrovia Tapajós – Miritituba/Itaituba (PA) /Barcarena (AP) (1.132 km).

Eixo Tocantins:

Rota 1: Ribeirão Cascalheira (MT) – Belém/Barcarena (PA) – (1.549 km) – tipo rodoviária.

Rodovia Ribeirão Cascalheira (MT) – Belém/Barcarena (PA) – BR 158/155 (1.549 km).

Rota 2: Bom Jesus das Selvas (MA) – Belém/Barcarena (PA) – (625 km) – tipo rodoviária.

Rodovia Bom Jesus das Selvas (MA) – Belém/Barcarena (PA) – BR 010 (625 km).

Rota 3: Ribeirão Cascalheira (MT) – Itaqui (MA) – (1.999 km) – tipo rodoferroviária.

Rodovia Ribeirão Cascalheira (MT) – Palmeirante (TO) – BR 158 (1.024 km).

Ferrovia Palmeirante (TO)/ Itaqui (MA) Estrada de Ferro Norte-Sul/ Estrada de Ferro Carajás – (975 km)

Rota 4: Ribeirão Cascalheira (MT) – Itaqui (MA) – (2.167 km) – tipo rodoferroviária.

Rodovia Ribeirão Cascalheira (MT) – Porto Nacional (TO) – BR 158 (894 km).

Ferrovia Porto Nacional (TO)/ Itaqui (MA) Estrada de Ferro Norte-Sul/ Estrada de Ferro Carajás – (1.273 km)

Rota 5: Ribeirão Cascalheira (MT) – Itaqui (MA) – (1.922 km) – tipo rodoferroviária.

Rodovia Ribeirão Cascalheira (MT) – Porto Franco (TO) – BR 158/ BR 226 (1.197 km).

Ferrovia Porto Franco (TO)/ Itaqui (MA) Estrada de Ferro Norte-Sul/ Estrada de Ferro Carajás – (725 km)

Rota 6: Ribeirão Cascalheira (MT) – Itaqui (MA) – (1.926 km) – tipo rodoviária.

Rodovia Ribeirão Cascalheira (MT) – São Luís (MA) – BR 158/ BR 226/ BR 135 (1.926 km).

Rota 7: Palmas (TO) – Itaqui (MA) – (1.260 km) – tipo rodoviária.

Rodovia Palmas (TO) – São Luís (MA) – BR 226/BR 135 (1.260 km).

Eixo São Luís:

Rota 1: Alto Parnaíba (MA) – Itaqui (MA) – (1.106 km) – tipo rodoviária.

Rodovia Alto (TO) – São Luís (MA) – BR 330/ BR 230/ BR 135 (1.106 km).

Rota 2: Tasso Fragoso (TO) – Itaqui (MA) – (947 km) – tipo rodoviária.

Rodovia Tasso Fragoso (TO) – São Luís (MA) – BR 330/ BR 230/ BR 135 (947 km).

Pelas rotas aqui apresentadas observa-se que a região produtora do MATOPIBA está muito bem-posicionada com relação ao seu porto de destino, Itaqui (MA), pelas vias rodoviárias e ferroviárias, quanto ao quesito de distância.

A região produtora do Oeste da Bahia: Correntina e Luís Eduardo Magalhães, está a menos de 1.000 km do porto de Salvador.

No caso das regiões produtoras da região Centro-Oeste, Mato Grosso e Goiás, tendo a opção de escoar grãos pelos portos do Arco Norte, terão que optar sempre pelo transporte multimodal, incluindo o transporte hidroviário. A região Leste de Mato Grosso pode optar em escoar a produção pelo porto de Itaqui (MA) ou Barcarena (PA) utilizando os modais ferroviário e rodoviário.

Cada um dos trechos das rotas, em qualquer modalidade de transporte tem um custo unitário de transporte (frete). Estes custos que somados, mais o custo de transporte marítimo/ portuário, darão os custos totais de escoamento da produção, tendo sempre como restrição as capacidades de movimentação portuária em cada destino, e as capacidades das vias de transporte, rodoviária, hidroviária e ferroviária.

7 O PROBLEMA DA OTIMIZAÇÃO DO TRANSPORTE

A questão natural que surge é: o que estamos tentando fazer quando estamos otimizando? A resposta convencional seria:

O anseio do homem pela perfeição encontra resposta na teoria de otimização. Ela estuda como descrever e atingir o Melhor, uma vez que se saiba medir e alterar o Bom e o Ruim... A teoria de otimização abrange o estudo quantitativo do ótimo e os métodos para encontrá-lo – Beigher, Philips and Wilde (Goldberg, 1989, p. 6).

A teoria de otimização, matematicamente falando, procura pontos extremos de funções (objetivos) que descrevem um problema físico ou sistema real. Ou seja, incorre em métodos de busca numérica. Estes métodos podem ser classificados em três tipos principais: baseado em cálculo, enumerativos e aleatórios ou randômicos (Goldberg, 1989).

Os métodos baseados em cálculo, por sua vez se dividem em duas classes principais: indiretos e indiretos. Os métodos indiretos buscam um ponto extremo (máximo ou mínimo de uma função) tornando seu gradiente igual a zero. O método direto busca um ponto ótimo local em saltos na função objetivo e movendo-se na direção apontada pelo gradiente local.

Os métodos enumerativos, em um espaço de busca finito ou em um espaço de busca infinito discretizado, inicia buscando os valores da função objetivo em cada ponto do espaço.

Os dois tipos de métodos acima citados têm fragilidades no que concerne a eficiência e soluções em falsos pontos ótimos quando a função objetivo possui ótimos locais e ótimo global, e ainda quando o espaço de estudo é bastante grande.

Os métodos randômicos têm sido bastante utilizados, principalmente aqueles que simulam processos da natureza. A busca genérica e simultânea de vários pontos na procura do ótimo torna estes métodos robustos e de alta eficiência.

De maneira geral, a otimização busca melhorar a performance na direção de um ponto ótimo. Separando-se as duas etapas do processo: melhoria e destino, a otimização propriamente dita. Importante ressaltar que “melhorias” ou aperfeiçoamento é o mais importante objetivo do processo de otimização. Atingir o ótimo é muito menos importante para sistemas complexos (Goldberg, 1989).

No problema em estudo, deve-se considerar que o analista do sistema a ser otimizado deve ter sempre em mente as vantagens e limitações das técnicas de otimização. A análise crítica de dados e resultados não se desconecta da qualidade das decisões a serem tomadas. São três os fatores que fragilizam as análises realizadas: a falta de dados sistemáticos,

a carência de mão de obra qualificada para realizar estas atividades e por fim o imediatismo que caracteriza as decisões na esfera pública e privada brasileira (Novais, 1978).

Entende-se otimização como uma procura sistemática do melhor prático sem querer e chegar ao melhor absoluto (Novais, 1978). É recomendada uma abordagem de iniciar o processo pela “formulação do problema” de otimização (Fox, 1971) no que se diz a sua configuração física. Por este motivo, os capítulos anteriores formaram um contexto geral da infraestrutura de transporte existente com seus corredores logísticos, de forma que se possa entender as diversas alternativas para cada região produtora dentro do Arco Norte.

Seguindo a sistemática proposta por Novais (1978) teremos os passos:

- a) Descrever as opções físicas e operacionais para o problema;
- b) Definir as restrições físicas para as alternativas (capacidades operativas);
- c) Definir um modelo matemático adequado, otimizar e realizar a análise de sensibilidade dos resultados.

O processo de otimização implica em se obter primeiro uma função objetivo, e em segundo lugar adotar a premissa de determinismo das variáveis, em outras palavras, um conjunto valores de variáveis independentes que deva produzir apenas um resultado na função objetivo.

Deve-se adotar uma medida de mérito representada no caso pelos valores de custo ou uma grandeza associada a rentabilidade ou viabilidade da alternativa.

Na abordagem aqui adotada será adotada a premissa que o modelo será adequado para analisar alternativas existentes sem entrar no mérito de alternativas futuras ainda em fase de planejamento. Sendo assim, a figura de mérito se reduz ao custo de transporte resultante da escolha adotada pela otimização.

Segundo Goldbarg e Luna (2005): os modelos são representações simplificadas da realidade que preservam, para determinadas situações e enfoques, uma equivalência adequada. E o processo de verificação de sua representatividade é denominado de validação do modelo.

Portanto, encontrada a formulação matemática que represente o sistema físico com suas restrições de custo e capacidade, deve-se buscar os valores em que esta função seja mínima dentro da região pré-definida pelo estudo, ou seja:

$$\min f(x_1, x_2, x_3, \dots, x_n) \quad (1)$$

Sujeito a:

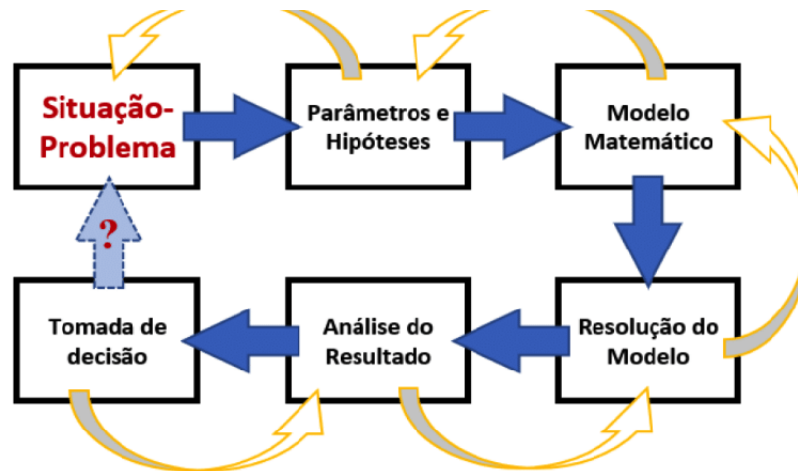
$$g_j(x_1, x_2, x_3, \dots, x_n) = 0 \quad (j = 1, 2, \dots, m) \quad (2)$$

$$h_k(x_1, x_2, x_3, \dots, x_n) = 0 \quad (k = 1, 2, \dots, 1) \quad (3)$$

$$x \in R^n. \quad (4)$$

As etapas de construção da modelagem matemática estão descritas na Figura 17:

Figura 17 – Etapas do processo de modelagem matemático



Fonte: Dias, Arruda e Baumgratz (2020).

Dentro do campo da Pesquisa Operacional a Programação Linear é uma técnica utilizada para resolver problemas de alocação de recursos de maneira ótima, muito utilizada em problemas de transporte. A linearidade, neste caso, significa que todas as funções definidas no modelo matemático são lineares.

Na Programação Linear a representação matemática fica desta forma:

$$\min z = c_1x_1 + c_2x_2 + \dots + c_nx_n \quad (5)$$

Sujeito a,

$$a_{11}x_1 + a_{12}x_2 + \dots + a_{1n}x_n \geq b_i, i = 1, 2, \dots, p \quad (6)$$

$$a_{12}x_1 + a_{22}x_2 + \dots + a_{2n}x_n = b_j, i = p+1, p+2, \dots, m \quad (7)$$

E mais,

$$x_i \geq 0 \text{ para } i = 1, 2, \dots, q \quad (8)$$

$$x_j \in R, j = q+1, q+2, \dots, n \quad (9)$$

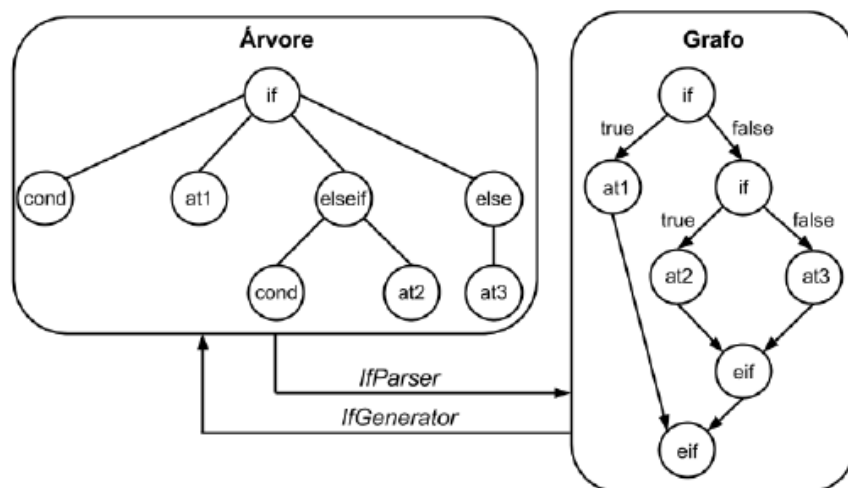
No processo de organização do modelo temos as seguintes etapas (Goldbarg; Luna, 2005):

- Definição das atividades (variáveis de decisão) que compõem o problema associando cada atividade a uma medida;
- Definição dos recursos/insumos disponíveis em cada atividade;
- Determinação do coeficiente de recursos de cada atividade;

- d) Determinar as condições externas (restrições);
- e) Formalização do modelo (função objetivo) com a associação das quantidades não negativas a cada uma das atividades, escrever as equações de balanceamento e indicar o uso dos recursos.

O problema de transporte da forma aqui abordada pode ser caracterizado como uma otimização de modelo em redes, que podem ser vistos na representação topológica de um grafo que são utilizados para problemas de otimização de fluxo máximo, caminho mais curto e árvores de ligação mínima, cujas soluções podem ser obtidas pelos algoritmos Ford-Fulkerson (fluxo máximo), Kruskal e Prim (árvore mínima) e o Dijkstra (caminho mais curto) (Passos, 2008), entre outros. Ahuja *et al.* (1993) abordam de forma ampla o problema de fluxo em redes com os diversos algoritmos de solução (Figura 18).

Figura 18 – Representação de grafos e árvores



Fonte: Povia *et al.* (2014).

7.1 A modelagem do problema

No desenvolvimento da função objetivo de nosso problema deve-se considerar que buscamos uma inovação, e esta é frequentemente, segundo Hadamard, uma justaposição de coisas que funcionaram bem no passado (Goldberg, 1989). Portanto, a partir de ideias já estabelecidas e provadas irá se formular um novo modelo.

Os modelos matemáticos de sistemas de transporte representam, para um sistema hipotético ou real, o fluxo da demanda, o funcionamento dos elementos organizacionais e físicos, a interação entre eles, e seu efeitos no mundo externo (Cascetta, 2009). Os modelos

matemáticos e os métodos de solução são, portanto, ferramentas para análise dos sistemas reais ou planejados de sistemas de transporte e de uso estratégico para tomadas de decisão baseadas em custos. Podemos dizer que este assunto está delimitado, mas não totalmente, ao campo de conhecimento da engenharia de sistemas de transporte lastreado na teoria de modelagem ótima.

Podemos definir “sistema de transporte” como um conjunto de elementos e suas interações que produzem a uma demanda por viagem dentro de uma dada área, e a previsão dos serviços de transporte para satisfazer esta demanda (Cascetta, 2009).

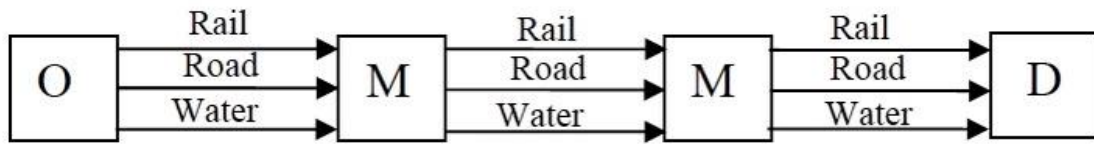
Conceitualmente, nossa demanda por viagem de uma origem a um destino (produtos ou passageiros) pode ser atendida por sistemas de transportes disponíveis (modais) que implicam em uma “escolha”, se há mais de um, viável. Cada um destes sistemas (modais) tem suas características (capacidades, distância, tempo de viagem, confiabilidade, custos etc.) que são conhecidas como “nível de serviço” ou atributos de desempenho. A escolha do modal esta fortemente relacionada com tempo, custo e confiabilidade. No caso em estudo o custo é o atributo fundamental já que os outros atributos fazem parte das restrições analisadas previamente. Podemos então delimitar nosso problema de transporte como um problema de otimização baseada em custos com restrições de capacidade de modais. Onde as variáveis são de natureza matemática real e os elementos inerentes são determinísticos apesar de randômicos ao longo do tempo, isto é, cada análise implica em observar uma janela específica de tempo, sem considerar dados estatísticos em séries temporais.

A estrutura do nosso problema pode ser vista como a ligação de diversos pontos, onde o ponto inicial é a região produtora (origem) e o ponto final é a instalação portuária de desembarque de grãos (destino).

A ligação destes pontos, no percurso em terra, pode se dar por meio de transporte ferroviário, rodoviário ou hidroviário ou uma combinação de mais de um meio de transporte, como ocorre muitas vezes em situações reais.

No nosso caso, em que buscamos representar os corredores logísticos estratégicos, o sistema real tem a partir de um nó (vértice de origem) uma representação em árvores ou grafos com ligação aos pontos possíveis de destino por meio de caminhos (arcos) por um modal, ou mais de um, com pontos intermediários de transbordo, ou não. Então, o problema passa a ser de calcular o caminho de menor custo dentro das restrições de capacidade do modal ou da restrição da capacidade do nó (vértice) de destino. Então, todo o caminho estará limitado pela capacidade do nó de destino (Figura 19).

Figura 19 – Topologia do problema



Fonte: Congli e Yixiang (2016).

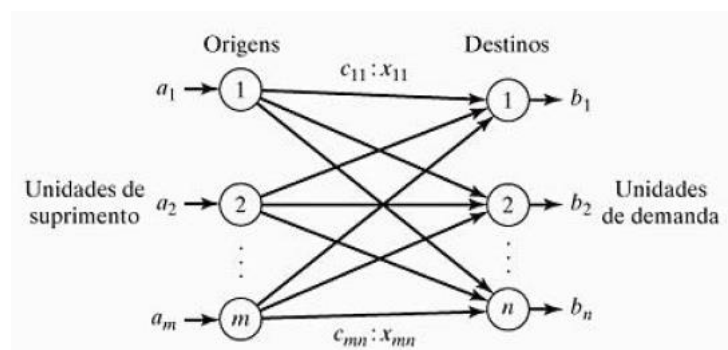
O problema passa então a ser alocar da produção total de grãos de cada região produtora por cada modal ou modais em sequência, ou corredor logístico, até o destino da instalação portuária mais próxima ou para mais de uma instalação portuária caso haja restrições de capacidade de transporte ou da própria instalação portuária mais próxima, sendo que objetivo é minimizar o custo total de transporte da produção para o embarque portuário até o destino consumidor, já considerando os custos portuários e fretes marítimos.

Considerando que cada meio de transporte tem um custo unitário por peso ou volume, e que há limites de transporte de acordo com suas capacidades, além do limite de embarque da própria instalação portuária o problema está caracterizado como um modelo em rede com as características de um clássico problema de otimização em transporte.

O problema proposto é, então, de característica multiobjetivo onde podem ser considerados: custo de transporte, tempo de transporte e qualidade da rota. Os custos de transporte não possuem linearidade ao longo do tempo, algo a ser considerado se a variável tempo for levada em conta.

Portanto, o problema do transporte pode ser visto como um problema de fluxo em redes no qual o objetivo é minimizar globalmente os custos de fluxo através dos arcos de uma rede oferta x demanda (Figura 20) (Goldbarg; Luna, 2005).

Figura 20 – Fluxo em rede



Fonte: Centro Federal de Educação Tecnológica de Minas Gerais (2016).

Esta estrutura em grafo tem sua representação matricial como na Figura 21 onde o numeral (0) zero representa a inexistência de ligação entre dois nós ou pontos de conexão e o numeral 1 (um) o contrário.

Figura 21 – Representação matricial

	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
1	0	1	1	1	0	0	0	0	0	0
2	0	0	0	0	1	1	0	0	0	0
3	0	0	0	0	1	1	0	0	0	0
4	0	0	0	0	1	1	0	0	0	0
5	0	0	0	0	0	0	1	1	1	0
6	0	0	0	0	0	0	1	1	1	0
7	0	0	0	0	0	0	0	0	1	1
8	0	0	0	0	0	0	0	0	1	1
9	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1
10	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0

Fonte: Congli e Yixiang (2016).

As abordagens de solução podem ser as clássicas pela programação linear, programação dinâmica, programação inteira mista, mas pode ser por meio de caminhos menos tradicionais mais cada vez mais em uso em outras áreas como as redes neurais artificiais, a lógica *fuzzy* e a computação evolucionária (algoritmos genéticos).

A formulação clássica do problema de transporte é feita considerando as demandas e ofertas localizadas nos nós (Goldbarg; Luna, 2005):

$$\min Z = \sum \sum c_{ij}x_{ij} \quad (10)$$

Sendo,

c_{ij} = custo de percorrer o arco i - j ;

$i = 1, \dots, m$, conjunto de pontos de origem/oferta;

$j = 1, \dots, n$, conjunto de pontos de destino/demanda;

x_{ij} = variável de decisão associada ao arco ij .

sujeito a,

$$\sum x_{ij} = o_i, \quad i = 1, \dots, m \quad (11)$$

$$\sum x_{ij} = d_j, \quad j = 1, \dots, n \quad (12)$$

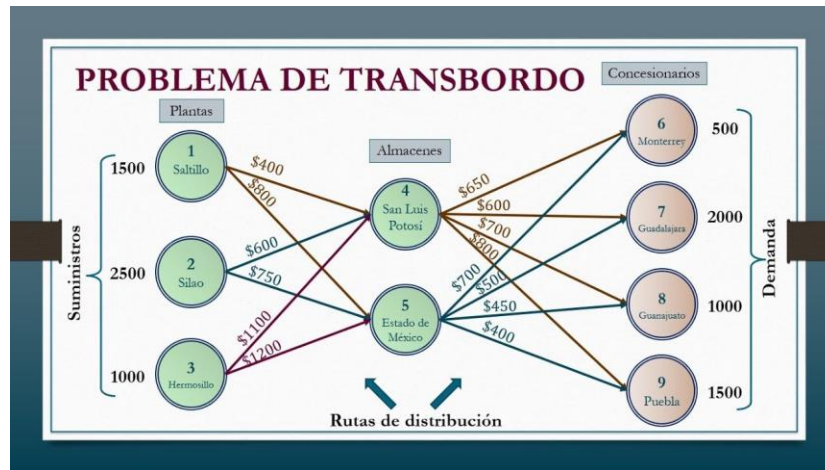
$$x_{ij} \geq 0 \quad i = 1, \dots, m; j = 1, \dots, n \quad (13)$$

Na função objetivo a ser minimizada, $Z = \sum \sum c_{ij}x_{ij}$, o vetor de custos (c_{ij}) está associado aos coeficientes das variáveis de decisão (x_{ij}), ou seja aos arcos que ligam os pontos de oferta e demanda, ou ainda, no nosso caso aos custos de transportes dos modais disponíveis entre os pontos de origem e destino, além dos custos de transbordo e armazenagem em nós intermediários.

As restrições estarão associadas aos limites de capacidade de transporte das vias que compõem os diversos modais que interligam origem e destino, e aos limites de embarque das instalações portuárias, ou seja, o modelo clássico é invertido com o destino sendo o fator de limitação e não a oferta sendo o fator limitante.

No caso em estudo, poderá haver transbordo através da troca de modal antes do destino portuário, ou a mudança de via do mesmo modal com custos de transporte diferentes. Neste caso, teremos um problema de transbordo capacitado, ou seja, com limitações ou restrições aos fluxos nos arcos sendo que estas limitações são as capacidades de tráfego das vias de transporte ou do modal (Figura 22).

Figura 22 – Problema de transbordo capacitado



Fonte: Herandéz (2021).

A formulação do Problema de Transbordo Capacitado é a seguinte:

$$(PTC) \min z = \sum \sum c_{ik}x_{ik} + \sum \sum w_{kj}y_{kj} + \sum f_k v_k + \sum g_k p_k \quad (14)$$

sujeito a

$$\sum x_{ik} < a_k v_k, \quad k = 1, \dots, s. \quad (15)$$

$$\sum y_{kj} = d_j, \quad j = 1, \dots, n. \quad (16)$$

$$\sum x_{ik} = p_k = \sum x_{kj}, \quad k = 1, \dots, s \quad (17)$$

$$h_k < p_k < H_k \quad k = 1, \dots, s. \quad (18)$$

$$l_{ik} < x_{ik} < L_{ik} \quad k = 1, \dots, s. \quad (19)$$

$$l_{kj} < y_{kj} < L_{kj} \quad k = 1, \dots, s. \quad (20)$$

$$x_{ik} \geq 0 \quad (21)$$

$$y_{kj} \geq 0 \quad (22)$$

$$v_k \in \{0, 1\} \quad (23)$$

Sendo,

$M = \{1, \dots, m\}$, conjunto de pontos de origem/oferta;

$S = \{1, \dots, s\}$, conjunto de pontos de transbordo;

$N = \{1, \dots, n\}$, conjunto de pontos destino/demanda;

v_k = variável binária que assume o valor 1 se o transbordo é ativado e 0 caso contrário;

a_k = capacidade de transbordo/armazenagem disponibilizada pelo ponto de transbordo k ;

x_{ik} = fluxo que percorre um arco $i-k$;

y_{kj} = fluxo que percorre um arco $k-j$;

c_{ik} = custo de percorrer o arco $i-k$;

w_{kj} = custo de percorrer o arco $k-j$;

f_k = custo fixo de se ativar um ponto de transbordo/armazenagem $k \in S$, $S = \{1, \dots, s\}$;

g_k = custo de armazenagem/transbordo na unidade k por unidade de fluxo $k \in S$;

$S = \{1, \dots, s\}$;

H_k e h_k = capacidade máximas e mínimas de armazenagem nas unidades de armazenamento k , que correspondem também a limites para o fluxo na rede;

p_k = fluxo circulando na unidade de armazenamento k ;

l_{ik} = limite inferior de fluxo no arco $i-k$;

L_{ik} = limite superior no arco $i-k$;

Pode-se então fazer as seguintes considerações:

- O custo de armazenagem e transbordo pode ser considerado um só onde há armazenagem no transbordo;
- Podemos considerar que não há limite para a capacidade de transbordo/armazenagem, pois ela já está adequada ao limite de capacidade do arco x_{ik} ;
- Pode-se ou não considerar o custo de transbordo igual a zero;

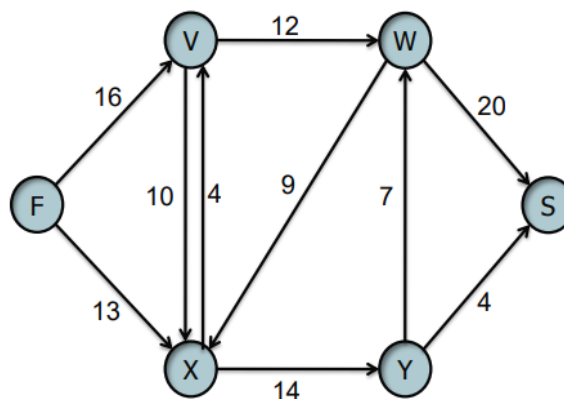
- d) Não necessariamente os pontos de origem i tem que se ligar a um ponto de destino j por um transbordo k ;
- e) Um ponto de origem i pode se ligar a mais de um ponto de destino se houver limitações de capacidade nos arcos $i-k$ e $k-j$.

