



**UFOP**

Universidade Federal  
de Ouro Preto

UNIVERSIDADE FEDERAL DE OURO PRETO  
INSTITUTO DE CIÊNCIAS EXATAS E APLICADAS  
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA DE PRODUÇÃO



**TRABALHO DE CONCLUSÃO DE CURSO**

**LOCALIZAÇÃO DE TERMINAIS FERROVIÁRIOS  
E ALOCAÇÃO DE FLUXOS PARA A EXPORTAÇÃO DE CELULOSE**

**FELIPE AUGUSTO CIQUEIRA ROLLA**

**JOÃO MONLEVADE, MG**

**2025**

**FELIPE AUGUSTO CIQUEIRA ROLLA**

**LOCALIZAÇÃO DE TERMINAIS FERROVIÁRIOS  
E ALOCAÇÃO DE FLUXOS PARA A EXPORTAÇÃO DE CELULOSE**

Trabalho de Conclusão de curso apresentado à Universidade Federal de Ouro Preto como parte dos requisitos para obtenção do Título de Bacharel em Engenharia de Produção pelo Instituto de Ciências Exatas e Aplicadas da Universidade Federal de Ouro Preto. Orientadora: Prof. Dr<sup>a</sup>. Mônica do Amaral – monica.amaral@ufop.edu.br.

**UNIVERSIDADE FEDERAL DE OURO PRETO  
JOÃO MONLEVADE. MG**

**2025**

## SISBIN - SISTEMA DE BIBLIOTECAS E INFORMAÇÃO

R749l Rolla, Felipe Augusto Ciqueira.  
Localização de terminais ferroviários e alocação de fluxos para a  
exportação de celulose. [manuscrito] / Felipe Augusto Ciqueira Rolla. -  
2025.  
28 f.: il.: color., gráf., tab., mapa.

Orientadora: Profa. Dra. Mônica do Amaral.  
Monografia (Bacharelado). Universidade Federal de Ouro Preto.  
Instituto de Ciências Exatas e Aplicadas. Graduação em Engenharia de  
Produção .

1. Celulose - Exportação. 2. Grafos de ligação. 3. Localização. 4.  
Logística empresarial - Indústria de celulose. 5. Pesquisa operacional. I.  
Amaral, Mônica do. II. Universidade Federal de Ouro Preto. III. Título.

CDU 519.8:658.5

Bibliotecário(a) Responsável: Flávia Reis - CRB6-2431



## FOLHA DE APROVAÇÃO

**Felipe Augusto Ciqueira Rolla**

### Localização de terminais ferroviários e alocação de fluxos para a exportação de celulose

Monografia apresentada ao Curso de Engenharia de Produção da Universidade Federal de Ouro Preto como requisito parcial para obtenção do título de Bacharel em Engenharia de Produção

Aprovada em 2 de junho de 2025

#### Membros da banca

Dra. Mônica do Amaral - Orientadora (Universidade Federal de Ouro Preto)  
Dr. Alexandre Xavier Martins - (Universidade Federal de Ouro Preto)  
Dr. Samuel Martins Drei - (Universidade Federal de Ouro Preto)

Mônica do Amaral, orientadora do trabalho, aprovou a versão final e autorizou seu depósito na Biblioteca Digital de Trabalhos de Conclusão de Curso da UFOP em 09/06/2025.



Documento assinado eletronicamente por **Monica do Amaral, PROFESSOR DE MAGISTERIO SUPERIOR**, em 09/06/2025, às 23:43, conforme horário oficial de Brasília, com fundamento no art. 6º, § 1º, do [Decreto nº 8.539, de 8 de outubro de 2015](#).



A autenticidade deste documento pode ser conferida no site [http://sei.ufop.br/sei/controlador\\_externo.php?acao=documento\\_conferir&id\\_orgao\\_acesso\\_externo=0](http://sei.ufop.br/sei/controlador_externo.php?acao=documento_conferir&id_orgao_acesso_externo=0), informando o código verificador **0926721** e o código CRC **1B761D59**.

## RESUMO

O Brasil é o maior exportador de celulose e o setor se encontra em franco crescimento, já alcançando o quinto lugar nas exportações do agronegócio. Dentre os estados produtores, o Mato Grosso do Sul é responsável pelo maior volume produtivo e tem previsão de dobrar a sua produção nos próximos anos. Por causa disso, investimentos vêm sendo realizados na criação de terminais ferroviários e na modernização dos portos, porém, com previsão de ruptura de capacidade nos próximos anos. Sendo assim, é preciso encontrar alternativas de escoamento que acompanhem o crescimento das exportações. Nesse contexto, propõe-se um modelo de localização de terminais ferroviários e alocação de fluxos para a exportação de celulose, utilizando uma estrutura de grafos multicamadas e de  $p$ -medianas. Testes realizados com dados secundários foram utilizados para analisar cenários de investimentos em terminais ferroviários e no escoamento pelo corredor bioceânico, considerando redução de custos logísticos e emissão de CO<sub>2</sub>.

**Palavras-chave:** Localização; Fluxos em redes; Logística da celulose.

## **ABSTRACT**

*Brazil is the largest exporter of cellulose and the sector is experiencing rapid growth, already reaching fifth place in agribusiness exports. Among the producing states, Mato Grosso do Sul is responsible for the largest production volume and is expected to double its production in the coming years. Because of this, investments have been made in the creation of railway terminals and in the modernization of ports, but with a forecast of capacity rupture in the coming years. Therefore, it is necessary to find alternatives for outflow that keep up with the growth of exports. In this context, a model for the location of railway terminals and allocation of flows for the export of cellulose is proposed, using a multilayer graph structure and p-medians. Tests carried out with secondary data were used to analyze investment scenarios in railway terminals and in the outflow through the bioceanic corridor, considering the reduction of logistics costs and CO<sub>2</sub> emissions.*

**Keywords:** *Location. Network flows. Pulp and paper logistics.*

## **AGRADECIMENTOS**

Agradeço, primeiramente a Deus, por me abençoar e me dá forças durante toda minha trajetória acadêmica.

Aos meus pais e minha família, que sempre estiveram comigo, me apoiando e mostrando que tudo isso seria possível.

Agradecimento especial à minha orientadora Mônica, que nesse momento mais desafiador do curso me deu todo o suporte necessário, entendendo minhas ideias e me direcionando para o caminho certo, com muita paciência e generosidade. Sou muito grato por esta oportunidade!

Importante destacar também o papel da UFOP, que me preparou como profissional e pessoa, me permitindo alcançar sonhos.

# Lista de Tabelas

Tabela 1: Resultados do cenário I .....	12
Tabela 2: Resultados do cenário II .....	16
Tabela 3: Comparativo de resultados entre os cenários I e II.....	21

## Lista de Figuras

Figura 1: Variação de p (Cenário I).....	13
Figura 2: Trade-off biobjetivo (Cenário I).....	13
Figura 3: Minimização de custos (Cenário I).....	14
Figura 4: Minimização de CO2 (cenário atual).....	15
Figura 5: Custos logísticos (Cenário I).....	15
Figura 6: Emissões de CO2 (Cenário I).....	16
Figura 7: Variação de p (Cenário II).....	17
Figura 8: Trade-off biobjetivo (Cenário II).....	17
Figura 9: Custos logísticos (Cenário II).....	18
Figura 10: Emissões de CO2 (Cenário II).....	19
Figura 11: Custos logísticos (Cenário II).....	20
Figura 12: Emissões de CO2 (Cenário II).....	20

## SUMÁRIO

<b>1</b>	<b>Introdução .....</b>	<b>1</b>
1.1	Objetivo .....	2
1.1.1	Objetivo geral .....	2
1.1.2	Objetivos específicos .....	2
1.2	JUSTIFICATIVA .....	2
1.3	Estrutura do Trabalho .....	3
<b>2</b>	<b>Revisão de Literatura.....</b>	<b>4</b>
<b>3</b>	<b>Metodologia de Pesquisa .....</b>	<b>6</b>
3.1	Modelagem do problema de localização de terminais ferroviários para exportação de celulose.....	6
3.2	Coleta e análise de dados sobre a exportação de celulose do Mato Grosso do Sul ..	8
3.3	Planejamento da análise de cenários .....	10
<b>4</b>	<b>Análise dos Resultados.....</b>	<b>12</b>
4.1	Cenário I.....	12
4.2	Cenário II.....	16
4.3	COMPARATIVO DE RESULTADOS.....	20
<b>5</b>	<b>Considerações Finais .....</b>	<b>23</b>
<b>6</b>	<b>Referências .....</b>	<b>25</b>

## 1 INTRODUÇÃO

O Brasil é o maior exportador mundial de celulose, tendo exportado 18 milhões de toneladas em 2023, o que representou cerca de 7,6 bilhões de dólares em divisas. O mercado é crescente, apresentando 19% de aumento apenas no primeiro semestre de 2024. O setor acumulou mais de 100% de crescimento nos últimos 10 anos e atualmente representa o quinto item na balança de exportação do agronegócio. Os principais países importadores da celulose brasileira são a China, com cerca de 49% da fatia de mercado, seguida pela União Europeia e Estados Unidos (Ibá, 2024).

