

PONTIFÍCIA UNIVERSIDADE CATÓLICA DE GOIÁS

ESCOLA POLITÉCNICA E DE ARTES

GRADUAÇÃO EM CIÊNCIA DA COMPUTAÇÃO



**OTIMIZAÇÃO EM ROTEAMENTO DE VEÍCULOS PARA A EXPORTAÇÃO DE
SOJA NO BRASIL: MODELAGEM E APLICAÇÃO PRÁTICA**

FELIPE CAMILO ALVES

GOIÂNIA

2024

FELIPE CAMILO ALVES

**OTIMIZAÇÃO EM ROTEAMENTO DE VEÍCULOS PARA A EXPORTAÇÃO DE
SOJA NO BRASIL: MODELAGEM E APLICAÇÃO PRÁTICA**

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado à
Escola Politécnica e de Artes da Pontifícia
Universidade Católica de Goiás, como partes dos
requisitos para obtenção do título de Bacharel em
Ciência da Computação.

Orientadora:

Profa. Dra. Maria José Pereira Dantas

GOIÂNIA

2024

FELIPE CAMILO ALVES

**OTIMIZAÇÃO EM ROTEAMENTO DE VEÍCULOS PARA A EXPORTAÇÃO DE
SOJA NO BRASIL: MODELAGEM E APLICAÇÃO PRÁTICA**

Trabalho de Conclusão de Curso aprovado em sua forma final pela Escola Politécnica e de Artes da Pontifícia Universidade Católica de Goiás, para obtenção do título de Bacharel em Ciência da Computação, em ____/____/____.

Orientadora: Profa. Dra. Maria José Pereira Dantas

Prof. Me. Alexandre Ribeiro

Profa. Dra. Carmen Cecília Centeno

GOIÂNIA

2024

AGRADECIMENTOS

Agradeço, em primeiro lugar, a Deus, por me conceder força, sabedoria e resiliência para superar os desafios dessa jornada. Aos meus pais, expresso minha profunda gratidão pelo apoio, pelas orientações e pelo amor incondicional, que me acompanharam em cada etapa deste caminho.

Agradeço também à Professora Dra. Maria José Pereira Dantas, que foi minha orientadora durante cerca de dois anos, tanto na Iniciação Científica quanto no desenvolvimento deste Trabalho de Conclusão de Curso. Sua paciência, dedicação e vasto conhecimento foram fundamentais para o meu crescimento acadêmico e pessoal, deixando um impacto significativo em minha trajetória.

Reconheço também a valiosa contribuição dos membros da banca examinadora, Professor Me. Alexandre Ribeiro e Professora Dra. Carmen Cecília Centeno, que aceitaram o convite para avaliar este trabalho. Suas aulas, ministradas nas primeiras disciplinas do curso, despertaram meu interesse pela área da computação, e consolidaram minha escolha por essa profissão. Seus ensinamentos foram pilares importantes para minha formação.

Aos amigos e colegas que caminharam comigo ao longo do curso, deixo minha sincera gratidão. As trocas de experiências, o apoio constante e o incentivo de cada um de vocês foram fundamentais para que eu mantivesse a motivação e encontrasse a força necessária para alcançar esta conquista.

Por fim, agradeço também todos os professores que contribuíram para a construção do meu aprendizado. Suas lições foram além ao âmbito acadêmico, mas também contribuíram para minha formação pessoal. Em especial, destaco o Me. Alexandre Ribeiro, Dra. Carmen Cecília Centeno, Dr. Marco Antônio Figueiredo Menezes, Dra. Maria José Pereira Dantas e Me. Max Gontijo de Oliveira, que, com seu compromisso e inspiração, deixaram marcas profundas na minha trajetória.

“Os ouvidos que atendem à repreensão da vida farão a sua morada no meio dos sábios.
O que rejeita a instrução menospreza a própria alma, mas o que escuta a repreensão
adquire entendimento. O temor do Senhor é a instrução da sabedoria, e precedendo a
honra vai a humildade.” Provérbios 15:31-33

RESUMO

Este trabalho apresenta o desenvolvimento e a aplicação de um modelo de otimização multiobjetivo para o Problema de Transporte com Múltiplos Veículos (PTMV), com foco na logística de exportação de soja no Brasil. A soja, sendo uma das principais commodities do país, desempenha um papel estratégico na economia nacional, exigindo soluções logísticas eficientes que conciliem custos reduzidos e menores emissões de CO₂. Utilizando dados reais de rotas e nós logísticos, o modelo foi implementado com base na programação linear inteira mista (PLIM) e na técnica ϵ -*constraint*, permitindo uma abordagem biobjetivo para minimizar custos e emissões de gases de efeito estufa. Três cenários distintos foram analisados, cada um representando diferentes configurações logísticas e explorando os *trade-offs* entre eficiência econômica e sustentabilidade ambiental. A partir das Fronteiras de Pareto construídas para cada cenário, foram identificadas as soluções mais relevantes: aquelas com menor custo, menor emissão de CO₂ e equilíbrio entre os dois critérios. Os resultados demonstraram a robustez do modelo, capaz de atender às restrições de oferta, demanda e capacidade, bem como sua flexibilidade para se adaptar a diferentes cenários logísticos. Além disso, a análise destacou a importância de integrar transbordos estratégicos em rotas otimizadas para reduzir emissões, mesmo que isso implique em custos adicionais. As soluções geradas pelo modelo refletem uma contribuição prática significativa para o planejamento logístico da cadeia produtiva de soja, oferecendo alternativas viáveis e sustentáveis para o transporte rodoviário no Brasil. Apesar das limitações relacionadas à disponibilidade de dados reais, o modelo provou ser uma ferramenta eficaz para apoiar decisões estratégicas no setor agrícola. O modelo desenvolvido oferece soluções otimizadas para problemas logísticos complexos, contribuindo diretamente para a redução dos impactos ambientais associados ao transporte de soja e promovendo um equilíbrio estratégico entre competitividade econômica e sustentabilidade.

Palavras-chave: Otimização de Transporte; Problema de Transporte com Múltiplos Veículos; Programação Linear Inteira Mista; Fronteira de Pareto; Soja.

ABSTRACT

This study presents the development and application of a multi-objective optimization model for the Multi-Vehicle Transportation Problem (MVTP), focusing on the logistics of soybean exportation in Brazil. Soybean, as one of the country's main commodities, plays a strategic role in the national economy, requiring efficient logistics solutions that balance reduced costs and lower CO₂ emissions. Using real data on routes and logistics nodes, the model was implemented based on mixed-integer linear programming (MILP) and the ϵ -constraint technique, enabling a bi-objective approach to minimize costs and greenhouse gas emissions. Three distinct scenarios were analyzed, each representing different logistical configurations and exploring the tradeoffs between economic efficiency and environmental sustainability. From the Pareto Fronts constructed for each scenario, the most relevant solutions were identified: those with the lowest cost, the lowest CO₂ emissions, and the best balance between the two criteria. The results demonstrated the model's robustness in meeting constraints on supply, demand, and capacity, as well as its flexibility to adapt to different logistical scenarios. Additionally, the analysis highlighted the importance of integrating strategic transshipment points into optimized routes to reduce emissions, even at the expense of increased costs. The solutions generated by the model provide a significant practical contribution to the logistical planning of the soybean supply chain, offering viable and sustainable alternatives for road transport in Brazil. Despite limitations related to the availability of real data, the model proved to be an effective tool to support strategic decision-making in the agricultural sector. The developed model provides optimized solutions for complex logistical problems, directly contributing to the reduction of environmental impacts associated with soybean transport while promoting a strategic balance between economic competitiveness and sustainability.

Key-words: Transportation Optimization; Multi-Vehicle Transportation Problem; Mixed-Integer Linear Programming; Pareto Front; Soybean.

LISTA DE ILUSTRAÇÕES

Figura 1: Problema de Transporte com Múltiplos Veículos.....	18
Figura 2: Rotas ferroviárias no Brasil para exportação de soja, 2023.....	21
Figura 3: Logística da Soja e do Milho no Brasil, 2020.....	22
Figura 4: Grafo das Rotas Possíveis para o Transporte de Soja no Cenário 1.....	31
Figura 5: Grafo das Rotas Possíveis para o Transporte de Soja no Cenário 2.....	32
Figura 6: Grafo das Rotas Possíveis para o Transporte de Soja no Cenário 3.....	33
Figura 7: Fronteira de Pareto para o Cenário 2: Custo vs Emissão de CO ₂	35
Figura 8: Fronteira de Pareto para o Cenário 3: Custo vs Emissão de CO ₂	37

LISTA DE TABELAS

Tabela 1: Classificação dos Nós Logísticos no Transporte de Soja no Brasil.....21

Tabela 2: Exemplos de Rotas entre os Nós Logísticos.....21

LISTA DE SIGLAS

CO₂: Dióxido de Carbono

CST: Castro (PR)

CHO: Chopinzinho (PR)

CRT: Cristianópolis (GO)

EST: Estrela (RS)

MILP: *Mixed-Integer Linear Programming* (Programação Linear Inteira Mista - PLIM)

MOO: *Multi-Objective Optimization* (Otimização Multiobjetivo)

MVTP: *Multi-Vehicle Transportation Problem* (Problema de Transporte com Múltiplos Veículos - PTMV)

PAR: Paranaguá (PR)

PLIM: Programação Linear Inteira Mista

PRG: Porto Rio Grande (RS)

PTMV: Problema de Transporte com Múltiplos Veículos

RND: Rondonópolis (MT)

SNT: Porto Santos (SP)

SRS: Sorriso (MT)

STM: Santa Maria (RS)

TUP: Tupanciretã (RS) UBR: Uberlândia (GO) ϵ -constraint: Método de restrição *epsilon* para otimização multiobjetivo

SUMÁRIO

1. INTRODUÇÃO:	14
1.1 Problema de pesquisa:	15
1.2 Objetivo Geral:	16
1.3 Objetivos Específicos:	16
1.4 Justificativa:	16
1.5 Organização do Trabalho:	17
2 REFERENCIAL TEÓRICO:	18
2.1 Logística Verde e Sustentabilidade no Transporte	18
2.2 Fundamentos da Otimização	18
2.3 Problema de Transporte com Múltiplos Veículos (PTMV)	19
2.4 Abordagem Biobjetivo	20
2.5 Fronteira de Pareto	20
2.6 Pontos de Transbordo	20
2.7 Métodos de Otimização e Ferramentas Computacionais	21
2.8 Aplicação Prática na Logística de Soja	21
3 MÉTODO:	24
3.1 Descrição do Problema:	24
3.2 Base de Dados:	24
3.3 Modelo do Problema:	26
3.4 Implementação ϵ -constraint:	28
3.5 Etapas da Pesquisa:	29
3.6 Ferramentas Utilizadas:	30
4. RESULTADOS E DISCUSSÃO:	31
4.1 Aplicação Prática:	31
4.2 Cenário 1: Transporte de Soja de Tupanciretã (RS) para o Porto Rio Grande (RS)	32
4.3 Cenário 2: Transporte de Soja de Chopinzinho (PR) e Castro (PR) para o Porto Paranaguá (PR)	32
4.4 Cenário 3: Transporte de Soja de Cristianópolis (GO) e Sorriso (MT) para o Porto Santos (SP)	33
4.5 Resultados do Cenário 1: Transporte de Soja de Tupanciretã (RS) para o Porto Rio Grande (RS)	34

4.6 Resultados do Cenário 2: Transporte de Soja em Chopinzinho (PR) e Castro (PR) para o Porto Paranaguá (PR)	35
4.7 Resultados do Cenário 3: Transporte de Soja de Cristianópolis (GO) e Sorriso (MT) para o Porto Santos (SP)	37
4.8 Discussão:	39
5. CONSIDERAÇÕES FINAIS:	40
REFERÊNCIAS	41
<i>APÊNDICE A – Classificação dos Nós Logísticos no Transporte de Soja no Brasil</i>	<i>44</i>
<i>APÊNDICE B – Rotas entre os Nós Logísticos no Transporte de Soja no Brasil</i>	<i>46</i>
<i>APÊNDICE C – Estado da Arte em Métodos de Otimização</i>	<i>49</i>

1.INTRODUÇÃO

De acordo com a Embrapa, na safra de 2021/22, a produção mundial de soja alcançou 369,029 milhões de toneladas, das quais o Brasil foi responsável por aproximadamente 154,5 milhões de toneladas, representando 41,8% da produção global de soja (EMBRAPA, 2024). Isso posiciona o Brasil como o maior produtor de soja no mundo.