Então, na Equação 14 o termo $\sum f_k v_k$ será nulo se não houver transbordo ($v_k = 0$), ou se o custo estimado de transbordo for muito menor que o custos de transporte nos arcos $i-k$ e $k-j$. O termo $\sum g_k p_k$ também poderá ser considerado nulo para efeito de simplificação dos cálculos. Neste caso:

$$(PTC) \min Z = \sum \sum c_{ik} x_{ik} + \sum \sum v_{kj} y_{kj} + \sum f_k v_k \quad (24)$$

Este problema também pode ser visto como um Problema de Custo de Fluxo Mínimo (PCFM) que corresponde à necessidade de circular um fluxo em uma rede $s-t$ com um custo mínimo de tráfego (Goldbarg; Luna, 2005). O fluxo a transitar será a produção anual de grãos da região em estudo considerando as restrições de capacidade da via a ser utilizada (modal) com a restrições de fluxo máximo admissível no arco (capacidade de tráfego) e de fluxo mínimo (mínimo viável a ser transportado), e ainda o custo de transporte em cada arco (via ou modal) (Figura 23).

Figura 23 – Grafo de um PCFM



Fonte: Demontiê Junior (2010).

Há diversos algoritmos de solução do PCFM baseados no método Simplex como nos apresenta Goldbarg e Luna (2005):

- a) Fulkerson e Minty (1961);
- b) Zadeh (1973);

- c) Goldfarb e Hao (1992);
- d) Orlin (1993);
- e) Orlin et al. (1993);
- f) Armstrong e Jin (1997).

Na construção da função objetivo a ser proposta pode se considerar o custo de transporte total até o destino, o custo de transbordo/armazenagem, e uma função penalidade. Caso o tempo de transporte seja considerado, então o custo unitário por tempo de transporte deverá ser considerado (Congli; Yixiang, 2016).

Então, o custo do transporte O-D se torna:

$$\sum_i \sum_k x_{i1,i2}^k c_{i1,i2}^k \quad (25)$$

Onde,

$c_{i1,i2}^k$ = custo de transporte entre os nós i_1 e i_2 , no modal k .

Para o custo de transbordo/armazenagem, tem-se:

$$\sum_i \sum_k \sum_l y_{i1}^{kl} c_{i2}^{kl} . \quad (26)$$

Onde,

c_{i2}^{kl} = custo de transbordo/armazenagem entre os modais k e l do nó i_1 para o nó i_2

O custo associado ao tempo de transporte entre i_1 e i_2 se torna:

$$\sum_i \sum_k x_{i1,i2}^k T_{i1,i2}^k . \quad (27)$$

Onde,

$T_{i1,i2}^k$ = custo do tempo no modal k do nó i_1 para o nó i_2

Uma função de penalidade pode ser associada a função objetivo, da seguinte forma:

$$\sum_i \sum_k \sum_l (\mu_{i1}^{k,l} - 1)M. \quad (28)$$

Onde,

M = fator de penalidade;

$\mu_{i1}^{k,l}$ relativo à continuidade de transporte no nó i_1 de um modal k para um modal l

Portanto, considerando a variável tempo a função objetivo se torna:

$$Z = \min (\sum_i \sum_k x_{i1,i2}^k c_{i1,i2}^k + \sum_i \sum_k \sum_l y_{i1}^{kl} c_{i2}^{kl} + \sum_i \sum_k x_{i1,i2}^k T_{i1,i2}^k + \sum_i \sum_k \sum_l (\mu_{i1}^{k,l} - 1)M) \quad (29)$$

Sujeito a,

$$x_{i0,i1}^k + x_{i1,i2}^l \geq 2y_{i1}^{kl} \quad \forall i, k, l \text{ (assegura a continuidade do transporte)} \quad (30)$$

$$\sum_k x_{i1,i2}^k = 1 \quad \forall i \text{ (assegura o uso somente de um tipo de modal entre nós)} \quad (31)$$

$$\sum_k \sum_l y_{i1}^{kl} = 1 \quad \forall i \text{ (assegura somente um transbordo entre modais)} \quad (32)$$

$$\sum_i \sum_k t_{i_1, i_2}^k x_{i_1, i_2}^k + \sum_i \sum_k \sum_l a_{i_1}^{kl} y_{i_2}^{kl} \leq T \text{ (limita tempo total de transporte)} \quad (33)$$

$$q \leq f_{i_1, i_2}^k \quad \forall i, k, l \text{ (assegura que a carga transportada seja menor que a capacidade do modal)} \quad (34)$$

$$(i_1, i_2) = 1 \quad \text{(assegura que haja nós entre } i_1 \text{ e } i_2) \quad (35)$$

$$x_{i_1, i_2}^k, y_{i_1}^{kl} \in \{0, 1\} \quad \forall i, k, l \text{ (assegura que variáveis de decisão sejam } (0, 1)) \quad (36)$$

Onde,

Z = custo geral do transporte por meio de diferentes modais;

i = conjunto de nós na rede transporte, com i variando de 1 a n ;

k e l = modais opcionais de transporte;

c_{i_1, i_2}^k = custo de transporte entre os nós i_1 e i_2 , no modal k ;

$c_{i_2}^{kl}$ = custo de transbordo do modal k para o l no nó i_2 ;

T_{i_1, i_2}^k = custo unitário do tempo de transporte do nó i_1 para o nó i_2 ;

T_d = tempo de transbordo e armazenamento no nó i ;

f_{i_1, i_2}^k = capacidade de transporte do modal k entre os nós i_1 e i_2 ;

t_{i_1, i_2}^k = tempo de transporte no modal k , entre os nós i_1 e i_2 ;

q = volume (quantidade da carga a ser transportada);

M = fator de penalidade suficientemente alto;

T = tempo máximo de transporte permitido entre a origem O e o destino D .

$$x_{i_1, i_2}^k = \begin{cases} 1, & \text{escolhendo o modal } k \text{ entre os nós } i_1 \text{ e } i_2; \\ 0, & \text{escolhendo um outro modal entre os nós } i_1 \text{ e } i_2 \end{cases}$$

$$y_{i_1}^{kl} = \begin{cases} 1, & \text{se houver troca de modal } k \text{ para o modal } l \text{ no nó } i_1 \\ 0, & \text{se não houver troca de modais no nó } i_1 \end{cases}$$

$$\mu_{i_1}^{k,l} = \begin{cases} 1, & \text{se as instalações em } i_1 \text{ atendem os requisitos de} \\ & \text{continuidade} \\ & \text{de transporte entre } k \text{ e } l; \\ 0, & \text{se as instalações em } i_1 \text{ não atendem os requisitos.} \end{cases}$$

O modelo proposto é inspirado na formulação de CONGLI com as adequações ao caso de transporte de graneis sólidos e as restrições existentes no sistema físico real estudado. O tempo total de transporte origem-destino não é relevante em graneis agrícolas porque os ciclos de produção são anuais, ao contrário do transporte de manufaturados que tem prazo de entrega contratado. A função penalidade representa as ineficiências dos portos brasileiros: o tempo de espera (*waiting time*) nos portos de embarque – o penúltimo nó da rede, em se tratando do modal rodoviário passa a ser impactante no custo do frete, podendo levar dias.

Na construção da função objetivo, temos três componentes, ou a soma de três funções: custo de transporte, custo de transbordo e custo da espera de carga/descarga no nó do porto devido a atrasos por ineficiência logística.

$$Z = Q_t + Q_x + Q_d \quad (37)$$

As duas primeiras parcelas são similares ao modelo de CONGLI e se inclui uma terceira parcela que o atraso de descarga e embarques que retratam a ineficiência logística.

Custo de transporte

$$Q_t = \sum_i \sum_k x_{i1,i2}^k c_{i1,i2}^k \quad (38)$$

Custo de transbordo

$$Q_x = \sum_i \sum_k \sum_l y_{i1}^{kl} c_{i2}^{kl} \quad (39)$$

Custo de atraso nos portos

$$Q_d = \sum_i \sum_k x_{in-2,in-1}^{k,l} T_{in-2,in-1}^{k,l} \quad (40)$$

Onde,

$T_{in-2,in-1}^{k,l}$ = custo do tempo de espera do nó i_{n-2} para o nó i_{n-1}

$x_{in-2,in-1}^{k,l}$ = variável de decisão entre os nós i_{n-2} e i_{n-1} (i_{n-1} é igual ao nó do porto de embarque)

Como os preços de fretes de transporte variam ao longo do ano de acordo com a procura, durante períodos de safra e entressafra, o tempo de espera nos portos já pode estar contabilizado nos fretes. Mas o nó destino, o porto de embarque, tem um custo agregado que inclui tarifas portuárias e frete de transporte marítimo até o porto de destino. Então, um novo fator tem que ser adicionado ao modelo matemático, que é um custo do nó de destino referente aos custos portuários e de transporte marítimo, ou de forma mais simplificada, o nó final será o porto de desembarque de destino, considerando um laço (arco) final entre o porto de embarque e o porto de destino.

Outra restrição incluída na modelagem é a limitação da capacidade portuária, um gargalo no sistema logístico brasileiro. Nenhuma carga deverá ser encaminhada a determinado porto sem que este tenha capacidade de movimentá-la, ou seja, sendo que a carga a ser transportada q deve ser menor que a capacidade portuária igual C_p :

$$q \leq C_p \quad \forall in - 1 \quad (41)$$

Sendo,

C_p = capacidade de movimentação portuária no nó i_{n-1}

O modelo de otimização (função objetivo) proposto é:

$$Z = \min \sum_i \sum_k x_{i1,i2}^k c_{i1,i2}^k + \sum_i \sum_k \sum_l y_{i1}^{kl} c_{i2}^{kl} + \sum_i \sum_k x_{in-2,in-1}^{k,l} T_{in-2,in-1}^{k,l} \quad (42)$$

Sujeito a,

$$x_{i0,i1}^k + x_{i1,i2}^l \geq 2y_{i1}^{kl} \quad \forall i, k, l \text{ (assegura a continuidade do transporte)}$$

$$\sum_k x_{i1,i2}^k = 1 \quad \forall i \text{ (assegura o uso somente de um tipo de modal entre nós)}$$

$$\sum_k \sum_l y_{i1}^{kl} = 1 \quad \forall i \text{ (assegura somente um transbordo entre modais)}$$

$$q \leq f_{i1,i2}^k \quad \forall i, k, l \text{ (assegura que a carga transportada seja menor que a capacidade}$$

do modal)

$$(i_1, i_2) = 1 \text{ (assegura que não haja nós entre } i_1 \text{ e } i_2)$$

$$x_{i1,i2}^k, y_{i1}^{kl} \in \{0,1\} \quad \forall i, k, l \text{ (assegura que as variáveis de decisão sejam (0,1)}$$

$$q \leq C_p \quad \forall i_{n-1} \text{ (assegura que a carga transportada seja menor que a capacidade}$$

do porto de embarque – i_{n-1})

Onde,

Z = custo geral do transporte por meio de diferentes modais;

i = conjunto de nós na rede transporte, com i variando de 1 a n ;

k e l = modais opcionais de transporte;

$c_{i1,i2}^k$ = custo de transporte entre os nós i_1 e i_2 , no modal k ;

c_{i2}^{kl} = custo de transbordo do modal k para o l no nó i_2 ;

$T_{in-2,in-1}^{k,l}$ = custo do tempo de espera/descarga nos portos de embarque (i_{n-1})

$f_{i1,i2}^k$ = capacidade de transporte do modal k entre os nós i_1 e i_2 ;

$t_{i1,i2}^k$ = tempo de transporte no modal k , entre os nós i_1 e i_2 ;

q = volume (quantidade da carga a ser transportada a partir de i_1);

C_p = capacidade de embarque no nó i_{n-1} (porto de embarque).

7.2 A solução do problema

Nesta seção são apresentadas comparações dos possíveis métodos de solução para um problema em rede de característica linear, baseadas na pesquisa bibliográfica realizada em trabalhos publicados por outros autores de forma a justificar o uso do algoritmo de Dijkstra como o mais adequado para sistemas com características do caso estudado.

Para problema de Caminho Mais Curto (SPP) foi realizada comparação (Yang *et al.*, 2020) dos algoritmos de Djiskstra, Floyd, Simmulated Annealing e Algoritmo Genético. Foi ressaltado que os algoritmos de Djiskstra e Floyd são de simples simulação e práticos para redes de pequena escala. Os algoritmos Simmulated Annealing e Algoritmo Genético são indicados para redes de grande escala, mas podem ter o problema de ótimos locais.

A natureza do problema em rede para cálculo do caminho mais curto também pode ser indicada para uma solução por programação dinâmica.

7.2.1 A solução por programação dinâmica

A solução do modelo de otimização pode ser feita pelo uso de um algoritmo de busca para identificação dos caminhos (arcos) existentes entre os nós, e em seguida um algoritmo de PCFM.

Inicialmente, busca-se identificar todos os possíveis caminhos utilizando o algoritmo de busca em largura (*bread-first search* – BFS) muito utilizado para realizar busca em um grafo ou estrutura de árvore (Universidade de São Paulo, 2021). Há rotinas já construídas em diversas linguagens de programação, como Python, por exemplo (Congli; Yixiang, 2016).

Quando para o nó n , o custo total for $f_n = 0$, então o tempo total $T_n = 0$;

Para o nó $n-1$ o custo total do transporte pode ser expresso como:

$$f_{n-1}(k, l) = C_{n-1,n}^l + C_{n-1}^{kl} + T_{n-1,n}^1 \quad (43)$$

E, o tempo total de transporte pode ser expresso como:

$$T_{n-1} = \frac{d_{n-1,n}^l}{v_{n-1,n}^l} + T_n \quad (44)$$

Neste modelo, o fator mais importante é o tempo e a escolha do modal não é crítica, pode-se escolher o modal de menor custo entre dois nós dentro do tempo limite estipulado, e assim se obtém o custo total mais baixo dentro dos parâmetros de tempo desejados.

No nosso caso, o tempo de transporte T_n não é levado em consideração.

a) O algoritmo de busca em largura (*breadth-first search*/BFS)

Calcula-se o custo de transporte geral mais barato (caminho de custo mínimo) utilizando o algoritmo de programação dinâmica, em tantos estágios quanto o número de nós do grafo.

Dado um grafo $G(V,E)$, direcionado ou não-direcionado, em um nó de origem $s \in V$, precisamos identificar todos os nós de G que são alcançáveis a partir de s . Dizer que um

nó u é alcançável a partir de um nó v significa que existe uma sequência de laços (arcos) no grafo permitindo que se saia de u e se chegue a v (Algoritmo Sempython, 2023).

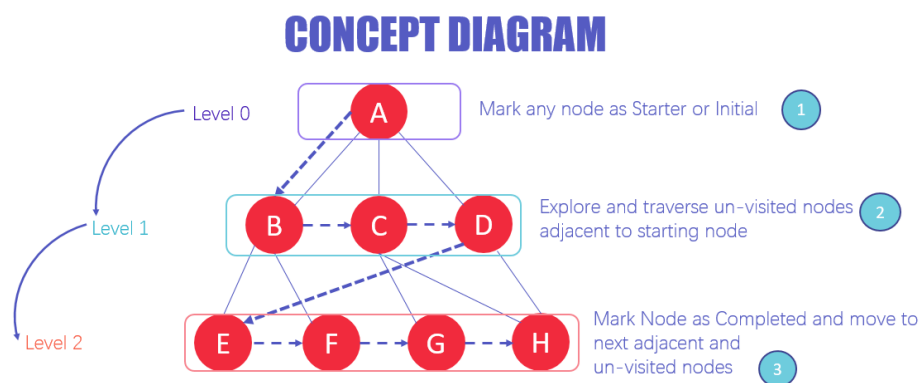
A idéia geral da busca em largura é explorar o grafo visitando os nós (vértices) por níveis. O primeiro nível é formado pelos nós que estão conectados diretamente ao nó de origem. O segundo nível é formado pelos nós adjacentes aos nós do primeiro nível. O terceiro nível é formado pelos nós vizinhos aos nós do segundo nível, e assim por diante. Note que, na busca em largura, antes de explorarmos nós mais distantes do nós atual, exploramos os nós em ordem crescente de distância (em número de arcos) do nó atual.

A busca em largura pode ser implementada usando uma fila para manter registro dos próximos nós a serem visitados. Inicialmente, inserimos o nó de origem, s , na fila. Depois, enquanto ainda houver nós na fila, removemos o primeiro nós da fila e visitamos todos os nós adjacentes a ele (que ainda não tenham sido visitados). Sempre que visitamos um novo nó, o adicionamos ao final da fila, para termos certeza de que visitaremos seus vizinhos no futuro.

A ideia central do algoritmo como pode ser esquematizada como (Figura 24):

- Enquanto houver nós na fila:
 - Remova um nó v da fila
- Se v ainda não tiver sido visitado:
 - Marque v como visitado
- Adicione à fila todos os vizinhos de v que ainda não tenham sido visitados.

Figura 24 – Algoritmo BFS/ Diagrama conceitual



Fonte: Walker (2023).

a) O algoritmo de programação dinâmica

A programação dinâmica é uma técnica utilizada para a otimização de processos de decisão multi-estágios, ou seja, que pode ser desdobrado em um certo número de etapas

sequenciais). Neste processo o objetivo é encontrar uma trajetória (política) ótima, seguindo o princípio de optimalidade de Bellman: “Uma política ótima apresenta a propriedade segunda a qual, a despeito das decisões tomadas para assumir um estado particular num certo estágio, as decisões restantes a partir deste estado devem constituir uma política ótima (Bellman)” (Silva, 2009, p. 7).

Esse método, ou estratégia de projeto de algoritmos, é uma espécie de tradução iterativa inteligente da recursão e pode ser definido como recursão com o apoio de uma tabela. Como em um algoritmo recursivo, cada etapa do problema é resolvida a partir da solução de etapas menores, ou melhor, de sub-etapas da etapa original. A característica distintiva da programação dinâmica é a tabela que armazena as soluções das várias sub-etapas.

Este método apresenta a desvantagem de ser de implementação pouco prática sem rotinas estabelecidas em softwares usuais e de tempo de computação pouco adequado caso um nível apresente número elevado de nós.

7.2.2 A solução pelo algoritmo de Dijkstra

O algoritmo de Dijkstra (E.W. Dijkstra) é um dos algoritmos que utiliza o princípio da programação dinâmica e que calcula o caminho de custo mínimo entre nós (vértices) de um grafo (Figura 25). Escolhido um nó como raiz da busca, este algoritmo calcula o custo mínimo deste nó para todos os demais nós do grafo. Ele não garante, contudo, a exatidão da solução caso haja a presença de arcos com valores negativos (Universidade Federal de Santa Catarina, [201-]).

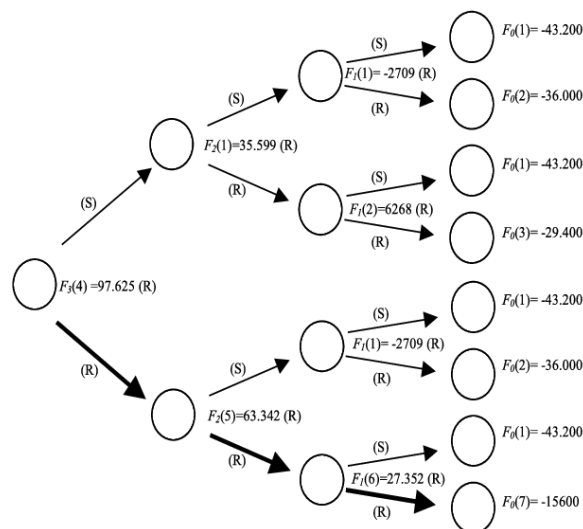
Parte de uma estimativa inicial para o custo mínimo e vai sucessivamente ajustando esta estimativa. Ele considera que um nó estará fechado quando já tiver sido obtido um caminho de custo mínimo do vértice tomado como raiz da busca até ele. Caso contrário ele é dito estar aberto. Como na sequência de passos a seguir:

Seja $G(V,A)$ um grafo orientado e s um vértice de G :

- a) Atribua valor zero à estimativa do custo mínimo do vértice s (a raiz da busca) e infinito às demais estimativas;
- b) Atribua um valor qualquer aos precedentes (o precedente de um vértice t é o vértice que precede t no caminho de custo mínimo de s para t);
- c) Enquanto houver vértice aberto:
 - Seja k um vértice ainda aberto cuja estimativa seja a menor dentre todos os vértices abertos;

- Feche o vértice k ;
- Para todo vértice j ainda aberto que seja sucessor de k faça:
 - Some a estimativa do vértice k com o custo do arco que une k a j ;
 - Caso esta soma seja melhor que a estimativa anterior para o vértice j , substitua-a e anote k como precedente de j .

Figura 25 – Diagrama esquemático do algoritmo Dijkstra



Fonte: Marques, Silva e Leite (2005, p. 755).

7.2.3 A solução por algoritmo genético

Só para efeito ilustrativo será apresentada aqui o método utilizando o algoritmo genético que tem sido explorado em trabalhos recentes publicados sobre otimização de transporte multimodal, como mostrado na revisão de literatura.

Algoritmos Genéticos (*Genetic Algorithms* – GAs) são algoritmos matemáticos inspirados nos mecanismos de evolução natural e recombinação genética. A técnica de Algoritmos Genéticos fornece um mecanismo de busca adaptativa que se baseia no princípio Darwiniano de reprodução e sobrevivência dos mais aptos (Pacheco, 2001).

De acordo com a teoria da evolução das espécies, o princípio de seleção privilegia os indivíduos mais aptos com maior longevidade e, portanto, com maior probabilidade de reprodução, e os com mais descendentes têm mais chance de perpetuarem seus códigos genéticos para as próximas gerações.

Os códigos genéticos constituem a identidade de cada indivíduo e estão representados nos cromossomas. Estes princípios são imitados na construção de algoritmos computacionais que buscam uma melhor solução para um determinado problema, através da evolução de populações de soluções codificadas através de cromossomas artificiais (Goldberg, 1989).

O algoritmo genético segue a seguinte sequência de passos (Figura 26) (Eberhart, 2007):

- a) Caracterização do Problema a ser otimizado (função objetivo);
- b) Representação (binária) das soluções do problema (indivíduo);
- c) Decodificação (construção da solução real) do cromossomo (palavra binária, vetor);
- d) Inicialização da população (a partir de indivíduos criados aleatoriamente);
- e) Avaliação (aptidão – fitness) do indivíduo pela função objetivo;
- f) Utilização dos Operadores Genéticos:

Crossover (cruzamento): os indivíduos selecionados (e reproduzidos na população seguinte) são recombinaados randomicamente através do operador de crossover. O operador de crossover é considerado a característica fundamental do algoritmo genético. Pares de genitores são escolhidos aleatoriamente da população, baseado na aptidão, e novos indivíduos são criados a partir da troca do material genético. Os descendentes serão diferentes de seus pais, mas com características genéticas de ambos os genitores.

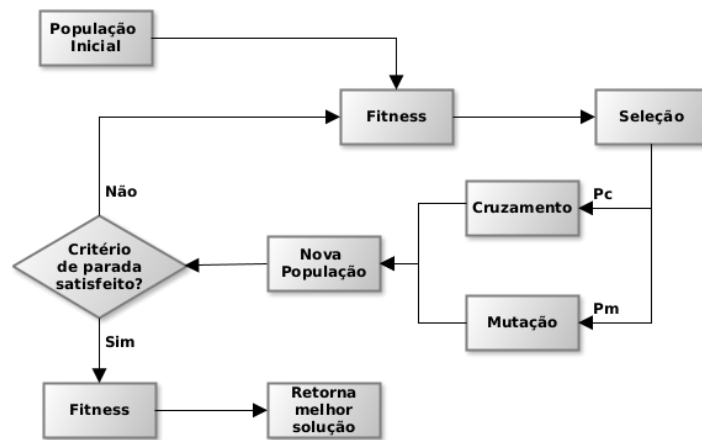
Mutação é o outro operador quando se altera um cromossomo filho com a troca de um dos bits da sequência binária (*string*);

- g) Seleção dos indivíduos da nova população (cinco principais mecanismos de seleção: proporcional, por torneios, com truncamento, por normalização linear e por normalização exponencial);
- h) Volte ao passo 4 até alcançar um critério de parada utilizado.

Critérios de parada:

- a) Número de gerações: total de ciclos de evolução de um AG; ou
- b) Total de indivíduos: total de tentativas em um experimento (tamanho da população x número de gerações).

Figura 26 – Fluxograma do algoritmo genético



Fonte: Kato (2021).