Os maiores produtores de celulose são os estados de Mato Grosso do Sul, São Paulo e Paraná, que obtêm a celulose a partir do pinus e do eucalipto. Além dessas espécies se adaptarem bem às características hídricas e do solo brasileiro, o setor se destaca pela utilização de uma matriz energética limpa no processo produtivo e uso de tecnologias genéticas inovadoras. Além da produção de papel e papelão, a celulose ainda é importante para a produção de fibras e tecidos, itens de higiene pessoal, materiais de construção, medicamentos e cosméticos (Klabin, 2025).

O porto de Santos é o principal ponto de exportação, correspondendo a 42% do volume exportado. Além do Governo Federal, várias empresas têm investido na modernização dos terminais disponíveis, como a Eldorado Brasil, a Suzano e a Bracell (Governo Federal, 2025). Porém, a logística de escoamento da celulose ainda apresenta muitos entraves, como a baixa disponibilidade de terminais ferroviários que dão acesso aos portos, os altos custos e grandes distâncias na contratação de fretes rodoviários até esses terminais. Além disso, os aumentos na produção, possibilitado pela construção e expansão de fábricas de celulose, tornam imperativos os investimentos em capacidade de armazenagem e escoamento nos portos (Portal Celulose, 2025).

Diante desse contexto, têm-se por objetivo propor um modelo de localização de terminais ferroviários e alocação de fluxos multimodais para a exportação da celulose, considerando os objetivos de minimização de custos e das emissões de CO<sub>2</sub>. Utilizando uma estrutura do tipo *p*-medianas e baseado em (Amaral et al., 2012), o modelo proposto possibilita o estudo dos ganhos marginais relativos de cada terminal ferroviário, bem como análises de capacidades de embarque nos terminais ferroviários e nos portos. São discutidos resultados computacionais preliminares de

dois cenários, um atual e uma projeção futura, para a exportação da celulose produzida no Mato Grosso do Sul. Destacam-se a modelagem da cadeia brasileira da celulose, da qual não se tem conhecimento na literatura e a análise biobjetivo realizada, possibilitando destacar o potencial menos poluidor do transporte ferroviário em relação ao rodoviário, uma vez que os custos de frete entre esses modais apresentaram poucas diferenças no estudo realizado.

## 1.1 OBJETIVO

### 1.1.1 Objetivo geral

Tem-se por objetivo analisar a logística de exportação da celulose produzida no Mato Grosso do Sul, por meio da proposição e realização de testes computacionais com um modelo de localização de terminais ferroviários e alocação de fluxos, considerando custos logísticos e as emissões de CO<sub>2</sub>.

### 1.1.2 Objetivos específicos

Têm-se por objetivos específicos:

- Estudar a logística de exportação da celulose produzida no Mato Grosso do Sul;
- Adaptar o modelo de Amaral et al. (2012) para atender às especificações da cadeia da celulose e considerar as emissões de CO<sub>2</sub> como custos na função objetivo;
- Realizar um estudo de cenários, considerando a realidade atual e uma alternativa de cenário futuro, a partir do método das somas ponderadas, para a análise de *trade-off* biobjetivo.

## 1.2 JUSTIFICATIVA

A abertura de uma nova fábrica de celulose em Inocência – MS, com capacidade produtiva de 3,5 milhões de toneladas anuais (Agência de Notícias do Mato Grosso do Sul, 2024), acrescida dos 2,8 milhões de toneladas que passarão a ser

produzidas em Água Clara – MS (Campos, 2024), levará um aumento superior a 100% na produção estadual de celulose, exigindo um planejamento logístico mais eficiente. Desta forma, entende-se que, não havendo conhecimento de nenhum trabalho que modele essa cadeia, um modelo de localização de terminais ferroviários e alocação de fluxos possa suprir uma lacuna teórica e prática de pesquisa, possibilitando a avaliação da rede logística existente, bem como o planejamento de expansões mais eficientes economicamente e em termos das emissões de CO<sub>2</sub>.

### 1.3 ESTRUTURA DO TRABALHO

A partir dessa introdução, o trabalho está organizado da seguinte maneira: na Seção 2, apresenta-se uma breve revisão de literatura, sendo destacados trabalhos relacionados à modelagem de cadeias de papel e celulose. Na Seção 3, o problema de exportação da celulose brasileira é apresentado e formulado matematicamente, bem como são definidos os procedimentos metodológicos utilizados nos testes computacionais realizados. Na Seção 4, são apresentados e discutidos os resultados obtidos com cadeia de celulose construída a partir de dados secundários, comparando-se cenários atuais e futuros. Na Seção 5, encerra-se o trabalho, com considerações a respeito da validade e aplicabilidade do modelo, além de perspectivas para pesquisas futuras.

## 2 REVISÃO DE LITERATURA

A revisão de literatura foi conduzida utilizando-se do portal Periódico Capes, Scielo, Web of Science e Google Acadêmico como bases de artigos científicos. Os artigos foram pesquisados por meio das seguintes expressões de busca: “*pulp and paper optimization*”, “*pulp and paper supply chain optimization*”, “*pulp and paper modeling*” e “*pulp and paper review*”, além das suas traduções para o Português. Não foi estabelecido nenhum limite para a data de publicação, mas artigos muito antigos em que apenas o resumo estava disponível foram excluídos da análise.

Foram encontrados dois artigos de revisão de literatura, seis artigos com modelos de Pesquisa Operacional que modelaram a parte de distribuição da cadeia da celulose, mas não foi encontrado nenhum artigo em Português com modelos de otimização, nem em Inglês que relatasse um estudo realizado no Brasil.

Malik e Qiu (2008) fizeram uma revisão sobre a modelagem do planejamento da produção na cadeia de suprimentos de celulose e papel, analisando nove artigos, publicados entre 1997 e 2005. Os autores afirmam que a maior complexidade de planejamento está em coordenar as atividades de produção da celulose com a distribuição, pelo fato dos estoques de madeira e polpa de celulose ocuparem grandes espaços e apresentarem complexidade de manuseio. Por causa disso, os modelos desenvolvidos para essa cadeia se baseiam principalmente em problemas de dimensionamento de lotes, considerando custos fixos de preparação e custos variáveis de estocagem ou de *scheduling*, possibilitando a sincronização da produção com a distribuição.

Dos trabalhos analisados, apenas dois apresentavam modelagem da parte logística. Bredström e Rönnqvist (2002) modelaram o planejamento da produção de celulose em uma indústria de celulose com três fábricas da Suécia e duas na Noruega, integrando a distribuição da celulose pela decisão de alocação de três navios próprios com o aluguel de outros navios, quando necessário, para atendimento de uma demanda trimestral de 90 coprodutos. Bredström et al. (2004) estenderam o mesmo modelo à cadeia na Escandinávia, considerando a colheita, a produção e a distribuição da polpa de celulose. Devido ao porte e complexidade do modelo, duas abordagens de solução foram testadas, utilizando geração de colunas e técnicas de ramificação, ambas obtendo bons resultados práticos e em termos de tempos de execução aceitáveis.

Posteriormente, Bredström e Rönnqvist (2006) remodelaram a cadeia de celulose da Suécia e Noruega com horizonte rolante, que foi resolvido por técnicas de *relax-and-fix*, obtendo boas soluções em menos de uma hora. Gunnarsson e Rönnqvist (2008) também propuseram um novo modelo para a mesma cadeia da celulose, porém considerando o uso de trens e caminhões para a entrega aos clientes, sendo o único modelo conhecido que considera modais alternativos para um mesmo nível da cadeia de suprimentos. Como métodos de resolução, os autores propuseram uma heurística do tipo *relax-and-fix* e um método baseado em relaxação Lagrangiana.