A soja representa uma parte significativa da produção agrícola do Brasil, e é um dos pilares da economia nacional. A exportação de soja gera receitas substanciais, contribui para a balança comercial e cria empregos em diversas regiões do país (EMBRAPA, 2024; IBGE, 2024).

A crescente demanda global por soja, impulsionada pela expansão dos mercados asiáticos, aumenta a pressão sobre as cadeias de suprimentos brasileiras (FAO, 2023). Além disso, as preocupações com mudanças climáticas e a necessidade de reduzir emissões de gases de efeito estufa destacam a urgência de implementar práticas logísticas sustentáveis (IPCC, 2021). Ferramentas de otimização logística tornam-se, portanto, indispensáveis para equilibrar competitividade econômica e responsabilidade ambiental no setor agrícola (Resat & Turkay, 2019).

Com o crescimento contínuo da produção de soja, a eficiência logística se torna cada vez mais crucial. O transporte desta *commodity* do campo até os portos de exportação exige uma gestão otimizada para reduzir custos, minimizar tempos de transporte e aumentar a competitividade no mercado internacional.

O Brasil enfrenta um dos maiores custos de transporte de soja no mundo, reflexo das grandes distâncias que separam as áreas de produção dos portos de exportação (IBGE, 2024). Além disso, a precariedade de muitas rodovias gera atrasos e eleva os custos logísticos (EMBRAPA, 2024). A situação é agravada pela malha ferroviária limitada, que dificulta a implementação eficiente do transporte intermodal (Borges, 2023).

Apesar dos avanços em tecnologias de aprendizado de máquina, problemas logísticos complexos, como o Problema de Transporte com Múltiplos Veículos, ainda apresentam desafios significativos. Esses problemas são classificados como NP-

difíceis, o que significa que encontrar soluções ótimas em tempo aceitável é computacionalmente inviável na maioria dos casos (CHEN et al., 2017). Para lidar com essas limitações, técnicas de otimização combinatória, como a programação linear inteira e mista (PLIM), são amplamente utilizadas, possibilitando a modelagem e a resolução de problemas reais de logística de forma eficiente (Resat & Turkay, 2019).

Borges (2023) enfatiza a importância da logística verde, que visa incorporar práticas sustentáveis na logística e na cadeia de suprimentos, abrangendo a redução de emissões de gases de efeito estufa, a minimização de resíduos e a preservação de recursos naturais. Borges analisou o impacto financeiro e ambiental do transporte rododferroviário de soja em Goiás, destacando economias significativas e a redução de emissões de CO₂ com a ativação da Rumo Malha Central (RMC). Esta ativação resultou em uma economia de 11 milhões de reais em custos de frete e uma redução de 38.625 toneladas de CO₂e. Implementações bem-sucedidas dessas práticas podem gerar economias financeiras significativas e reduções nas emissões de CO₂.

Este trabalho tem como objetivo desenvolver um modelo de otimização baseado em programação linear inteira e mista para propor soluções que minimizem os custos de transporte e as emissões de CO₂ no contexto da exportação de soja. A abordagem utiliza o solver Gurobi para encontrar rotas eficientes, integrando critérios econômicos e ambientais em uma estrutura multiobjetivo. Essas soluções otimizadas contribuem diretamente para práticas logísticas sustentáveis, ao propor rotas de transporte mais eficientes tanto economicamente quanto ecologicamente, atendendo à necessidade de minimizar os impactos negativos do transporte rodoviário de soja no meio ambiente.

1.1 Problema de pesquisa:

Como modelar a rede de transporte de soja para exportação no Brasil, considerando dados reais de nós e rotas disponíveis de 2018, de forma a minimizar os custos e as emissões de CO₂? O desafio é otimizar as rotas de transporte rodoviário, onde caminhões coletam a soja dos produtores e a transportam para os portos de exportação ou pontos de transbordo, avaliando a eficiência da cadeia logística buscando minimizar tanto os custos totais quanto as emissões de CO₂.

1.2 Objetivo Geral:

Desenvolver e implementar um modelo de otimização baseado em programação linear inteira e mista biobjetivo, utilizando o solver Gurobi, para propor soluções eficientes ao Problema de Transporte com Múltiplos Veículos (PTMV) no contexto da logística de exportação de soja no Brasil, visando minimizar custos e emissões de CO₂.

1.3 Objetivos Específicos:

- Analisar o transporte rodoviário de soja no Brasil como um Problema de Transporte com Múltiplos Veículos (PTMV), utilizando dados reais de 2019 sobre nós e rotas disponíveis.
- Modelar o PTMV como um problema de programação linear inteira mista (PLIM), com abordagem bi-objetivo para minimizar custos e emissões de CO₂.
- Resolver o modelo matemático utilizando o solver Gurobi para obter soluções otimizadas e eficientes.
- Avaliar a qualidade e eficiência das soluções propostas, aplicando testes em diferentes cenários de demanda e variabilidade nos dados de transporte.
- Explorar as soluções obtidas utilizando frentes de Pareto, destacando os *trade-offs* entre critérios econômicos e ambientais no contexto logístico.

1.4 Justificativa:

A crescente complexidade e demanda por soluções eficientes na logística moderna, especialmente no transporte de *commodities* como a soja, destacam a importância de métodos avançados de otimização (Toth & Vigo, 2002). O Problema de Transporte com Múltiplos Veículos (PTMV) é um desafio relevante nesse contexto, pois envolve a minimização de custos e emissões de CO₂ em cenários reais de logística (Cordeau et al., 2007). A escolha pela programação linear inteira e mista, combinada com o solver Gurobi, é justificada por sua capacidade de resolver problemas NP-difíceis de maneira eficiente e robusta (Bertsimas & Tsitsiklis, 1997; Gurobi Optimization, LLC, 2024). Essa abordagem permite integrar critérios econômicos e ambientais, fornecendo soluções otimizadas que reduzem custos e

emissões de gases de efeito estufa (Silva, Souza & Ribeiro, 2020). O uso de frentes de Pareto no modelo facilita a análise de *trade-offs*, permitindo que tomadores de decisão identifiquem soluções não dominadas que equilibram eficiência econômica e sustentabilidade (Ehrgott, 2005; Coello et al., 2007). Além disso, resolver o PTMV com uma abordagem que utiliza dados reais de nós e rotas disponíveis representa uma contribuição prática e relevante para o setor de logística agrícola brasileiro (Wanke & Rodrigues, 2016).

1.5 Organização do Trabalho:

Este trabalho está estruturado em cinco capítulos, conforme descrito a seguir:

- Capítulo 1 - Introdução: Apresenta o contexto, a importância e os objetivos do estudo, bem como o problema de pesquisa e as justificativas que sustentam o desenvolvimento do modelo proposto.
- Capítulo 2 - Referencial Teórico: Aborda os fundamentos teóricos e estudos prévios relacionados à logística de transporte, otimização multiobjetivo, Fronteiras de Pareto e o Problema de Transporte com Múltiplos Veículos (PTMV). Inclui também as técnicas e ferramentas utilizadas no modelo desenvolvido.
- Capítulo 3 - Metodologia: Descreve a modelagem do problema, a base de dados utilizada, os métodos matemáticos aplicados, como a programação linear inteira mista (PLIM) e a técnica ε -constraint, bem como as etapas de implementação e validação do modelo.
- Capítulo 4 - Resultados e Discussão: Apresenta os cenários analisados, as soluções obtidas por meio das Fronteiras de Pareto e a análise detalhada dos *trade-offs* entre custo e emissões de CO₂. Discute também as implicações práticas dos resultados e as limitações do modelo.
- Capítulo 5 - Considerações Finais: Conclui o trabalho destacando as contribuições do modelo proposto, as limitações encontradas e as perspectivas para estudos futuros, incluindo a possibilidade de aprimorar o modelo com novos critérios e bases de dados mais abrangentes.

2 REFERENCIAL TEÓRICO:

2.1 Logística Verde e Sustentabilidade no Transporte

A logística de transporte desempenha um papel estratégico no escoamento da produção agrícola brasileira, com destaque para a soja, uma das principais *commodities* do país. Estudos como os de Borges (2023) e Resat & Turkay (2019) enfatizam a relevância de práticas sustentáveis nesse setor, destacando a necessidade de otimização das cadeias de suprimentos para reduzir custos operacionais e emissões de gases de efeito estufa. No contexto da logística verde, a redução de custos e a minimização de poluentes surgem como objetivos fundamentais para garantir a sustentabilidade e competitividade do setor.

2.2 Fundamentos da Otimização

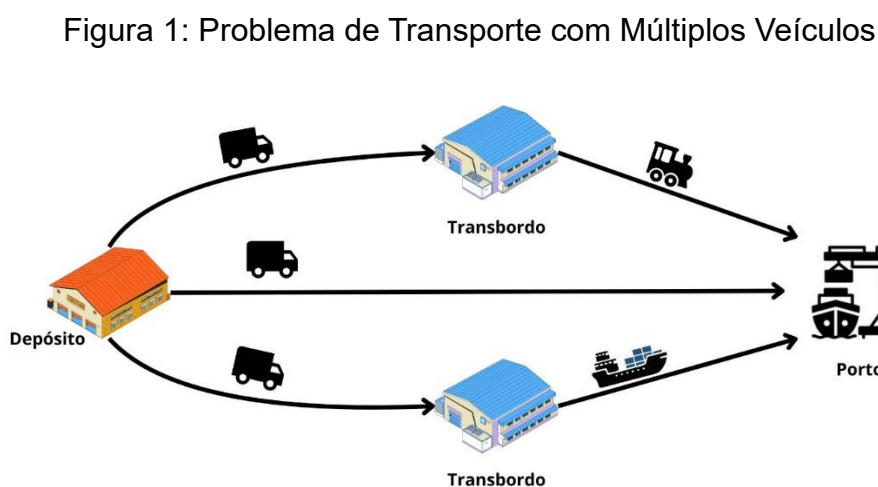
A otimização é uma área de estudo baseada na busca de uma solução ótima (melhor possível) para determinado problema, sendo fundamental nos processos de tomada de decisão sistemática que surgem em áreas das ciências econômicas, físicas, químicas e biológicas, além das engenharias (Rego et al., 2011; Samuco, 2014). A solução de um problema de otimização busca encontrar a melhor combinação de valores para um conjunto de variáveis de decisão que minimize ou maximize a função objetivo deste problema. Essa função é representada por uma ou mais variáveis entre pontos pertencentes a uma região do espaço de busca, sujeita a um conjunto de restrições (Luenberger; Ye, 2008).