Segundo Sharma *et al.* (2012) para uma rede de roteamento em cálculo do caminho mais curto, ou ótimo, a sequência de cálculo para o algoritmo genético será feita desta forma:

- a) O algoritmo avalia uma população de soluções no espaço de estado;
- b) A cada arco entre nós tem um valor de custo ou distância que é transformado em um número binário;
- c) As populações avaliadas são os caminhos possíveis da origem ao destino, ou seja, seus valores transformados em um string de números binários (4 bits), ou seja, cromossomos;
- d) É calculado o valor da função fitness de cada caminho;
- e) O maior valor numérico da função será o menor custo ou menor caminho, ou caminho ótimo;
- f) No passo seguinte é feito o cruzamento (crossover) onde alguns arcos (4 bits) são permutados entre cromossomos, e novo cálculo da função fitness é realizado;
- g) Em seguida realiza-se a mutação, quando alguns bits são trocados, 0 por 1 e vice-versa, em cromossomos aleatoriamente;
- h) Novo cálculo da função fitness;
- i) Todos os passos de cruzamento e mutação são realizados novamente até que o critério de parada seja alcançado;
- j) O valor ótimo é alcançado pelo caminho de menor custo.

Os algoritmos genéticos têm se destacado em soluções de rede de grande escala, mas tendem a encontrar a uma solução que não é o ótimo global e chegar a soluções que são apenas o ótimo local.

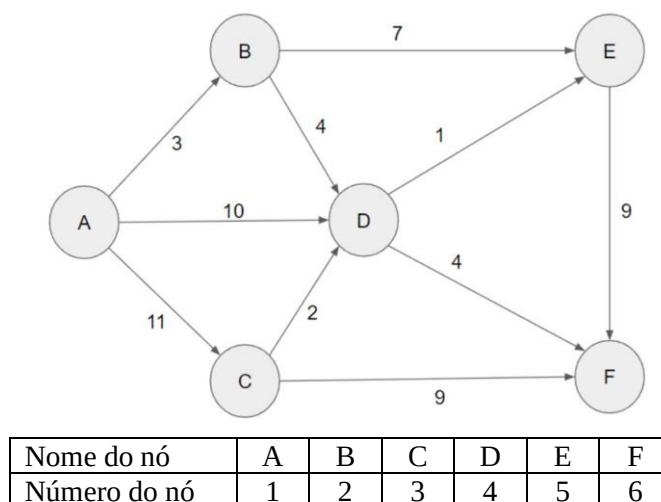
7.3 O caso teste

Considerando a baixa ramificação da rede logística do Arco Norte, em que o ponto de origem tem poucas opções de corredores até um, ou no máximo dois, pontos de destino se deve buscar a solução pelo algoritmo de mais fácil implementação, no caso o Dijkstra. Caso este se torne adequado como ferramenta de solução, e valide o modelo matemático proposto, o objetivo será alcançado. Ressalta-se que o algoritmo Dijkstra reduz sua eficiência operacional com redes de grande escala.

7.3.1 Exemplo de aplicação do algoritmo Dijkstra

Considere a rede de nós da Figura 27 com seus devidos valores (custos) entre cada um dos nós, pretende-se calcular qual o caminho de menor custo:

Figura 27 – Gráfico de vértices e nós



Fonte: Elaborada pelo autor.

Utilizando-se o código Matlab do algoritmo Dijkstra para resolver o caminho mais curto do gráfico de vértices e nós da figura 27. Nesse gráfico “G” é a matriz do grafo, “n1” é o

nó inicial, “n2” é o nó destino, “rota” é a trajetória do caminho mais curto, “custo” é o valor do caminho mais curto.

Os resultados da simulação no Matlab são:

```
clear all; clc;
G = [ 0   3  11  10   0   0;
      0   0   0   4   7   0;
      0   0   0   2   0   9;
      0   0   0   0   1   4;
      0   0   0   0   0   9;
      0   0   0   0   0   0 ];
n1 = 1; n2 = 6;
[custo rota] = dijkstra(G,n1,n2)
>>
custo =    11
rota =     6     4     2     1
```

Se o nó destino fosse “E” tanto “G” quanto “n1” não serão alterados e tem-se:

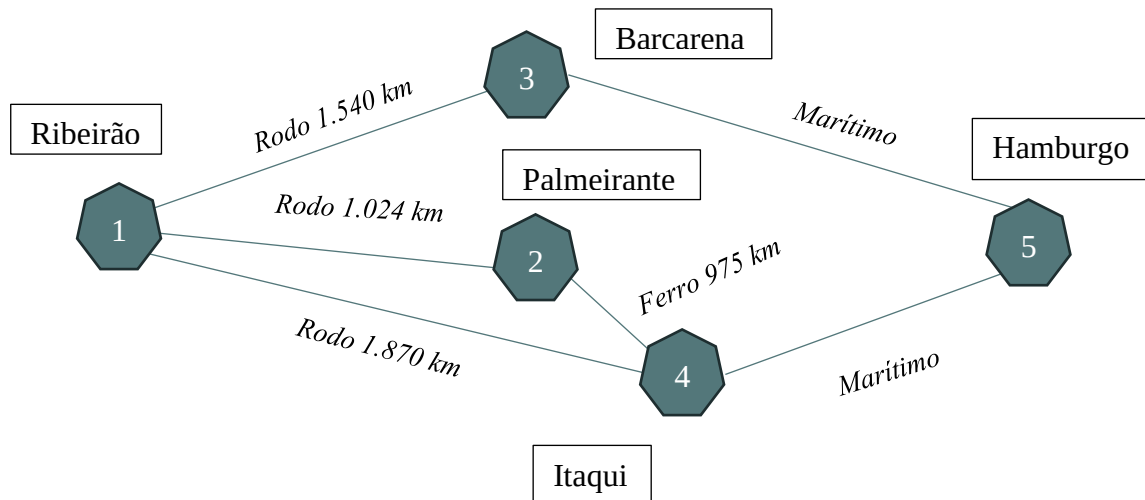
```
n2 = 5; [custo rota] = dijkstra(G,n1,n2)
>>
custo =     8
rota =     5     4     2     1
```

Como pode ser visto, o algoritmo Dijkstra é muito eficiente em redes de poucos nós, então em termos de validação do modelo matemático é o suficiente para nosso objetivo.

7.3.2 Exemplo de aplicação do algoritmo Dijkstra com dados reais

Em nosso modelo, baseado em dados reais, escolhemos um nó inicial que contemple mais de uma alternativa logística (corredores) e mais de um nó de destino (porto), até um porto receptor de grãos, Shangai (China) ou Hamburgo (ALE). O ponto de destino é a cidade de Ribeirão Cascalheira (ou Querência) no nordeste do Mato Grosso, onde a produção de grãos de origem no centro-norte do estado, usualmente, é direcionada para os portos de Barcarena/Belém (PA) ou Itaqui (MA), utilizando um modal único rodoviário ou modal misto rodoferroviário com transbordo em Palmeirante (TO) ou Porto Franco (MA). A topologia em grafo fica da seguinte forma (Figura 28):

Figura 28 – Topologia do caso teste



Nome do nó	Ribeirão	Palmeirante		Barcarena	Itaqui	Hamburgo
Número do nó	1	2		3	4	5

Fonte: Elaborado pelo autor.

Na topologia terrestre é acrescentado mais um arco a partir dos nós de “Itaqui” e “Barcarena”, que representam os custos portuários e de transportes marítimos entre estes portos e os portos de destino mais comuns para cargas de graneis sólidos agrícolas, que são: Hamburgo (Alemanha) e Shanghai (China).

Então, teremos a seguinte representação:

Nó 1- Ribeirão Castanheira (MT)

Nó 2 – Palmeirante (TO)

Nó 3 – Barcarena (PA)

Nó 4 – Itaqui (MA)

Os arcos (caminhos) serão os seguintes:

Arco 1 – 1;4

Arco 2 – 1;2;4

Arco 3 – 1;3

E um último nó (5) que é o porto de destino, Shanghai ou Hamburgo no caso.

Nó 5 – Porto destino

Então os arcos (caminhos) serão os seguintes:

Arco 1 – 1;4;5

Arco 2 – 1;2;4;5

Arco 3 – 1;3;5

Considerando,

- a) os dados de frete conforme metodologia da CONAB (frete rodoviário) e Rumo (frete ferroviário) para efeitos de simplificação;
- b) que um trem de transporte de grãos pode carregar até 11.500 ton (3 locomotivas, 126 vagões na FNS);
- c) que um bitrem rodoviário transporta até 57 toneladas.

Realiza-se, então, uma simulação para o caso do transporte de 10 mil toneladas, o equivalente a aproximadamente um trem ferroviário ou 200 bitrens rodoviários. O valor total da carga pelo preço médio considerado pela CONAB – R\$ 1.784,0: **R\$ 17.840.000,00 (dezessete milhões e oitocentos quarente mil reais).**

- a) Para o trecho Ribeirão Cascalheira/Palmeirante (rodoviário) – neste caso vamos considerar o valor de frete informado pela CONAB para um trecho similar – Querência/Colinas: R\$ 300,00/ton, ou seja, $T = 300,00 \times 10.000 = \textbf{R\$ 3.000.000,00 (três milhões de reais), ou 3.000,00 (x mil reais)}$

- b) Para o trecho Palmeirante/Itaqui (ferroviário): por ausência de dados da operadora ferroviária VLI – responsável por este trecho – pode-se utilizar o frete de referência da operadora ferroviária Rumo para a Malha Central (Goiás):

$$T_{ref} = \text{R\$ } 33,01 \times ton + \text{R\$ } 0,1036 \times dist \times ton$$

$$T_{ref} = \text{R\$ } 330.000 + \text{R\$ } 0,1036 \times 975 \times 10.000$$

$$T_{ref} = \textbf{R\$ 1.010.100,00, ou 1.010,10 (x mil reais)}$$

- c) Para o trecho Ribeirão Cascalheira/ Itaqui (rodoviário): neste caso vamos considerar o valor de frete informado pela CONAB: R\$ 470,00/ton, ou seja, $T = 470,00 \times 10.000$, então: **R\$ 4.700.000,00 (quatro milhões e setecentos mil reais) ou 4.700 mil (x mil reais);**

- d) Para o trecho Ribeirão Cascalheira/ Barcarena (rodoviário): pelos dados da CNT as rodovias que ligam as cidades do nordeste do Mato Grosso a Barcarena/Belém são classificadas como de conservação “ruim”, então como o frete rodoviário para este trecho não está disponível em nenhum banco de dados considera-se o frete praticado neste trecho superior em 20% do frete rodoviário praticado no trecho Ribeirão/Itaqui segundo a CONAB, ou seja, $T = \text{R\$ } 570 \times 10.000,00$, então: **T = 5.700.000,00 (cinco milhões e setecentos mil reais) ou 5.7000 (x mil reais).**

- e) Para o trecho Itaqui/ Hamburgo: US\$ 36.00 ou R\$ 180,00/ton (USDA), ou seja, **T = R\$ 1.800.000,00 (um milhão e oitocentos mil reais) ou 1.800 (x mil reais).**

f) Para o trecho Barcarena/ Hamburgo: US\$ 31.00 ou R\$ 155,00/ton (USDA), ou seja, **T = R\$ 1.550.000,00 (um milhão e quinhentos e cinquenta mil reais), ou 1.550,00 (x mil reais).**

g) Custo de transbordo do modal rodoviário para o ferroviário: **R\$ 22,16/ton ou 221,6 (x mil reais)** (Silva; Miranda, 2019).

Utilizando-se a Eq. 42 para o caso teste:

$$Z = \min \sum_i \sum_k x_{i1,i2}^k c_{i1,i2}^k + \sum_i \sum_k \sum_l y_{i1}^{kl} c_{i2}^{kl} + \sum_i \sum_k x_{in-2,in-1}^{k,l} T_{in-2,in-1}^{k,l}$$

Com as restrições,

$$x_{i0,i1}^k + x_{i1,i2}^l \geq 2y_{i1}^{kl} \quad \forall i, k, l;$$

$$\sum_k x_{i1,i2}^k = 1 \quad \forall i ;$$

$$\sum_k \sum_l y_{i1}^{kl} = 1 \quad \forall i ;$$

$$q \leq f_{i1,i2}^k \quad \forall i, k, l ;$$

$$(i_1, i_2) = 1 ;$$

$$x_{i1,i2}^k, y_{i1}^{kl} \in \{0,1\} \quad \forall i, k, l ;$$

$$q \leq Cp \quad \forall in - 1 .$$

Onde,

i = número de nós da rede, variando de 1 a n ;

k = modal em uso (rodoferroviário, ferroviário, aquaviário);

l = modal alternativo para transbordo;

$c_{i1,i2}^k$ = custo de transporte entre os nós i_1 e i_2 , no modal k ;

c_{i2}^{kl} = custo de transbordo/armazenagem entre os modais k e l do nó i_1 para o nó i_2 ;

$T_{in-2,in-1}^{k,l}$ = custo do tempo de espera do nó i_{n-2} para o nó i_{n-1} (fila de espera no porto de embarque);

$f_{i1,i2}^k$ = capacidade de transporte do modal k entre os nós i_1 e i_2 ;

q = volume (carga a ser transportada a partir de i_1);

C_p = capacidade de embarque no nó i_{n-1} (neste caso irá se utilizar a capacidade estática de armazenagem do Tegram - Itaquí).

Dados:

$$n = 5$$

$k = 1$ (rodoviário)

$k = 2$ (ferroviário)

$k = 3$ (marítimo)

$q = 10$ mil ton

$C_p = 500$ mil ton

$f_{2,4}^2 = 11,5$ mil ton

$f_{1,2}^1 = f_{1,3}^1 = f_{1,4}^1 = 15$ mil ton

$f_{4,5}^3 = f_{3,5}^3 = 70$ mil

$c_{i2}^{1,2} = 221$ mil

$T_{4,5}^{1,3} = 0,20 \times c_{1,4}^1 = 940$

Notas:

- como a carga a ser transportada em rodovias não enfrenta limites de peso, a não ser por limites do próprio veículo, então será considerado como limite teórico um valor 50% maior que a carga a ser transportada em rodovias.
- No caso do transporte marítimo se considerou um navio tipo Panamax, cuja capacidade é de em média 70 mil tons em granéis sólidos (Ventura, [2015]).
- O tempo de espera na fila de embarque foi considerado 2 dias para o porto de Itaquí e zero dias para o porto de Barcarena. O acréscimo no frete foi estimado em 10% do frete total para cada dia de espera.
- No transbordo do modais rodoviário e ferroviário o custo assumido é zero, pois já está embutido no valor do frete marítimo.
- No custo de transbordo $c_{i2}^{1,2}$ a variável y_1 é na verdade a variável $x_{1,2}$

$c_{1,2}^1 = 3.000$

$c_{1,3}^1 = 5.700$

$c_{1,4}^1 = 4.700$

$c_{2,4}^2 = 1.010$

$c_{3,5}^3 = 1.800$

$c_{4,5}^3 = 1.350$

A Eq. 42 se torna então:

$$Z = \min[(3000x_{1,2} + 5700x_{1,3} + 4700x_{1,4}) + (1010x_{2,4}) + (1800x_{3,5} + 1350x_{4,5}) + (221x_{1,2}) + (940x_{1,4})]$$

Os resultados das simulações no algoritmo Dijkstra para cálculo do arco (caminho) de menor custo, considerando porto de Hamburgo (ALE) como (nó) destino:

Matriz G1=

0	3.000	5.700	4.700	0
0	0	0	1.010	0
0	0	0	0	1.800
0	0	0	0	1.350
0	0	0	0	0

Custo calculado: R\$ 5.360,00 x 1.000

Rota de menor custo: 5-4-2-1(Ribeirão-Palmeirante (rodoviário)/Palmeirante-Itaqui (ferroviário)/Itaqui-Hamburgo (marítimo)).

Simulação similar foi realizada para o destino porto de Xangai (CHI), cujos custos de transporte marítimo são similares para o porto de Itaqui e o porto de Barcarena, ou seja, US\$ 40.00. Então:

$$c_{3,5}^3 = 2.000$$

$$c_{4,5}^3 = 2.000$$

Os resultados das simulações no algoritmo Dijkstra para cálculo do arco (caminho) de menor custo, considerando porto de Xangai como (nó) destino:

Matriz G1=

0	3.000	5.700	4.700	0
0	0	0	1.010	0
0	0	0	0	2.000
0	0	0	0	2.000
0	0	0	0	0

Custo calculado: R\$ 6.010,00 x 1.000

Rota de menor custo: 5-4-2-1(Ribeirão-Palmeirante (rodoviário)/Palmeirante-Itaqui (ferroviário)/Itaqui-Hamburgo (marítimo)).

O algoritmo, portanto, calculou o menor custo pelos caminhos:

- Ribeirão-Palmeirante (rodoviário)/Palmeirante-Itaqui (ferroviário)/Itaqui-Hamburgo (marítimo).
- Ribeirão-Palmeirante (rodoviário)/Palmeirante-Itaqui (ferroviário)/Itaqui-Xangai (marítimo).

Concluindo, a aparente vantagem do porto de Barcarena sobre o porto de Itaqui, seja em distância percorrida da origem ao destino, seja em custo de transporte marítimo é superada pelas vantagens do caminho multimodal rodoferroviário Ribeirão Cascalheira/Itaqui, o que prova a robustez do modelo matemático com dados de um sistema real e o algoritmo Dijkstra como bastante adequado aos propósitos do estudo.

8 CONCLUSÃO

Este trabalho foi iniciado com a pesquisa do ambiente histórico socioeconômico da região sob estudo – Arco Norte – e os fatores potencializadores de seu desenvolvimento, sendo avaliado que a produção de grãos para exportação é determinante para seu crescimento econômico, principalmente para o estado do Maranhão que se identificou como a soldadura das áreas produtoras envolvidas, pelo seu potencial logístico, via portos da Baía de São Marcos.

Em seguida, a pesquisa bibliográfica buscou trabalhos publicados para soluções de logística, sendo destaque os artigos publicados pelos acadêmicos da República Popular da China quanto a questão da multimodalidade logística, que a princípio seria uma ótima solução para o escoamento de grãos da região do Arco Norte.

Para a caracterização dos corredores logísticos foi desenvolvido um modelo matemático que representasse as características físicas e econômicas da logística da região e os custos de transporte associados, e que permitissem uma otimização pelo Problema do Menor Caminho na abordagem do custo de transporte. A partir deste modelo, um método de solução de programação linear (algoritmo de Dijkstra) foi identificado como o mais adequado, e validado em simulações computacionais com um caso teste de dados reais da malha logística do Arco Norte.

As simulações atestaram a validade do modelo matemático apresentado e da adequação do uso do algoritmo Dijkstra como ótima opção para as redes logísticas multimodais de transporte de grãos características da região do Arco Norte.

O resultado deste trabalho propicia desenvolvimento de aplicativos de uso comercial, utilizando o modelo matemático apresentado, e que podem ter grande utilidade na tomada de decisão do produtor de grãos tanto para o fechamento de contratos de venda de acordo com o destino, quanto para a contratação de fretes de transporte até o porto marítimo a ser transportada a carga. Um software de uso comercial que possuam interfaces amigáveis com geração de *dashboards*, conexões com base de dados e aplicativos de programação seria o caminho natural para posteriores desenvolvimentos de uma aplicação de uso prático.

A Pesquisa Operacional aliada a engenharia da computação podem ser áreas de conhecimento poderosas para apoiar o agronegócio na tomada de decisões e aumentar sua lucratividade.

REFERÊNCIAS

AGÊNCIA NACIONAL DE TRANSPORTES AQUAVIÁRIO. **Estatístico Aquaviário**. Brasília, DF: Antaq, 2024. Disponível em:

<https://web3.antaq.gov.br/ea/sense/movport.html#pt>. Acesso em: 10 ago. 2024.

AHUJA, R. K. *et al.* **Network flows**: theory, algorithms, and applications. Englewood Cliffs: Prentice-Hall, 1993.

ALGORITMO SEMPYTHON. **Busca em largura**. [S. l.], 2023. Disponível em: <https://algoritmosempython.com.br/cursos/algoritmos-python/algoritmos-grafos/busca-largura/>. Acesso em: 5 fev. 2024.

ASSOCIAÇÃO NACIONAL DOS TRANSPORTADORES FERROVIÁRIOS. **Mapa ferroviário**. Brasília, DF: ANTF, 2024. Disponível em: <https://www.antf.org.br/mapa-ferroviario/>. Acesso em: 2 ago. 2024.

AZEREDO, Thiago. Portos brasileiros. **Globo**, Rio de Janeiro, 10 jul. 2015. Educação. Disponível em: <http://educacao.globo.com/artigo/portos-brasileiros.html>. Acesso em: 10 ago. 2024.

BELLMAN, Richard. **Dynamic programming**. New York: Dover Publications, 2003.

BRANCO, José E. H. *et al.* Otimização logística para o transporte multimodal de safras agrícolas no Brasil com foco no Corredor Nordeste. **Revista Econômica do Nordeste**, Fortaleza, v. 43, n. 1, p. 68-92, jan./mar. 2012b.

BRASIL. Ministério das Comunicações. Empresa Brasil de Comunicação. Novo PAC garante recursos para fortalecer transporte ferroviário no Brasil. **Agência Gov**, Brasília, DF, 4 jan. 2024a. Disponível em: <https://agenciagov.ebc.com.br/noticias/202401/novo-pac-garante-recursos-para-o-transporte-ferroviario-e-acelera-retomada-do-setor-no-brasil>. Acesso em: 2 ago. 2024.

BRASIL. Ministério dos Transportes. Agência Nacional de Transportes Terrestres. **Concessões Ferroviárias**. Brasília, DF: ANTT, 2017. Disponível em: <https://antt-hml.antt.gov.br/concessoes-ferroviarias>. Acesso em: 10 set. 2022.

BRASIL. Ministério dos Transportes. Agência Nacional de Transportes Terrestres. **Anuário do setor ferroviário**. Brasília, DF: ANTT, 2022b. Disponível em: <https://www.gov.br/antt/pt-br/assuntos/ferrovias/anuario-do-setor-ferroviario>. Acesso em: 10 set. 2022.

BRASIL. Ministério dos Transportes. **DNIT publica Mapas Multimodais referentes a 2021**. Brasília, DF, 12 maio 2022a. Disponível em: <https://www.gov.br/dnit/pt-br/assuntos/noticias/dnit-publica-mapas-multimodais-referentes-a-2021>. Acesso em: 8 maio 2024.

BRASIL. Ministério dos Transportes. Infra. **A Ferrovia de Integração Oeste-Leste**. Brasília, DF, 2024c. Disponível em: <https://portal.valec.gov.br/ferrovias/ferrovia-de-integracao-oeste-leste/a-ferrovia-de-integracao-oeste-leste>. Acesso em: 2 maio 2024.

BRASIL. Ministério dos Transportes. Infra. **Ferrovia de Integração Centro-Oeste (FICO)**. Brasília, DF, 2024b. Disponível em: <https://www.infrasa.gov.br/ferrovias-da-infra-s-a/ferrovia-de-integracao-centro-oeste/>. Acesso em: 2 maio 2024.

BRASIL. Ministério dos Transportes, Portos e Aviação Civil. **Corredores logísticos estratégicos: complexo de soja e milho**. Brasília, DF: MTPA, 2017a. v. 1.

BRASIL. Ministério dos Transportes. Observatório Nacional de Transporte e Logística. **Panorama transportes**: setembro 2023. Brasília, DF: ONTL, 2023b. Disponível em: <https://ontl.infrasa.gov.br/publicacoes/panorama-transportes/>. Acesso em: 19 out. 2023.

BRASIL. Ministério dos Transportes. Observatório Nacional de Transporte e Logística. **Anuário Estatístico de Transporte**: movimentação de cargas – aquaviário. Brasília, DF: ONTL, 2023a. Disponível em: <https://ontl.infrasa.gov.br/paineis-analiticos/painel-anuario-estatistico/movimentacao-de-carga-por-modo-de-transporte/aquaviario/>. Acesso em: 19 mar. 2024.

BRASIL. Ministério dos Transportes. **Relatório Executivo 2011 – PNL T**. Brasília, DF: Ministério dos Transportes, 2014. Disponível em: <https://www.gov.br/infraestrutura/pt-br/assuntos/transporte-terrestre/plano-nacional-de-logistica-e-transportes/relatorio-executivo-2011>. Acesso em: 5 fev. 2023.

BRÄYSSY, Olli; GENDREAU, Michel. Vehicle routing problem with time windows. Part I: Route construction and local search algorithms. **Transportation Science**, [S. l.], v. 39, n. 1, p. 104-118, Feb. 2005.

CALDEIRA, Valquíria Cardoso; LOPES, Elisângela Pereira; GASQUES, José Garcia. Infraestrutura logística do arco norte: características, gargalos e propostas. In: VIEIRA FILHO, José Eustáquio Ribeiro; GASQUES, José Garcia. **Agropecuária Brasileira: evolução, resiliência e oportunidades**. Rio de Janeiro: Ipea, 2023. p. 153-173. Disponível em: https://repositorio.ipea.gov.br/bitstream/11058/12242/10/220662_LV_Agropecuária%20Brasileira_Cap.7.pdf. Acesso em: 2 ago. 2024.

CASCETTA, Ennio. **Transportation system analysis: models and applications**. 2th ed. New York: Springer, 2009.

CASTANHEIRA, Nelson P. *et al.* Avaliação dos modais de transporte rodoviário e ferroviário de commodities agrícolas (soja) da região oeste do estado do paraná ao porto de Paranaguá. In: ENCONTRO NACIONAL DE ENGENHARIA DE PRODUÇÃO, 32., 2012, Caxias do Sul. **Anais [...]**. Caxias do Sul: Abepro, 2012. Disponível em: https://abepro.org.br/biblioteca/enegep2012_tn_stp_157_915_20750.pdf Acesso em: nov. 2023.

CENTRO FEDERAL DE EDUCAÇÃO TECNOLÓGICA DE MINAS GERAIS.

Transporte: programação linear. Belo Horizonte: CEFETMG, 2016. Disponível em: https://otimizacao.js.org/transporte_about.html. Acesso em: 2 fev. 2023.

CICKOVA, Zuzana *et al.* Alternative method for solving traveling salesman problem by evolutionary algorithm. **Management Information Systems**, Minneapolis, v. 3, n. 1, p. 17-22, 2008.