Carlsson et al. (2009) publicaram uma revisão sistemática mais abrangente sobre otimização da cadeia da celulose, dividindo os trabalhos de acordo com o horizonte de planejamento. Apesar de mais abrangente, citando 52 artigos, o trabalho não cita outros trabalhos com foco logístico.

É interessante destacar o surgimento de modelos que inserem a cadeia produtiva da celulose no contexto de geração de energia elétrica, a partir da queima de madeira e outras matérias primas nas usinas termelétricas em detrimento da produção de celulose. Waldemarsson et al. (2013) propuseram um modelo de maximização de lucro para definição do portfólio de produção em uma indústria de celulose considerando a geração de energia elétrica como coproduto alternativo, de acordo com as variações de demanda e preço da energia elétrica. Waldemarsson et al. (2017) apresentaram um estudo com dados reais de uma empresa com cinco fábricas na Suécia e Noruega, mostrando que modelo é adequado para o processo de tomada de decisão e que a escolha das matérias primas e dos coprodutos a serem produzidos, incluindo a venda de energia elétrica, podem impactar significativamente nos lucros das empresas do setor de celulose.

No Brasil, não se tem conhecimento da publicação de modelos de otimização voltados ao planejamento da produção ou à logística de exportação de celulose. Porém, é possível entender o seu contexto histórico por Soares et al. (2009) e Coelho et al. (2013), o contexto do mercado brasileiro de celulose (Soares et al., 2010) frente aos seus principais mercados consumidores (Soares et al., 2011; Salles et al., 2011) e concorrentes internacionais (Sanquetta et al., 2020). Dessa forma, entende-se a modelagem da cadeia da celulose para a exportação como uma oportunidade de pesquisa, de forma a contribuir para o entendimento e o processo de tomada de decisão no setor.

### 3 METODOLOGIA DE PESQUISA

O presente trabalho pode ser classificado como empírico normativo, uma vez que se trata da modelagem de um problema real, num contexto de otimização voltado ao processo de tomada de decisões logísticas de exportação da celulose produzida no estado do Mato Grosso do Sul (Morabito et al., 2010). A pesquisa foi desenvolvida em três etapas: modelagem, coleta e análise de dados e testes de cenários.

#### 3.1 MODELAGEM DO PROBLEMA DE LOCALIZAÇÃO DE TERMINAIS FERROVIÁRIOS PARA EXPORTAÇÃO DE CELULOSE

O modelo proposto foi baseado em Amaral et al. (2012), que foi formulado para a tomada de decisões estratégicas para a exportação de soja. Além de adaptado ao contexto da exportação de celulose, incluiu-se uma segunda função objetivo de minimização das emissões de CO<sub>2</sub>.

A rede de exportação de celulose é modelada por um grafo multicamadas em que se tem um conjunto de vértices dos pontos de oferta de celulose no estado do Mato Grosso do Sul  $O$ , um conjunto de vértices de demanda  $D$ , além de três conjuntos de vértices referentes aos modais de transporte  $V_m = \{1, 2, 3\}$ , em que 1 corresponde ao modal rodoviário, 2 ao modal ferroviário e 3 ao modal marítimo. A rede é direcionada, sendo seus arcos formados por um conjunto  $A = \{(i, j) \in V, j \in V, i \neq j\}$ , sendo este dividido entre os arcos de  $A'$ , que se referem às vias de transporte da rede e  $T$ , que representa os arcos candidatos à instalação de terminais intermodais, ou seja, arcos que fazem as ligações entre as redes de transporte, ou seja, os terminais ferroviários e os portos.

Os parâmetros do modelo são:  $a_i$ , que é a quantidade ofertada (t) pelo ponto  $i$ ,  $\{i \in O\}$ ;  $b_j$ , que é a quantidade demandada (t) pelo ponto  $j$ ,  $\{j \in D\}$ ;  $c_{ij}$ , que representa o custo unitário (R\$) de transportar a carga pelo arco  $(i, j)$ ,  $\{(i, j) \in A\}$ ;  $g_{ij}$ , que é a emissão de CO<sub>2</sub> no arco  $(i, j)$ ,  $\{(i, j) \in A\}$  e  $u_{ij}$ , que é capacidade para o fluxo nos arcos  $(i, j)$  de transbordo (t),  $\{(i, j) \in T\}$ . Os de  $A'$  arcos não foram capacitados, uma vez que os terminais ferroviários e os portos representam limitantes

realistas para os fluxos logísticos. O parâmetro  $p$  indica o número de terminais ferroviários que devem ser abertos.

As variáveis de decisão são:

$$y_{ij} = \begin{cases} 1, & \text{se um terminal intermodal é instalado em } (i, j), \{(i, j) \in T\} \\ 0, & \text{caso contrário} \end{cases}$$

$$x_{ij} = \text{Fluxo no arco } (i, j), \{(i, j) \in A\}$$

O modelo, então, é definido nas equações (1)-(9):

$$z_1 = \text{Min} \sum_{(i,j) \in A} c_{ij} x_{ij} \quad (1)$$

$$z_2 = \text{Min} \sum_{(i,j) \in A} g_{ij} x_{ij} \quad (2)$$

Sujeito a:

$$\sum_{(i,j) \in T} y_{ij} = p \quad (3)$$

$$\sum_{j|(i,j) \in A_0} x_{ij} \leq a_i \quad \forall i \in O \quad (4)$$

$$\sum_{i|(i,k) \in A} x_{ik} = \sum_{j|(k,j) \in A} x_{kj} \quad \forall k \in V \setminus \{O \cup D\} \quad (5)$$

$$\sum_{i|(i,j) \in A_1^D \cup A_2^D \cup A_3^D} x_{ij} = b_j \quad \forall j \in D \quad (6)$$

$$x_{ij} \leq u_{ij} y_{ij} \quad \forall (i, j) \in T \quad (7)$$

$$x_{ij} \geq 0 \quad \forall (i, j) \in A \quad (8)$$

$$y_{ij} \in \{0, 1\} \quad \forall (i, j) \in T \quad (9)$$

O modelo possui dois objetivos, sendo que a função objetivo da equação (1) visa à minimização dos custos de transporte e transbordo, enquanto a função objetivo descrita pela equação (2) visa à minimização das emissões de CO<sub>2</sub> no transporte da celulose. A equação (3) garante que exatamente  $p$  terminais sejam instalados. As restrições apresentadas nas equações (4) a (6) garantem as condições de fluxo no sistema, se referindo em (4) às quantidades ofertadas, em (5) à conservação do fluxo nos nós intermediários e em (6) ao atendimento da demanda. Em (7), garante-se que

só pode haver fluxo em um terminal intermodal se este for aberto e o respeito às limitações de capacidade de transbordo. Finalmente, em (8) e (9) são definidos os domínios das variáveis, sendo as variáveis de fluxo não-negativas e binárias as de abertura de terminais.

### 3.2 COLETA E ANÁLISE DE DADOS SOBRE A EXPORTAÇÃO DE CELULOSE DO MATO GROSSO DO SUL

Os dados foram coletados a partir de fontes secundárias, com o intuito de representar a rede de exportação da celulose produzida no estado do Mato Grosso do Sul e destinada à exportação. A cidade de Três Lagoas abriga fábricas da Suzano e da Eldorado Brasil, com capacidade conjunta 5.300.00 toneladas anuais (Eldorado Brasil, 2023). Já Ribas do Rio Pardo sedia a maior fábrica de celulose em linha única do mundo, inaugurada em 2024 pela Suzano, com produção atual de 2.300.000 toneladas por ano (Campo Grande News, 2024). Como destino, considerou-se a China, que absorve cerca de 50% do volume exportado pelo Brasil.

Foram identificados quatro terminais ferroviários que atendem às fábricas escolhidas, no transporte de celulose até o porto de Santos: Jundiaí (SP), Anápolis (GO), Campo Grande (MS) e Três Lagoas (MS). Com isso, é evidente que apenas a fábrica de Três Lagoas tem acesso a um terminal ferroviário no mesmo município, sendo todos os demais acessos rodoviários intermunicipais ou interestaduais. O terminal de Jundiaí integra a Malha Sudeste, operada pela MRS Logística, conectando diretamente com o Porto de Santos pela Linha Santos–Jundiaí, amplamente utilizada para o escoamento ferroviário de celulose (MRS Logística, 2023). As capacidades dos terminais foram consideradas uniformes e iguais a 1.250.000 t/ano, de acordo com dados das fábricas, uma vez que não foram encontrados dados reais nas agências pesquisadas.