O apêndice C apresenta uma relação de artigos selecionados da base científica *Web of Science* que mostra modelos de otimização utilizados no estado da arte para aplicações na logística verde. Na leitura do artigo "*Bibliometrics and systematic reviews: A comparison between the Proknow-C and the Methodi Ordinatio*" (*Bibliometria e revisões sistemáticas: uma comparação entre o Proknow-C e o Methodi Ordinatio*) foi verificado o uso do índice InOrdinatio que é utilizado para classificar as publicações relevantes com base em uma fórmula, que inclui a contagem de citações, ano de publicação, fator de impacto dos periódicos e um fator alfa. A fórmula é expressa a seguir.

InOrdinatio = Citações + Fator impacto + $(10 \cdot \alpha)$ - $(\alpha \cdot \text{Idade publicação})$, onde $\alpha = 10$ para artigos mais recentes e 1 para artigos mais antigos

2.3 Problema de Transporte com Múltiplos Veículos (PTMV)

O Problema de Transporte com Múltiplos Veículos (PTMV) é uma extensão do Problema de Roteamento de Veículos (PRV), amplamente abordado na literatura. Toth e Vigo (2002) definem o PRV como a busca pela rota mais eficiente para uma frota de veículos atender demandas específicas, respeitando restrições de capacidade e custo. No entanto, a inclusão de múltiplos objetivos, como a minimização simultânea de custos e emissões, transforma o PTMV em um problema ainda mais desafiador, classificado como NP-difícil. A Figura 1 apresenta o PTMV, destacando os diferentes modais de transporte que podem ser utilizados entre um depósito e um porto. Segundo Resat e Turkey (2019), a resolução desse tipo de problema requer abordagens sofisticadas, uma vez que a complexidade cresce exponencialmente com o aumento do número de variáveis e restrições. Além disso, a necessidade de avaliar várias soluções possíveis em cenários reais, nos quais variáveis dinâmicas impactam diretamente a eficiência do modelo, torna o problema ainda mais desafiador (Golden et al., 2008; Kaya & Kaya, 2023).



Fonte: Elaborado pelo autor.

2.4 Abordagem Biobjetivo

A otimização de problemas logísticos que envolvem múltiplos critérios, como custo e emissões de CO₂, exige métodos robustos para avaliar os *trade-offs* entre objetivos conflitantes. Segundo Deb (2001), os métodos de otimização multiobjetivo são fundamentais para identificar soluções que conciliem critérios econômicos e ambientais, fornecendo suporte consistente para a tomada de decisões estratégicas. Para este trabalho, foi empregada a técnica ε -*constraint*, amplamente destacada na literatura por sua capacidade de transformar um dos objetivos em uma restrição com um limite predefinido, enquanto otimiza o outro como função principal (Mavrotas, 2009). Essa abordagem possibilitou a exploração iterativa de soluções, com limites progressivos definidos para os custos totais e avaliação das emissões correspondentes. Como resultado, foi possível construir uma fronteira de Pareto, que evidencia os compromissos entre eficiência econômica e sustentabilidade ambiental.

2.5 Fronteira de Pareto

De acordo com Deb (2001), a fronteira de Pareto em um problema de otimização multiobjetivo é definida como o conjunto de soluções não dominadas dentro do espaço de busca. Uma solução é considerada não dominada se não existir outra solução que melhore em pelo menos um objetivo sem piorar em outro. Em outras palavras, a fronteira de Pareto representa as melhores soluções possíveis, onde não é possível melhorar um objetivo sem comprometer outro, oferecendo um equilíbrio entre os *trade-offs* dos diferentes critérios avaliados.

A construção da fronteira de Pareto revelou os compromissos entre custo e emissões de CO₂ no transporte logístico, proporcionando uma análise aprofundada das alternativas disponíveis.

2.6 Pontos de Transbordo

Os pontos de transbordo, também conhecidos como hubs ou nós de transferência, são locais estratégicos dentro de uma rede logística onde ocorre a

consolidação, desconsolidação ou troca de cargas entre diferentes modais de transporte ou rotas. Esses pontos têm como objetivo melhorar a eficiência operacional, reduzindo custos e tempos de transporte ao permitir a movimentação de mercadorias em maior escala e otimizar o fluxo logístico (Campbell, 1996; Alumur & Kara, 2008).

2.7 Métodos de Otimização e Ferramentas Computacionais

Técnicas como a programação linear inteira e mista (PLIM) são amplamente utilizadas para modelar problemas complexos no campo da otimização multiobjetivo. Essas técnicas permitem a integração de dados reais e a aplicação de métodos como o ε -*constraint*, é utilizado por sua eficácia na solução de problemas multiobjetivo. Nesse método, uma das funções objetivo é transformada em uma restrição com limite predefinido, enquanto as outras são otimizadas, gerando soluções eficientes e explorando o espaço de busca para diferentes configurações de *trade-offs* (Mavrotas, 2009).

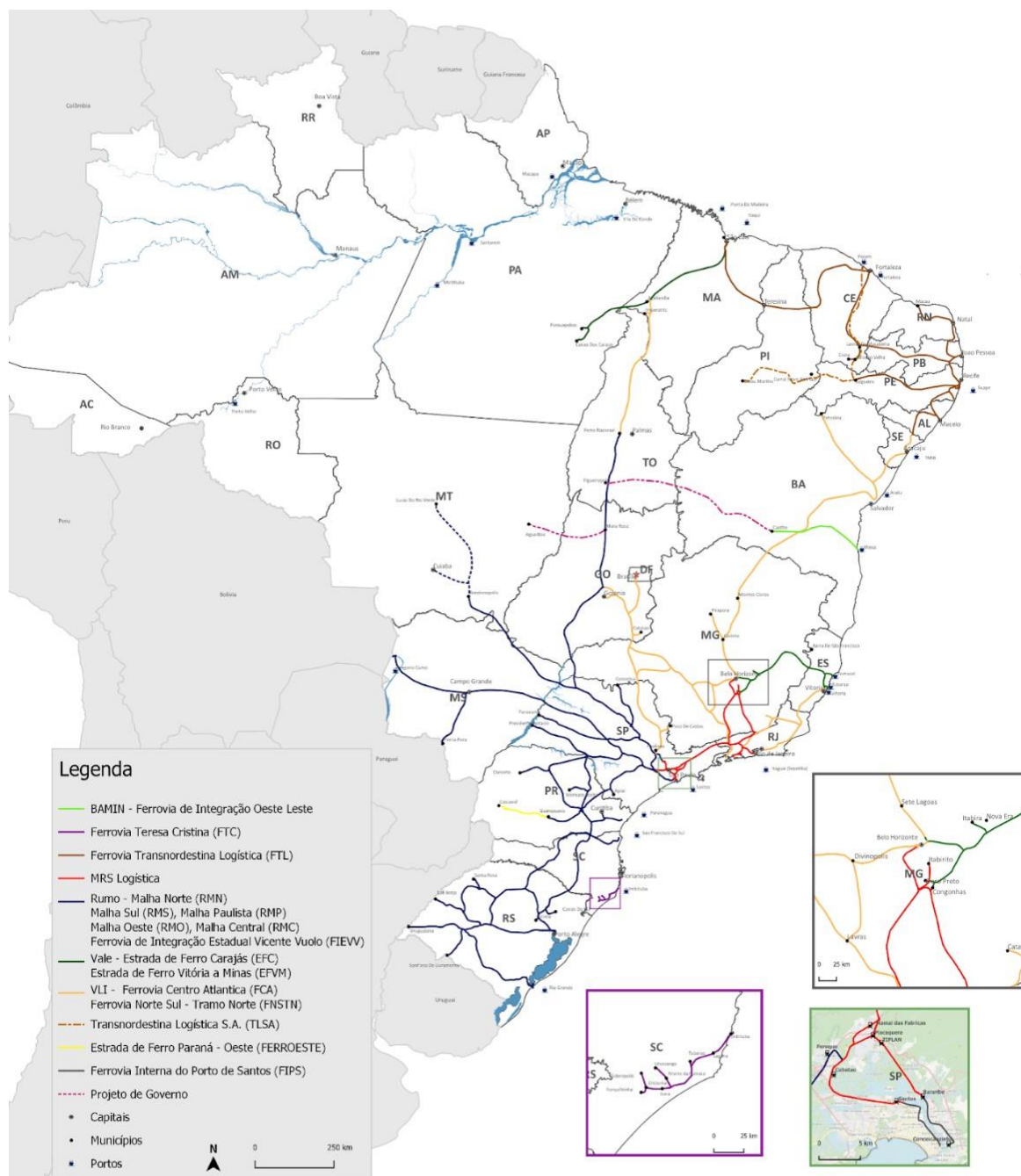
A otimização multiobjetivo (OMO) é amplamente utilizada para problemas que exigem a conciliação de objetivos conflitantes, como custo e sustentabilidade ambiental. Conforme De Weck (2004), soluções eficientes, conhecidas como ótimos de Pareto, fornecem alternativas para a tomada de decisão estratégica. Métodos como o ε -*constraint* exploram configurações de *trade-offs*, gerando soluções para cenários reais (Mavrotas, 2009).

2.8 Aplicação Prática na Logística de Soja

Ferramentas computacionais como o solver Gurobi também desempenham um papel crucial nesse processo, graças à sua robustez e eficiência na resolução de problemas de grande escala e múltiplos objetivos. A aplicação dessas ferramentas na logística de transporte rodoviário de soja no Brasil permite o desenvolvimento de soluções otimizadas que contribuem para a sustentabilidade e competitividade do setor agrícola (Gurobi Optimization, 2024). Por fim, o uso de algoritmos de otimização aliados a técnicas multiobjetivo vem demonstrando ser uma abordagem promissora

para superar desafios técnicos e promover práticas mais verdes e sustentáveis na logística (Borges, 2023; Jayarathna et al., 2021).

Figura 2: Rotas ferroviárias no Brasil para exportação de soja, 2023.



Fonte: ANTF (2023).

A Figura 2 ilustra as principais linhas ferroviárias no Brasil, destacando a contribuição desse modal para o transporte de grãos, enquanto a Figura 3 apresenta

a logística da soja e do milho no Brasil em 2020, destacando as principais rotas de exportação de soja, evidenciando os corredores logísticos estratégicos.

As rotas são caracterizadas por custos de transporte e emissões de CO₂, ambos calculados para os diferentes meios de transporte utilizados. Essa segmentação reflete a estrutura logística brasileira e é crucial para a formulação das funções objetivo e restrições no modelo.

Figura 3: Logística da Soja e do Milho no Brasil, 2020.



Fonte: CNA (2020).

3 MÉTODO:

3.1 Descrição do Problema:

O transporte de soja no Brasil envolve uma complexa rede logística, conectando produtores, pontos de transbordo e portos de exportação por meio de rodovias, ferrovias e hidrovias. Cada rota utiliza exclusivamente um único tipo de transporte, refletindo a segmentação da infraestrutura brasileira.