COMPANHIA NACIONAL DE ABASTECIMENTO. Mercado de fretes e conjuntura de exportação. **Boletim Logístico**, Brasília, DF, ano 7, p. 1-27, dez. 2023. Disponível em: <https://www.conab.gov.br/info-agro/analises-do-mercado-agropecuario-e-extrativista/boletim-logistico>. Acesso em: 27 dez. 2023.

COMPANHIA NACIONAL DE ABASTECIMENTO. Mercado de fretes e conjuntura de exportação. **Boletim Logístico**, Brasília, DF, ano 6, p. 1-27, dez. 2022. Disponível em: <https://www.conab.gov.br/info-agro/analises-do-mercado-agropecuario-e-extrativista/boletim-logistico>. Acesso em: 27 dez. 2023.

CONGLI, Hao; YIXIANG, Yue. Optimization on combination of transport routes and modes on dynamic programming for a container multimodal transport system. **Procedia Engineering**, [S. l.], v. 137, p. 382-390, 2016. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S187770581600299X>. Acesso em: 15 abr. 2023.

DEMONTIÊ JUNIOR. **Fluxo máximo custo mínimo - min cost max flow**. Campina Grande: UFCG, 2010. Disponível em: http://www.dsc.ufcg.edu.br/~pet/ciclo_seminarios/tecnicos/2010/FluxoMaximoCustoMinimoGrafos.pdf. Acesso em: 10 mar. 2023.

DIAMOND, Jared M. **Armas, germes e aço: os destinos da sociedade humana**. 25. ed. Rio de Janeiro: Record, 2020.

DIAS, Cláudia; ARRUDA, Edilson; BAUMGRATZ, Juan César D'Avila. Otimizando a fila de cirurgias por meio da modelagem matemática. **Brazilian Journal of Development**, Curitiba, v. 6, n. 11, p. 91368-91383, nov. 2020.

DORIGO, Marco; GARAMBELLA, Luca M. Ant colonies for the travelling salesman problem. **Biosystems**, [S. l.], v. 43, n. 2, p. 73-81, 1997.

EBERHART, Russel; SHI, Yuh. **Computational intelligence: concepts to implementation**. Burlington: Morgan Kaufman, 2007.

EMPRESA BRASILEIRA DE PESQUISA AGROPECUÁRIA. **Macrologística da agropecuária brasileira: estudo de caso das exportações de soja e milho**. Campinas: Embrapa Monitoramento por Satélite, 2017. (Cadernos, 118).

EMPRESA DE PLANEJAMENTO DE LOGÍSTICA. **PNL 2035: Plano Nacional de Logística**. [S. l.]: EPL/Ministério da Infraestrutura, 2021. Disponível em:

https://ontl.epl.gov.br/wp-content/uploads/2021/10/PNL_2035_29-10-21.pdf. Acesso em: 27 mar. 2023.

EMPRESA MARANHENSE DE ADMINISTRAÇÃO PORTUÁRIA. **Porto do Itaqui:** movimentação de carga. São Luís: Emap, 2024. Disponível em: <https://www.portodoitaqui.com/porto-do-itaqui/operacoes-portuarias/movimentacao-de-carga>. Acesso em: 10 maio 2024.

FEDERAL HIGHWAY ADMINISTRATION. **Freight analysis framework**. [S. l.], U. S. Department of Transportation, 2023. Disponível em: https://ops.fhwa.dot.gov/freight/freight_analysis/faf/. Acesso em: 8 mar. 2022.

FOX, Richard L. **Optimization methods for engineering design**. Reading (MASS): Addison-Wesley Publishig, 1971.

FUNDAÇÃO PARA O ECODESENVOLVIMENTO DA AMAZÔNIA. **ANA e IBGE lançam inéditas bases de dados hidrográficos do Brasil**. Brasília, DF: Ecoamazônia, 2021. Disponível em: <https://www.ecoamazonia.org.br/2021/09/ana-ibge-lancam-ineditas-bases-dados-hidrograficos-brasil/>. Acesso em: 2 maio 2024.

GOLDBARG, Marco C.; LUNA, Henrique P. L. **Otimização combinatória e programação linear: modelos e algoritmos**. 2. ed. Rio de Janeiro: Elsevier, 2005.

GOLDBERG, David E. **Genetics Algorithms in search, optmization & machine learnig**. Michigan: Addison Wesley Longman, 1989.

HERNANDÉZ, Vladimir Asael Zerón. **Problema de transbordo**. [S. l.: s. n.], 2021. 1 vídeo (22 min). Publicado pelo canal Professor Asael. Disponível em: https://www.youtube.com/watch?app=desktop&v=PVKFJ0NP9_g. Acesso em: 10 fev. 2024.

LIN, Lihua *et al.* A genetic algorithm for the fuzzy shortest path problem in a fuzzy network. **Complex & Intelligent Systems**, Springer, v. 7, p. 225-234, 2021. DOI: <https://doi.org/10.1007/s40747-020-00195-8>.

MALAQUIAS, Neli G. Lisboa. **Uso de algoritmos genéticos para a otimização de rotas de distribuição**. 2006. Dissertação (Mestrado em Engenharia Elétrica) – Universidade Federal Uberlândia, Uberlândia, 2006.

MANIKANDAN, R. Somasundara. Performance analysis of shortest path routing problem using heuristics algorithms. **International Journal of Engineering Research & Technology**, Gandhinagar, v. 3, n. 33, p. 1-6, 2015. Special Issue. Disponível em: <https://www.ijert.org/research/performance-analysis-of-shortest-path-routing-problem-using-heuristic-algorithms-IJERTCONV3IS33011.pdf>. Acesso em: 10 ago. 2024.

MARQUES, Gláucio Marcelino; SILVA, Márcio Lopes da; LEITE, Helio Garcia. Aplicação da programação dinâmica na substituição de equipamentos. **Revista Árvore**, Viçosa, v. 29, n. 5, p. 749-756, 2005. Disponível em: <https://www.scielo.br/j/rarv/a/gZYfS5VpY7yXLVXtS3jqg3r/?format=pdf&lang=pt>. Acesso em: 2 set. 2022.

MORAES NETO, Moacyr M. de FACCIONI FILHO, Mauro. A utilização do algoritmo genético na solução de problemas de otimização de rotas. **Revista Tecnologia da Informação e Comunicação: Teoria e Prática**, Palhoça, v. 1, n. 2, p. 3-16, 2017.

NOVAIS, Antônio Galvão. **Métodos de otimização**: aplicações ao transporte. São Paulo: Edgard Blucher/Transep, 1978.

PACHECO, Marco A. C. P. **Algoritmos genéticos**: princípios e aplicações. [Florianópolis: UFSC/Laboratório de Inteligência Computacional Aplicada, 2001: Disponível em: https://www.inf.ufsc.br/~mauro.roisenberg/ine5377/Cursos-ICA/CE-intro_apost.pdf. Acesso em: 15 maio 2023.

PASSOS, Eduardo J. P. F dos. **Programação linear com instrumento da pesquisa operacional**. São Paulo: Atlas, 2008.

PETROLI, Viviane. Mato Grosso: safra 2021/22 registra 86,4 milhões de toneladas de grãos. **Canal Rural**, Rondonópolis, 8 set. 2022b. Disponível em: <https://www.canalrural.com.br/mato-grosso/mato-grosso-safra-2021-22-registra-864-milhoes-de-toneladas-de-graos/>. Acesso em: 5 nov. 2022.

POVOA, Lucas Venezian *et al.* An approach to business processes decomposition for cloud deployment. In: BRAZILIAN SYMPOSIUM ON SOFTWARE ENGINEERING, 27., 2013, Brasília, DF. **Anais [...]**. Brasília, DF: IEEE, 2014.

RARDIN, Ronald L. **Optimization in operations research**. New Jersey: Prentice-Hall, 1998.

REINA, Daniel R. *et al.* **Algoritmos genéticos con Python**: un enfoque práctico para resolver problemas de ingeniería. Sevilla: Marcombo, 2020.

RODRIGUES, Alberto M. **Custos no transporte rodoviário brasileiro**: semana de logística. 2. ed. Rio de Janeiro: FGV, mar. 2023. Disponível em: <https://repositorio.fgv.br/server/api/core/bitstreams/ab693923-ff47-425c-99c0-1dc6f4af2eae/content>. Acesso em: 10 maio 2024.

ROTA BIOCENICA MATO GROSSO DO SUL. **Brasil dá sinal verde à construção da Ferrovia Transoceânica**. [S. l.], 28 mar. 2024. Disponível em: <https://rotabioceanica.com.br/2024/03/brasil-da-sinal-verde-a-construcao-da-ferrovia-transoceanica/>. Acesso em: 18 abr. 2024.

ROULET, Michel Camacho; CAIXETA-FILHO, José Vicente; YOSHIKAZI, Hugo Tsugunobu Yoshida. A multiple-criteria analysis application for vertical coordination in the transportation of agricultural commodities in Brazil. **Journal of Food Products Marketing**, [S. l.], v. 22, n. 6, June 2016. DOI: <http://dx.doi.org/10.1080/10454446.2015.1121436>.

RUMO LOGÍSTICA. **Tarifas e fretes**. Curitiba, 2024. Disponível em: <https://rumolog.com/documentos/tabela-de-tarifas-e-operacoes-acessorias/>. Acesso em: 20 dez. 2023.

SACHS, Jeffrey. **O fim da pobreza**: como acabar com a miséria nos próximos 20 anos. São Paulo: Companhia das Letras, 2005.

SHARMA, Yagvalka *et al.* Comparison of Dijkstra's shortest path algorithm with genetic algorithm for static and dynamic routing network. **International Journal of Electronics and Computer Science Engineering**, Buldanskahr, v. 1, n. 2, p. 416-425, 2012. Disponível em: <https://citeseerx.ist.psu.edu/document?repid=rep1&type=pdf&doi=712c21e994cbe89d23fbaa7429dcf192a184c81b>. Acesso em: 6 dez. 2023.

SILVA, Ana P. M. da; MIRANDA, Luís Miguel de. Seleção do porto de embarque de produção regional de Mato Grosso pelo corredor da rodovia BR- 242 MT com a aplicação do método TOPSIS. In: CONGRESSO DE ENSINO DE PESQUISA E ENSINO EM TRANSPORTE, 33., 2019, Balneário Camboriú. **Anais [...]**. Balneário Camboriú: Anpet, 2019. Disponível em: https://www.anpet.org.br/anais/documentos/2019/Log%C3%ADstica/Log%C3%ADstica%20Sustentável%20e%20Transporte%20de%20Carga/4_426_AC.pdf . Acesso em: 05 mar. 2024.

SILVA, Antônio Carlos Morais da. **Pesquisa operacional/programação matemática**: Otimização discreta, Programação dinâmica II. São Paulo: USP, 2009. Disponível em: http://wiki.icmc.usp.br/images/7/7c/7bb6dinamica_mari.pdf. Acesso em: 8 abr. 2023.

SILVA, Carlos A. F. da. A Logística da expansão do Madeira na expansão da soja na Amazônia. **Revista GEOgraphia**, Rio de Janeiro, ano 7, n. 14, p. 75-92, 2006.

TEGRAM INSTITUCIONAL. **O terminal de grãos do Maranhão**. São Luís, 2024. Disponível em: <https://tegram.com.br/sobre/>. Acesso em: 10 mar. 2024.

UNIVERSIDADE DE SÃO PAULO. Instituto de Matemática e Estatística. **Algoritmos e estruturas de dados para hiperárvores de componentes de imagens em níveis de cinza**. São Paulo: USP, 2021. Disponível em: <https://www.ime.usp.br/~pf/algori>. Acesso em: 10 ago. 2022.

UNIVERSIDADE FEDERAL DE SANTA CATARINA. **Algoritmo de Dijkstra para cálculo do caminho de custo mínimo**. Florianópolis, [201-]. Disponível em: <http://www.inf.ufsc.br/grafos/temas/custo-minimo/dijkstra.html>. Acesso em: 8 abr. 2023.

US DEPARTMENT OF AGRICULTURE. Agricultural Marketing Service. Brazil soybean transportation. **A quarterly Publication of the Agricultural Marketing Service**, Washington, DC, July/Sep. 2023. Disponível em: https://www.ams.usda.gov/sites/default/files/media/Brazil_Quarter3_2023.pdf. Acesso em: 19 set. 2023.

VALEC. **Estudo de viabilidade técnica econômica ambiental – EVTEA - Ferrovia Norte Sul**. Brasília, DF, 2022. Disponível em: <https://portal.valec.gov.br/ferrovias/ferrovia-norte-sul/estudos-de-viabilidade-evtea>. Acesso em 21 fev. 2023.

VENTURA, M. **Navios graneleiros**. [2015]. Dissertação (Mestrado em Engenharia Naval e Oceânica) – Instituto Superior Técnico, Lisboa, [2015]. Disponível em:

<http://www.mar.ist.utl.pt/mventura/Projecto-Navios-I/PT/1.4.3-Navios%20Graneleiros.pdf>. Acesso em: 6 mar. 2024.

VIEIRA FILHO, José E. R. Expansão da fronteira agropecuária brasileira: desafios estruturais logísticos. **Boletim Regional, Urbano e Ambiental**, Brasília, DF, n. 12, p. 37-48, 2015.

Disponível em:

https://repositorio.ipea.gov.br/bitstream/11058/6491/1/BRU_n12_Expansão.pdf. Acesso em: 2 mar. 2023.

XU, Xiang *et al.* Exploring the optimization of synchromodal transportation path under uncertainties. **Journal of Marine Science and Engineering**, [S. l.], v. 11, n. 2, p. 577, 2023. DOI: <https://doi.org/10.3390/jmse11030577>

YANG, Zhihui *et al.* Application of genetic algorithm in modelling of shortest path problem. In: CHINESE AUTOMATION CONGRESS, 2020. **Anais [...]**. Shanghai: [n. e.], 2020, p. 3447-3450.

ZHANG, Yong Gul *et al.* Path optimization model and algorithm of multimodal transport for long and bulky cargo. **Journal of Traffic and Transportation Engineering**, [S. l.], v. 14, n. 1, p. 75-83, 2014. Disponível em: https://www.researchgate.net/publication/288144165_Path_optimization_model_and_algorithm_of_multimodal_transport_for_long_and_bulky_cargo. Acesso em: 26 maio 2023.

ZHOU, Xiangfeng; DU, Juan. Research on optimization of logistics transportation mode based on multimodal transportation. **Advances in Economics, Business and Management Research**, New York, v. 56, p. 320-322, 2018.

APÊNDICES

APÊNDICE A – HISTÓRICO POLÍTICO-ECONÔMICO DA REGIÃO DO ARCO NORTE

1 CONTEXTO HISTÓRICO POLÍTICO-ECONÔMICO DA REGIÃO DO ARCO NORTE

O Brasil, neste primeiro quartil do século XXI, ainda apresenta graves problemas estruturais socioeconômicos e enormes desafios para que possa vir a ser reconhecido como um país desenvolvido socioeconomicamente.

Além das assimetrias existentes em relação às economias desenvolvidas, apresenta internamente relações de desigualdades entre regiões que reproduzem o modelo Norte-Sul de relações internacionais. No caso doméstico, entre a regiões Centro-Sul e a regiões Norte/Nordeste, como é possível de acontecer em países com nossas dimensões (Arrighi, 1997).

Os fatos políticos e econômicos do século XIX que mudaram de forma impactante as economias do hemisfério norte – mercantilismo, industrialização e tecnologias disruptivas – iniciaram o processo de mudança do eixo econômico mundial da Inglaterra para o Novo Mundo (Estados Unidos da América – EUA), com as fricções naturais que resultaram na grande Depressão Econômica e nas duas Guerras Mundiais no início do século XX, e o posterior *boom* econômico das sociedades ocidentais do pós-guerra.

Decorrido um século destas mudanças, a sociedade brasileira ainda busca os caminhos que a conduza ao estágio de desenvolvimento econômico sustentável e com um diferencial que possa assimilar suas vantagens competitivas e suas características inerentes, conforme no aponta Furtado (2002a): nada choca tanto o observador da economia brasileira como a contradição entre o formidável potencial de recursos do país e o baixo nível de desenvolvimento alcançado por este até o presente. O Brasil é um mundo totalmente criado pela extensão do capitalismo industrial; não é herdeiro de nenhuma velha civilização como o são outras grandes nações hoje denominadas subdesenvolvidas.

O mundo atual presencia uma nova mudança da ordem mundial com o deslocamento do eixo econômico das economias do Atlântico Norte para o Oriente, principalmente pelo surgimento de uma nova superpotência nos últimos 30 anos: a China (Dalio, 2022). No oriente estão os países mais populosos do mundo: China e Índia, importadores líquidos de energia e alimentos, e neste contexto o Brasil esta e poderá ser um dos

países mais beneficiados por esta mudança geopolítica, caberá ser eficiente na produção e transporte dos produtos demandados por este novo grande mercado.

Neste aspecto, há a coexistência de três setores econômicos que estabelecem dependência entre si e criam os desequilíbrios regionais acima citados: a economia de subsistência, o núcleo industrial voltado para a substituição de importações sem inovações tecnológicas e o setor exportador mineral e agropecuário. Esta heterogeneidade estrutural interna é uma das características essenciais do nosso subdesenvolvimento. Para a região do Arco Norte o terceiro setor é o que mais se apresenta em convivência com a economia de subsistência.

Embora haja a carência de investimentos privados e uma baixa capacidade econômico-financeira dos entes federativos para conduzirem investimentos próprios, a região se encontra no limiar de uma oportunidade histórica de desenvolvimento econômico por conta de uma conjunção de choques simultâneos como por exemplo: energia renovável abundante, disponibilidade de reservas de hidrocarbonetos; desenvolvimento da infraestrutura logística com investimentos privados, e crescimento duradouro e sustentável da produção agropecuária e mineral, combinados com o início de um longo ciclo de altos preços de *commodities* agrícolas e minerais. Estes fatores bem conduzidos poderão proporcionar uma transformação na estrutura produtiva da região com as conseqüentes e desejadas melhorias econômicas sociais.

O estudo divulgado pelo banco Goldman Sachs em 2003 sobre o futuro de grandes economias em desenvolvimento, o já celebre “*Dreaming with BRICS: The path to 2050*” (Wilson, 2003), previa um longo horizonte de crescimento econômico e de renda per capita para o Brasil até 2050 o posicionando como uma das seis maiores economias do mundo neste prazo, suplantando países desenvolvidos como França, Itália e Alemanha, desde que algumas condições macroeconômicas e de políticas públicas estruturais fossem mantidas ou resolvidas. Passados quase vinte anos desta previsão muito não se concretizou, em parte por conta de crises econômicas externas e fatores políticos internos, mas no início da década de 2020, uma das previsões parece estar alavancando um novo longo ciclo de crescimento sustentado: de acordo com este estudo o crescimento da renda de países populosos como China e Índia iriam gerar uma mudança interna nos padrões de consumo alavancando a demanda e preços de *commodities*, e o Brasil parece estar sendo um dos maiores beneficiários deste fato, com as exportações de minérios e produtos agropecuários para aqueles países.

Pelo fato de que as crises econômicas sucessivas que vem surgindo a nível mundial e as próprias crises econômicas domésticas é importante que não percamos de vista o fator histórico, ou seja nosso passado recente, pois “grandes crises não são decorrências de pequenos

erros ou de eventos isolados. São a consequência de uma sucessão de erros coletivos, cometidos em vários momentos, com efeitos cumulativos” (Pastore, 2021, p. 139), e para que tenhamos a capacidade de diagnosticar nossos problemas uma análise histórica econômico-política preliminar da região é conduzida, do período do século XIX ao século XXI, a fim de que oriente a estratégia a ser proposta para evitar repetição de erros ocorridos no passado.

A posição que o Brasil atingiu como país superavitário e exportador em petróleo e alimentos (energia para máquinas e energia para humanos) só tem similar atualmente com a superpotência mundial EUA, o que pode torná-lo peça-chave no jogo geopolítico mundial, assumindo o papel de potência energética. E acrescentamos ainda: ser fonte de alimentos.

Dos estados da região do Arco Norte analisados são relevantes aqueles que fazem parte da cadeia logística da exportação de grãos.

A região em foco tem uma história econômica bem diversificada com ciclos de expansão e crise nos estados do Pará e Maranhão ao longo de todo o período observado. No estado do Piauí há uma quase estagnação econômica permanente.

O estado do Tocantins, por ter existência política bem recente, criado pela Constituição Federal de 1988, com o desmembramento do estado de Goiás será objeto desta análise histórica junto com o estado de Goiás.

O estado de Mato Grosso, será visto em dois momentos, antes e depois do desmembramento em duas unidades, sendo que o Mato Grosso do Sul não será aqui visto, por não estar na região do Arco Norte.

Os estados do Amazonas, Roraima, Rondônia, Amapá e Acre terão suas análises econômicas vista de forma única. O estado da Bahia não faz parte desta análise por não ser um corredor logístico estratégico apesar de relevante produção de grãos na região Oeste (Barreiras/Luís Eduardo Magalhães).

O século XIX é escolhido como ponto de partida para análise porque a partir das transformações que aconteciam no mundo com a revolução industrial no final do século XVIII na Europa, e a abertura dos portos no Brasil após a chegada da família imperial portuguesa fugindo das guerras napoleônicas, o país inicia a transição de uma economia de “capitalismo comercial” ou mercantilismo para “capitalismo industrial” com a produção manufatureira e com o fim do período colonial se tornar uma comunidade nacional autônoma, mesmo que este processo ainda não esteja completado (Prado Júnior, 2004).

Este movimento beneficia inicialmente as regiões agrícolas do Nordeste mais tradicionais como as províncias marítimas que se estendiam do Maranhão até a Bahia. Com a mudança da capital do império para o Rio de Janeiro e a perda de autonomia das províncias do

Norte que se comunicavam diretamente com Lisboa, inicia-se o declínio desta região e a ascensão da região Sul/Sudeste.

A região do Nordeste brasileiro, ou a região político-econômica da sua costa meridional, tem se apresentado com os mais baixos indicadores econômicos e sociais do país, desde o último quartil do século XIX, ou seja, desde fim do período colonial, do regime monárquico e a abolição da escravatura, até os dias atuais. Após um longo período de subordinação aos interesses da economia portuguesa, com decisões ditadas por Lisboa, e uma estrutura agropecuária de exportação com a monocultura da cana de açúcar e do algodão (baseadas em *plantations*), além de uma pecuária extensiva no seu interior, que servia com hinterlandia para a região açucareira, a região mineira e a atividade econômica da província do Maranhão e Grão-Pará, os eventos do século XIX – mudança da família real para o Brasil, proclamação da Independência de Portugal, abolição da escravatura e a proclamação da República – afetaram profundamente a economia desta região, com a perda de seu dinamismo até as décadas finais do século XX, e início do século XXI.

As economias dos estados das regiões Norte e Centro-Oeste eram baseadas no extrativismo mineral e vegetal e sofreram oscilações em função dos ciclos econômicos vividos pelo país nestes últimos dois séculos – ciclo da borracha, ciclo do ouro etc. (Prado Júnior, 2004). Mas, recentemente, ao final do século XX e o início do século XXI, estas regiões iniciaram um processo de dinamismo econômico com crescentes atividades no setor agropecuário e na mineração industrial, se tornando uma nova fronteira de desenvolvimento do país, mas ainda com todas suas contradições sociais.

A análise mais detalhada será feita sobre a economia do estado do Maranhão por ser um consenso entre especialistas e estudiosos que este estado pela sua privilegiada localização geográfica e vantagens naturais, além de ter uma logística robusta voltada para a exportação e que está se consolidando como a “soldadura” do Arco Norte, o que de fato já havia ocorrido em parte dos séculos XVIII e XIX.

1.1 Maranhão

Criado em 1534 no período das Capitanias Hereditárias por D. João III de Portugal, teve sua primeira tentativa de formação política e geográfica neste episódio quando foram criadas as capitanias Maranhão 1 e Maranhão 2 doadas para João de Barros e Fernando Álvares de Andrade. Esta tentativa de ocupação física do espaço geográfico foi repelida pelos franceses, então ocupantes, com seus aliados nativos tupis (Caldeira, 2017).

Em 1621, Felipe III divide a colônia de Portugal na América em dois estados, o “Maranhão” com capital em São Luís que abrangia desde o Cabo de São Roque no atual estado do Rio Grande do Norte até o Amazonas ou Amazônia, ou até os limites expandidos do Tratado de Tordesilhas, e o restante era o “Brasil” com capital em Salvador. Portanto, o estado do Maranhão era politicamente ligado à Coroa em Lisboa e esta situação perdurou até 1755 quando o “Maranhão” foi incorporado ao “Brasil”. Somente em 1920 o estado do Maranhão tomou a configuração político-geográfica atual restrita aos limites dos rios Parnaíba, Tocantins e Gurupi (Rolim Filho, 2017).

Desde sua criação vários fatores dificultaram a ocupação do seu território e o desenvolvimento de sua economia: a agricultura baseada em técnicas rudimentares, a luta entre colonos e missionários, a mão de obra indígena, e a ausência de moeda corrente que ocasionava o escambo de mercadorias – somente no século XVIII as primeiras moedas começaram a circular no território.

Do último quartel do século XVII ao começo do século XIX, a economia nordestina sofreu um longo processo de atrofiamento (com queda da renda per capita) e com a consolidação no século XIX de um sistema econômico que viria a ser sua característica até o final do século passado causando uma permanente estagnação (Furtado, 2002b).

Até o ano de 1755, não se conhecia gênero algum que se exportasse da Capitania do Maranhão, exceto umas insignificantes partidas de solas pertencentes a um negociante chamado Lourenço Belfort; e alguma diminuta porção de algodão em fio, ou em rama (Carreira, 1988).

A criação da Companhia do Comércio do Grão-Pará e Maranhão pelo Marquês de Pombal em meados do século XVIII que incentivava o cultivo do arroz, do algodão e do couro com os objetivos de exportação, e disponibilizava algo novo – o crédito ao produtor – começou a mudar o panorama da antiga colônia subdesenvolvida e é apontada por muitos como o “marco zero” da economia maranhense.