O terminal de Anápolis é um importante nó da Ferrovia Norte-Sul, sob concessão da Rumo Logística, com terminal ativo e conexão direta com várias cidades no Sudeste (Rumo Logística, 2023). Os terminais de Campo Grande e Três Lagoas estão localizados na Malha Oeste, oriunda da antiga Noroeste do Brasil, atualmente sob concessão da Rumo. Apesar das limitações operacionais, essa malha é utilizada para o transporte de cargas florestais (ANTT, 2023).

Os portos de Santos (SP) e Paranaguá (PR) são atualmente os principais canais de exportação da celulose produzida no estado do Mato Grosso do Sul. O porto de Santos, maior complexo portuário do Brasil, possui capacidade estimada de 8.100.000 toneladas/ano para celulose, considerando a operação dos terminais da Suzano e Eldorado Brasil (Governo do Brasil, 2023). Já o Porto de Paranaguá possui capacidade para 1.000.000 de toneladas/ano, e sua operação é voltada majoritariamente a empresas que optam por transporte rodoviário direto.

Os custos de transporte rodoviários foram estimados R\$ 5,4943/km + R\$ 210,52 referentes às operações de carga e descarga ANTT (2023), os fretes ferroviários foram estimados em R\$ 66,00 por tonelada a cada 1.000 km (BNDES, 2023), enquanto os trechos marítimos custam US\$ 35/t para a China, convertido pelo câmbio de R\$ 5,10 (VALOR ECONÔMICO, 2024). Os dados de emissões de CO<sub>2</sub> considerados foram: modal rodoviário: 0,051 kg CO<sub>2</sub>/t.km (CETESB, 2023), modal ferroviário: 0,0053 kg CO<sub>2</sub>/t.km (ANTT, 2023) e modal marítimo 0,016 kg CO<sub>2</sub>/t.km (CCWG, 2023), pois não foi possível a utilização de uma única fonte de dados.

Porém a indústria de celulose no Mato Grosso do Sul está em plena expansão, com a construção de novas fábricas que devem elevar de forma significativa a capacidade produtiva do estado. A Arauco está investindo aproximadamente R\$ 25 bilhões na instalação de uma nova unidade em Inocência, com capacidade prevista de 3,5 milhões de toneladas anuais (Agência de Notícias do MS, 2024). Simultaneamente, a Bracell confirmou a implantação de uma nova fábrica em Água Clara, com capacidade de 2,8 milhões de toneladas anuais (Campos, 2024).

Com esse novo cenário produtivo, os atuais portos utilizados para exportação tornam-se insuficientes. O porto de Santos, mesmo com terminais modernos operados por empresas como Suzano e Eldorado Brasil terá capacidade estimada de 10 milhões de toneladas anuais para celulose (Ministério de Portos e Aeroportos, 2023). Já o Porto de Paranaguá, não tem previsão de novos investimentos em terminais de exportação de celulose (Portos do Paraná, 2024).

Dessa forma, o escoamento total da produção futura excede em mais de 3 milhões de toneladas a capacidade combinada desses portos. Os portos chilenos de Antofagasta e Iquique surgem como soluções viáveis, especialmente para atender aos mercados asiáticos, pois ambos possuem conexão com o oceano Pacífico e infraestrutura adaptada para movimentação de granéis e carga geral. Nesse contexto, o corredor bioceânico, com a construção da rota que conecta Porto Murtinho (MS) a

Calama (Chile) desponta como uma das principais alternativas logísticas. Porto Murtinho está em fase de finalização das obras da ponte binacional sobre o Rio Paraguai, que ligará a cidade brasileira a Carmelo Peralta, no lado paraguaio. Essa infraestrutura, prevista para ser concluída ainda em 2025, tem como principal objetivo logístico possibilitar o acesso direto ao mercado asiático (SEINFRA/MS, 2024), além de alavancar grandes projetos turísticos na região.

Diversos investimentos ferroviários estão em fase de planejamento ou já autorizados, com o objetivo de ampliar a conectividade logística do estado e possibilitar o escoamento da celulose. Destacam-se: (i) o ramal Três Lagoas – Aparecida do Taboado, autorizado pela ANTT com extensão de 89 km; (ii) a futura ligação Inocência – Aparecida do Taboado, associada ao escoamento da produção da nova fábrica da Arauco; (iii) e o trecho previsto entre Ribas do Rio Pardo e Inocência, atualmente em fase de estudos ambientais (Correio do Estado, 2024; AFCP, 2024). Dessa forma, considerou-se como candidatas à instalação de terminais ferroviários as cidades de Aparecida do Taboado e Inocência, além de um terminal alfandegário em Porto Murtinho, que possibilitará o acesso rodoviário aos portos de Antofagasta e Iquique, que poderão absorver a nova produção de celulose, que excederá as capacidades de Santos e Paranaguá.

### 3.3 PLANEJAMENTO DA ANÁLISE DE CENÁRIOS

Os testes computacionais foram dimensionados com dois objetivos principais: (i) verificar a coerência do modelo; (ii) analisar alternativas futuras de escoamento da celulose do Mato Grosso do Sul a fim de se evitar a ruptura de capacidade de escoamento pelos portos de Santos e Paranaguá. Denominou-se Cenário I ao conjunto de testes realizados com os dados atuais de produção e logística de exportação da celulose, com o objetivo de avaliar a coerência do modelo e ilustrar o seu potencial de análise no que se refere à localização ótima de terminais ferroviários e a alocação de fluxos a partir da configuração da rede obtida. O Cenário II é constituído de dados relativos à inclusão das novas fábricas, terminais ferroviários previstos e a possibilidade de exportação de celulose pelo corredor bioceânico, utilizando os portos do Chile.

Para a obtenção da curva de Pareto e as soluções ótimas, foi utilizado o método das somas ponderadas (Kim e Weck, 2005), pela avaliação de 21 pontos, em que o valor de  $\alpha$  foi variado de 0 a 1, com intervalos de 0,05, considerando-se os objetivos de minimização de custos e emissões de CO<sub>2</sub>, de acordo com a função objetivo dada pela equação (10):

$$Z = \text{Min } \alpha \sum_{(i,j) \in A} c_{ij} x_{ij} + (1-\alpha) \sum_{(i,j) \in A} g_{ij} x_{ij} \quad (10)$$

## 4 ANÁLISE DOS RESULTADOS

Os resultados computacionais obtidos com o modelo apresentado nas equações (1) – (9) foram realizados em um computador Intel Core I7 2.80 GHz, 8 Gb de memória RAM, sistema operacional Microsoft Windows 11, utilizando o AMPL/CPLEX 11.1. Todas as soluções ótimas foram obtidas em até 0,052 segundos de processamento, apesar do modelo ser considerado NP-difícil (Amaral et al., 2012), pois as redes consideradas apresentam porte bastante reduzido.

### 4.1 CENÁRIO I

Como o modelo apoia decisões de localização de terminais ferroviários e alocação de fluxos de exportação de celulose, primeiramente, foram realizados testes com a rede atual para determinar a ordem de importância dos terminais ferroviários já utilizados para a exportação de celulose, considerando apenas a função objetivo da equação (1). Os principais resultados estão na Tabela 1, que mostra a bateria de testes do método das somas ponderadas e os tempos de processamento.