Este trabalho busca criar um modelo matemático para essa rede de transporte com o objetivo de minimizar custos e emissões de CO₂, utilizando uma abordagem biobjetivo que integre critérios econômicos e ambientais. A solução proposta visa oferecer um modelo prático e adaptável para otimizar o escoamento da produção de soja de maneira eficiente e sustentável.

3.2 Base de Dados:

A base de dados utilizada neste trabalho foi obtida a partir do estudo desenvolvido por Zaluski (2018), que apresenta uma modelagem detalhada das rotas de transporte de soja no Brasil, abrangendo rodovias, ferrovias e hidrovias. Esses dados foram organizados em arquivos CSV, conforme Apêndices A e B, estruturados para representar informações específicas:

- **Nós Logísticos:** Os nós foram categorizados em três grupos principais: produtores, transbordos e portos. As informações incluem siglas que identificam os nós, classificações que indicam seu papel na cadeia logística e dados de demanda, como a quantidade de soja disponível nos produtores ou exigida pelos portos. No total, a base contempla 48 nós, distribuídos pelas principais áreas produtivas e de escoamento do país.
- **Rotas Disponíveis:** As rotas entre os nós foram descritas com informações sobre custos de transporte e emissões de CO₂. Cada arco representa um trajeto único, assegurando que apenas um tipo de transporte (rodoviário, ferroviário ou hidroviário) seja utilizado por rota. Essas informações foram validadas para evitar inconsistências, como arcos duplicados ou trajetos conflitantes.

- **Capacidades:** As capacidades máximas dos portos e transbordos foram incluídas para refletir as restrições operacionais desses nós logísticos. Esses dados não estavam disponíveis na base original, os valores foram simulados para assegurar a consistência e a adequação do modelo matemático às condições reais de operação. Foram consideradas capacidades de 50 mil toneladas para os portos e 100 mil toneladas para os transbordos.

A estrutura tabular dos arquivos CSV facilitou a integração eficiente ao modelo, utilizando bibliotecas especializadas da linguagem Python. Durante o processo de carregamento, os dados passaram por uma validação, garantindo precisão e coerência para aplicação no modelo.

Tabela 1: Classificação dos Nós Logísticos no Transporte de Soja no Brasil

Sigla	Nome e Estado	Tipo
TUP	Tupanciretã - RS	Produtor
EST	Estrela – RS	Transbordo
PRG	Porto Rio Grande - RS	Porto

Fonte: Zaluski, 2018.

Tabela 2: Exemplos de Rotas entre os Nós Logísticos

Origem	Destino	Custo (R\$)	Emissão (tCO ₂ e)	Modal
TUP	EST	78,8	1,55906685	Rodoviário
EST	PRG	15,6	0,469924796	Hidroviário
TUP	PRG	99,27	2,399	Ferrovário

Fonte: Zaluski, 2018.

Os produtores, representados na Tabela 1, são responsáveis pelas regiões agrícolas que cultivam a soja, concentrando a produção destinada ao transporte. Os transbordos, também apresentados na Tabela 1, desempenham um papel estratégico na cadeia logística, funcionando como locais intermediários para redistribuição ou armazenamento temporário, facilitando o fluxo entre os produtores e os portos. Nos transbordos também ocorre, obrigatoriamente a troca do meio de transporte. Por fim, os portos, igualmente listados na Tabela 1, servem como pontos de exportação ao longo da costa brasileira, sendo essenciais para o escoamento da produção aos

mercados internacionais. Além disso, a Tabela 2 detalha as rotas entre esses nós logísticos, apresentando os custos e emissões associados a cada trajeto. É importante ressaltar que os valores de custo e emissões na Tabela 2 são calculados por unidade de tonelada transportada, refletindo a eficiência econômica e ambiental de cada rota.

3.3 Modelo do Problema:

A modelagem matemática deste trabalho baseia-se em um modelo de otimização linear inteira mista, implementado com o solver Gurobi, para resolver o Problema de Transporte com Múltiplos Veículos (PTMV). O objetivo principal é minimizar os custos e as emissões de CO₂ no transporte de soja no Brasil, integrando critérios econômicos e ambientais. O modelo foi adaptado a partir da abordagem proposta por Wanke e Rodrigues (2016), que apresenta soluções aplicadas à logística agroindustrial com foco em otimização e sustentabilidade.

A adaptação consiste em integrar dois objetivos simultaneamente (custo e emissões), com múltiplos tipos de nós logísticos (produtores, portos e transbordos), permitindo uma representação mais abrangente e prática das operações de transporte.

Notação

V: Conjunto de veículos disponíveis.

N: Conjunto de nós logísticos (produtores, transbordos, portos).

A: Conjunto de arcos (rotas) disponíveis entre os nós.

c_{ij} Custo de transporte entre os nós i e j.

e_{ij} Emissões de CO₂ associadas ao transporte entre os nós i e j.

d_i Oferta no nó i (produtor).

d_j Demanda no nó j (porto).

Cap_j Capacidade máxima do porto j.

Cap_k : Capacidade máxima do transbordo k.

X_{vij} Total de mercadorias transportadas do nó i para o nó j utilizando o veículo v
 $(X_{vij} \geq 0) \forall X_{vij} \geq 0$.

Variáveis de Decisão

As variáveis de decisão representam o fluxo de mercadorias entre os nós da rede logística:

X_{vij} (Fluxo de mercadorias do nó i para o nó j utilizando o veículo v)

Funções Objetivo

Minimizar o custo total de transporte:

$$\text{Minimizar: } C = \sum_{v \in V} \sum_{(ij) \in A} c_{ij} \cdot X_{vij} \quad (1)$$

Minimizar as emissões totais de CO₂

$$\text{Minimizar: } E = \sum_{v \in V} \sum_{(ij) \in A} e_{ij} \cdot X_{vij} \quad (2)$$

Sujeito a:

Oferta dos Produtores: (3)

$$\sum_{v \in V} \sum_{j \in N} X_{vij} \leq -d_i \forall i \in \text{Produtores}$$

Demanda nos Portos: (4)

$$\sum_{v \in V} \sum_{i \in N} X_{vij} \leq -d_j \forall j \in \text{Portos}$$

Fluxo nos Nós de Transbordo: (5)

$$\sum_{i \in N} X_{vik} \geq \sum_{j \in N} X_{vjk} \forall k \in \text{Transbordos}, \quad \forall v \in V$$

Capacidade dos Portos:

$$\sum_{v \in V} \sum_{i \in N} X_{v,i,j} \leq Cap_j \forall j \in Portos \quad (6)$$

Capacidade dos Transbordos:

$$\sum_{v \in V} \sum_{i \in N} X_{v,i,k} \leq Cap_k \forall k \in Transbordos \quad (7)$$

A função objetivo (1), minimiza o custo total de transporte. A função objetivo (2) minimiza as emissões de CO₂. A restrição (3) garante que o fluxo de saída de um nó produtor não exceda sua oferta disponível, limitando o volume de mercadorias transportadas de cada produtor. A restrição (4) assegura que os portos recebam exatamente a quantidade de mercadorias correspondente à sua demanda prevista, garantindo o atendimento adequado das necessidades de exportação. A restrição (5) estabelece que o fluxo de entrada em um nó de transbordo seja igual ou superior ao fluxo de saída, mantendo o equilíbrio operacional em cada ponto intermediário. A restrição (6) define que o fluxo total para cada porto não deve exceder a sua capacidade máxima, garantindo que a infraestrutura portuária não seja sobrecarregada. A restrição (7) impõe que o fluxo total para cada transbordo também não ultrapasse a sua capacidade máxima, assegurando a viabilidade operacional dos pontos de redistribuição.

3.4 Implementação ϵ -constraint:

Na abordagem ϵ -constraint proposta originalmente por Haimes, Lasdon e Wismer (1971), a função de custo (C) foi transformada em uma restrição com limite predefinido (ϵ -bound), enquanto a função de emissão (E) foi otimizada como objetivo principal. O limite para o custo foi ajustado iterativamente para gerar diferentes soluções e construir a fronteira de Pareto. O modelo é formulado como:

Função Objetivo Principal:

$$\text{Minimizar: } E = \sum_{v \in V} \sum_{(i,j) \in A} e_{ij} \cdot X_{v,ij}$$

Restrição ϵ para o Custo:

$$C = \sum_{v \in V} \sum_{(i,j) \in A} c_{ij} \cdot X_{v,ij} \leq \epsilon$$

3.5 Etapas da Pesquisa:

Os dados, obtidos do estudo de Zaluski (2018), foram organizados em arquivos CSV, representando informações sobre os nós logísticos, rotas disponíveis e limites de capacidade. Cada nó foi classificado como produtor, transbordo ou porto, enquanto as rotas foram analisadas para garantir que cada trajeto fosse exclusivamente associado a um tipo de transporte — rodoviário, ferroviário ou hidroviário. Como as capacidades máximas dos portos e transbordos não estavam disponíveis na base original, valores foram simulados para suprir essa lacuna e viabilizar a construção do modelo. Antes de serem integrados, os dados passaram por uma etapa de validação, onde inconsistências foram eliminadas para assegurar a integridade das informações.

Com os dados validados, foi realizada a integração ao modelo matemático de otimização linear inteira mista. As informações de custos e emissões de CO₂ foram diretamente aplicadas às funções objetivo, enquanto os limites de capacidade, demandas de oferta e procura, e características dos arcos foram associadas às restrições do modelo. Esse processo permitiu mapear cada nó e rota para as variáveis de decisão, criando uma representação matemática que reflete as condições reais da logística brasileira.

Na sequência, foi implementado o método ϵ -constraint para lidar com os objetivos conflitantes de custo e emissões. Inicialmente, uma solução base foi obtida, priorizando a minimização de custo como função objetivo principal. Em seguida, limites progressivos foram aplicados ao custo total, permitindo a geração de soluções adicionais que otimizassem as emissões de CO₂. Esse processo iterativo resultou em

uma fronteira de Pareto com 10 soluções não dominadas, evidenciando os *trade-offs* entre eficiência econômica e sustentabilidade ambiental.

As soluções geradas pelo modelo foram analisadas para garantir que respeitassem todas as restrições impostas, como as capacidades máximas dos portos e transbordos, e o atendimento às demandas nos nós logísticos. A análise dos fluxos de transporte avaliou a consistência das soluções, garantindo sua viabilidade e adequação ao contexto logístico proposto. Testes adicionais foram realizados para avaliar o modelo, incluindo variações nos custos e emissões.

3.6 Ferramentas Utilizadas:

A linguagem Python foi escolhida como base para este trabalho devido à sua ampla disponibilidade de bibliotecas, que facilitaram a modelagem, resolução e análise do problema.

Entre as bibliotecas utilizadas, destacam-se:

- **gurobipy**: Interface do Gurobi para Python, utilizada para a modelagem e resolução do problema de otimização.
- **matplotlib**: Utilizada para criar visualizações gráficas, como a fronteira de Pareto, permitindo uma análise visual detalhada dos resultados obtidos.

Os dados foram organizados e manipulados em arquivos CSV, que proporcionaram uma estrutura simples e eficiente para integração com o modelo. Essa abordagem viabilizou o carregamento e a validação dos dados com consistência, assegurando sua adequação ao modelo de otimização.