A Companhia que detinha o monopólio de navegação, comércio e tráfico de escravos destinados ao Maranhão e Pará teve o prazo de duração fixado em vinte anos, contados da data da largada da primeira frota de Portugal, que só se verificou em 1758, por terem sido destruídas as instalações, com perda de mercadorias, pelo terremoto de Lisboa. O decreto que extinguiu a empresa é de 5 de janeiro de 1778 (Carreira, 1988).

Num primeiro momento desfavorável à colonização, a posição geográfica maranhense, contudo, favoreceu o ciclo de maior prosperidade que o Maranhão viveu, pode-se dizer, até os dias atuais, durante o auge do ciclo da indústria do algodão. O fato de a geografia

favorecer o contato com o “centro do mundo” ocidental que emergia, a Europa, favorecia, portanto, a corrente de comércio, já se caracterizando então um diferencial importante para aquele período de prosperidade.

O próximo momento de forte impacto na economia maranhense ocorreria mais recentemente, nos anos 1970-1980, com o advento dos grandes projetos (Alcoa-Alumar e Estrada de Ferro Carajás-Porto da Ponta da Madeira, e na sequência, o polo siderúrgico de Açailândia, na zona de passagem do minério de ferro da Vale) (Zonta; Trocate, 2015) viabilizado exatamente pelo diferencial geográfico do território projetado ao hemisfério norte. Estes pesados investimento impactariam fortemente o PIB estadual, contudo, há um debate acadêmico, todavia atual e que carece ser reexaminado a luz de uma nova realidade, sobre a conformação de uma “economia de enclave”, voltada para a exportação, que pouco ou nada agregaria de riquezas ao Estado.

Antes da Companhia, não havia nem indústria, nem cultura, nem exportação de gêneros, e os rendimentos da Coroa, ainda no ano de 1760 e 1761, não eram mais que 11.448.693 réis. Após a Companhia surgiu a indústria, o comércio e a exportação, de sorte que, nos anos de 1776 e 1777, os rendimentos da Coroa chegaram a 40.370.000 réis. Com o registro que em 16 de outubro de 1777 haviam sido carregados 15 navios com gêneros diversos, no montante de 275.864.945 réis (algodão, arroz, couros, entre outros) (Carreira, 1988).

Ressalte-se que, desde sua gênese, a economia local foi baseada na grande produção mercantil e escravista, voltada para o mercado internacional de matérias primas e alimentos (Barbosa, 2012). Com o início da Revolução Industrial e a criação da máquina de tear na Inglaterra, e a cultura do algodão em suas terras, o Maranhão entrava em seu 1º ciclo de prosperidade a partir de 1768 (Rolim Filho, 2017).

No final do período colonial existiam três centros econômicos no Brasil: a faixa litorânea açucareira, a região mineira e o Maranhão. Destes “o único que conheceu efetiva prosperidade” (Furtado, 2002b, p. 90) foi o Maranhão, chegando a receber no porto de São Luís 150 navios por ano e exportando um milhão de libras esterlinas anuais. O PIB per capita de US\$ 112 era quase o dobro da colônia portuguesa toda e similar ao da colônia norte-americana (Rolim Filho, 2017). Nem mesmo a extinção da Companhia Grão-Pará e Maranhão em 1778 interrompeu este ciclo de prosperidade pois a economia maranhense já havia alcançado a experiência de integração ao mercado internacional e acumulação de capital. Neste período, ocorreu o que foi chamada de “falsa euforia do fim da época colonial” (Furtado, 2022b, p. 89).

Costa (*apud* Barbosa, 2012) afirma que a partir de 1822 “a colônia ao se tornar independente politicamente manteve a ‘situação colonial’ – escravismo, estrutura tradicional de produção e dependência ao mercado internacional”.

Em meados do século XIX o quadro já era outro, com a economia local próxima da ruína com problemas que não foram sendo resolvidos ao longo do tempo: vias de comunicação difíceis, falta de mão de obra, baixa qualificação profissional e a ausência de gestão adequada dos negócios.

A mão de obra escrava africana, que havia substituído a escrava indígena, começava a sofrer as restrições do comércio escravagista imposto pela Inglaterra, mas ainda assim, por fatores exógenos como a Guerra da Secessão Americana (1861-1865), o modelo econômico de monocultura exportadora do algodão ainda daria seu último suspiro. A partir daí alguns fatores ferem de morte o modelo agroexportador no estado: o fim da Guerra da Secessão, a Abolição da Escravatura, o “encilhamento” de Rui Barbosa na República recém-proclamada e o ciclo da Borracha na Amazônia.

O primeiro trouxe de volta ao mercado internacional o algodão norte-americano com melhor qualidade e cultivado com técnicas mais avançadas, o segundo e o quarto criaram um colapso na oferta da mão de obra local com a perda da mão de obra africana e a fuga da população livre para o novo Eldorado com o ciclo da borracha na Amazônia. E por fim, a política econômica de Rui Barbosa que desvalorizou acentuadamente a moeda causando problemas aos empresários locais endividados em libra esterlina.

Após o fim do ciclo algodoeiro o Maranhão ainda viria a experimentar um novo ciclo de monocultura exportadora com a cana de açúcar, graças aos esforços do governador do Maranhão a partir de 1846 Joaquim Francisco de Sá. Já em 1864, o estado possuía 420 engenhos em atividade e em 1870 este número subiria para 500 engenhos, com uma produção que chegou a um milhão de sacas de açúcar/ano. O açúcar era então consumido internamente, abastecia o Pará e o Ceará, e ainda se exportava o excedente ao exterior, chegando os embarques internacionais a cem mil sacas em 1881 (Viveiros, 2019). Mas esta cultura também era baseada em técnicas agrícolas ultrapassadas, que nem o arado utilizava, baseada exclusivamente na mão de obra escrava, e que com o advento da Abolição em 1888 foi ferida de morte.

No século XIX, a economia brasileira tinha três setores principais: açúcar e algodão com a vasta economia de subsistência ligada a ela, a economia da região sul baseada em subsistência e a economia cafeeira que surgia em São Paulo, Minas Gerais e Rio de Janeiro (Furtado, 2002b). Esta última seria o grande motor das mudanças que viriam a ocorrer na economia brasileira.

Com a crise das economias do açúcar e do algodão, o crescimento da cultura cafeeira na região Sudeste, já baseada na mão de obra de imigrantes europeus, deslocava em definitivo o eixo econômico para esta região com o início da industrialização de São Paulo (Barbosa, 2012).

A economia cafeeira do oeste paulista lançou as raízes da industrialização de São Paulo, que concomitantemente modernizava sua agricultura, e que teve: no conhecimento, na inovação, nas instituições, no empreendedorismo e nas políticas [públicas] de apoio as alavancas de seu desenvolvimento econômico. Ao Maranhão, faltou estes componentes (Barbosa, 2012).

Antes de findar o século XIX houve ainda uma tentativa de industrialização tardia com a implantação de um parque têxtil em São Luís e em algumas cidades do interior com 16 unidades fabris no total, e considerando ainda outras atividades não têxteis o total chegava a 27 fábricas, o que o tornava o segundo maior polo industrial do país.

Pereira Filho (2020, p. 183) cita Viveiros quando se refere a industrialização do Maranhão na época: “Em 1895 ocupava o primeiro lugar entre os estados industriais o de Minas Gerais, com 37 fábricas, e o segundo, Maranhão, com 16. Estávamos acima da Capital Federal, e dos estados do Rio de Janeiro, Bahia e São Paulo, que tinham respectivamente 15, 14, 12 e 10”.

Mas, as políticas econômicas implantadas pelo ministro Rui Barbosa (Encilhamento) no período republicano e a falta de investimentos na modernização de fábricas com o maquinário importado da Inglaterra resultaram num progressivo fechamento de fábricas até o golpe final nos anos 30 com a Grande Depressão.

Após a Grande Depressão e a Revolução de 1930, a industrialização no Sudeste entra em ritmo acelerado pela necessidade de substituição de importações de manufaturados devido a ocorrência dos conflitos na Europa, e então a economia local inicia um longo processo de subordinação econômica ao centro produtor do Sudeste, e a de São Paulo em particular, com uma reprodução de relações econômicas tipo centro-periferia, reproduzindo-se dentro de um mesmo país (Pereira Filho, 2020).

No século XX surge um novo produto agrícola, a amêndoa e o óleo de babaçu, de origem extrativista cuja óleo tinha uma demanda internacional crescente no período das grandes guerras mundiais. E novamente um parque fabril foi criado em torno de um produto para fins de exportação e um pequeno consumo interno. Esta cadeia econômica era alimentada por subsídios governamentais para a instalação de fábricas e exploração da mão de obra rural que realizava a coleta da amêndoa (quebradeiras de coco). Este modelo foi se esgotando até ser

inviabilizado pela entrada de produtos similares mais competitivos no mercado e o fim da política de subsídios, ocorrendo a derrocada final na década de 70 do século XX.

Durante todo o período republicano no século XX o Maranhão foi governado por grupos políticos que mantiveram o controle das decisões no estado por longos períodos, com destaque partir de 1946 para dois grupos em questão. O primeiro sob o comando político de Vitorino Freire de 1946 a 1965 que sem nunca de fato ter exercido o comando do executivo do estado o governou com plenos poderes. O segundo grupo foi comandado por José Sarney, que chegou até a presidência da República, mas iniciou seu domínio em 1966 e permaneceu no poder até o início do século XXI, quando seu grupo se fraturou por divergências internas.

Este modelo de domínio político representou um período de superexploração da mão de obra (agora livre) com a manutenção de profundas desigualdades sociais e concentração de renda que caracterizaram o período colonial e monárquico, e que compensava a baixa competitividade da economia e mantinha o poder nas mãos de um pequeno grupo.

Neste período, com exceção do Porto do Itaqui na década de 60 e da construção e pavimentação da rodovia São Luís/Teresina não houve projetos públicos estruturantes que mudassem a fisionomia da sua economia, mantendo por todo este período índices ultrajantes de analfabetismo, baixa escolaridade, má qualificação da mão de obra e índices de desenvolvimento pífios que o levaram aos últimos lugares de classificação entre os estados brasileiros e a de menor renda per capita do país.

E finalmente, no quartil final do século XX e início do século XXI houve o surgimento de grandes plantas exportadoras minero-metalúrgicas (ferro e alumínio) baseadas na abundância do minério de ferro e bauxita no estado vizinho do Pará e as vantagens logísticas dos portos na baía de São Marcos. Esta nova fase marca a chegada do grande capital à economia do estado com unidades fabris com características de enclave econômico, com baixa interação com a economia local e sem criar os desdobramentos que seriam naturais, como a criação de um parque industrial para a produção de manufaturados. De positivo restou além de algum dinamismo econômico a ilha de São Luís o início de uma atividade portuária intensa que foi mais tarde acrescida da movimentação de granéis líquidos (combustíveis) e granéis sólidos agrícolas (grãos e fertilizantes).

A economia passou a ser impulsionada pela atividade portuária da Baía de São Marcos e pelas vantagens competitivas da infraestrutura logística ligadas a ela. O agronegócio, agora com modernas técnicas agrícolas, ao sul do estado passa a ter papel relevante crescente na produção de soja, milho e algodão contribuindo para uma retomada da economia agrícola em larga escala no estado, mas como no passado com forte conexão com o comércio

internacional e sem acréscimo considerável de valor agregado ao produto exportado. Este dinamismo portuário/industrial já posiciona o município de São Luís como uma das principais do país, como mostra a pesquisa por municípios divulgada em 2021 (Figura 1) (Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística, 2021).

Figura 1 – PIB per capita municípios brasileiros – 2021

2002		2021	
Brasília (DF)	2,93	Brasília (DF)	2,19
Vitória (ES)	2,82	Vitória (ES)	2,01
São Paulo (SP)	2,10	São Paulo (SP)	1,58
Rio de Janeiro (RJ)	1,87	Porto Alegre (RS)	1,29
Porto Alegre (RS)	1,56	Rio de Janeiro (RJ)	1,26
Curitiba (PR)	1,52	Curitiba (PR)	1,18
Florianópolis (SC)	1,41	Cuiabá (MT)	1,13
Manaus (AM)	1,39	Manaus (AM)	1,08
Belo Horizonte (MG)	1,21	Florianópolis (SC)	1,08
Recife (PE)	1,15	Belo Horizonte (MG)	0,99
Goiânia (GO)	1,15	Goiânia (GO)	0,91
Cuiabá (MT)	0,98	Campo Grande (MS)	0,90
Boa Vista (RR)	0,98	Porto Velho (RO)	0,86
Aracaju (SE)	0,98	Recife (PE)	0,78
Palmas (TO)	0,91	Palmas (TO)	0,78
Campo Grande (MS)	0,82	São Luís (MA)	0,77
Macapá (AP)	0,81	Boa Vista (RR)	0,73
Natal (RN)	0,79	Teresina (PI)	0,65
João Pessoa (PB)	0,78	Aracaju (SE)	0,65
Rio Branco (AC)	0,78	Fortaleza (CE)	0,64
Porto Velho (RO)	0,78	Natal (RN)	0,64
São Luís (MA)	0,74	João Pessoa (PB)	0,64
Salvador (BA)	0,73	Maceió (AL)	0,63
Belém (PA)	0,71	Rio Branco (AC)	0,62
Fortaleza (CE)	0,71	Macapá (AP)	0,59
Maceió (AL)	0,60	Belém (PA)	0,53
Teresina (PI)	0,56	Salvador (BA)	0,51

Fonte: Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística (2021).

As perspectivas de instalação no estado de indústrias de base como a siderurgia e do refino de petróleo poderão elevar o estado para uma posição nacional similar ao que o país já ocupa no cenário mundial: produtor/exportador de commodities agrícolas e minerais e de produtos industrializados, ocupando um patamar intermediário na hierarquia econômica nacional.

Dentro das macro políticas surgidas durante o período do regime militar nascido em 1966, onde estavam inseridas a de segurança nacional com a criação de uma indústria aérea e aeroespacial a partir do Instituto Tecnológico da Aeronáutica (ITA) em São José dos Campos (SP) e a indústria aeronáutica Empresa Brasileira de Aeronáutica S.A (EMBRAER) na mesma

cidade onde está sediada o ITA, surge o projeto da construção de um centro de lançamento de foguetes no país, e por suas condições geográficas excepcionais, dada a proximidade com a linha do Equador, a cidade de Alcântara, na Baía de São Marcos no Maranhão é a escolhida.

O Centro de Lançamento de Alcântara (lançamento de foguetes espaciais) foi então criado no início da década de 80 do século XX com o apoio de técnicos e oficiais da aeronáutica de origem no ITA, mas passados quase meio século de sua implantação ainda não se mostrou capaz de fazer uma inserção tecnológica no estado.

Se bem conduzido por políticas governamentais poderá se tornar um polo de produção e disseminação tecnológica a partir do Acordo de Salvaguardas Tecnológicas (Decreto nº 10.220/2020)¹ assinado com os Estado Unidos da América em 2020 (que assegura o acesso e uso das mais modernas tecnologias espaciais com origem no EUA), e a criação do curso universitário de Engenharia Aeroespacial na Universidade Federal do Maranhão (Universidade Federal do Maranhão, 2023). O desenvolvimento de tecnologia própria advinda dos centros de pesquisas acadêmicos em conjunção com a instalação de um polo industrial tecnológico poderá criar um momento na economia local e poderá contribuir para lançar as bases de um novo modelo econômico.

Uma outra vantagem encontrada na economia do estado é o percentual relativamente baixo de participação da capital São Luís no Produto Interno Bruto (PIB) estadual (33%), em contraste com outras capitais do Nordeste. A economia tem uma maior concentração nos três núcleos econômicos do estado, além da capital tem o polo de Imperatriz (logística e indústria) e de Balsas (agronegócio), mesmo assim estes três polos não ultrapassam os 45% da riqueza estadual (Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística, 2023).

Enfim, um olhar nesta história de mais de dois séculos “encontra uma constante no binômio concentração/desigualdade. Em outras palavras: ilhas de riqueza em um mar de pobreza” (Pereira Filho, 2020), ou seja, se olharmos para o futuro não podemos repetir o passado, nem o presente.

1.2 Piauí

As expedições que partiam do litoral brasileiro a partir do século XVII rumo ao sertão nordestino em busca de novas terras descobriram os sertões onde hoje é conhecido como

¹ Cf. Brasil (2020).

o estado do Piauí. Esta região inicialmente ficou dividida entre o domínio político e econômico dos dois polos dominantes no período colonial, São Luís e Salvador.

Segundo Furtado (2002b, p. 57), a impraticabilidade de criar gado na faixa litorânea na região produtora de açúcar e a devastação das florestas litorâneas, gerou a necessidade da busca de terras interioranas para a criação de gado e a separação das duas atividades econômicas: a açucareira e a criatória. Com a ressalva que a renda gerada pela economia criatória não excedia 5% das exportações de açúcar, mas “essa atividade apresentava para o colono sem recursos muito mais atrativos que as ocupações acessíveis na economia açucareira”. Estas duas atividades então se tornaram economicamente complementares.

As fazendas de gado que então se estabeleceram na região remontam às expedições do grupo econômico mais poderoso deste período colonial, Garcia D’Ávila, mais conhecido como a Casa da Torre, associado ao outro grande explorador do interior brasileiro, Domingos Afonso Mafrense ou Sertão, como era mais conhecido.

A criação em 1626 do Estado Colonial do Maranhão e Grão-Pará trouxe resultados de pouco impacto para o Piauí até o século XVIII, e, então, em 1702 a Coroa desvinculou a região do Piauí do Estado do Brasil (Salvador) e a vinculou ao estado do Maranhão (São Luís).

A fundação da Vila da Mocha (antes Freguesia de Nossa Senhora da Vitória do Piauí), mais tarde conhecida como Oeiras, em 1712, e depois a promoção a Capitania de São José do Piauí em 1759, seria uma consequência natural para o crescimento populacional da região e as disputas sobre a hegemonia da região então existentes entre Salvador e São Luís. Mas somente em 1811 o estado do Piauí teve decretada sua autonomia político-administrativa com a desvinculação formal do estado do Maranhão.

A região, com condições climáticas inadequadas para a agricultura, com chuvas escassas e solos inférteis, se apresentava em contraste bastante favorável a pecuária extensiva pelas planícies férteis de seus rios, cuja atividade foi fundamental como economia complementar das atividades de mineração que ocorriam nas regiões montanhosas do interior do país, Minas do Sul (Carvalho, 2007).

Mas o solo não era propício aos cultivos da época, principalmente a mandioca, e a região mal conseguia produzir alimentos para seu autossustento, sendo necessário importação de víveres alimentícios de toda a espécie principalmente do Reino de Portugal, via Maranhão, o que onerava as mercadorias em até 300% (Carvalho, 2007).

Já após a sua autonomia política e durante o século XIX, a pecuária permanece como a principal atividade econômica, mas já ocorrendo outras atividades agrícolas importantes como o cultivo de cana de açúcar, do fumo e do algodão. Este último, mesmo não tendo

alcançado os volumes e a importância que tinham no estado vizinho do Maranhão e adquirido a característica de *plantation*, aproveitou muito bem a oportunidade aberta no mercado internacional pela Guerra da Secessão na América do Norte (Lima, 2020). Isto foi consolidado pela construção de uma nova capital na confluência dos rios Parnaíba e Poti em 1852, denominada Teresina em homenagem a então imperatriz Teresa Cristina.

Neste período se consolida a interdependência das economias do Piauí e Maranhão, cujo mercado consumidor necessitava da carne das criações de gado piauiense, mas também o porto de São Luís servia como porta de saída para as exportações de couro do estado vizinho.

O estado do Pará também estabelece ligações com a economia criatória do Piauí, por meio do porto de Belém, cujos produtos que chegavam pelo rio Tocantins e eram consumidos na capital ou exportados sob a forma de couro.

Outro fator importante é que a economia criatória extensiva propiciou uma interligação entre os principais centros econômicos da época: Maranhão, faixa açucareira e região mineira, funcionando como uma hinterlândia, mesmo que de maneira fluida e imprecisa (Furtado, 2002b).

Desde o final do século XVIII e durante todo o século XIX a pecuária piauiense entra em lento declínio. Em parte, porque entram no mercado os criadores do sul do Maranhão, e do Rio Grande do Sul, e em parte porque os mercados tradicionais da pecuária do Piauí estavam em crise econômica como a região canavieira da Zona da Mata de Pernambuco e a atividade mineradora em Minas Gerais. Por outro lado, a não incorporação de técnicas mais modernas de criação e o transporte do gado vivo (havia perdas de até 50% no transporte do gado) davam pouca competitividade ao criador piauiense (Alves, 2003).

Do final do século XIX até meados do século XX a economia do Piauí viveu situação de estagnação ocorrendo neste período surtos de exportações de monoculturas agrícolas e extrativistas como maniçoba, borracha, cera de carnaúba e do coco babaçu, mas todas estas culturas vivendo a sombra de ondas de consumo do mercado internacional.

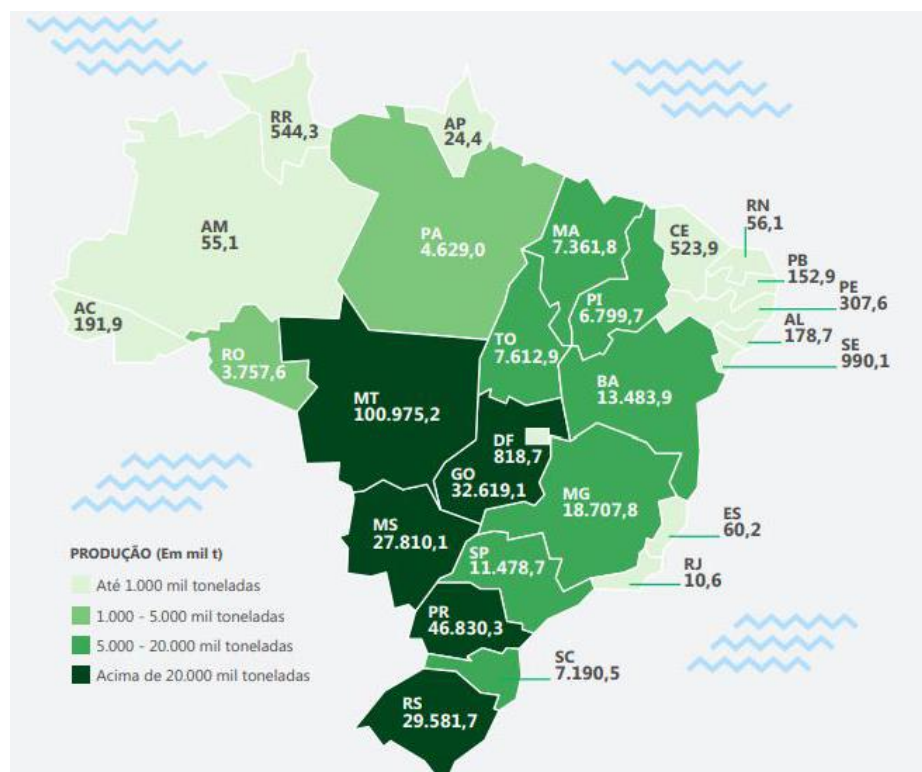
Nas duas primeiras décadas do século XXI a economia do Piauí tem se defrontado com desafios e oportunidades. Os desafios se encontram na necessária descontração da economia da região em torno da capital Teresina (macrorregião Entre Rios) que concentra quase 50% do PIB estadual com atividades voltadas ao setor de serviços e administração pública (Pochmann; Guerra, 2019), uma indústria ainda incipiente, mas que tem mais representatividade na participação do PIB (em torno de 15%) que o setor primário (em torno de 7%) que cresce no sul do estado.

Vê-se o início de um processo de formação de um setor agrícola moderno e dinâmico na produção de grãos para fins de exportação no sul do estado, nas macrorregiões de Tabuleiros do Alto Parnaíba e Chapada das Mangabeira.

Observa-se que o Piauí já se destaca entre os três grandes produtores de grãos do Nordeste (Bahia, Maranhão e Ceará) e com a liderança na produção de milho (Piauí, 2020).

A inserção de modernas técnicas de plantio e colheita, além de solo adequado, na região produtora com apoio da Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária (EMBRAPA) Cocais estabeleceu um polo de dinamismo ainda em expansão que pode apontar mudanças importantes na economia estadual e já é o terceiro maior produtor agrícola do Nordeste. Ressalta-se que o crescimento desta atividade irá aprofundar sua sinergia com a economia maranhense dada a disponibilidade logística rodovias/ferrovias/portos (Figura 2).

Figura 2 – Produção agrícola 2022/2023



Fonte: Companhia Nacional de Abastecimento (2023).

1.3 Pará

A história do Pará começa em 1616 com a edificação da cidade de Nossa Senhora de Belém do Pará pelo General Alexandre de Moura após a reconquista do Maranhão do

domínio francês, então ficando subordinada ao Estado do Maranhão até 1652 quando foi criada a Capitania do Grão-Pará.

O comando político da província se alternou diversas vezes entre Belém do Pará e São Luís do Maranhão, até que em 1772 as duas províncias foram separadas formalmente com cada uma tendo seu próprio Governador-Geral (Baena, 2014).

A economia da Província do Pará viveu exclusivamente à base do extrativismo florestal organizada pelos jesuítas com base na exploração da mão de obra indígena e da agricultura de pequena escala até pelo menos o final do século XIX, mas com a economia do Pará existindo como um núcleo isolado da economia da Colônia, mais tarde Reino (Furtado, 2002b).

Em 1670, lavradores vindos de Portugal ainda tentaram introduzir técnicas agrícolas mais modernas, como o uso do arado, mas esta iniciativa não prosperou entre os nativos da região. O cultivo era baseado em técnicas herdadas dos indígenas aí existentes, como as queimadas periódicas do solo e a mudança do local de plantio quando a fertilidade do solo cultivado se esvaía.

Não obstante, havia o cultivo de certas espécies de grãos cujos excedentes seguiam para exportação a portos da América, Nordeste do Brasil e Europa. Entre estes se destacavam o arroz, o algodão, o café, o tabaco, o cacau e a cana de açúcar trazida da Ilha da Madeira em 1677 (Baena, 2014).