Tabela 1: Resultados do cenário I

Alfa	Custos Logísticos (R\$)	CO2(kg)	Função Objetivo	Tempo (s)
0	2.606.630.000	2.595.120.000	2.595.123.000	0,022
0,05	2.606.630.000	2.595.120.000	2.595.698.200	0,029
0,1	2.559.700.000	2.598.060.000	2.594.224.650	0,019
0,15	2.437.460.000	2.614.020.000	2.587.533.325	0,020
0,2	2.437.460.000	2.614.020.000	2.578.705.600	0,052
0,25	2.437.460.000	2.614.020.000	2.569.877.875	0,023
0,3	2.437.460.000	2.614.020.000	2.561.050.150	0,027
0,35	2.436.580.000	2.614.490.000	2.552.221.150	0,011
0,4	2.436.580.000	2.614.490.000	2.543.325.600	0,014
0,45	2.436.580.000	2.614.490.000	2.534.430.050	0,024
0,5	2.436.580.000	2.614.490.000	2.525.534.500	0,025
0,55	2.436.580.000	2.614.490.000	2.516.638.950	0,021
0,6	2.436.580.000	2.614.490.000	2.507.743.400	0,013
0,65	2.436.580.000	2.614.490.000	2.498.847.850	0,036
0,7	2.436.580.000	2.614.490.000	2.489.952.300	0,015
0,75	2.436.580.000	2.614.490.000	2.481.056.750	0,014
0,8	2.436.580.000	2.614.490.000	2.472.161.200	0,051
0,85	2.436.580.000	2.614.490.000	2.463.265.650	0,018
0,9	2.436.580.000	2.614.490.000	2.454.370.100	0,010
0,95	2.436.580.000	2.614.490.000	2.445.474.550	0,031
1	2.436.580.000	2.614.490.000	2.436.579.000	0,019

Os resultados obtidos são mostrados na Figura 1. É possível observar que os ganhos marginais são decrescentes, à medida em que se aumenta o valor de  $p$ . Um ponto interessante é que o terminal de Anápolis, em termos de custos logísticos, não apresenta vantagem alguma, pois os fluxos ótimos não passam por ele. Devido à sua longa distância tanto das fábricas quanto do porto de Santos, esse terminal não é economicamente escolhido, mesmo quando se fixa o valor de  $p$  em quatro terminais ferroviários.

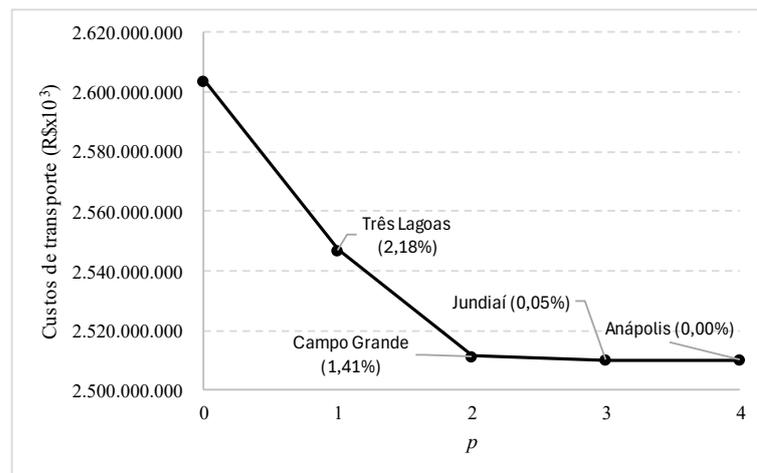


Figura 1: Variação de  $p$  (Cenário I)

A curva de Pareto ótima é mostrada na Figura 2. Foram obtidas quatro soluções de Pareto ótimas. Como pontos Nadir, têm-se a solução que minimiza apenas os custos logísticos, mostrada na Figura 3 e a solução que minimiza apenas as emissões de  $\text{CO}_2$ , mostradas na Figura 4. Na Figura 3 é possível observar que os fluxos que partem de Ribas do Rio Pardo se dividem, sendo direcionados por rodovia até o terminal de Campo Grande (54%), Jundiaí (2%) e até Paranaguá (43%).

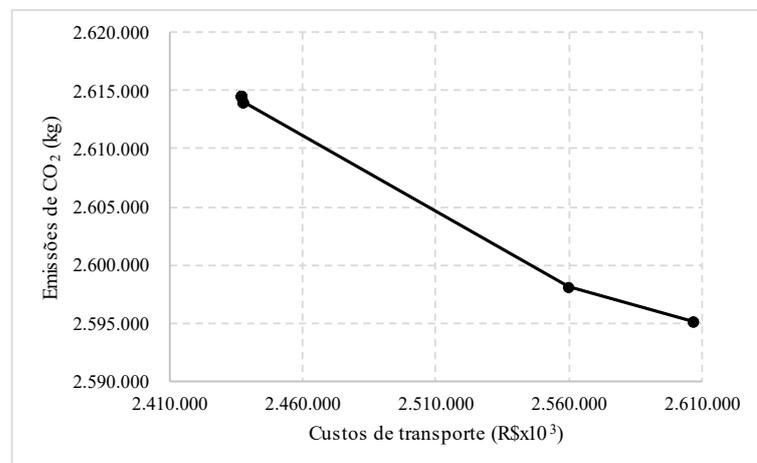


Figura 2: Trade-off biobjetivo (Cenário I)



Figura 3: Minimização de custos (Cenário I)

Como Três Lagoas está em uma posição geográfica privilegiada em relação a Ribas do Rio Pardo, esta fábrica esgota a capacidade do terminal de Três Lagoas e ocupa quase toda a capacidade do terminal de Jundiá, fazendo com que a celulose oriunda de Ribas do Rio Pardo percorra um trecho em sentido contrário ao porto, a fim de realizar o embarque ferroviário em Campo Grande.

O ponto Nadir oposto, quando se tem apenas a minimização das emissões de CO<sub>2</sub>, produz uma solução que prioriza o uso de modais menos poluentes, fazendo com que todos os terminais ferroviários sejam utilizados, enviando por rodovia apenas a celulose que excede a capacidade somada dos quatro terminais ferroviários disponíveis. É importante observar que, neste caso, a fábrica de Três Lagoas também transporta parte da sua produção por um terminal ferroviário mais oneroso, que é o de Anápolis, a fim de evitar que grandes volumes sejam direcionados para o terminal de Jundiá, que apresenta a menor rota ferroviária de apoio dentre os terminais disponíveis.



Figura 4: Minimização de CO<sub>2</sub> (cenário atual)

As Figuras 5 e 6 mostram os custos e emissões de CO<sub>2</sub> à medida em que o valor de  $\alpha$  é variado. Nos pontos em que  $\alpha = 0,05$  a  $0,15$ , o terminal de Jundiaí passa a ser, cada vez menos utilizado em detrimento ao de Anápolis, reduzindo os custos, mas aumentando as emissões de CO<sub>2</sub>.

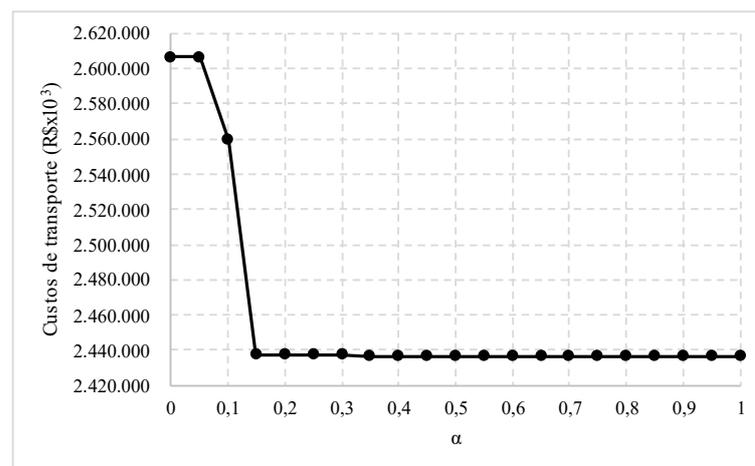


Figura 5: Custos logísticos (Cenário I)

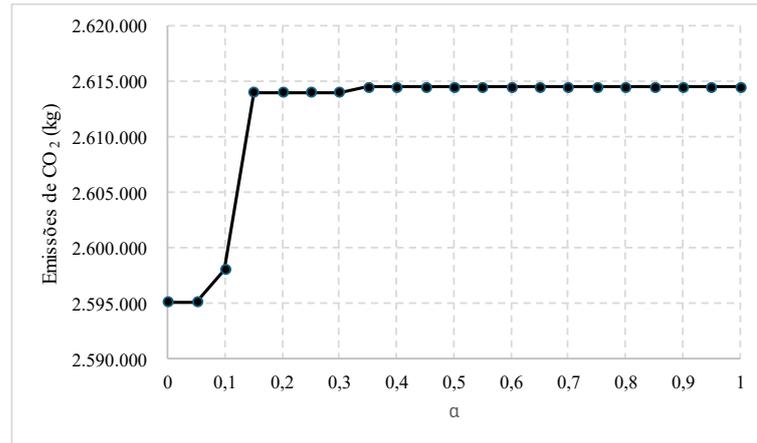


Figura 6: Emissões de CO<sub>2</sub> (Cenário I)

## 4.2 CENÁRIO II

A Tabela 2 mostra os resultados relativos à bateria de testes para o método das somas ponderadas, evidenciando que não houve aumento na escala dos tempos de processamento com o aumento do porte da rede representada.