4. RESULTADOS E DISCUSSÃO:

O modelo de otimização foi aplicado em três cenários distintos, cada um representando diferentes configurações logísticas para o transporte de soja no Brasil. Embora as estimativas tenham sido utilizadas, o modelo foi configurado para refletir condições logísticas realistas, alinhadas aos objetivos do estudo. A análise realizada abordou tanto o desempenho em termos de custo e emissões de CO₂ quanto o impacto das rotas otimizadas nas operações logísticas.

A validação das soluções geradas pelo modelo baseou-se na análise dos fluxos de transporte. Essa validação envolveu a verificação do atendimento às restrições de oferta, demanda e capacidade, assegurando que as soluções fossem consistentes com o contexto logístico simulado. Cada solução gerada respeitou os limites impostos pelas condições operacionais estabelecidas, demonstrando a adequação do modelo às especificidades do problema proposto.

Além disso, a análise incluiu a construção de Fronteiras de Pareto para cada cenário, explorando as soluções mais relevantes, como aquelas de menor custo, menor emissão de CO₂ e equilíbrio entre ambos os critérios. Essa abordagem possibilitou uma visualização clara dos *trade-offs* entre os objetivos conflitantes, oferecendo informações valiosas para a tomada de decisão estratégica no contexto logístico. Os resultados evidenciam a capacidade do modelo de identificar alternativas eficientes, mesmo em cenários com diferentes configurações e demandas.

4.1 Aplicação Prática:

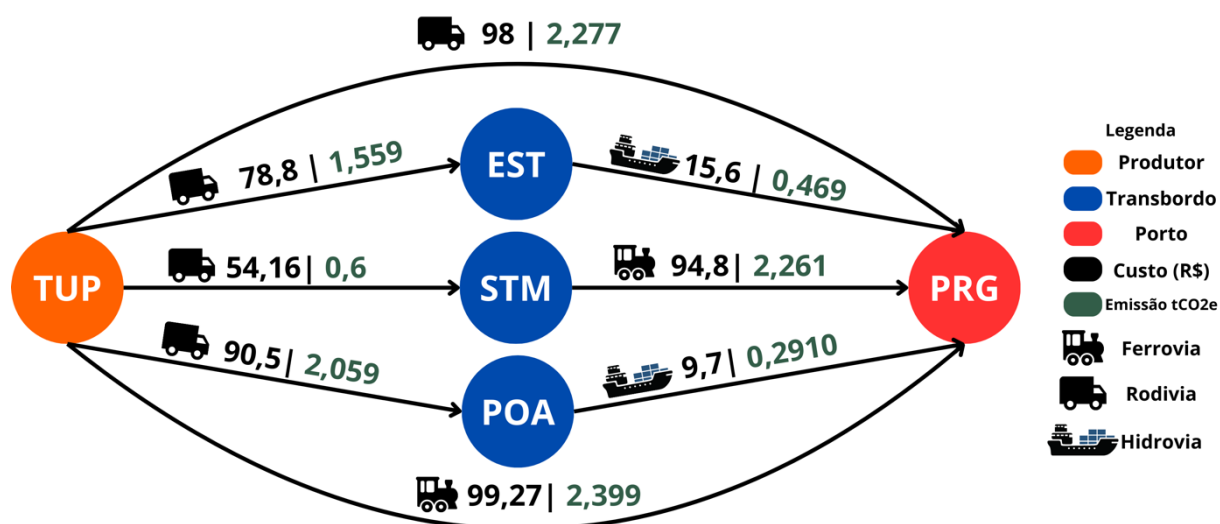
A análise dos resultados inicia-se com a representação gráfica das rotas possíveis entre os nós logísticos. As figuras 3, 4 e 5 ilustram os grafos de algumas rotas disponíveis para o transporte de soja, destacando os produtores a esquerda em cor laranja, os portos a direita em cor vermelha, e os transbordos ao meio em cor azul. As conexões entre os nós são representadas por setas, que indicam as rotas possíveis. Sobre cada seta, são exibidos valores a esquerda em preto, representando o custo do trajeto, e valores a direita em verde, correspondendo às emissões de CO₂.

associadas à rota. Esses valores refletem os custos e emissões por tonelada transportada, conforme os dados fornecidos na base de dados.

4.2 Cenário 1: Transporte de Soja de Tupanciretã (RS) para o Porto Rio Grande (RS)

No primeiro cenário, considera-se o transporte de 3 toneladas de soja partindo do produtor em Tupanciretã (TUP) - RS até o Porto Rio Grande (PRG) - RS. A rota pode incluir transbordos intermediários localizados em Estrela (EST) - RS, Santa Maria (STM) - RS, e Porto Alegre (POA) - RS. Este cenário explora as possíveis combinações de trajetos que minimizam os custos e/ou as emissões de CO₂, considerando a infraestrutura disponível na região sul do Brasil.

Figura 4: Grafo das Rotas Possíveis para o Transporte de Soja no Cenário 1.



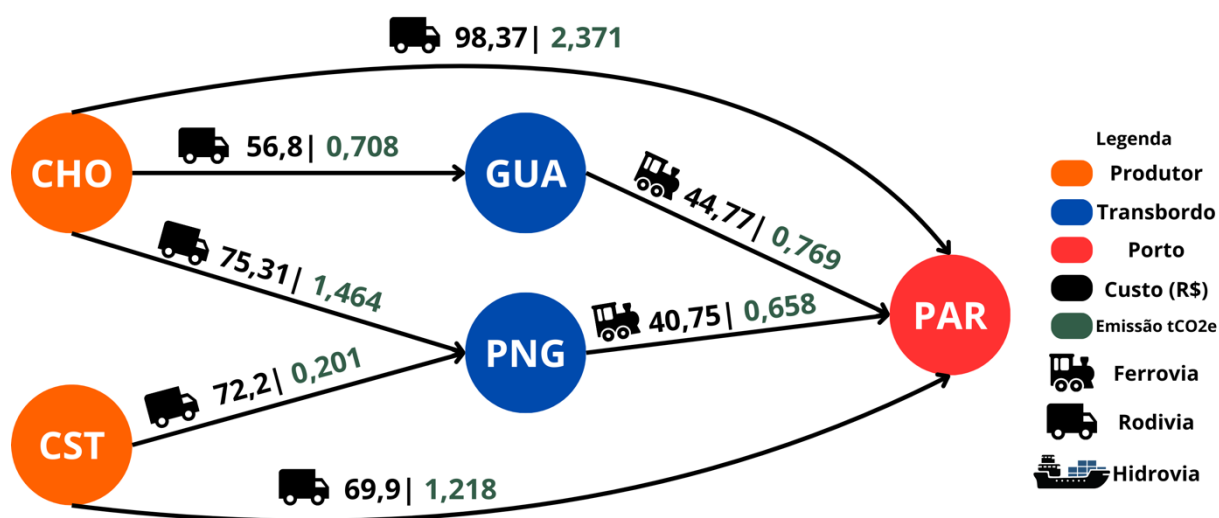
Fonte: Elaborado pelo autor.

4.3 Cenário 2: Transporte de Soja de Chopinzinho (PR) e Castro (PR) para o Porto Paranaguá (PR)

No segundo cenário, são analisados dois fluxos de transporte de soja simultâneos. O produtor em Chopinzinho (CHO) - PR envia 5 toneladas de soja, enquanto o produtor em Castro (CST) - PR transporta 3 toneladas de soja, ambos com destino ao Porto Paranaguá (PAR) - PR. Os transbordos possíveis são em Guarapuava (GUA) - PR para o primeiro produtor e, Paranaguá (PNG) - PR para o

segundo produtor. Este cenário avalia as rotas otimizadas para atender múltiplas demandas de diferentes produtores, considerando os custos e as emissões associados a cada trajeto, além da possibilidade de compartilhar o mesmo transbordo para maximizar a eficiência logística.

Figura 5: Grafo das Rotas Possíveis para o Transporte de Soja no Cenário 2.



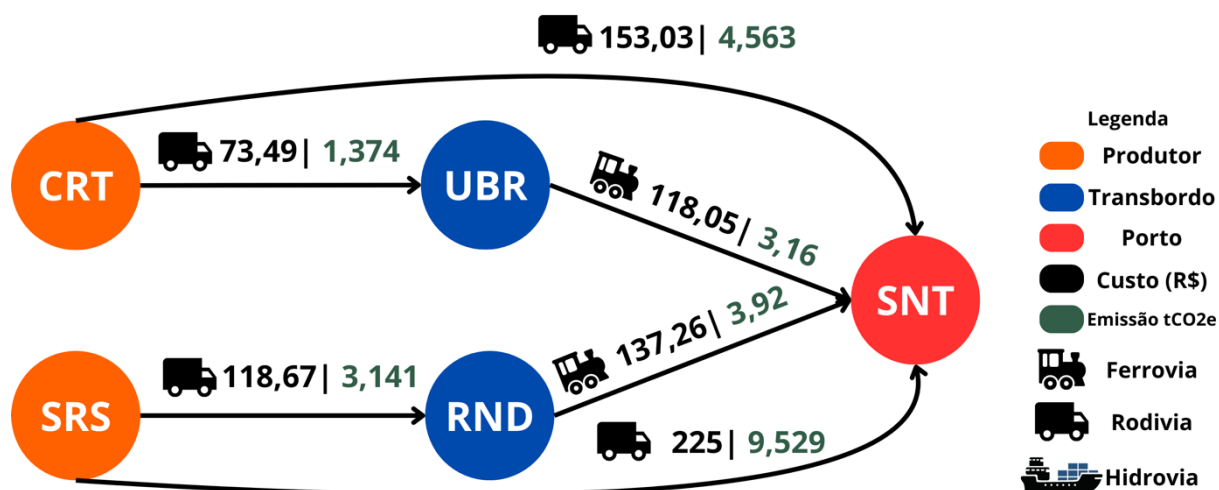
Fonte: Elaborado pelo autor.

4.4 Cenário 3: Transporte de Soja de Cristianópolis (GO) e Sorriso (MT) para o Porto Santos (SP)

No terceiro cenário, são analisados dois fluxos simultâneos de transporte de soja, destacando a integração logística entre diferentes regiões. O produtor em Cristianópolis (CRT) - GO transporta 2 toneladas de soja com a possibilidade de realizar transbordo em Uberlândia (UBR) - GO antes de chegar ao Porto Santos (SNT) - SP. Simultaneamente, o produtor em Sorriso (SRS) - MT envia 2 toneladas de soja com a opção de utilizar o transbordo em Rondonópolis (RND) - MT, também com destino ao Porto Santos (SNT) - SP. Este cenário, representado na Figura 6, ilustra a complexidade das operações logísticas, evidenciando como múltiplos fluxos de

diferentes origens convergem para o mesmo destino, enquanto minimizam custos e emissões ao longo das rotas.

Figura 6: Grafo das Rotas Possíveis para o Transporte de Soja no Cenário 3



Fonte: Elaborado pelo autor.

4.5 Resultados do Cenário 1: Transporte de Soja de Tupanciretã (RS) para o Porto Rio Grande (RS)

No primeiro cenário, que analisou o transporte de 3 toneladas de soja do produtor em Tupanciretã (TUP) - RS para o Porto Rio Grande (PRG) - RS, as soluções otimizadas revelaram um padrão: todas as três melhores soluções — a de menor custo, a de menor emissão de CO₂ e a solução intermediária entre ambos — resultaram exatamente no mesmo conjunto de rotas e valores. Essa uniformidade reflete a limitada variedade de alternativas no grafo de transporte disponível para este cenário.