A criação da Companhia Geral Grão-Pará e Maranhão pelo Marquês de Pombal iniciaria um novo ciclo econômico. Antes da Companhia a província era povoada de índios escravos, que lhes iam buscar cacau, café e drogas do sertão, mas uma epidemia de bexigas ceifou a vida milhares de destes, e logo depois dela, publicando-se a Lei de 6 de junho de 1755 que deu liberdade aos índios, reduziu os habitantes do Pará à última pobreza e miséria (Carreira, 1988).

Durante o século XIX, já no final do período colonial e no início da monarquia, a província se consolida como exportadora de gêneros alimentícios citados no parágrafo anterior, além de madeira, couro e especiarias (chamadas drogas do sertão) da região amazônica.

Com exceção da produção interna de gêneros alimentícios, como a carne bovina oriunda da ilha de Marajó (então Ilha Grande de Joannes), a farinha de mandioca e a maniva, em tudo o mais as necessidades da região eram supridas por importações de víveres e bens de consumo, sem que houvesse um movimento significativo de navios entre o porto de Belém e Portugal (Lisboa).

Até meados do século XIX, o principal produto de exportação da província foi o cacau que após um período de apogeu prosseguiu em lento e constante declínio, causando a

queda da economia local até que houve o surgimento do extrativismo da borracha na segunda metade do século XIX.

Este período se estendeu até a Primeira Guerra Mundial quando os grandes mercados consumidores da borracha buscaram a matéria prima da borracha com os produtores sul asiáticos que já se organizavam em cultivos organizados com sementes contrabandeadas da Amazônia, o que causou a queda dos preços internacionais 512 libras/t (início do século XX) para menos de 100 libras/t de forma permanente, causando um colapso na principal atividade econômica da região amazônica (Furtado, 2002b).

A borracha enriqueceu as cidades de Belém e de Manaus que serviam de ponto de suprimento de víveres aos seringueiros embrenhados na floresta, de ponto de recebimento das bolas de látex vindas dos seringais e os portos de exportação do produto. Mais tarde Manaus teve sua autonomia política decretada com o desmembramento da região do Rio Negro da província do Pará e a criação da Província do Amazonas em 1872 (Tavares, 2008).

Durante o ciclo da borracha a economia é impulsionada também com o desenvolvimento da navegação nos rios da região amazônica, primeiro com a Companhia de Navegação de Comércio do Amazonas do Barão de Mauá, fundada em 1853, e mais tarde com a abertura da navegação a empresas estrangeiras, em 1867 (Souza, 2019).

Em 1874, o governo local toma a iniciativa de abrir a concessão da estrada de Ferro Belém-Bragança a fim estimular o povoamento e a economia da região nordeste do estado, e em consequência ocorre uma corrente migratória estrangeira significativa, com destaque para a colônia de origem japonesa.

Ainda no final do século XIX há um pequeno movimento de industrialização na cidade de Belém baseado nas matérias primas locais do extrativismo (juta, algodão, cacau e pimenta), mas após 1920 a economia como um todo entra em declínio, ocorrendo um pequeno intervalo para a produção de borracha aos aliados da 2ª Guerra Mundial (Mourão, 2017).

Em 1920, o Pará dependia em 61% da receita de exportação do látex, e em 1920 caiu para 10%, dobrando a dívida pública do estado, e, após breve intervalo na Segunda Guerra, a economia entrou novamente em estagnação.

No início da década de 70 a economia já vivenciava certo dinamismo e não dependia mais somente do extrativismo. Havia a agropecuária, a mineração e a metalurgia, mesmo assim a partir dos anos 90 já era visível o declínio de Belém em relação a Manaus. Em 1950, Belém tinha 43,9% da população da Amazônia, e em 1990 tinha somente 23,0% do total e sua importância regional se reduziu muito.

Em 31 de julho de 2018, o geólogo Breno Augusto dos Santos da US Steel fez um pouso de abastecimento na Serra Arqueada, no sudeste do Pará. A procura de manganês na

Amazônia encontrou por acaso o que seria a maior mina a céu aberto de minério de ferro de alta qualidade do mundo e que colocou o país no mapa da mineração mundial.

Naquela época a Vale produzia 11 milhões t/ano em suas minas na região Sudeste, atualmente exporta 190 milhões t/ano (números de 2020) pelo complexo mina/ferrovia/porto de Carajás (PA) e Ponta da Madeira (MA) (Zonta; Trocate, 2015).

Além do minério de ferro, atualmente o estado do Pará se destaca na produção de bauxita, cobre e caulim, além de ser grande produtor de manganês, níquel, calcário, ouro, gemas e outros minérios de uso na construção civil, sendo o maior produtor de minérios do país, o carro chefe de sua economia (Abreu, 2020).

Apesar do crescimento da atividade mineral e da agropecuária as desigualdades e a produção de riqueza ainda são incertas e mal distribuídas espacialmente. Não ocorre um processo de industrialização consistente para a transformação das matérias primas locais, havendo alguns enclaves industriais como uma planta de beneficiamento de bauxita (alumínio e alumina) em Barcarena da empresa norueguesa Hydro, sendo a maior planta de alumina do mundo fora da China (Alunorte) e a maior planta de alumínio primário do Brasil (Albrás) (Hydro, 2023).

No município de Marabá, há um polo siderúrgico de beneficiamento do minério de ferro da Serra de Carajás, com produção de ferro-gusa e aço laminado. Porém, por conta de práticas ambientais ilegais, como o desflorestamento de mata nativa para uso de carvão vegetal em seus fornos, este polo industrial teve suas atividades reduzidas, e se no passado contava com onze indústrias metalúrgicas, atualmente conta com apenas três em operação.

Por fim, a falta de dinamismo de sua economia baseada fortemente nas atividades de mineração com baixo índice de transformação local, coloca o estado em situação de alerta, comprometendo um possível futuro de prosperidade, como os indicadores econômicos e sociais oficiais já demonstram.

O setor agrícola tem apresentado grande crescimento já alcançando perto de 2 milhões de t/ano de soja para exportação. No setor pecuário, se destaca com o quarto maior rebanho do país, com 21 milhões de cabeças de gado, e um item já importante em sua pauta de exportações (Botelho, 2020).

Na última pesquisa do Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística (2023) de PIB per capita indicava a capital Belém como o segundo pior índice de PIB per capita entre todas as capitais brasileiras, Tabela 1. O que demonstra uma baixa geração de riqueza, sem falar nas desigualdades sociais comumente existentes em aglomerações urbanas nas regiões Norte e Nordeste.

A extensa rede de rios navegáveis do estado do Pará pode viabilizar os portos de Santarém e de Miritituba/Itaituba como alternativas importantes para escoamento da produção de grãos do Mato Grosso (maior produtor nacional). A recente conclusão, em 2020, da pavimentação da BR-163 (Cuiabá/Santarém) que liga o Mato Grosso até estes dois portos já ocasionou a queda de frete para transporte de grãos até estas duas localidades. São portos ainda com pequena movimentação, mas com potencial de crescimento em volume de cargas.

Outro fato, que chama atenção é que por ter sua economia baseada no extrativismo mineral, a economia paraense criou uma certa simbiose com a economia do Maranhão, já que não possui portos navegáveis com grande calado (7 a 10 m), e os minerais exportados em grande volume, como o minério de ferro, dependem de exportação em portos de maior capacidade de atender grande navios graneleiros como Itaqui e Ponta da Madeira (MA).

1.4 Amazonas, Acre, Roraima e Amapá

Até 1757 o estado do Grão-Pará e Maranhão era composto de sete capitanias: Caeté, Cametá, Joanes (hoje Marajó), Pará, Maranhão e Piauí, sendo as três primeiras governadas por donatários, e as outras por governadores. Neste ano é criada a capitania de São José do Rio Negro, com capital em Barcelos.

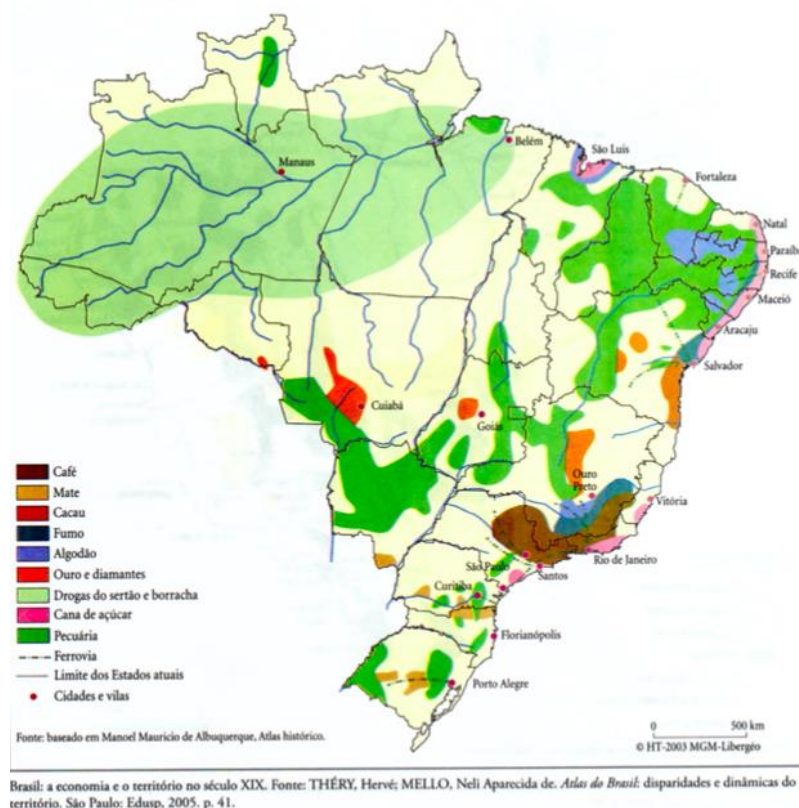
A economia era baseada na borracha e nas chamadas “drogas do sertão”, ou seja, o extrativismo, pois era a única possibilidade econômica visível da região e era uma atividade lucrativa (Souza, 2019). Quando os portugueses se assenhoraram da região introduziram o cultivo de café, cana de açúcar, anil e algodão, além da atividade de construção naval.

A região do Amapá, disputada por ingleses, holandeses e franceses, só seria incorporada ao nosso território em 1899 (Prado Júnior, 2011).

Os grandes responsáveis pela ocupação desta região e sua colonização foram as missões jesuíticas e franciscanas. Considerando que o marco da ocupação da região foi a instalação dos portugueses na Foz do Orinoco em 1616.

O século XIX foi marcado por convulsões políticas, estagnação econômica e guerra civil que dizimou 30% da população, incluído o Grão-Pará (Figura 3).

Figura 3 – Mapa das atividades econômicas no século XIX



Fonte: Moraes (2017).

Em 1850 a capitania é elevada a condição de província do Brasil sob o Império, e em 1867 a navegação do rio Amazonas é aberta às nações amigas quando foram fundadas as primeiras companhias de navegação na Amazônia, em Belém e Manaus (Souza, 2019). Em 1852, o Barão de Mauá criou a Companhia de Navegação e Comércio do Amazonas com a linha Belém/Manaus.

Mas até a proclamação de República a província irá viver na penúria por não ter o Império do Brasil um projeto econômico para a região que não fosse a ocupação do espaço geográfico.

Inicia-se a partir da metade do século XIX o período conhecido como Ciclo da Borracha, cultura que já vinha se desenvolvendo desde o final do século XVIII e que no final do século XIX chegou a representar um quarto das exportações brasileiras.

Esta cultura, basicamente extrativista e que ocupava grandes áreas, foi fortemente beneficiada pela migração de nordestinos fugindo da Grande Seca (1877/1879), proporcionando uma mão de obra barata para a ocupação da área.

Esta migração chegou até o território do Acre, então boliviano, e que após diversos incidentes resultou no Tratado de Petrópolis, em que o Brasil comprava os 191 mil km² da Bolívia por 2 milhões de libras esterlinas (Prado Júnior, 2011).

O território do Acre começará a contribuir com algum vulto à produção de borracha em 1904, com 2.000 toneladas exportadas, e em 1907 chegará a 11.000 toneladas se consolidando na liderança da produção nacional. Os estados de Pará e Amazonas ficaram com produção um pouco abaixo do Acre (Prado Júnior, 2004).

Após o apogeu e glória do ciclo da borracha e seu posterior declínio já relatado em item anterior, o estado do Amazonas só viria ter novo ciclo de prosperidade com a implantação da Zona Franca de Manaus em 1967, e a implantação de um parque industrial voltado para exportações e com benefícios fiscais muito vantajosos. Após isto, em pouco mais de 10 anos a capital deu um salto populacional de 150 mil para 600 mil habitantes.

1.5 Goiás, Mato Grosso e Rondônia

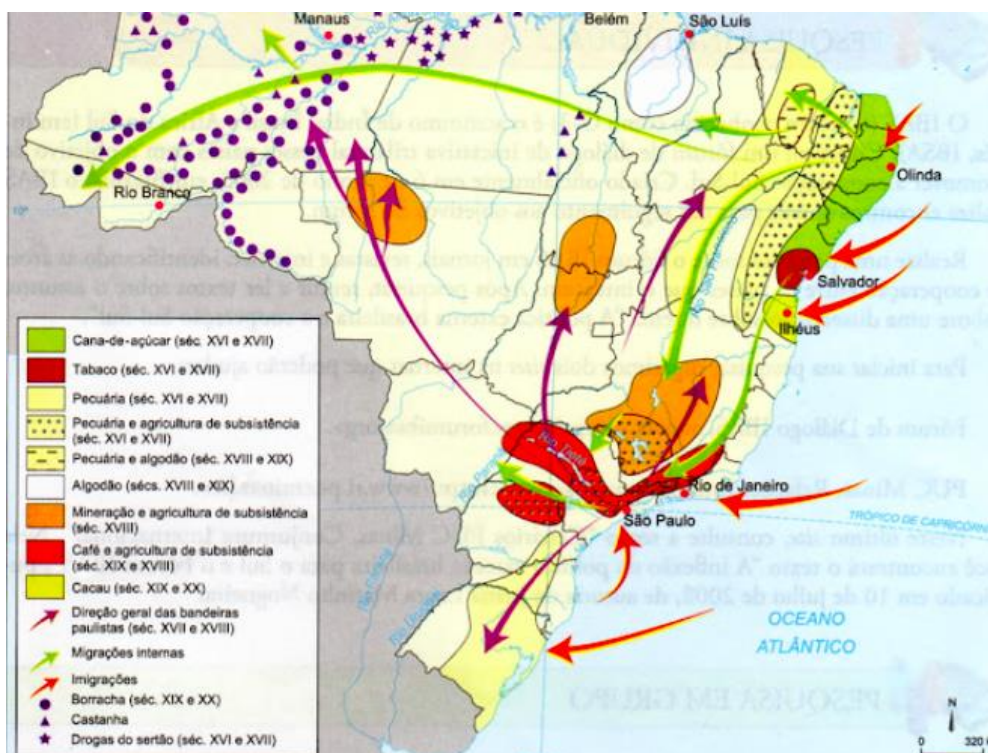
As minas de Mato Grosso foram descobertas e batizadas em 1734 pelos irmãos Paes de Barros, e este nome colonial setecentista perdurou até nossos dias. Em 1750, as conquistas dos bandeirantes foram reconhecidas pelo Tratado de Madrid, e no ano seguinte, o capitão-general do Mato Grosso Antônio Rolim de Moura Tavares fundou, à margem do rio Guaporé, a Vila Bela da Santíssima Trindade, mas somente em 1802 o Mato Grosso passou a ser definitivamente território brasileiro depois que os conflitos por fronteira com os espanhóis deixaram de acontecer.

Durante o período colonial, os governos defenderam a posse do território do Mato Grosso e consolidaram a sua propriedade e posse até os limites do rio Guaporé e Mamoré, afastando as aspirações espanholas de domínio desse território (Mato Grosso, 2023).

A exploração das minas no século XVII fixaram os núcleos de povoamento no coração do continente sul-americano, atualmente o estado de Goiás e os estados de Mato Grosso e Mato Grosso do Sul. As descobertas do ouro em Cuiabá e depois em Goiás causaram a migração da população para o interior do Brasil, até então fortemente fixada na faixa litorânea, ou como dizia o Frei Vicente do Salvador “[...] arranhando as terras ao longo do mar como caranguejos” (Prado Júnior, 2011, p. 59).

Neste período as economias de Mato Grosso e Goiás eram baseadas na mineração de ouro e diamantes e a agricultura de subsistência (Figura 4). A partir do século XIX a pecuária passa ter um papel predominante nesta região, mas ainda com atividade residual de mineração.

Figura 4 – Mapa das atividades econômicas século XVIII



Fonte: Mapas [...] (202-?).

No Mato Grosso, a exploração do ouro, diamantes e outras pedras preciosas, permitiu à economia provincial investimentos de capitais, tanto nacionais como estrangeiros. Com relação ao valor dos diamantes, Corrêa Filho (1926 *apud* Reynaldo, 2013, p. 160) assegura que os preços “nos primeiros tempos só alcançavam 30 a 20\$000 a oitava” e chegaram, em 1830, a 320\$000 no lugar de extração. Ao todo (diamante e ouro), houve um razoável aumento da produção entre os anos de 1824 e 1839, bem como uma valorização (em onças) no mercado externo totalizando uma receita de 156\$000 (Quadro 1).

Quadro 1 – Produção mineral da Província de Mato Grosso

Minério	Ano	Quantidade (Kg)	Valor (em mil reis)
Diamantes	1824	1.800	58\$000
Ouro	1839	3.781	98\$000

Nota: Dados coletados nos relatórios econômicos das finanças da Província entre os anos de 1824 e 1854 do Arquivo Público do Estado de Mato Grosso. Lata F, Pasta VIII.

Fonte: Reynaldo (2013).

Após a Independência, houve cinco governantes no Mato Grosso e o fato mais importante ocorrido foi a oficialização da capital da Província em Cuiabá (Lei nº 19 de

28/8/1835). Neste período pós-colonial, início do século XIX, as minas de ouro estavam se esaurindo e a economia iniciava um período de decadência com a estagnação da população da província. A economia, então voltava-se então para o extrativismo vegetal.

O Anuário Econômico da Província de Mato Grosso, publicado em 1852, entende “indústrias extrativistas como sendo o conjunto de matérias-primas existentes no interior da província que, uma vez aproveitado, poderá gradativamente substituir as importações de outras províncias, reduzindo, com isso, a sua dependência desse tipo de comércio” (Reynaldo, 2013, p. 159).

No extrativismo vegetal, destacou-se, inicialmente, uma matéria-prima que passou a ser explorada em grande quantidade, a poaia. Esse tubérculo esverdeado, encontrado no vale do rio Paraguai, foi bastante procurado no mercado externo (Reynaldo, 2013). O comércio deste vegetal durou até os primeiros anos do século XX; junto com a exaustão da planta nativa, veio o desinteresse dos laboratórios farmacológicos europeus, que tinham descoberto outras drogas que foram utilizadas em seu lugar.

A erva-mate foi outro produto extrativo de grande valor comercial exportador nesse período. Em 1852, sua área de produção abrangia respectivamente parte do território paraguaio e da Província de Mato Grosso.

No final século XVIII, as monções² que faziam o abastecimento do Mato Grosso começaram a diminuir com a queda da produção do ouro, e isto propiciou o surgimento de uma zona de pecuária local (Caldeira, 1999).

De todo os setores da economia do período colonial aquele que mais se manteve, cresceu e se consolidou foi o da pecuária. Os primeiros rebanhos datam do início do século XVIII. Mas, o maior desenvolvimento da pecuária ocorreu nas primeiras décadas do século XIX, devida a demanda crescente pela instalação da Corte no Rio de Janeiro (1808), e o crescimento da população urbana naquela cidade. Em Mato Grosso, chegou a haver neste período fazendas de propriedade do governo provincial para atender o mercado e suas demandas funcionais (Reynaldo, 2013).

A economia do estado começa a melhorar com a implantação de estradas de ferro e telégrafos, época em que começam a chegar seringueiros, pessoas que cultivavam erva-mate e criadores de gado, mas não houve progresso econômico significativo.

Já no século XX, em 1977, o Mato Grosso é desmembrado em dois estados: Mato Grosso e Mato Grosso do Sul.

² Expedições fluviais entre São Paulo e Mato Grosso

Na década de 1990 as migrações de populações vindas da região Centro-Sul do país (“gaúchos”) iniciaram o povoamento de boa parte do Mato Grosso e Rondônia, que experimentam um surto de crescimento de sua economia baseado nas atividades do campo, ainda que de forma desorganizada, e causando problemas ecológicos graves.

Atualmente, o estado de Mato Grosso é o líder na produção agropecuária nacional. Segundo levantamento da Companhia Nacional de Abastecimento (2024), na safra 2022/2023 Mato Grosso teve a maior colheita de grãos do país, atingindo o volume de 100,98 milhões de toneladas. A tendência de crescimento do Valor Bruto de Produção (VPB) é contínua e sustentável com crescimento de 70% na última década.

O VBP de Mato Grosso, que corresponde ao faturamento bruto dos produtos do setor, conforme dados divulgados pelo Ministério da Agricultura, Pecuária e Abastecimento (MAPA), em 2020 registrou R\$ 149 bi. O desempenho mato-grossense consolida o estado na primeira posição em nível nacional, com 17,2% do VBP total. Em segundo lugar está o Paraná, com 13,2%, seguido por São Paulo (11,2%), Rio Grande do Sul (10,8%) e Minas Gerais (10%) (Moura, 2021).

Os primórdios de Rondônia datam da construção do Forte Príncipe da Beira nas margens do rio Guaporé em 1776, devido a descoberta de ouro na região pelos bandeirantes paulistas. O primeiro impulso de ocupação ocorreu no ciclo da borracha pelos seringueiros, mas somente o estabelecimento definitivo do antigo território do Acre em 1903 deu o impulso necessário ao desenvolvimento da região, pois o Tratado de Petrópolis obrigava o Brasil a construir a ferrovia Madeira-Mamoré (1907-1912).

Em 1943 foi constituído o Território Federal de Guaporé, com capital em Porto Velho, com o desmembramento de parte de Mato Grosso e do Amazonas, e em 1956 o território passou a se chamar Rondônia em homenagem ao sertanista e desbravador marechal Cândido Rondon. Finalmente, em 1981, o Congresso Nacional elevou o território à categoria de estado da federação.

Depois de um período conturbado, causado pelo grande fluxo migratório vindo da região Centro-Sul, e os incentivos fiscais para empresas nas décadas de 60 e 70 que causou grandes problemas ambientais como a devastação de grandes áreas florestais, o estado parece ter encontrado sua vocação no agronegócio, em culturas sustentáveis e a pecuária de corte.

A produção de grãos em Rondônia 2020/21 está estimada em 2,59 milhões ton. O volume é recorde e superior em 8% à safra anterior. O resultado é influenciado pelo aumento na área plantada de 9,1%, chegando a 657,3 mil hectares (Companhia Nacional de Abastecimento, 2021).

Na pecuária o crescimento também é vigoroso, e o estado já possui o sexto maior rebanho do país com 14,8 milhões de cabeças de gado, com Mato Grosso liderando com 37,8 milhões, e projeções para que chegue em 2030 com um rebanho de 17,6 milhões de cabeças (Centro de Sensoramento Remoto, 2014).

O Goiás, em seus primórdios, experimentou todas as euforias e mazelas do vizinho Mato Grosso, sendo a descoberta de minas de ouro em 1725 responsável pelo seu povoamento inicial na sua primeira sede da capitania, Vila Boa.

O ciclo minerador em Goiás apresentou características diversas do restante das zonas mineradoras. Havia uma descentralização quase total, graças as características geológicas locais que causavam escassez por causa da duração das lavras descobertas, resultando em nomadismo permanente e impedindo uma consolidação urbana na província (Caldeira, 1999).

A decadência de Goiás no terceiro quartel do século XVIII, será ainda mais profunda que de seus congêneres centros de mineração levando a decadência da capitania (Prado Júnior, 2011).

Em 1744, ocorre o desmembramento da Capitania de São Paulo com a criação da capitania de Goiás com capital em Vila Boa. Até o final daquele século serão fundadas duas fundições, em Vila Boa e São Félix.

No início do século XIX ocorre o fim do ciclo do ouro na região com início da atividade econômica predominante da agropecuária, que se estende por todo este século até no último quartil quando a economia goiana começa a se integrar a economia nacional pela agricultura.

No período regencial da monarquia houve estímulos às atividades agropecuárias, mas somente no período republicano haverá uma transformação na economia com a chegada da estrada de ferro entre Araguari (MG) e Rencador (GO). Em 1920, o estado já era o quarto produtor nacional de arroz, milho e cana de açúcar (Assis, 2018).

A extensão da estrada de ferro iria ocorrer até a cidade de Anápolis em 1935, que iria se transformar no centro econômico do estado.

No século XX, a transferência da capital para Goiânia, a fundação de Brasília e os fortes investimentos em infraestrutura durante o regime militar irão trazer prosperidade econômica ao estado.

Já nos anos 2000, ocorre um processo inicial de industrialização com a implantação de montadoras de automóveis e indústrias do agronegócio.

A partir da promulgação da Constituição de 1988 o estado se divide em dois com a criação do estado do Tocantins, antiga reivindicação da população do norte do estado, que começa a se desenvolver trilhando o mesmo caminho da parte sul, a agropecuária.

1.6 Comentários gerais

O estudo da história econômica desta região se mostrou muito importante como esclarecimento do fato de que algumas oportunidades que estão surgindo atualmente são muito similares as ocorridas em passado recente, e que estratégias diferentes devem ser seguidas para que não haja a repetição dos mesmos erros do passado que ocasionaram um longo período de estagnação econômica após períodos de breve prosperidade.

No século XIX os acontecimentos internos e as mudanças geopolíticas em outros países como: as guerras napoleônicas, a mudança da família real para o Brasil, a independência do Reino de Portugal, a Revolução Industrial, a abolição da escravidão, a Guerra da Secessão nos EUA e a Proclamação da República afetaram de forma profunda e duradoura o setor produtivo desta região.