Tabela 2: Resultados do cenário II

Alfa	Custos Logísticos (R\$)	CO <sub>2</sub> (kg)	Função Objetivo	Tempo (s)
-	7.848.620.000	4.232.430.000	4.232.430.000	0,004
0,05	6.005.650.000	4.287.010.000	4.372.939.425	0,007
0,10	4.604.220.000	4.380.360.000	4.402.748.100	0,009
0,15	4.603.080.000	4.380.540.000	4.413.924.400	0,009
0,20	4.603.080.000	4.380.540.000	4.425.051.200	0,001
0,25	4.418.690.000	4.432.280.000	4.428.885.500	0,009
0,30	4.418.690.000	4.432.280.000	4.428.205.800	0,007
0,35	4.418.690.000	4.432.280.000	4.427.526.100	0,009
0,40	4.418.690.000	4.432.280.000	4.426.846.400	0,011
0,45	4.418.690.000	4.432.280.000	4.426.166.700	0,008
0,50	4.418.690.000	4.432.280.000	4.425.487.000	0,08
0,55	4.418.690.000	4.432.280.000	4.424.807.300	0,08
0,60	4.418.690.000	4.432.280.000	4.424.127.600	0,015
0,65	4.418.690.000	4.432.280.000	4.423.447.900	0,016
0,70	4.418.690.000	4.432.280.000	4.422.768.200	0,011
0,75	4.418.690.000	4.432.280.000	4.422.088.500	0,005
0,80	4.418.690.000	4.432.280.000	4.421.408.800	0,007
0,85	4.418.690.000	4.432.280.000	4.420.729.100	0,007
0,90	4.418.690.000	4.432.280.000	4.420.049.400	0,06
0,95	4.418.690.000	4.432.280.000	4.419.369.700	0,013
1,00	4.418.690.000	4.432.280.000	4.418.690.000	0,01

A Figura 7 mostra a importância relativa dos terminais ferroviários em projeto e a inclusão do corredor bioceânico como alternativa de exportação da celulose do Mato Grosso do Sul. Devido ao aumento de demanda, não é possível fazer a exportação do volume total de celulose produzido sem a abertura de nenhum terminal ou rota, por isso o gráfico só apresenta soluções viáveis a partir de  $p = 1$ .

Pelo fato de as rodovias não serem capacitadas, a primeira opção a ser aberta é a ponte de Porto Murtinho, possibilitando o escoamento da celulose pelo Chile. O terminal de Aparecida do Taboado apresenta maior importância que o de Inocência nos testes realizados. O *trade-off* entre os custos e as emissões também resultaram em quatro soluções de Pareto ótimo para esse cenário e a Figura 8 mostra estes resultados.

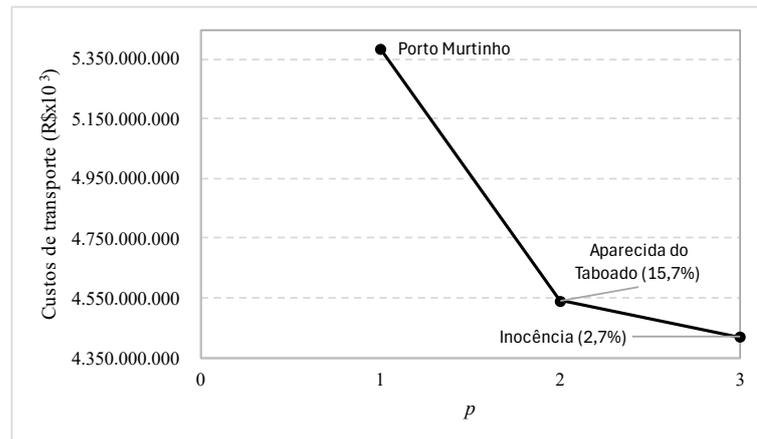


Figura 7: Variação de p (Cenário II)

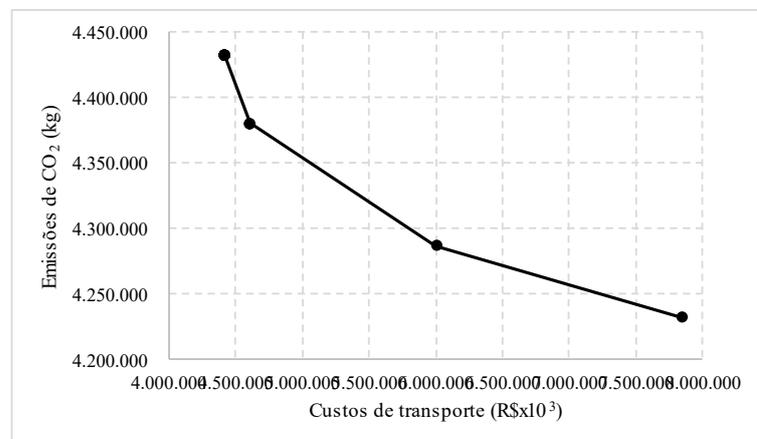


Figura 8: Trade-off biobjetivo (Cenário II)

As Figuras 9 e 10 mostram os fluxos encontrados para os dois novos pontos Nadir. É interessante observar que a abertura dos terminais de Aparecida do Taboado e Inocência reduzem tão significativamente a importância relativa dos terminais de Anápolis e Jundiáí, que nenhum dos dois terminais recebe fluxo de celulose, independente do objetivo considerado.

Quando apenas os custos logísticos são minimizados, o porto de Antofagasta é selecionado, ao passo que, quando apenas as emissões de CO<sub>2</sub> são minimizadas, o porto de Iquique é escolhido.

Ademais, é importante mencionar que, como o corredor bioceânico ainda não está em operação e as projeções de custos encontradas são favoráveis, toda a celulose é escoada para o Chile quando se considera apenas a função objetivo da equação (2).



Figura 9: Custos logísticos (Cenário II)



Figura 10: Emissões de CO<sub>2</sub> (Cenário II)

As Figuras 11 e 12 mostram os custos e emissões de CO<sub>2</sub> à medida em que o valor de  $\alpha$  é variado. No ponto em que  $\alpha = 0,05$ , os terminais intermodais abertos são os de Três Lagoas e Inocência, além da ponte em Porto Murtinho. Esses são os terminais mais próximos às fábricas, que estes estão relacionados à redução de custos por possibilitarem reduções drásticas nos trechos rodoviários percorridos até um terminal e relacionados ao menor aumento das emissões de CO<sub>2</sub>, pela disponibilidade de modais menos poluentes.

Desta forma, é importante ressaltar que esses testes não demonstram que o corredor bioceânico será competitivo ao ponto de absorver grande parte ou a totalidade da demanda dos portos de Santos e Paranaguá.

No ponto em que  $\alpha$  é igual a 0,10, o terminal de Aparecida do Taboado já atinge a sua capacidade máxima de escoamento.

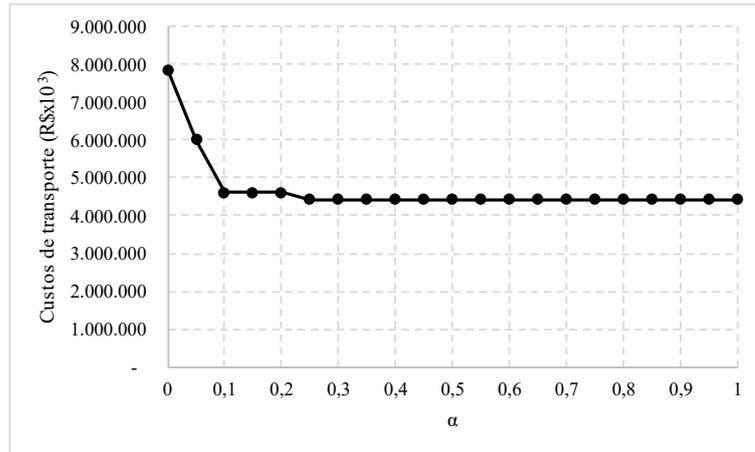


Figura 11: Custos logísticos (Cenário II)

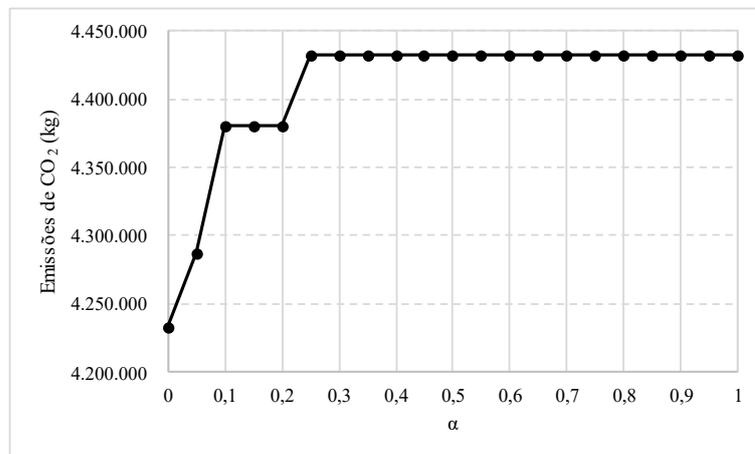


Figura 12: Emissões de CO2 (Cenário II)

### 4.3 COMPARATIVO DE RESULTADOS

A Tabela 3 apresenta um comparativo entre os dois cenários analisados neste estudo: o Cenário I, que representa a configuração da rede logística atual, e o Cenário II, que contempla a expansão industrial e da malha logística, com novos terminais e a integração ao corredor bioceânico.