Solução Obtida:

Custo: R\$ 283,19

Emissão tCO₂e: 6,09

Rotas:

Veículo 0:

- TUP -> EST (fluxo de 3 toneladas)
- EST -> PRG (fluxo de 3 toneladas)

Para o Cenário 1, não foi possível encontrar uma Frente de Pareto evidenciando a relação entre custo e emissões de CO₂. Como esperado, a variedade limitada de possibilidades de rotas para este cenário resultou em uma menor variabilidade. Essa representação reflete o comportamento uniforme das soluções analisadas, como descrito anteriormente.

4.6 Resultados do Cenário 2: Transporte de Soja em Chopinzinho (PR) e Castro (PR) para o Porto Paranaguá (PR)

O Cenário 2, que avalia o transporte de soja dos produtores em Chopinzinho (CHO), com 5 toneladas de carga, e Castro (CST), com 3 toneladas de carga, para o Porto Paranaguá (PAR), apresentou resultados variados em termos de custo e emissões. A seguir, estão descritas as três soluções mais relevantes identificadas na Fronteira de Pareto: a solução com menor custo, a solução com menor emissão e a solução com o melhor equilíbrio entre custo e emissão.

Solução com menor custo:

Custo: R\$ 701,54

Emissão tCO₂e: 15,51

Rotas:

- Veículo 0: CHO -> PAR (fluxo de 5 toneladas)
- Veículo 1: CST -> PAR (fluxo de 3 toneladas).

Solução com menor emissão:

Custo: R\$ 719,08

Emissão tCO₂e: 11,06

Rotas:

- Veículo 0: CHO -> GUA (fluxo de 5 toneladas)
- Veículo 0: GUA -> PAR (fluxo de 5 toneladas)
- Veículo 1: CST -> PAR (fluxo de 3 toneladas).

Solução com menor custo e emissão combinados:

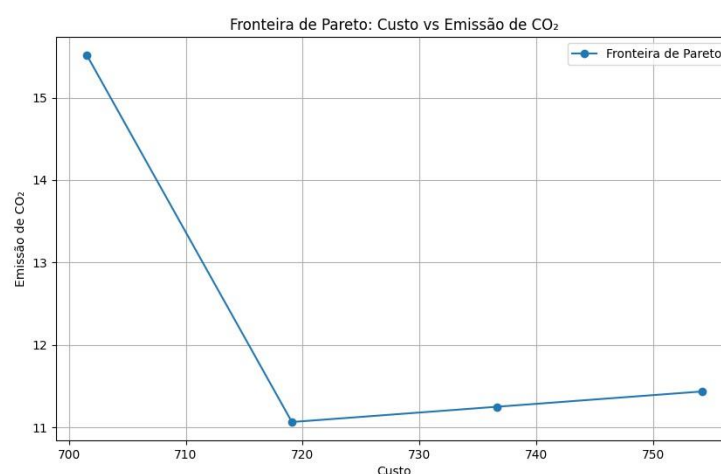
Custo: R\$ 719,08

Emissão tCO₂e: 11,06

Rotas:

- Veículo 0: CHO -> GUA (fluxo de 5 toneladas)
- Veículo 0: GUA -> PAR (fluxo de 5 toneladas)
- Veículo 1: CST -> PAR (fluxo de 3 toneladas).

Figura 7: Fronteira de Pareto para o Cenário 2: Custo vs Emissão de CO₂



Fonte: Elaborado pelo autor.

A Figura 7 apresenta a Fronteira de Pareto obtida para o Cenário 2, que analisa o transporte de soja dos produtores em Chopinzinho (CHO) e Castro (CST) para o Porto Paranaguá (PAR). A curva evidencia as soluções eficientes identificadas, demonstrando os trade-offs entre custo e emissões de CO₂. O primeiro ponto à esquerda representa a solução com o menor custo, enquanto o ponto seguinte corresponde à solução com a menor emissão. Esse segundo ponto, também representa a solução com menor custo e emissão combinados.

Neste cenário, destaca-se que a solução de menor custo (cerca de R\$ 701,54) apresenta uma emissão de aproximadamente 15,51 toneladas de CO₂. Por outro lado, a solução com menor emissão (cerca de 11,06 toneladas de CO₂) implica em um aumento significativo no custo, alcançando cerca de R\$ 719,08. A Fronteira de Pareto ainda demonstra uma transição linear entre as soluções intermediárias, indicando uma relação proporcional entre o aumento de custos e a redução de emissões.

4.7 Resultados do Cenário 3: Transporte de Soja de Cristianópolis (GO) e Sorriso (MT) para o Porto Santos (SP)

O Cenário 3, que avalia o transporte de soja dos produtores em Cristianópolis (CRT) e Sorriso (SRS) para o Porto Santos (SNT), apresentou resultados distintos em termos de custo e emissões. No total, foram transportadas 4 toneladas de soja, sendo 2 toneladas provenientes de cada produtor. A seguir, estão descritas as três soluções mais relevantes obtidas na Fronteira de Pareto: a solução com menor custo, a solução com menor emissão e a solução com o melhor equilíbrio entre custo e emissão.

Solução com Menor Custo:

Custo: R\$ 756,02

Emissão tCO₂e: 28,18

Rotas:

- Veículo 0: SRS → SNT (fluxo de 2 toneladas)
- Veículo 1: CRT → SNT (fluxo de 2 toneladas)

Solução com Menor Emissão:

Custo: R\$ 831,62

Emissão tCO₂e: 23,40

Rotas:

- Veículo 0: SRS → RND (fluxo de 2 toneladas)
- Veículo 0: RND → SNT (fluxo de 2 toneladas)
- Veículo 1: CRT → SNT (fluxo de 2 toneladas)

Solução com Menor Custo e Emissão Combinados:

Custo: R\$ 756,02

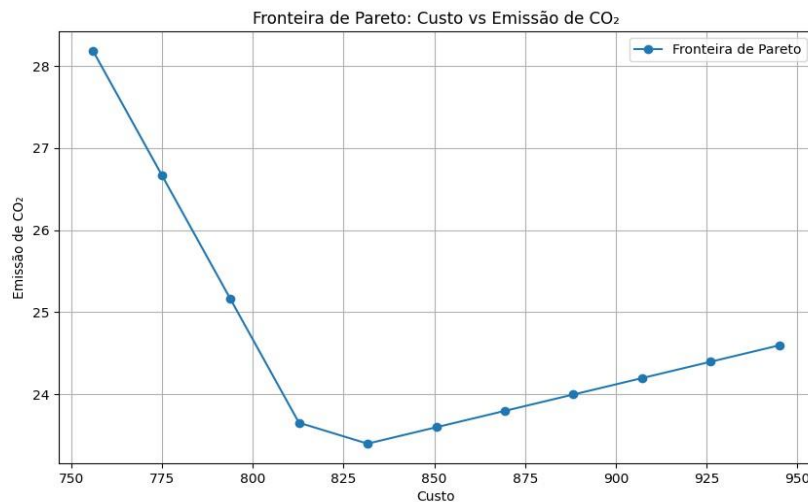
Emissão tCO₂e: 28,18

Rotas:

- Veículo 2: SRS → SNT (fluxo de 2 toneladas)
- Veículo 4: CRT → SNT (fluxo de 2 toneladas)

Neste cenário, observa-se que as soluções com menor custo e menor custo e emissão combinados resultaram em rotas idênticas. Isso ocorre devido à predominância de um trajeto direto entre os produtores e o porto, com poucas alternativas viáveis para redução de emissões. Por outro lado, a solução com menor emissão implica em rotas adicionais que incluem transbordos, refletindo um aumento de custo para alcançar maior eficiência ambiental.

Figura 8: Fronteira de Pareto para o Cenário 3: Custo vs Emissão de CO₂



Fonte: Elaborado pelo autor.

A Figura 8 apresenta a Fronteira de Pareto do Cenário 3, que ilustra os compromissos entre custo e emissão de CO₂ no transporte de soja dos produtores em Cristianópolis (CRT) e Sorriso (SRS) para o Porto Santos (SNT). Observa-se um comportamento típico de *trade-off*: à medida que os custos diminuem, as emissões aumentam e vice-versa. A parte inicial da curva destaca soluções de baixo custo e alta emissão, enquanto a região intermediária apresenta um equilíbrio mais eficiente entre os critérios.

Adicionalmente, a solução de menor custo coincide com a de menor custo e emissão combinados, apresentando rotas diretas e simplificadas, como esperado em cenários com poucas alternativas logísticas. A análise desta fronteira destaca as limitações de rotas disponíveis neste cenário, mas evidencia também as possibilidades de ajustes para soluções mais sustentáveis.

4.8 Discussão:

Os resultados obtidos em cada cenário demonstram a eficácia do modelo proposto em identificar soluções otimizadas para o transporte de soja no Brasil, considerando os *trade-offs* entre custo e emissões de CO₂. A análise das Fronteiras de Pareto revelou as melhores combinações entre os critérios avaliados, mas também as limitações impostas pela disponibilidade de dados e pela estrutura logística de

cada cenário. Esses resultados fornecem uma base sólida para discussões mais amplas sobre as aplicações práticas do modelo e suas contribuições para a sustentabilidade no setor logístico.

5. CONSIDERAÇÕES FINAIS:

Este estudo apresentou o desenvolvimento e a aplicação de um modelo de otimização multiobjetivo para o transporte de soja no Brasil, abordando as dimensões de custo e emissões de CO₂. Utilizando a técnica *ε-constraint*, o modelo foi capaz de gerar Fronteiras de Pareto para três cenários distintos, permitindo uma análise detalhada dos *trade-offs* entre os objetivos conflitantes.

Os resultados confirmam a eficácia do modelo na identificação de soluções eficientes, mesmo em cenários com dados limitados e restrições operacionais diversas. As análises destacaram a importância de considerar múltiplos critérios na tomada de decisão logística, oferecendo alternativas que equilibram eficiência econômica e sustentabilidade ambiental. No entanto, as limitações relacionadas à utilização de dados simulados e à restrita variedade de rotas disponíveis reforçam a necessidade de ampliar a base de dados e explorar configurações logísticas mais diversas em estudos futuros.

Além disso, a aplicação prática do modelo evidenciou sua flexibilidade para se adaptar a diferentes cenários e demandas. A inclusão de transbordos em alguns casos, por exemplo, mostrou como ajustes estratégicos nas rotas podem contribuir para reduzir emissões, ainda que com impacto nos custos. Esses insights são particularmente relevantes para o planejamento logístico de cadeias produtivas agrícolas, que enfrentam pressões crescentes por maior sustentabilidade.

Como perspectivas futuras, sugere-se a incorporação de novos critérios ao modelo, como tempos de transporte e restrições de capacidade dinâmica, bem como o uso de bases de dados mais completas e detalhadas. A integração de algoritmos de aprendizado de máquina também pode ser explorada para melhorar a previsão de demandas e a alocação de recursos. Assim, o modelo desenvolvido neste estudo representa um passo inicial promissor para otimizar o transporte de soja no Brasil, contribuindo para a competitividade do setor agrícola e para a mitigação dos impactos ambientais associados.