Então, os estados (províncias/capitanias) da região que antes comandavam sua própria economia em diálogo com a Corte em Portugal, passaram a ser excluídos das tomadas de decisão do país com a migração das esferas de poder para o Rio de Janeiro.

Com as políticas públicas implantadas no governo republicano, o estado de São Paulo veio a assumir um protagonismo político-econômico que perdura até o início do século XXI, e a região Nordeste e Norte se tornaram consumidores dependentes economicamente da região Sudeste.

A revolução do agronegócio brasileiro com o crescente protagonismo das regiões produtoras acima do paralelo 16S (Centro-Oeste e MATOPIBA), e o fortalecimento da infraestrutura logística para os portos do Arco Norte, criou uma oportunidade única para que esta região volte a ter a proeminência econômica do passado.

A interdependência econômica dos estados do Piauí, Maranhão e Pará, notória no século XIX, volta a se manifestar pela complementariedade de suas estruturas econômicas.

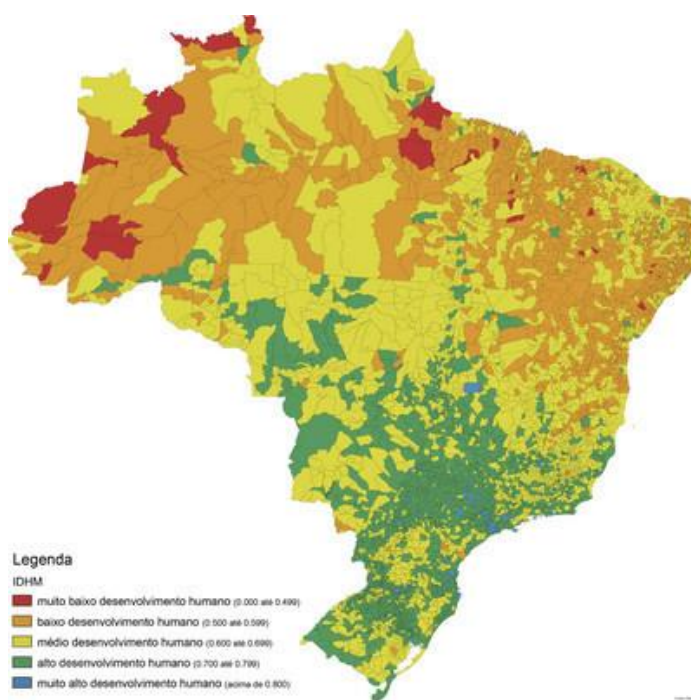
O estado do Ceará, que até o século XIX se encontrava em uma situação de pobreza crônica em relação aos vizinhos, no século XX optou por um modelo de crescimento próprio, razoavelmente bem-sucedido, sem a interdependência com os vizinhos da região, mas em uma análise mais detalhada de suas estruturas econômicas e potenciais naturais, verifica-se a fragilidade de seu modelo que teria muito a ganhar com a interação de sua economia com os

vizinhos pois estes dispõem de recursos e estruturas que não são disponíveis em seu território, com por exemplo: produção agropecuária relevantes, infraestrutura logística expressiva, recurso minerais em grande monta e manufaturas de valor acionado em tecnologia.

A desigualdade de indicadores sociais econômicos da região com relação ao restante do país é ainda grande, mas já se pode perceber que as áreas em que houve os avanços do agronegócio isto já começou a mudar.

Na Figura 5 observa-se já o aumento da renda per capita dos estados da região Centro-Oeste onde o agronegócio é atividade econômica dominantes.

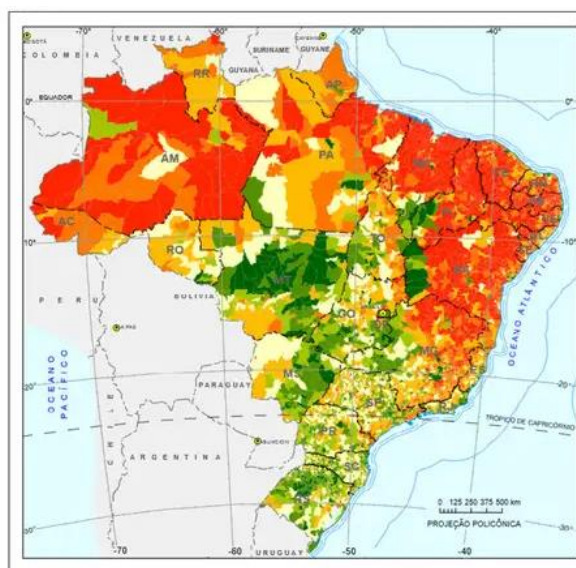
Figura 5 – IDH municípios (2020)



Fonte: Paraná (2010).

Da mesma forma, observa-se na Figura 6 que baixos indicadores sociais (Índice de Desenvolvimento Humano – IDH) continuam a ser a realidade dos estados nordestinos e nas regiões de economia extrativista dos estados do Amazonas e Acre.

Figura 6 – PIB per capita nos municípios (2021)



Fonte: Moura (2023).

REFERÊNCIAS

- ABREU, Giovanna. Pará é o estado brasileiro que mais exporta produtos minerais. **Agência Pará**, Belém, 10 jul. 2020. Disponível em: <https://agenciapara.com.br/noticia/20707/para-e-o-estado-brasileiro-que-mais-exporta-produtos-minerais>. Acesso em: 2 nov. 2022.
- ALVES, Vicente E. L. As bases históricas da formação territorial piauiense. **Revista Geosul UFSC**, Florianópolis, v. 18, n. 76, p. 55-76, jul./dez. 2003.
- ARRIGHI, Giovanni. **A ilusão do desenvolvimento**. 6. ed. Petrópolis: Vozes, 1997.
- ASSIS, Wilson R. Fernandes. **Estudos de história de goiás**. 3. ed. Goiânia: Palavrear Livros, 2018.
- BAENA, Antônio L. M. **Ensaio corográfico sobre a Província do Pará**. Brasília, DF: Senado Federal/Conselho Editorial, 2014. (Edições do Senado Federal, 30).
- BARBOSA, Francisco Benedito da Costa. **Economia do Maranhão e de São Paulo: semelhança na origem, descontinuidade no desenvolvimento**. São Paulo: IPADES, 2012. Disponível em: <https://www.ipades.com.br/publicacoes-ipades.php>. Acesso em: 19 fev. 2021.
- BOTELHO, Camila. Soja é o principal produto agro exportado pelo Pará. **Agência Pará**, Belém, 27 ago. 2020. Disponível em: <https://agenciapara.com.br/noticia/21749/soja-e-o-principal-produto-agro-exportado-pelo-para>. Acesso em: 2 nov. 2022.
- BRASIL. **Decreto nº 10.220, de 5 de fevereiro de 2020**. Promulga o Acordo entre o Governo da República Federativa do Brasil e o Governo dos Estados Unidos da América sobre Salvaguardas Tecnológicas Relacionadas à Participação dos Estados Unidos da América em Lançamentos a partir do Centro Espacial de Alcântara, firmado em Washington, D.C., em 18 de março de 2019. Brasília, DF: Presidência da República, 2020. Disponível em: http://www.planalto.gov.br/ccivil_03/_ato2019-2022/2020/decreto/D10220.htm. Acesso em: 2 ago. 2022.
- CALDEIRA, Jorge. **A nação mercantilista**. São Paulo: Edições 34, 1999.
- CALDEIRA, Jorge. **História da Riqueza no Brasil: cinco séculos de pessoas, costumes e governos**. Rio de Janeiro: Estação Brasil, 2017.
- CARREIRA, Antônio. **A Companhia Geral do Grão-Pará e Maranhão**. São Paulo: Editora Nacional, 1988.
- CARVALHO, João Renôr F. de. **A geopolítica lusitana do Século XVIII no Piauí Colonial**. Imperatriz: Ética, 2007.
- CENTRO DE SENSORAMENTO REMOTO. **Rondônia**. [S. l.], 2014. Disponível em: <https://csr.ufmg.br/pecuaria/portfolio-item/rondonia/>. Acesso em: 10 abr. 2023.

COMPANHIA NACIONAL DE ABASTECIMENTO. **Acompanhamento da safra brasileira de grãos**: safra 2022/23: 12º levantamento. Brasília, DF: Conab, 2023. Disponível em: <https://www.conab.gov.br/info-agro/safras/graos/boletim-da-safra-de-graos/item/21369-12-levantamento-safra-2022-23>. Acesso em: 24 mar. 2024.

COMPANHIA NACIONAL DE ABASTECIMENTO. **Grãos por unidade da federação**. Brasília, DF, 12 set. 2024. Disponível em: <https://www.conab.gov.br/info-agro/safras/serie-historica-das-safras/itemlist/category/907-graos-por-unidades-da-federacao>. Acesso em: 24 set. 2024.

COMPANHIA NACIONAL DE ABASTECIMENTO. **Rondônia**: produção na safra 2020/21 é recorde e chega perto de 2,6 milhões de toneladas de grãos. Brasília, DF, 10 set. 2021. Disponível em: <https://www.conab.gov.br/ultimas-noticias/4247-rondonia-producao-na-safra-2020-21-e-recorde-e-chega-perto-de-2-6-milhoes-de-toneladas-de-graos>. Acesso em: 10 mar. 2022.

DALIO, Ray. **Princípios para a ordem mundial em transformação**: porque as nações prosperam e fracassam. Rio de Janeiro: Intrínseca, 2022.

FURTADO, Celso. **Em busca de novo modelo econômico**: reflexões sobre a crise contemporânea. São Paulo: Paz e Terra, 2002a.

FURTADO, Celso. **Formação econômica do Brasil**. 31. ed. São Paulo: Companhia Editora Nacional, 2002b.

HYDRO. **Albrás**. [S. l.], 2023. Disponível em: <https://www.hydro.com/pt-BR/sobre-a-hydro/a-hydro-no-mundo/americas/brasil/barcarena/albras/>. Acesso em: 10 maio 2023.

INSTITUTO BRASILEIRO DE GEOGRAFIA E ESTATÍSTICA. **Produto Interno Bruto**. Rio de Janeiro: IBGE, 2023. Disponível em: <https://www.ibge.gov.br/explica/pib.php>. Acesso em: 20 maio 2023.

INSTITUTO BRASILEIRO DE GEOGRAFIA E ESTATÍSTICA. **Produto Interno Bruto dos municípios**. Rio de Janeiro: IBGE, 2021. Disponível em: <https://www.ibge.gov.br/estatisticas/economicas/contas-nacionais/9088-produto-interno-bruto-dos-municipios.html>. Acesso em: 20 maio 2023.

LIMA, Nilsângela (org.). **Páginas da história do Piauí colonial e provincial**. Teresina: EDUFPI, 2020.

MAPAS ciclos econômicos do Brasil. In: SILBERMANN, Ben. **Pinterst**. [S. l.: s. n.], [202-?]. Disponível em: <https://br.pinterest.com/pin/592434525958062717/>. Acesso em: 2 mar. 2024.

MATO GROSSO. Governo do Estado. **História**. Cuiabá, 2023. Disponível em: <http://www.mt.gov.br/historia>. Acesso em: 10 mar. 2023.

MORAES, Vinícius Silva de. Industrialização brasileira: de Vargas a FHC. **Globo**, Rio de Janeiro, 22 maio 2017. Educação. Disponível em:

<http://educacao.globo.com/geografia/assunto/industrializacao/industrializacao-brasileira-de-vargas-ao-periodo-neoliberal.html>. Acesso em: 10 nov. 2023.

MOURA, Bruno de Freitas. Capitais perdem espaço e economia fica menos concentrada, aponta IBGE. **Agência Brasil**, Rio de Janeiro, DF, 15 dez. 2023. Disponível em: <https://agenciabrasil.ebc.com.br/economia/noticia/2023-12/capitais-perdem-espaco-e-economia-fica-menos-concentrada-aponta-ibge>. Acesso em: 10 jan. 2024.

MOURA, Viviane. **Em 5 meses, valor da produção agropecuária de MT supera ano de 2020**. Cuiabá: Secretaria de Estado de Desenvolvimento Econômico do Estado do Mato Grosso, 29 jun. 2021. Disponível em: <http://www.sedec.mt.gov.br/-/17408501-em-5-meses-valor-da-producao-agropecuaria-de-mt-supera-ano-de-2020>. Acesso em: 10 mar. 2023.

MOURÃO, Leila. Memórias da Indústria Paraense. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE HISTÓRIA ECONÔMICA, 12., 2017, Niterói. **Anais [...]**. São Paulo: associação brasileira de pesquisadores em história econômica, 2017. Disponível em: <http://www.abphe.org.br/uploads/ABPHE%202017/10%20Memórias%20da%20indústria%20Paraense.pdf>. Acesso em: 15 mar. 2021.

PARANÁ. Secretaria de Educação. **Galeria**: mapas. Curitiba, 2010. Disponível em: <http://www.geografia.seed.pr.gov.br/modules/galeria/detalhe.php?foto=1565&evento=5>. Acesso em: 10 set. 2023.

PASTORE, Afonso Celso. **Erros do passado, soluções para o futuro**: a herança das políticas econômicas brasileiras do século XX. São Paulo: Penguin, 2021.

PEREIRA FILHO, Jomar F. **Economia maranhense de 1890 a 2010**: superexploração e Estado oligárquico como entraves ao desenvolvimento. São Luís: EDUFMA, 2020. v. 1.

PIAUÍ. Secretaria do Planejamento. Superintendência de Estudos Econômicos e Sociais. **Conjuntura econômica**: 2º trimestre de 2020. Teresina: CEPRO, 2020. Disponível em: http://www.cepro.pi.gov.br/download/202011/CEPRO05_6788b5c584.pdf. Acesso em: 2 ago. 2022.

POCHMANN, Marcio; GUERRA, Alexandre. Piauí: trajetória e transição econômica. Teresina: CEPRO, 2019.

PRADO JÚNIOR, Caio. **Formação do Brasil contemporâneo**: colônia. São Paulo: Companhia da Letras, 2011.

PRADO JÚNIOR, Caio. **História econômica do Brasil**. São Paulo: Brasiliense, 2004.

REYNALDO, Ney Iared. Uma análise econômica da Província de Mato Grosso na primeira metade do século XIX. **Albuquerque: Revista de História**, Campo Grande, MS, v. 5 n. 10 p. 157-183, jul./dez. 2013.

ROLIM FILHO, Claudiomar. **Maranhão**: de província mais rica a estado mais miserável. Brasília, DF: [s. n.], 2017.

SOUZA, Márcio. **História da Amazônia**: do período pré-colombiano aos desafios do século XXI. 2. ed. Rio de Janeiro: Record, 2019.

TAVARES, Maria G. da C. A formação territorial do espaço paraense: dos fortes à criação de municípios. **Acta Geográfica**, Boa Vista, ano 2, n. 3, p. 56-83, jan./jun. 2008. Disponível em: <https://revista.ufr.br/actageo/issue/view/37>. Acesso em: 15 mar. 2021.

UNIVERSIDADE FEDERAL DO MARANHÃO. **Curso de Engenharia Aeroespacial**. São Luís: UFMA, 2023. Disponível em: <https://portalpadrao.ufma.br/profissoes/nossos-centros-academicos/campus-sao-luis/eng-aeroespacial-sao-luis>. Acesso em: 10 mar. 2023.

VIVEIROS, Jerônimo de. **Quadros da vida maranhense [Recortes da economia maranhense]**. Organização Sebastião Moreira Duarte. São Luís: Edições AML, 2019.

WILSON, Dominic; PURUSHOTMAN, Roopa. Dreaming with BRICS: the path to 2050. In: GOLDMAN SACHS. **Intelligence**. [S. l.], Oct. 2003. (Global Economic Paper, 99). Disponível em: <https://www.goldmansachs.com/intelligence/archive/brics-dream.html>. Acesso em: 2 set. 2022.

ZONTA, Márcio; TROCATE, Charles (org.). **A questão mineral no Brasil**: projeto Grande Carajás: trinta anos de desenvolvimento frustrado. Marabá: iGuana, 2015. v. 1. Disponível em: <https://www2.ufjf.br/poemas/files/2014/07/Coelho-2015-Projeto-Grandes-Carajás.pdf>. Acesso em: 10 maio 2024.

APÊNDICE B – O AGRONEGÓCIO NA REGIÃO DO ARCO NORTE

1 O DESENVOLVIMENTO DO AGRONEGÓCIO NA REGIÃO DO ARCO NORTE

Nas décadas de 1950 e 1960 havia a crença de que o Brasil estaria destinado a ser mais uma vítima da “maldição” dos países da periferia mundial devido a uma suposta inelasticidade preço/demanda internacional de *commodities* agrícolas, e, portanto, não iria internalizar em sua economia os ganhos do setor agropecuário (Pastore, 2021).

O Brasil se tornou exemplo de sucesso na agropecuária pelo aumento de sua produtividade e a expansão da sua fronteira agrícola, com poucos estímulos de natureza fiscal e aberto ao comércio internacional, abandonando as práticas vigentes até a década de 1960 de sustentação artificial de preços de produtos agrícolas exportáveis, como por exemplo o café. Até a década de 60 o Brasil era um importador líquido de alimentos, passando a ser exportador a parti da década de 1990 (Vieira Filho, 2016).

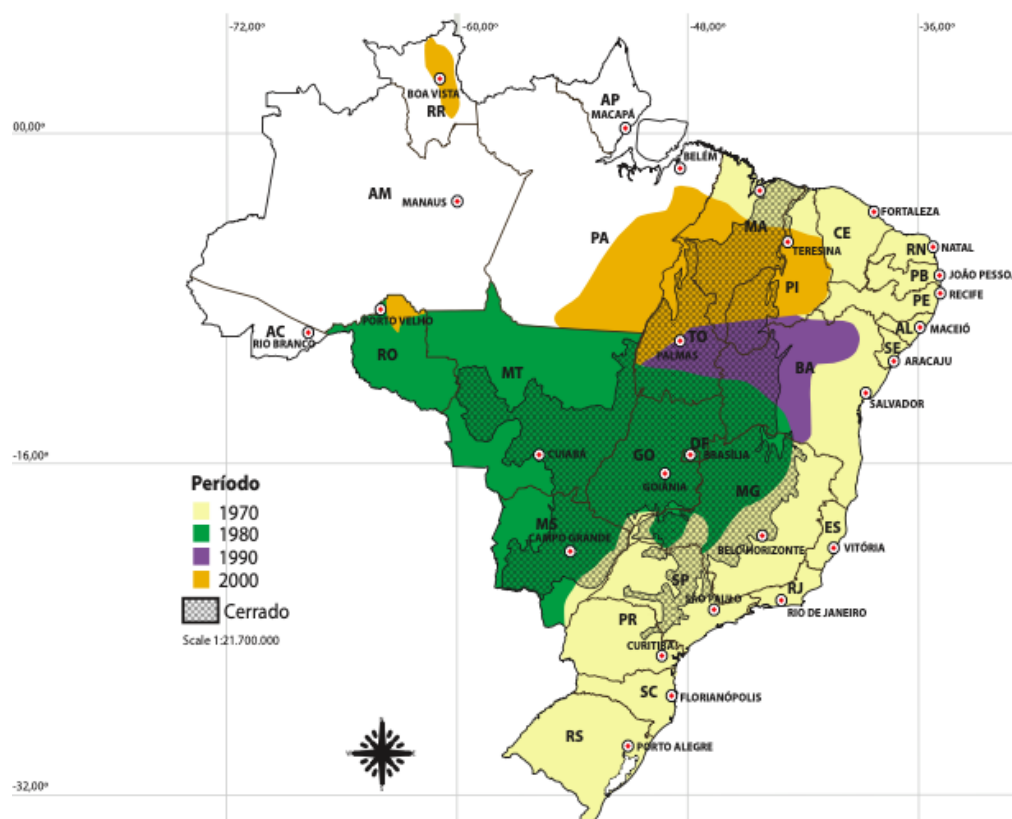
O aumento da área agrícola é fruto da natureza desbravadora e expansionista de seu povo e do desenvolvimento, bem-sucedido, de técnicas de correção de solos pouco propícios ao cultivo agrícola em grandes volumes a culturas de grãos pela equipe técnica da EMBRAPA, fato reconhecido internacionalmente. Pode se dizer que o agronegócio intensivo em conhecimento foi organizado com a criação da Embrapa em 1973 (Vieira Filho, 2016).

Na agricultura, a produtividade está atrelada aos fatores do capital humano e do capital físico, este último composto de capital biológico e capital mecânico. O capital biológico é o conjunto de conhecimentos acumulados sobre a prática do cultivo das espécies agrícolas, baseado em conhecimentos herdados de antepassados ou desenvolvido em pesquisas genéticas, e o capital mecânico está relacionado ao aumento da produtividade por inserção de máquinas agrícolas nos processos de cultivo e colheita.

Nos fatores que envolvem a produção agrícola o fator abundante, a partir do domínio do cultivo nos solos do cerrado, se tornou a terra e com a disponibilização do capital mecânico por meio de financiamentos, e do capital biológico, criou-se uma disrupção que explica o desenvolvimento deste setor no Brasil (Pastore, 2021). Segundo Vieira Filho (2016), a cada 100% de aumento na renda bruta da produção agropecuária 80% vêm da aplicação de tecnologia, 23% da aplicação de trabalho e 9% do uso da terra, ou seja, o custo marginal da terra vem caindo com a aplicação da tecnologia, e causando o efeito

“poupa terra”. Estes avanços tecnológicos não foram uniformes em todos o território nacional, como por desempenho na região Nordeste onde ainda predomina a agricultura tradicional de baixa produtividade. A expansão da fronteira pode ser vista na Figura 1, proposta por Vieira Filho (2016). A Tabela 1 apresenta o deslocamento espacial da produção agrícola brasileira ao longo do período 1990-2013, que se acelerou na última década com a ocupação de novas áreas nas regiões Norte e Nordeste.

Figura 1 – Expansão da fronteira agrícola no Brasil em décadas



Fonte: Vieira Filho (2016).

Tabela 1 – Deslocamento temporal da produção agrícola no Brasil

Região	Porcentagem relativa à produção em toneladas									
	Soja		Milho		Cana-de-açúcar		Café		Algodão	
	1990	2013	1990	2013	1990	2013	1990	2013	1990	2013
Matopiba	1,3	8,4	2,0	5,3	2,8	1,6	3,8	5,3	6,4	30,8
Rondônia	0,0	0,7	1,0	0,6	0,0	0,0	5,9	2,4	0,5	0,0
Acre	0,0	0,0	0,3	0,2	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
Amazonas	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,1	0,0	0,0
Roraima	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
Pará	0,0	0,6	0,9	0,8	0,1	0,1	1,8	0,2	0,3	0,0
Amapá	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
Tocantins	0,2	1,9	0,3	0,4	0,1	0,3	0,0	0,0	0,0	0,4
Norte	0,2	3,3	2,5	2,0	0,3	0,5	7,8	2,7	0,8	0,4
Maranhão	0,0	1,9	0,6	1,6	0,8	0,4	0,0	0,0	0,0	2,2
Piauí	0,0	1,1	0,4	0,6	0,6	0,1	0,0	0,0	0,2	1,1
Ceará	0,0	0,0	0,6	0,1	1,0	0,2	0,2	0,0	1,0	0,1
Rio Grande do Norte	0,0	0,0	0,0	0,0	0,9	0,5	0,0	0,0	0,2	0,0
Paraíba	0,0	0,0	0,2	0,0	3,2	0,8	0,0	0,0	0,6	0,0
Pernambuco	0,0	0,0	0,4	0,0	8,7	1,9	0,3	0,0	0,1	0,0
Alagoas	0,0	0,0	0,1	0,0	10,0	3,7	0,0	0,0	0,1	0,0
Sergipe	0,0	0,0	0,1	0,9	0,8	0,4	0,0	0,0	0,0	0,0
Bahia	1,1	3,4	0,6	2,6	1,3	0,9	3,8	5,3	6,1	27,1
Nordeste	1,1	6,4	3,0	6,0	27,3	8,9	4,3	5,4	8,5	30,4
Minas Gerais	3,8	4,1	10,6	9,3	6,7	9,3	35,5	54,0	5,3	2,0
Espírito Santo	0,0	0,0	0,9	0,1	0,6	0,5	14,9	23,7	0,0	0,0
Rio de Janeiro	0,0	0,0	0,1	0,0	2,1	0,6	0,8	0,6	0,0	0,0
São Paulo	4,7	2,3	13,0	5,5	52,5	56,5	22,2	9,2	26,9	1,4
Sudeste	8,5	6,4	24,6	14,9	61,8	67,0	73,4	87,5	32,2	3,4
Paraná	23,4	19,5	24,2	21,6	4,5	6,3	10,7	3,4	47,8	0,0
Santa Catarina	2,7	1,9	12,5	4,1	0,4	0,1	0,0	0,0	0,0	0,0
Rio Grande do Sul	31,7	15,6	18,5	6,8	0,3	0,1	0,0	0,0	0,0	0,0
Sul	57,8	37,1	55,2	32,5	5,2	6,5	10,7	3,4	47,8	0,0
Mato Grosso do Sul	10,2	7,1	2,8	9,4	1,6	5,5	0,3	0,1	4,1	5,1
Mato Grosso	15,4	28,7	2,9	25,1	1,2	2,6	2,7	0,3	3,2	54,6
Goiás	6,3	10,9	8,7	9,6	2,6	9,0	0,7	0,5	3,4	6,0
Distrito Federal	0,4	0,2	0,2	0,5	0,0	0,0	0,1	0,0	0,0	0,0
Centro-Oeste	32,4	46,8	14,6	44,7	5,4	17,1	3,7	1,0	10,7	65,7
Brasil	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0

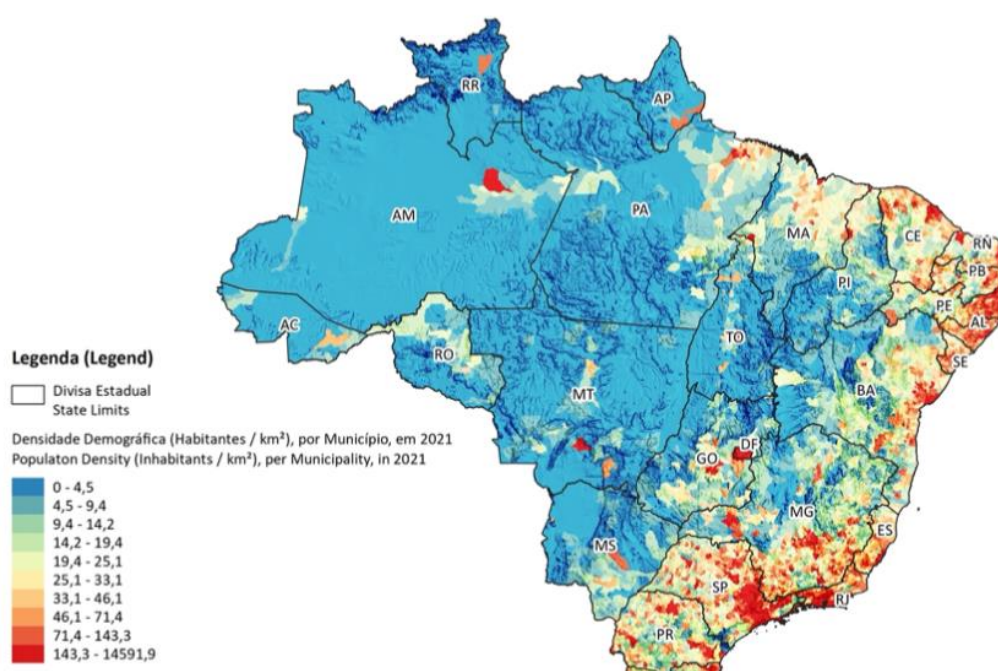
Fonte: Vieira Filho (2016).