Em relação aos portos utilizados, no Cenário I são utilizados os portos de Santos e Paranaguá, enquanto no Cenário II, além desses 2 portos do Brasil, são utilizados também os 2 portos chilenos: Antofagasta e Iquique.

No Cenário I utiliza-se mais os terminais de Três Lagoas, Campo Grande e Jundiaí, já no Cenário II os terminais mais usados são os de Inocência, Aparecida do Taboado e Três Lagoas. Isso porque os terminais de Aparecida do Taboado e

Inocência se destacam por combinar acesso ferroviário e viabilidade operacional, são terminais bem próximos às fábricas que permitem o escoamento dos materiais por modal ferroviário, reduzindo custos e emissões de CO<sub>2</sub>.

Tabela 3: Comparativo de resultados entre os Cenários I e II

<b>Critério</b>	<b>Cenário I (Rede Atual)</b>	<b>Cenário II (Rede Futura + Rota Bioceânica)</b>
<b>Portos utilizados</b>	Santos, Paranaguá	Santos, Paranaguá, Antofagasta, Iquique
<b>Terminais mais usados</b>	Três Lagoas, Campo Grande, Jundiá	Inocência, Aparecida do Taboado, Três Lagoas
<b>Terminal desconsiderado</b>	Anápolis (alto custo, longa distância)	Jundiá e Anápolis (ambos excluídos do modelo ótimo)
<b>Custo logístico médio</b>	Menor custo quando prioriza Jundiá e Paranaguá	Custo competitivo, com destaque para Antofagasta
<b>Emissão média de CO<sub>2</sub></b>	Alta emissão devido ao predomínio do modal rodoviário	Redução significativa ao usar modais ferroviário e marítimo chileno
<b>Trade-off observado</b>	Custos menores com alta emissão / menores emissões com maior custo	Melhor equilíbrio entre custo e emissão
<b>Limitação principal</b>	Capacidade de terminais saturada e distância longa	Dados ainda incertos sobre a rota bioceânica (em implantação)
<b>Conclusão geral</b>	Rede atual pouco sustentável e com gargalos logísticos	Rede futura mais equilibrada, com maior potencial de expansão

Quando se busca somente reduzir os custos, o terminal de Anápolis não é utilizado no Cenário I, pelo fato de apresentar um alto custo e longa distância das fábricas e portos. No cenário II, Jundiá e Anápolis não são utilizados, visto que os terminais de Inocência e Aparecida do Taboado são mais benéficos para a operação em termos de custos e emissões.

Quando se deseja reduzir custos, no Cenário II o porto chileno utilizado é o de Antofagasta, já quando o objetivo é reduzir emissões de CO<sub>2</sub> utiliza-se o porto de Iquique.

Em relação aos *trade-offs* observados nos dois cenários, tem-se as seguintes observações: no Cenário I, há custos menores com maior emissão e menores emissões com maior custo, ou seja, não consegue reduzir custo sem aumentar emissão e vice-versa. No cenário II temos um melhor equilíbrio entre custo e emissão, isso mostra que a rede logística futura está mais bem configurada, com os terminais ferroviários próximos às fábricas proporcionando benefícios logísticos.

Quando se fala das limitações encontradas nos dois cenários, nota-se que no Cenário I a capacidade dos terminais está saturada e as rotas são muito longas, no Cenário II observa-se que o corredor bioceânico pode ser uma alternativa

interessante, mas que ainda demanda maiores estudos para entender a capacidade e viabilidade desse fluxo.

Por fim, conclui-se que a rede atual é pouco sustentável e possui gargalos logísticos, apresentando problemas que podem causar o não atendimento aos clientes, enquanto a rede futura apresenta maior equilíbrio e potencial de expansão, para assim manter o Brasil na liderança das exportações de celulose.

## 5 CONSIDERAÇÕES FINAIS

O Brasil é um país de tradição agroexportadora, sendo a celulose o quinto produto no *ranking* de exportações do setor e atualmente o maior *player* no mercado internacional. O estado do Mato Grosso do Sul é o maior produtor nacional, exportando sua produção principalmente pelos portos de Santos e Paranaguá, utilizando transporte rodoviário ou rodo-ferroviário para chegar até esses portos, visto que a celulose é um material de grande peso e volume e que poucos terminais ferroviários estão disponíveis próximos às fábricas.

Nesse contexto, apresentou-se uma adaptação do modelo de Amaral et al. (2012) para capturar características da rede logística da celulose e para permitir uma análise biobjetivo, considerando custos logísticos e emissões de CO<sub>2</sub>. Dois cenários foram analisados, demonstrando a coerência e aplicabilidade do modelo e mostrando que: há ganhos reais em termos de emissões de CO<sub>2</sub> quando se utiliza o modal ferroviário e que construir terminais ferroviários mais próximos às fábricas é extremamente vantajoso para o setor.

Também foi analisada a possibilidade de escoamento da celulose brasileira pelos portos do Chile, demonstrando que essa alternativa pode ser viável. Porém, em função desta rota ainda não estar em funcionamento e a baixa disponibilidade de dados, as análises realizadas foram muito simplificadas.

A partir dos objetivos definidos neste trabalho, conclui-se que a modelagem matemática desenvolvida cumpriu seu papel ao simular e comparar redes logísticas distintas, permitindo identificar os impactos da ampliação da infraestrutura sobre os fluxos de transporte. O modelo se mostrou eficaz na identificação de rotas mais eficientes em termos de custo e de impacto ambiental, fornecendo, assim, subsídios técnicos relevantes para o planejamento estratégico de empresas exportadoras de celulose e para políticas públicas voltadas à logística e infraestrutura.

Como sugestões para pesquisas futuras, seria interessante ampliar a abrangência da rede logística, considerando mais estados produtores de celulose, de forma a se obter um maior grau de adequação à realidade do setor. Também seria interessante considerar outros objetivos, tais como incentivos fiscais estaduais à exportação, como a diferenciação de alíquotas de ICMS (imposto por circulação de mercadorias e serviços) ou também as taxas de embarque nos terminais e portos, considerando diferenças de tarifas referentes às empresas com e sem participação

nas parcerias público-privadas em vigor nos terminais de logística multimodal da rede considerada. Outra proposta interessante seria estudar alternativamente o impacto dos custos de CO<sub>2</sub> no mercado de carbono, tornando o modelo mono-objetivo.

## 6 REFERÊNCIAS

Agência de Notícias do MS. *Conselho da Arauco aprova investimentos de R\$ 25,1 bilhões para a fábrica de celulose em Inocência*. Disponível em: <https://www.agenciadenoticias.ms.gov.br>. Acesso em: 12 abr. 2025.

Agência Nacional de Transportes Terrestres – ANTT; Empresa de Planejamento e Logística – EPL. *Relatório de emissões no transporte ferroviário*. Disponível em: <https://www.epl.gov.br>. Acesso em: 4 nov. 2024.

Amaral, A.; Almeida, M. S.; Morabito, R. Um modelo de fluxos e localização de terminais intermodais para escoamento da soja brasileira destinada à exportação. *Gestão & Produção*, v. 19, n. 2, p. 717–732, 2012.

Associação Florestal de Celulose e Papel – AFCP. *Estudo ambiental viabiliza ferrovia entre Inocência e Aparecida do Taboado*. Disponível em: <https://www.afcp.org.br>. Acesso em: 12 abr. 2025.