REFERÊNCIAS

- EMBRAPA. Caminho da safra (safra 2022/23). EMBRAPA - EMPRESA BRASILEIRA DE PESQUISA AGROPECUÁRIA, 2024. Disponível em: <https://www.embrapa.br/macrologistica/caminhos-da-safra>. Acesso em: jun. 2024.
- IBGE. Estatísticas da Produção Agrícola, 2024. IBGE - INSTITUTO BRASILEIRO DE GEOGRAFIA E ESTATÍSTICA, 2024. Disponível em: <https://www.ibge.gov.br/estatisticas-da-producao-agricola-2024>. Acesso em: jun. 2024.
- FAO. Food and Agriculture Organization. World Food and Agriculture Statistical Yearbook 2023. Disponível em: <https://www.fao.org/statistical-yearbook>. Acesso em: dez. 2024.
- IPCC. Climate Change 2021: The Physical Science Basis. Cambridge University Press, 2021. Disponível em: <https://www.ipcc.ch>. Acesso em: dez. 2024.
- CHEN, X.; et al. A comprehensive review of the vehicle routing problem. *Transportation Research Part E: Logistics and Transportation Review*, v. 107, p. 1-19, 2017.
- TOTH, P.; VIGO, D. The vehicle routing problem. *SIAM Monographs on Discrete Mathematics and Applications*, 2002.
- CORDEAU, J. F.; LAPORTE, G.; SAVELSBERGH, M. W. P.; VIGO, D. Vehicle routing. *Handbooks in Operations Research and Management Science*, v. 14, p. 367–428, 2007.
- BERTSIMAS, D.; TSITSIKLIS, J. N. Introduction to Linear Optimization. Belmont: Athena Scientific, 1997.
- EHRGOTT, M. Multicriteria Optimization. 2. ed. Berlin: Springer, 2005.

ANTF. Associação Nacional dos Transportadores Ferroviários – ANTF. Disponível em: <https://www.antf.org.br>. Acesso em: 17 jun. 2024.

CNA. Confederação da Agricultura e Pecuária do Brasil – CNA. Relatório Anual, 2020. Disponível em: <https://www.cnabrazil.org.br>. Acesso em: 10 dez. 2024.

COELLO, C. A. C.; LAMONT, G. B.; VAN VELDHUIZEN, D. A. Evolutionary Algorithms for Solving Multi-Objective Problems. New York: Springer, 2007.

GOLDEN, B.; ASSAD, A.; LEVY, L. The fleet size and mix vehicle routing problem. *Computers & Operations Research*, v. 11, n. 1, p. 49-66, 1984.

KAYA, C. B.; KAYA, C. An ant colony system empowered variable neighbourhood search algorithm for the vehicle routing problem with simultaneous pickup and delivery. *Expert Systems with Applications*, v. 66, p. 163–175, 2023.

LUENBERGER, D. G.; YE, Y. Linear and Nonlinear Programming. 3rd ed. New York: Springer, 2008.

REGO, C.; ALIDAEI, B.; SOUZA, M. J. Heuristics for optimization. In: GASS, S. I.; HARRIS, C. M. (Ed.). Encyclopedia of operations research and management science. New York: Springer, 2011. p. 653–659.

SAMUCO, L. Modelagem Matemática Aplicada à Otimização em Redes Logísticas. 2014. Tese (Doutorado em Engenharia de Produção) – Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, 2014.

DE WECK, O. L. Multiobjective Optimization: History and Promise. *Journal of Mechanical Design*, v. 127, n. 4, p. 525–530, 2004.

MAVROTAS, G. Effective implementation of the ϵ -constraint method in multi-objective mathematical programming problems. *Applied Mathematics and Computation*, v. 213, n. 2, p. 455–465, 2009.

CAMPBELL, J. F. Strategies for Transportation Network Design: An Algorithm for the Hub Location Problem. *Operations Research*, v. 44, n. 6, p. 923-935, 1996.

ALUMUR, S. A.; KARA, B. Y. Network Hub Location Problems: The State of the Art. *European Journal of Operational Research*, v. 190, n. 1, p. 1-21, 2008.

WANKE, P.; RODRIGUES, C. Modelagem e simulação em logística agroindustrial. *Produção Online*, v. 14, n. 4, p. 1150–1168, 2016.

SILVA, F. A.; SOUZA, J. F.; RIBEIRO, G. M. Análise de custos e emissões no transporte rodoviário de commodities. *Revista de Logística e Transporte*, v. 15, n. 2, p. 45–58, 2020.

HAIMES, Y. Y.; LASDON, L. S.; WISMER, D. A. On a bicriterion formulation of the problems of integrated system identification and system optimization. *IEEE Transactions on Systems, Man, and Cybernetics*, v. 1, n. 3, p. 296–297, 1971.

BORGES, Jucelina Leandro. Otimização Biobjetivo do Transporte Rodoferroviário da Soja de Goiás para Exportação: Aspectos Econômicos e Ambientais. 2023. Dissertação (Mestrado em Engenharia de Produção e Sistemas) – Pontifícia Universidade Católica de Goiás, Goiânia, 2023.

RESAT, H. G.; TURKAY, M. A bi-objective model for design and analysis of sustainable intermodal transportation systems: a case study of Turkey. *International Journal of Production Research*, v. 57, n. 19, p. 6146-6161, 2019.

GUROBI OPTIMIZATION. Gurobi Optimizer Reference Manual. 2024. Disponível em: <https://www.gurobi.com>. Acesso em: dez. 2024.

DEB, K. Multi-objective Optimization using Evolutionary Algorithms. John Wiley & Sons, 2001.

JAYARATHNA, C.; et al. A hybrid algorithm for vehicle routing problems with environmental considerations. *Applied Soft Computing*, v. 91, p. 106–123, 2021.

ZALUSKI, E. G. Modelagem e Otimização no Transporte de Soja: Um Estudo de Caso. 2018. Dissertação (Mestrado em Engenharia de Produção) – Pontifícia Universidade Católica de Goiás, Goiânia, 2018.

APÊNDICE A – Classificação dos Nós Logísticos no Transporte de Soja no Brasil

Sigla	Nome e Estado	Tipo
TUP	Tupanciretã - RS	Produtor
EST	Estrela - RS	Transbordo
PRG	Porto Rio Grande - RS	Porto
STM	Santa Maria - RS	Transbordo
POA	Porto Alegre - RS	Transbordo
CAR	Carazinho - RS	Transbordo
CRA	Cruz Alta - RS	Produtor
PNG	Paranaguá - PR	Porto
SNT	Porto Santos - SP	Porto
PED	Pederneiras - SP	Transbordo
GUA	Guarapuava - PR	Transbordo
LON	Londrina - PR	Produtor
MAR	Maringá - PR	Transbordo
CSC	Cascavel - PR	Transbordo
MAM	Mamborê - PR	Produtor
ASS	Assis Chateaubriand - PR	Produtor
CHO	Chopinzinho - PR	Produtor
COR	Cornélio Procópio - PR	Produtor
CST	Castro - PR	Produtor
UBR	Uberlândia - MG	Produtor
GIR	Guaíra - PR	Produtor
SJR	São José do Rio Preto - SP	Transbordo
RVD	Rio Verde - GO	Produtor
ANP	Anápolis - GO	Transbordo
SLZ	São Luís - MA	Porto
CRT	Cristianópolis - GO	Produtor
SSM	São Simão - GO	Transbordo
CHS	Chapadão do Sul - MS	Produtor

TLG	Três Lagoas - MS	Transbordo
MJC	Maracajú - MS	Produtor
ATG	Água Clara - MS	Transbordo
SGO	São Gabriel do Oeste - MS	Produtor
PML	Primavera do Leste - MT	Produtor
RND	Rondonópolis - MT	Transbordo
SRS	Sorriso - MT	Produtor
ITB	Itaituba - PA	Transbordo
BAR	Porto Barcarena - PA	Porto
PTV	Porto de Vila do Conde - PA	Porto
CNR	Canarana - MT	Produtor
PTN	Porto Nacional - TO	Transbordo
BLS	Balsas - MA	Produtor
PFC	Porto Franco - MA	Transbordo
CMP	Campos Lindos - TO	Produtor
BMJ	Bom Jesus - PI	Produtor
SDD	São Denário - PI	Produtor
PGM	Paragominas - PA	Produtor
APU	Apucarana - PR	Transbordo
PAR	Paranaguá - PR	Porto

Fonte: Zaluski (2018).

APÊNDICE B – Rotas entre os Nós Logísticos no Transporte de Soja no Brasil

Rota	Custo (R\$)	Emissão tCO2e				
		Ferrovário	Hidroviário	Rodoviário	Ferrovário	Hidroviário
TUP-EST-PRG	78,8		15,6	1,55906685	0	0,469924796
TUP-PRG	98			2,27718249	0	0
TUP-PRG		99,27		0	2,399325141	0
TUP-STM-PRG	54,16	94,8		0,60000452	2,261802847	0
TUP-POA-PRG	90,5		9,7	2,05985802	0	0,291025812
CRA-PRG		103		0	2,595367561	0
CRA-STM-PRG	80,9	59,27		1,66772909	0,333564715	0
CRA-STM-PRG	52,51	94,8		0,62835119	2,261802847	0
CRA-PRG	96,72			2,30552916	0	0
CRA-POA-PRG	80,62		9,7	1,66300464	0	0,291025812
CRA-EST-PRG	68,19		15,6	1,16221347	0	0,469924796
LON-PNG-PAR	71,72	40,75		1,30394682	0,658351411	0
LON-PED-SNT	79,9	46,25		1,6063113	0,810503737	0
LON-GUA-PAR	76,9	44,77		1,5118224	0,769539649	0
LON-PAR	120			2,31025361	0	0
LON-PAR		79,19		0	1,781937818	0
MAM-PAR	103,7			2,78269811	0	0

MAM-CSC - PAR	56,28	78,89		0,68504453	1,7731598	0
MAM-GUA- PAR	67,48	44,77		1,1338668	0,769539649	0
MAM - MAR - PAR	55,45	79,5		0,65197341	1,793641844	0
MAM - PNG - PAR	89,29	40,75		2,00788913	0,658351411	0
ASS-CSC- PAR	49,27	78,89		0,40016049	1,7731598	0
ASS-GUA- PAR	77,47	44,77		1,54489352	0,769539649	0
ASS-PNG- PAR	98,92	40,75		2,35749806	0,658351411	0
ASS-PAR	112			3,20317371	0	0
CHO-GUA- PAR	56,8	44,77		0,70866675	0,769539649	0
CHO-PAR	98,37			2,37167139	0	0
CHO-PNG- PAR	75,31	40,75		1,46457795	0,658351411	0
COR-APU- PAR	53,21	87,05		0,56220896	1,187958546	0
COR-PED- SNT	68,2	46,25		1,16221347	0,810503737	0
COR-SNT	104,5			2,61734253	0	0
COR-PAR	97,43			2,33387583	0	0
COR-PNG- PAR	72,2	40,75		1,3228446	0,658351411	0
CST-PAR	69,9			1,21890681	0	0
CST- PNG- PAR	72,2	40,75		0,20126136	0,658351411	0
UBR-SNT		118,5		0	3,160086772	0
UBR-SNT	118			3,16065371	0	0
UBR-PED- SNT	93,65	46,25		2,18269359	0,810503737	0
GIR-SJR- SNT	54,28	75,27		0,60472896	1,661971561	0
GIR-SNT	103,44			2,57482253	0	0
GIR-SJB- SNT	47,25	73,46		0,32267959	1,609010848	0
RVD-ANP- SLZ	73,9	395		1,39371128	6,012942885	0
RVD-SNT	154,3			4,61578277	0	0
RVD-SRT- SNT	72,31	106,5		1,32756905	2,703980914	0