De qualquer forma, seja por obstáculos de um meio hostil a inovações ou por ações de extensão rural insuficientes, as instituições se adaptaram as restrições existentes de clima e solo e geraram variedades que elevaram a produtividade.

O efeito não desejado deste processo foi a baixa absorção de mão de obra na produção e a aceleração de um processo de migração de grandes contingentes populacionais em direção às zonas urbanas. Em 1940 a proporção da população rural no Brasil em relação ao total era de quase 70%, em 2010 esta proporção tinha caído para 15%.

Esta proporção não se desenha de forma homogênea no país, e as regiões Norte (27%) e Nordeste (25%) apresentam as maiores proporções de população rural. Por outro lado, a região Centro-Oeste (10%) apresenta proporção de população rural menor que a média nacional (15%), segundo a última Pesquisa Nacional de Amostragem de Domicílios (PNAD) do Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística (2023b) (Figura 2).

Figura 2 – Densidade populacional – Brasil (2021)



Fonte: Castro (2022).

Esta migração para áreas urbanas em um primeiro momento causa um “bolsão de desempregados” ou subempregados nas periferias dos grandes centros urbanos, que só poderão entrar no mercado formal de trabalho por um processo de qualificação profissional para que possam ser absorvidos pelos setores industriais ou de serviços.

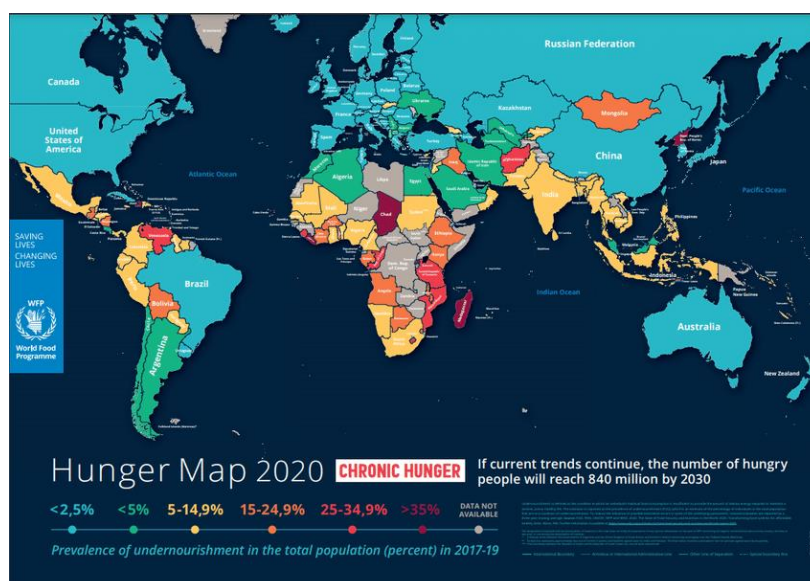
Neste contexto, o Arco Norte vem se destacando na produção de grãos e proteína animal. Há dez anos, a produção de grãos no Brasil era de 149 milhões de t/ano, estando a liderança da produção com os estados abaixo do paralelo 16 S, a safra 2022/2023 foi recorde de 322,8 milhões de toneladas (Companhia Nacional de Abastecimento, 2023), mais do que o

dobro de uma década atrás. A região do Arco Norte é responsável por quase 60% do total desta safra, valores estes obtidos pela expansão da área plantada, mas também pelo uso intensivo de tecnologia que faz com que em algumas áreas agrícolas a produtividade brasileira por hectare já seja maior que a da soja norte-americana. Atualmente, a produtividade média brasileira é 3,4 t/ha, mas já existem regiões no país que conseguem a produtividade recorde de 8,9 t/ha.

Atualmente, a economia agropecuária é o grande motor de desenvolvimento dos estados do Mato Grosso, Goiás e Rondônia, se posicionando estes como grandes produtores nacionais, assim como no estado do Tocantins. Os estados do MATOPIBA já iniciaram este processo mais recentemente e já ultrapassaram os estados do Sudeste na produção de grãos (Figura 1 – Apêndice A).

No mundo, a proporção de pessoas que vivem na linha da pobreza caiu de 1,9 bilhões em 1990 para 650 milhões em 2018. Somente a China retirou 800 milhões de habitantes desta situação nos últimos 40 anos (Instituto Sociocultural Brasil-China, 2022), em 2022 o país respondia por 20% das exportações da soja brasileira (Fundação Getúlio Vargas, 2022). A fome, ou a ingestão de alimentos abaixo da necessidade diária ainda alcança boa parte do mundo, apesar de o país estar em posição privilegiada de segurança alimentar (Figura 3); residindo nestes números o potencial de crescimento de um grande exportador de alimentos como o Brasil.

Figura 3 – Mapa da fome mundial 2020



Fonte: Food and Agricultural Organization of the United Nations (2021).

A Organização para a Cooperação e Desenvolvimento Econômico (OCDE) projeta a necessidade de crescimento da produção agrícola mundial em 20% para os próximos 10 anos, e estima que os países tradicionais produtores agrícolas conseguirão aumentar em no máximo 15% sua produção (Confederação da Agricultura e Pecuária Do Brasil, 2022). Somente um país poderá crescer mais que isto, o Brasil, mas necessitaria crescer 41%, ou seja, sua safra teria que crescer 41% nos próximos 10 anos (378 MTA), para atender a demanda mundial. No ritmo de crescimento anual já está muito perto deste volume.

A safra brasileira de grãos poderá chegar nos próximos a 500 milhões t/ano, e com todas as culturas agrícolas – soja, milho, algodão, sorgo, café, celulose - crescendo em volumes, o que poderá levar o país a assumir a liderança mundial na exportação de todas as *commodities* agrícolas que produz.

O mesmo acontece na produção de carnes (proteína animal) onde o país já tem o maior rebanho bovino comercial do mundo, sendo que a região do Arco Norte detém 50% do rebanho nacional, sendo o Brasil o primeiro ou segundo exportador mundial de carnes bovina, suína ou de frango (Avisite, 2022).

Apesar das deficiências da logística de escoamento das áreas produtoras até os portos de embarque – rodovias, ferrovias e hidrovias, as exportações de soja e milho pelos portos do Arco Norte cresceram 487,5% nos últimos 11 anos. Por causa disto, dois dos cinco maiores portos exportadores de grãos estão no Arco Norte – Itaqui e Barcarena/Belém (Arco [...], 2022).

Mesmo com a região liderando a produção agrícola, os portos do Arco Norte exportam apenas pouco mais da 30% da produção total brasileira. Mas isso está mudando pouco a pouco, com a ampliação e modernização dos portos da região e a construção de novas rodovias e ferrovias que levam a produção agrícola até estes portos, o que tem contribuído para reduzir substancialmente os fretes terrestres (Companhia Nacional de Abastecimento, 2022a).

Nos próximos anos – uma década pelo menos, segundo especialistas – ocorrerá um novo superciclo de *commodities* (na verdade, já está ocorrendo) pela combinação de uma série de choques simultâneos assimétricos, sendo a pandemia da Covid-19 o mais intenso, e ainda os efeitos da crise financeira de 2008 e os atentados de “11 de setembro” (Zakaria, 2008).

Além do mais, a ocorrência que vitimou o rebanho suíno chinês também causou a elevação de preços de *commodities* básicas da ração animal, como milho e soja. Como consequência de tudo isso, os grandes exportadores agrícolas – EUA, União Europeia e Brasil – deverão ter superávits comerciais agrícolas elevados.

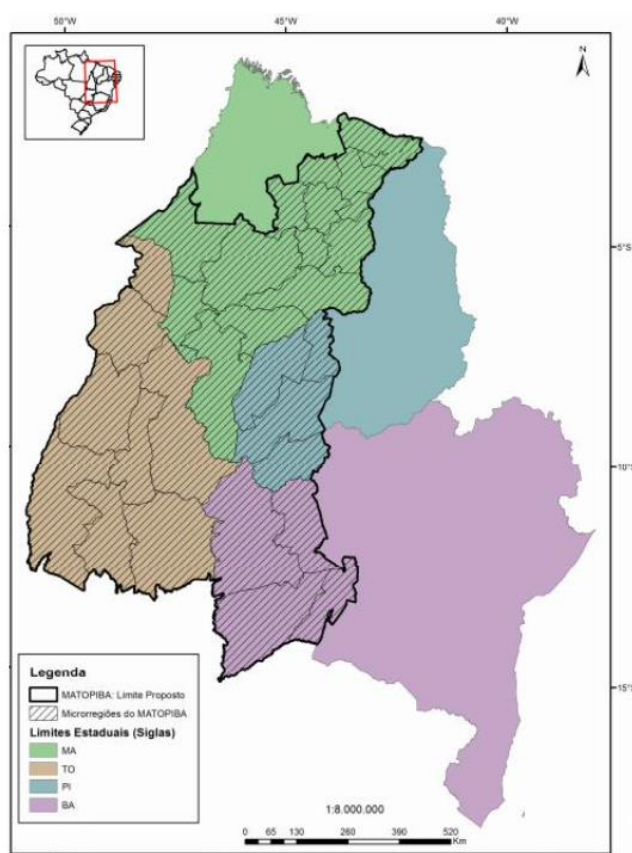
1.1 O Matopiba

O acrônimo Matopiba designa uma região geográfica que recobre alguns municípios dos estados do Maranhão, Tocantins, Piauí e Bahia. A área envolve toda a região sul e oeste do Maranhão, com exceção da Pré-Amazônia, o estado do Tocantins, Oeste da Bahia e sudoeste do Piauí.

É considerada a última fronteira agrícola brasileira, é resultante da expansão do agronegócio e do avanço de um modelo de produção altamente mecanizado, amparado sobre critérios de excelência e competitividade, que faz uso de tecnologias modernas. A produção de grãos em 2022/2023 já alcançou 35 milhões/ton, sendo atualmente a área de maior expansão em área cultivada (Companhia Nacional de Abastecimento, 2023).

Esta é a fronteira agrícola com vegetação e solos característicos do cerrado, terras baratas e estações climáticas regulares e previsíveis, fatores essenciais para o bom desempenho da produtividade e lucratividade do agronegócio (Figura 4).

Figura 4 – A região do Matopiba



Fonte: Massari (2022).

O Matopiba está delimitado em uma área de 73,07 milhões de hectares onde vivem mais de seis milhões de habitantes. Como já citado, a presença de áreas planas de cerrado, condições climáticas adequadas para cultivos de grãos, proximidade de terminais portuários (Baía de São Marcos – MA), terras comparativamente de baixo valor comercial, possibilidade de escoamento da produção por meio de outros modais de transporte – alternativos ou complementares ao modal rodoviário (ferrovias Norte-Sul e Carajás) tornam a região bastante atrativa para a atividade agropecuária.

Em 2015, foi lançado o Plano de Desenvolvimento Agropecuário do Matopiba (Mapa Brasil, 2016), que tem por finalidade promover e coordenar políticas públicas voltadas ao desenvolvimento econômico sustentável fundado nas atividades agrícolas e pecuárias que resultem na melhoria da qualidade de vida da população da região. O plano prevê a criação de um Comitê Gestor que será responsável, entre outras funções, por implementar programas, projetos e ações que incentivem o desenvolvimento agrícola e pecuário da região, propondo soluções visando a geração de tecnologias, produtos, processos e serviços capazes de aumentar a produtividade, reduzir custos, minorar os impactos ambientais e proporcionar o desenvolvimento econômico e social de forma sustentável (Belchior; Alcântara; Barbosa, 2017).

1.2 O Centro-Oeste

Formada pelos estados do Mato Grosso, Mato Grosso do Sul e Goiás, a região Centro-Oeste teve a inauguração de Brasília como o fator que alavancou o desenvolvimento da região. Ainda assim, ela até hoje é uma das regiões menos populosas do Brasil, com apenas 8,7 habitantes por quilômetro quadrado, sendo que 88% deles vivem em cidades (Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística, 2023). Apesar disto, tem se mostrado extremamente dinâmica economicamente.

Ano após ano, o Centro-Oeste tem se consolidado como o celeiro do Brasil, abastecendo tanto o mercado doméstico quanto o internacional (Portal do Agronegócio, 2018).

O agronegócio é o setor mais importante da agricultura do Centro-Oeste brasileiro. O cenário do estado do Mato Grosso – o que mais cresce na região e em todo o território nacional – é um excelente exemplo de sua consolidação.

A região é a maior produtora nacional de soja, e compete, inclusive, em mercados tradicionais e internacionais – em períodos de clima adverso nos Estados Unidos, a zona brasileira chegou a desbancar a produção americana. A cultura da soja foi introduzida no

Centro-Oeste em 1980, por imigrantes do Sul do Brasil. Ela se adaptou facilmente e, hoje, é o principal produto local. O Mato Grosso é o maior produtor brasileiro de soja, com safra em 2022/2023 de 44,4 Mi ton (Petroli, 2023), e em segundo lugar vem o estado de Goiás com 16,8 Mi ton (Goiás, 2023).

O milho é o outro grão responsável por impulsionar o crescimento econômico do Centro-Oeste. A produção de milho desta região na safra 2022/2023 teve o total de 63 Mi Ton, mais da metade da produção nacional.

O motivo por trás disso são os investimentos crescentes no etanol de milho. Recursos nacionais e estrangeiros têm sido depositados no projeto, que deve aumentar a capacidade produtiva nacional do combustível em mais de 1 bilhão de litros. Em 2018, seis usinas devem ser aumentadas ou construídas na região, o que deve colaborar com o escoamento da produção.

Dois estados do Centro-Oeste são os líderes nacionais no abate de gado bovino (Mato Grosso e Goiás), representando quase um terço da produção nacional, de acordo com o Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística (2024).

O Mato Grosso, maior produtor de carne bovina do país, se destacou entre os estados do Centro-Oeste em termos de crescimento de volume exportado frente a 2021. O estado registrou um incremento de 24,2% nas exportações saltando de 272,72 mi ton para 338,69 mil. Os embarques de carne bovina in natura brasileira ao mercado internacional somaram 1,5 milhão de toneladas entre janeiro e setembro de 2022. A região Centro-Oeste foi responsável por 45,3% desse volume, com 680,1 mil toneladas de carnes embarcadas (Petroli, 2022).

Como consequência a região se tornou a mais dinâmica economicamente nas últimas décadas com crescimento do PIB acima da média nacional e este crescimento puxado pelo setor agropecuário está solicitando urgente expansão da logística de escoamento de produção (Miragaya, 2014).

REFERÊNCIAS

ARCO Norte ultrapassa outros portos em movimentação de soja e milho. **Canal Rural**, São Paulo, 15 ago. 2022. Disponível em: <https://www.canalrural.com.br/noticias/agricultura/arco-norte-ultrapassa-outros-portos-em-movimentacao-de-soja-e-milho/>. Acesso em: 10 set. 2022.

AVISITE. **OCDE/FAO**: Tendências da produção e comércio de carnes no mundo e a participação brasileira. Campinas, 6 jul. 2022. Disponível em: <https://www.avisite.com.br/ocde-fao-tendencias-da-producao-e-comercio-de-carne-no-mundo-e-a-participacao-brasileira/>. Acesso em: 10 jul. 2022.

BELCHIOR, Ernandes Barboza; ALCÂNTARA, Pedro Henrique Rezende; BARBOSA, Cláudio França. Perspectivas e desafios para a região do Matopiba. **Fronteira Agrícola – Informativo Técnico**, [S. l.], n. 16, p. 1-3, jan. 2017. Disponível em: <https://www.embrapa.br/busca-de-publicacoes/-/publicacao/1065435/perspectivas-e-desafios-para-a-regiao-do-matopiba>. Acesso em: 14 jun. 2022.

CASTRO, Alexandre. Mapa da População e Densidade Demográfica dos Municípios do Brasil (2021). **Rede Urbana**, [S. l.], 11 fev. 2022. Disponível em: <https://aredeurbana.com.br/2022/02/11/mapa-da-populacao-e-densidade-demografica-dos-municipios-do-brasil-2021/>. Acesso em: 10 mar. 2024.

COMPANHIA NACIONAL DE ABASTECIMENTO. **Boletim logístico**: maior volume de soja escoado pelos portos do Arco Norte é registrado pela Conab. Brasília, DF, 24 nov. 2022a. Disponível em: <https://www.conab.gov.br/ultimas-noticias/4834-boletim-logistico-maior-volume-de-soja-escoado-pelos-portos-do-arco-norte-e-registrado-pela-conab>. Acesso em: 8 dez. 2022.

COMPANHIA NACIONAL DE ABASTECIMENTO. **Conab prevê novo recorde na produção de grãos em 312,4 milhões de toneladas na safra 2022/23**. Brasília, DF, 6 out. 2022. Disponível em: <https://www.conab.gov.br/ultimas-noticias/4774-conab-preve-novo-recorde-na-producao-de-graos-em-312-4-milhoes-de-toneladas-na-safra-2022-23>. Acesso em: 10 out. 2022.

COMPANHIA NACIONAL DE ABASTECIMENTO. Mercado de fretes e conjuntura de exportação. **Boletim Logístico**, Brasília, DF, ano 7, p. 1-27, dez. 2023. Disponível em: <https://www.conab.gov.br/info-agro/analises-do-mercado-agropecuario-e-extrativista/boletim-logistico>. Acesso em: 27 dez. 2023.

CONFEDERAÇÃO DA AGRICULTURA E PECUÁRIA DO BRASIL. **Sumário executivo: OCDE-FAO perspectivas agrícolas 2022–2031**. [S. l.], 2022. Disponível em: <https://www.cnabrazil.org.br/storage/arquivos/files/Sumario-Executivo-Perspectivas-Agricolas-2022-2031.pdf>. Acesso em: 5 fev. 2022.

FOOD AND AGRICULTURAL ORGANIZATION OF THE UNITED NATIONS. **Optimising Global Food System Model Based on Index Evaluation System**. [S. l.], 2021. Disponível em: https://www.researchgate.net/figure/Hunger-Map-Adapted-from-FAO-2020_fig1_351079482. Acesso em: 14 mar. 2024.

FOOD AND AGRICULTURE ORGANIZATION OF THE UNITED NATIONS. **How to feed the world in 2050**. [S. l.]: Food and Agriculture Organization, 2009. Disponível em: https://www.fao.org/fileadmin/templates/wsfs/docs/expert_paper/How_to_Feed_the_World_in_2050.pdf Acesso em: 10 mar. 2022.

FUNDAÇÃO GETÚLIO VARGAS. **Volume de exportações para a China cai, mas cresce em outros mercados**. Rio de Janeiro, 18 fev. 2022. Disponível em: <https://portalibre.fgv.br/noticias/volume-de-exportacoes-para-china-cai-mas-cresce-em-outros-mercados>. Acesso em: 20 fev. 2022.

GOIÁS. Secretaria de Estado de Agricultura, Pecuária e Abastecimento. **Goiás deve aumentar produção de grãos na safra 2022/2023 e chegar a 31,5 milhões de toneladas**. Goiânia, 9 fev. 2023. Disponível em: <https://www.agricultura.go.gov.br/comunicacao/not%C3%ADcias/4217-goi%C3%AAs-deve-aumentar-produ%C3%A7%C3%A3o-de-gr%C3%A3os-na-safra-2022-2023-e-chegar-a-31,5-milh%C3%B5es-de-toneladas.html#:~:text=A%20soja%20%C3%A9%20o%20gr%C3%A3o,em%203.700%20milh%C3%B5es%20por%20hectare>. Acesso em: 15 fev. 2023.

INSTITUTO BRASILEIRO DE GEOGRAFIA E ESTATÍSTICA. **Cidades e estados**: Brasil. Rio de Janeiro, 2023. Disponível em: <https://www.ibge.gov.br/cidades-e-estados>. Acesso em: 2 mar. 2022.

INSTITUTO BRASILEIRO DE GEOGRAFIA E ESTATÍSTICA. Em 2023, abate de bovinos cresce e o de suínos e frangos atinge recordes. **Agência IBGE Notícias**, Rio de Janeiro, 14 mar. 2024. Disponível em: <https://agenciadenoticias.ibge.gov.br/agencia-sala-de-imprensa/2013-agencia-de-noticias/releases/39452-em-2023-abate-de-bovinos-cresce-e-o-de-su%C3%ADnos-e-frangos-atingem-recordes#:~:text=Mato%20Grosso%20continuou%20liderando%20o,de%20servi%C3%A7o%20de%20inspe%C3%A7%C3%A3o%20sanit%C3%A1ria>. Acesso em: 20 mar. 2024.

INSTITUTO SOCIOCULTURAL BRASIL-CHINA. **China tira 800 milhões de pessoas da pobreza em 40 anos, respondendo por 75% da redução global da pobreza**. São Paulo, 22 abr. 2022. Disponível em: <https://www.ibrachina.com.br/china-tira-800-milhoes-de-pessoas-da-pobreza-em-40-anos-respondendo-por-75-da-reducao-global-da-pobreza/>. Acesso em: 5 maio 2023.

MAPA BRASIL. Secretaria de Mobilidade Social, do Produtor Rural e do Cooperativismo. **PDA-Matopiba**: Plano de Desenvolvimento Agropecuário do Matopiba. [S. l.], 2016. Disponível em: <https://legis.senado.leg.br/sdleg-getter/documento/download/9793c5f3-9a98-4d32-a632-2638ea4407e1>. Acesso em: 5 fev. 2022.

MASSARI. **A nova fronteira agrícola do Brasil**: Matopiba. Salto de Pirapora, jan. 2022. Disponível em: <https://www.massari.ind.br/a-nova-fronteira-agricola-do-brasil-matopiba/>. Acesso em: 15 nov. 2023.

MIRAGAYA, Júlio Flávio Gameiro. O desempenho da economia na Região Centro-Oeste. In: CAVALCANTI, Isabel Machado *et al.* **Um olhar territorial sobre o desenvolvimento-Centro-Oeste**. Rio de Janeiro: Banco Nacional de Desenvolvimento Econômico e Social, 2014. Disponível em:

https://web.bndes.gov.br/bib/jspui/bitstream/1408/7301/1/O%20desempenho%20da%20economia%20na%20Região%20Centro-Oeste_14_P.pdf. Acesso em: 10 abr. 2023.

PASTORE, Afonso Celso. **Erros do passado, soluções para o futuro**: a herança das políticas econômicas brasileiras do século XX. São Paulo: Penguin, 2021.

PETROLI, Viviane. Brasil: 45,3% da carne bovina exportada em 2022 é do Centro-Oeste.

Canal Rural, Rondonópolis, 25 out. 2022. Disponível em:

<https://www.canalrural.com.br/mato-grosso/brasil-453-da-carne-bovina-exportada-em-2022-e-do-centro-oeste/>. Acesso em: 5 nov. 2022.

PETROLI, Viviane. Na safra 2022/23, Mato Grosso supera Argentina e se torna terceiro maior produtor de soja do mundo. **Canal Rural**, Rondonópolis, 15 mar. 2023. Disponível em:

<https://www.canalrural.com.br/mato-grosso/na-safra-2022-23-mato-grosso-supera-argentina-e-se-torna-terceiro-maior-produtor-de-soja-do-mundo/#:~:text=SAFRA%20RECORDE-,Na%20safra%202022%2F23%2C%20Mato%20Grosso%20supera%20Argentina%20e%20se,produtor%20de%20soja%20do%20mundo&text=A%20safra%20recorde%20de%2044,o%20estado%20fosse%20um%20pa%C3%ADs>. Acesso em: 20 mar. 2023.

PORTAL DO AGRONEGÓCIO. **Agronegócio no Centro-Oeste: importância e principais produtos**. Belo Horizonte, 19 mar. 2018. Disponível em:

<https://www.portaldoagronegocio.com.br/gestao-rural/analise-de-mercado/noticias/agronegocio-no-centro-oeste-importancia-e-principais-produtos-169749>. Acesso em: 5 fev. 2022.

VALE. **Conheça mais sobre a história de Carajás**: a maior mina minério de ferro do mundo. [S. l.], [2024?]. Disponível em: <http://www.vale.com/hotsite/PT/Paginas/conheca-mais-sobre-historia-carajas-maior-mina-minerio-ferro-mundo.aspx>. Acesso em: 2 mar. 2023.

VIEIRA FILHO, José E. R. **Expansão da fronteira agrícola no Brasil**. Brasília, DF: IPEA, 2016. (Texto para Discussão, 2223). Disponível em:

https://repositorio.ipea.gov.br/bitstream/11058/6909/1/td_2223.PDF. Acesso em: 2 mar. 2023.

ZAKARIA, Fareed. **O mundo pós-americano**. São Paulo: Companhia das Letras, 2008.