Banco Nacional de Desenvolvimento Econômico e Social – BNDES. *Relatório de infraestrutura logística*. Disponível em: <https://www.bndes.gov.br>. Acesso em: 11 abr. 2025.

Bredström, D.; Lundgren, J. T.; Rönnqvist, M.; Carlson, D.; Mason, A. Supply chain optimization in the pulp mill industry — IP models, column generation and novel constraint branches. *European Journal of Operational Research*, v. 156, p. 2–22, 2004.

Bredström, D.; Rönnqvist, M. Integrated production planning and route scheduling in pulp mill industry. In: *Hawaii International Conference on System Sciences – HICSS*, 35., 2002. Anais [...]. [S. l.]: IEEE, 2002. p. 1–9.

Bredström, D.; Rönnqvist, M. *Supply chain optimization in pulp distribution using a rolling horizon solution approach*. In: *Norwegian School of Economics. Discussion Papers 2006/17*. Department of Business and Management Science, 2006. p. 2–18.

Campo Grande News. *Com futuro otimista e maior fábrica do mundo, MS se firma como Vale da Celulose*. Disponível em: <https://www.campograndenews.com.br/economia/com-futuro-otimista-e-maior-fabrica-do-mundo-ms-se-firma-como-vale-da-celulose>. Acesso em: 9 abr. 2025.

Campos, A. *Nova fábrica de celulose vai investir US\$ 4 bilhões em Água Clara*. Disponível em: <https://www.campograndenews.com.br>. Acesso em: 12 abr. 2025.

Carlsson, D.; D'Amours, S.; Martel, A.; Rönnqvist, M. Supply chain planning models in the pulp and paper industry. *INFOR*, v. 47, n. 3, p. 167–183, 2009.

Coelho, M. R. F.; Coelho, M. H. Panorama da indústria de celulose e papel no Brasil: 2001 a 2011. *Floresta*, v. 43, n. 3, p. 463–474, 2013.

Companhia Ambiental do Estado de São Paulo – CETESB. *1º Inventário de Emissões de Gases de Efeito Estufa do Estado de São Paulo: Setor de Transportes*. Disponível em: <https://cetesb.sp.gov.br>. Acesso em: 15 abr. 2025.

Congestion Control Working Group – CCWG. Disponível em: <https://datatracker.ietf.org/group/ccwg>. Acesso em: 5 nov. 2024.

Correio do Estado. *ANTT autoriza Suzano a construir 255 km de ferrovias no MS*. Disponível em: <https://www.correiestado.com.br>. Acesso em: 12 abr. 2025.

Eldorado Brasil Celulose. *Eldorado Brasil inaugura Terminal Portuário no Porto de Santos. 2023*. Disponível em: <https://www.eldoradobrasil.com.br/pb/eldorado-brasil-celuloseinaugura-terminal-portuario-no-porto-de-santos-em-sao-paulo/>. Acesso em: 25 abr. 2025.

Governo do Brasil. *Do Porto de Santos para o mundo: como é a exportação de celulose*. Ministério de Portos e Aeroportos, 2023. Disponível em: <https://www.gov.br/portos-e-aeroportos/ptbr/assuntos/noticias/2023/03/do-porto-de-santos-para-o-mundocomo-e-a-exportacao-de-celulose>. Acesso em: 11 abr. 2025.

Governo Federal. *Do Porto de Santos para o mundo: como é a exportação de celulose*. Disponível em: <https://www.gov.br/portos-e-aeroportos/ptbr/assuntos/noticias/2025/03/do-porto-de-santos-para-o-mundo-como-e-a-exportacao-de-celulose>. Acesso em: 5 maio 2025.

Indústria Brasileira de Árvores – IBÁ. *Exportação de celulose brasileira para a China cresce mais e bate recorde em 2023*. Disponível em: <https://iba.org/exportacao-de-celulose-brasileira-para-a-china-cresce-mais-e-bate-recorde-em2023>. Acesso em: 11 maio 2025.

Kim, I. Y.; Weck, O. L. Adaptive weighted-sum method for bi-objective optimization: Pareto front generation. *Structural and Multidisciplinary Optimization*, v. 29, p. 149–158, 2005.

Klabin. *Como o Brasil se tornou um dos líderes em papel e celulose*. Disponível em: <https://blog.klabin.com.br/-/brasil-lider-em-celulose-no-mundo>. Acesso em: 16 abr. 2025.

Malik, M. M.; Qiu, M. A review of planning and scheduling in the pulp and paper supply chain. In: IEEE International Conference on Industrial Engineering and Engineering Management – IEEM, 2008. *Proceedings.... [S. l.]: IEEE, 2008. p. 1855–1859.*

Miguel, P. A. C.; Fleury, A.; Mello, C. H. P.; Nakano, D. N.; Turrioni, J. B.; Ho, L. L.; Morabito, R.; Martins, R. A.; Pureza, V. *Metodologia de pesquisa em engenharia de produção e gestão de operações*. Rio de Janeiro: Elsevier, 2010.

Ministério de Portos e Aeroportos. *Do Porto de Santos para o mundo: como é a exportação de celulose*. Disponível em: <https://www.gov.br/portos-eaeroportos>. Acesso em: 12 abr. 2025.

MRS Logística. *Malha ferroviária e frota*. Disponível em: <https://www.mrs.com.br/empresa/ferrovia-frota/>. Acesso em: 9 abr. 2025.

Portal Celulose. *Retrospectiva 2024: expansão e investimentos consolidam o Brasil como líder no mercado global de celulose*. Disponível em: <https://portalcelulose.com.br/retrospectiva-2024-expansao-e-investimentos-consolidam-o-brasilcomo-lider-no-mercado-global-de-celulose/>. Acesso em: 11 abr. 2025.

Portos do Paraná. *Dados gerais operacionais – Celulose*. Paranaguá, 2024. Disponível em: <https://www.portosdoparana.pr.gov.br>. Acesso em: 12 abr. 2025.

Rumo Logística. *Nossas malhas*. Disponível em: <https://rumolog.com/nossas-malhas/>. Acesso em: 9 abr. 2025.

Salles, T. T.; Silva, M. L.; Soares, N. S.; Moraes, A. C. Exportação brasileira de celulose: sua dinâmica pela equação gravitacional. *Revista Árvore*, v. 35, n. 3, p. 573–580, 2011.

Sanquetta, C. R.; Piva, L. R. O.; Sanqueta, M. N. I.; Maos, G. C. B.; Corte, A. P. D. Mercado da celulose no Brasil e em cinco grandes países. *BIOFIX Scientific Journal*, v. 5, n. 2, p. 189–194, 2020.

Secretaria de Estado de Infraestrutura e Logística – SEINFRA/MS. *Rota Bioceânica: ponte entre Porto Murtinho e Carmelo Peralta fortalece corredor internacional*. Disponível em: <https://www.seilog.ms.gov.br>. Acesso em: 15 abr. 2025.

Soares, N. S.; Oliveira, R. J.; Carvalho, K. H. A.; Silva, M. L.; Jacovine, L. A. G.; Valverde, S. R. A cadeia produtiva da celulose e do papel no Brasil. *Floresta*, Curitiba, PR, v. 40, n. 1, p. 1–22, jan./mar. 2010.

Soares, N. S.; Silva, M. L.; Lima, J. E. Oferta de exportação da celulose brasileira. *Revista de Política Agrícola*, ano XX, n. 2, p. 52–65, 2011.

Soares, N. S.; Silva, M. L.; Valverde, S. R.; Lima, J. E.; Souza, U. O. Análise do mercado brasileiro de celulose, 1969–2005. *Revista Árvore*, v. 33, n. 3, p. 563–573, 2009.

Valor Econômico. *Frete marítimo tem alta com demanda asiática e dólar valorizado*. São Paulo, 2024. Disponível em: <https://valor.globo.com>. Acesso em: 11 abr. 2025.

Valverde, S. R.; Soares, N. S.; Silva, M. L. Desempenho das exportações brasileiras de celulose. *Revista Árvore*, v. 30, n. 6, p. 1017–1023, 2006.

Waldemarsson, M.; Lidestam, H.; Karlsson, M. How energy price changes can affect production- and supply chain planning – A case study at a pulp company. *Applied Energy*, v. 203, p. 333–347, 2017.

Waldemarsson, M.; Lidestam, H.; Rudberg, M. Including energy in supply chain planning at a pulp company. *Applied Energy*, v. 112, p. 1056–1065, 2013.