CRT-ANP-SLZ	66,3	395		1,08662235	6,012942885	0
CRT-SNT	153,03			4,56381387	0	0
CRT-UBR-SNT	73,49	118,05		1,3748135	3,160086772	0
CHS-ANP-SLZ	121,6	395		3,30238706	6,012942885	0
CHS-TLG-SNT	77,9	98,85		1,55434241	2,516365392	0
CHS-SNT		115,4		0	3,054750546	0
CHS-SNT	154,14			4,60633388	0	0
MJC-CSC-PAR	98,96	78,89		2,39529362	1,7731598	0
MJC-SNT	168,4			5,17799172	0	0
MJC-PAR		171,4		0	3,048898533	0
MJC-TLG-SNT	97	101,6		2,3197025	2,518120996	0
MJC-MAR-PAR	100,85	79,56		2,47088474	1,793641844	0
MJC-PAR	171,8			5,31500063	0	0
SGO-RND-SNT	81,16	137,2		1,68190242	3,920848402	0
SGO-TLG-SNT	92,9	101,6		2,15434692	2,516365392	0
SGO-ATG-SNT	82,57	106,2		1,73859576	2,703629793	0
SGO-SNT	181			5,69768067	0	0
SGO-MAR-PAR	121,4	79,56		3,29766261	1,793641844	0
PML-RND-PAR	54,39	187,92		0,60945341	4,857170408	0
PML-ANP-SLZ	119,24	395		3,20789816	6,012942885	0
PML-SNT	218,39			7,1811564	0	0
PML-UBR-SNT	165,3	118,05		5,05515615	3,160086772	0
SRS-ITB-BAR	210		45,4	5,10712505	0	0,457326276
SRS-RND-SNT	118,67	137,26		3,14175593	3,920848402	0
SRS-RND-PAR	98,96	187,92		2,39529362	4,857170408	0
SRS SNT	225			9,52920557	0	0
SRS-PAR	264			10,3748812	0	0
SRS-BAR	219			9,44889	0	0

SRS-PTV-BAR	209,55		98,57	6,82682303	0	2,956872644
CNR-BAR	239			8,00793428	0	0
CNR-PTN-SLZ	134,68	123,96		3,82680045	3,394167273	0
BLS-PFC-SLZ	74,08	90		1,39843572	2,115502533	0
BLS-SLZ	129,5			3,77483156	0	0
CMP-PFC-SLZ	80,68	90		1,66300464	2,115502533	0
CMP-SLZ	146			4,28507162	0	0
BMJ-SLZ	151,2			4,48822275	0	0
SDD-SLZ	209,31			6,81737414	0	0
PGM-BAR	67,13			1,28977349	0	0

Fonte: Zaluski (2018).

APÊNDICE C –ESTADO DA ARTE EM MODELOS DE OTIMIZAÇÃO

TÍTULO	Citações	Ano	Valor do JCR	$\alpha =$ 10 p/ + recente e 1 + antigos	Idade da publicação	InOrdinatio	Autor(es)	Revista	Tipo de Documento	Referências	Citações no WoS
A review of vehicle routing with simultaneous pickup and delivery	92	2020	5,159	10	4	157,16	Koc, Cagri; Laporte, Gilbert; Tukenmez, Ilknur	COMPUTERS & OPERATIONS RESEARCH	Review	124	87
A hyper heuristic for the green vehicle routing problem with simultaneous pickup and delivery	55	2021	7,180	10	3	132,18	Olgun, Busra; Koc, Cagri; Altıparmak, Fulya	COMPUTERS & INDUSTRIAL ENGINEERING	Article	75	51
The vehicle routing problem with simultaneous pickup and delivery and handling costs	52	2020	5,159	10	4	117,16	Hornstra, Richard P.; Silva, Allyson; Roodbergen, Kees Jan; Coelho, Leandro C.	COMPUTERS & OPERATIONS RESEARCH	Article	36	50
The vehicle routing problem with simultaneous pickup and delivery and occasional drivers	11	2023	8,665	10	1	109,67	Yu, Vincent F.; Aloina, Grace; Jodiawan, Panca; Gunawan, Aldy; Huang, Tsung-Chi	EXPERT SYSTEMS WITH APPLICATIONS	Article	73	11

A unified exact approach for a broad class of vehicle routing problems with simultaneous pickup and delivery	3	2024	5,159	10	0	108,16	Praxedes, Rafael; Bulhoes, Teobaldo; Subramanian, Anand; Uchoa, Eduardo	COMPUTERS & OPERATIONS RESEARCH	Article	55	3
A robust optimization approach for the production-inventory-routing problem with simultaneous pickup and delivery	40	2020	7,180	10	4	107,18	Golsefidi, Atefeh Hemmati; Jokar, Mohammad Reza Akbari	COMPUTERS & INDUSTRIAL ENGINEERING	Article	34	39
A hybrid metaheuristic algorithm based on iterated local search for vehicle routing problem with simultaneous pickup and delivery	16	2022	8,665	10	2	104,67	Oztas, Tayfun; Tus, Aysegul	EXPERT SYSTEMS WITH APPLICATIONS	Article	85	14
The Vehicle Routing Problem with Simultaneous Pickup and Delivery Considering the Total Number of Collected Goods	2	2023	2,592	10	1	94,592	Guo, Qinge; Wang, Nengmin	MATHEMATICS	Article	35	2
Optimization of Simultaneous Pickup and Delivery Vehicle Routing with Three-Dimensional Balanced Loading Constraints	0	2023	3,889	10	1	93,889	Zhang, Yinggui; Sheng, Lining	SUSTAINABILITY	Article	35	0
The Integrated Production-Inventory-Routing Problem with Reverse Logistics and Remanufacturing: A Two-Phase Decomposition Heuristic	7	2022	3,889	10	2	90,889	Chekoubi, Zakaria; Trabelsi, Wajdi; Sauer, Nathalie; Majdoulina, Ilias	SUSTAINABILITY	Article	70	7
Multi-commodity demand fulfillment via simultaneous pickup and delivery for a fast fashion retailer	34	2019	5,159	10	5	89,159	Zhang, Zhenzhen; Cheang, Brenda; Li, Chongshou; Lim, Andrew	COMPUTERS & OPERATIONS RESEARCH	Article	37	30
An adaptive large neighborhood search with path relinking for a class of vehicle-routing problems with simultaneous pickup and delivery	28	2019	1,871	10	5	79,871	Hof, Julian; Schneider, Michael	NETWORKS	Article	45	25

Dynamic multi-stage failure-specific cooperative recourse strategy for logistics with simultaneous pickup and delivery	4	2021	3,732	10	3	77,732	Zhang, Wenyu; Chen, Zixuan; Zhang, Shuai; Cai, Yishuai	SOFT COMPUTING	Article	28	4
A MATHEMATICAL FORMULATION AND HEURISTIC APPROACH FOR THE HETEROGENEOUS FIXED FLEET VEHICLE ROUTING PROBLEM WITH SIMULTANEOUS PICKUP AND DELIVERY	6	2021	1,411	10	3	77,411	Kececi, Baris; Altiparmak, Fulya; Kara, Imdat	JOURNAL OF INDUSTRIAL AND MANAGEMENT OPTIMIZATION	Article	67	5
Mathematical programming based heuristic approach for two-echelon vehicle routing problem with simultaneous pickup and delivery	3	2021	1,059	10	3	74,059	Belgin, Onder; Karaoglan, Ismail; Altiparmak, Fulya	JOURNAL OF THE FACULTY OF ENGINEERING AND ARCHITECTURE OF GAZI UNIVERSITY	Article	63	1
A new model for the asymmetric vehicle routing problem with simultaneous pickup and deliveries	8	2020	1,151	10	4	69,151	Agarwal, Yogesh Kumar; Venkateshan, Prahalad	OPERATIONS RESEARCH LETTERS	Article	22	5

Fonte: Base científica *Web of Science*

Legenda:

JCR: base estatística Journal Citation Reports (JCR) da editora Clarivate Analytics que é a principal medida de impacto do periódico Web of Science (WoS). É um recurso que permite avaliar e comparar publicações científicas utilizando dados de citações extraídos de revistas acadêmicas e técnicas e o impacto destas na comunidade científica indexadas pela coleção principal da Web of Science. Por meio da JCR é possível verificar os periódicos mais citados em uma determinada área e a relevância da publicação para a comunidade científica por meio do Fator de Impacto.

InOrdinatio: Na leitura do artigo "Bibliometrics and systematic reviews: A comparison between the Proknow-C and the Methodi Ordinatio" (Bibliometria e revisões sistemáticas: uma comparação entre o Proknow-C e o Methodi Ordinatio) foi verificado o uso do índice InOrdinatio que é utilizado para classificar as publicações relevantes com base em uma fórmula, que inclui a contagem de citações, ano de publicação, fator de impacto dos periódicos e um fator alfa. A fórmula é expressa a seguir.

InOrdinatio = Citações + Fator impacto + $(10 \cdot \alpha) - (\alpha \cdot \text{Idade publicação})$, onde $\alpha = 10$ para artigos mais recentes e 1 para artigos mais antigos

Citações: quantidades de vezes que o artigo em estudo foi citado.

Web of Science (WoS): é uma plataforma online, que contém base de dados de informações de bibliografias e citações. Trata-se, em resumo, de uma base de referências bibliográficas, que permite avaliar e analisar o rendimento das pesquisas.

RESOLUÇÃO nº 038/2020 – CEPE

ANEXO I

APÊNDICE ao TCC

Termo de autorização de publicação de produção acadêmica

O(A) estudante Felipe Camilo Alves
do Curso de Ciência da computação, matrícula 20191002800178,
telefone: 62 98170-5615 e-mail felipecamiloalves04@gmail.com,
na qualidade de titular dos direitos autorais, em consonância com a Lei nº 9.610/98 (Lei
dos Direitos do Autor), autoriza a Pontifícia Universidade Católica de Goiás (PUC Goiás)
a disponibilizar o Trabalho de Conclusão de Curso intitulado
Otimização de Roteamento de Veículos para Exportação de Soja no Brasil: Modelagem e Aplicação
Prática, gratuitamente, sem ressarcimento dos direitos autorais, por 5 (cinco) anos,
conforme permissões do documento, em meio eletrônico, na rede mundial de
computadores, no formato especificado (Texto(PDF); Imagem (GIF ou JPEG); Som
(WAVE, MPEG, AIFF, SND); Vídeo (MPEG, MWV, AVI, QT); outros, específicos da
área; para fins de leitura e/ou impressão pela internet, a título de divulgação da produção
científica gerada nos cursos de graduação da PUC Goiás.

Goiânia, 29 de novembro de 2024.

Assinatura do autor: _____

Nome completo do autor: Felipe Camilo Alves

Assinatura do professor-orientador: _____

Nome completo do professor-orientador: Maria José Pereira Dantas