57º SBPO
SIMPÓSIO BRASILEIRO DE PESQUISA OPERACIONAL
Gramado • RS
DE 5 A 9 DE OUTUBRO DE 2025

OTIMIZAÇÃO DA ALOCAÇÃO DE VEÍCULOS E MÓDULOS DE CARREGAMENTO PARA O ABASTECIMENTO DE INDÚSTRIAS DE CELULOSE

Kamila de Macena Rodrigues
Faculdade de Engenharia de Bauru – FEB UNESP
Av. Eng. Luís Edmundo Carrijo Coube, 14-01 - Vargem Limpa, Bauru - SP, 17033-360
kamila.macena@unesp.br

Sônia Cristina Poltroniere
Faculdade de Ciências – FC UNESP - BAURU
Av. Eng. Luís Edmundo Carrijo Coube, 14-01 - Vargem Limpa, Bauru - SP, 17033-360
poltroniere.silva@unesp.br

RESUMO

Nos últimos anos, a demanda crescente por produtos derivados de celulose tem impulsionado empresas do setor a buscar soluções para otimizar recursos e reduzir custos, especialmente os logísticos, que representam uma parcela relevante dos custos totais. Um dos principais desafios enfrentados é o transporte florestal, cuja complexidade exige uma alocação eficiente dos recursos disponíveis. Este estudo propõe um modelo matemático de programação linear inteira mista para otimizar as operações envolvidas no abastecimento de madeira em indústrias de celulose. O objetivo é minimizar os custos logísticos, respeitando restrições como capacidade de transporte e expedição, tipos de madeira exigidos e estoques de pátio. A abordagem permite avaliar a eficiência da logística florestal por meio da otimização do uso de módulos de carregamento, caminhões, viagens por período e níveis de estoque. Espera-se, com isso, uma redução dos custos operacionais e melhor aproveitamento dos ativos logísticos da empresa, contribuindo para maior competitividade no setor.

PALAVRAS CHAVE. Otimização, Transporte florestal, Madeira.

L&T – Logística e Transportes

ABSTRACT

In recent years, the growing demand for cellulose-based products has driven companies in the sector to seek solutions to optimize resources and reduce costs, especially logistics costs, which represent a significant portion of total expenses. One of the main challenges faced is forest transportation, whose complexity requires efficient allocation of available resources. This study proposes a mixed-integer linear programming model to optimize operations involved in the wood supply chain for pulp and paper industries. The objective is to minimize logistics costs while meeting constraints such as transportation and shipping capacities, required wood types, and yard inventory levels. The approach allows for evaluating the efficiency of forest logistics by optimizing the use of loading modules, trucks, trips per period, and stock levels. The expected outcome is a reduction in operational costs and better utilization of the company's logistics assets, contributing to greater competitiveness in the sector.

KEYWORDS. Optimization. Forest transportation. Logs.

L&T – Logística e Transportes

1. Introdução

A crescente demanda mundial por produtos das indústrias de papel e celulose tem pressionado as empresas do setor a expandirem sua capacidade produtiva e a buscarem formas mais eficientes de operar suas cadeias logísticas. No Brasil, essa realidade é ainda mais marcante, considerando que o país se posiciona como um dos maiores exportadores globais de celulose, especialmente da celulose *kraft* branqueada proveniente do eucalipto — matéria-prima de alta qualidade utilizada em produtos *tissue,* papéis especiais e embalagens [Ortega et al. 2024].

O transporte florestal se consolida como um dos elos mais críticos da cadeia de suprimentos. Estima-se que mais de dois milhões de viagens de caminhão sejam realizadas anualmente apenas para atender à demanda interna das fábricas brasileiras, um número significativamente superior ao de outros grandes exportadores como o Canadá [IBGE 2024, Moraes et al. 2014]. Tais operações representam, em muitos casos, mais de 45% dos custos operacionais totais [Audy et al. 2012], o que evidencia a importância de estratégias que promovam sua eficiência.

Além do alto custo, o transporte florestal é um processo logístico complexo, pois envolve a sincronização de atividades e recursos escassos — caminhões, módulos de carregamento, operadores, vias de acesso e volumes de madeira de diferentes densidades (A, B e C), que afetam diretamente o rendimento industrial [Gomide et al. 2010]. Como destaca Mundim [Mundim 2009], fatores como rotas internas, tempo de carregamento e manutenção de veículos influenciam significativamente o desempenho da operação e podem gerar tempos não produtivos, como filas e ociosidade.

O planejamento dessas operações, frequentemente realizado com base na experiência prática dos gestores, tende a desconsiderar o potencial de otimização matemática, resultando em decisões que nem sempre aproveitam os recursos disponíveis da forma mais eficiente [Silva 2015]. Epstein et al. [Epstein et al. 2007] sugerem que a operação de transporte florestal deve ser tratada como um ciclo logístico fechado, com decisões integradas desde a alocação de módulos até a definição das rotas dos caminhões.

Neste trabalho, propõe-se um modelo matemático baseado em programação linear inteira mista (PLIM), capaz de representar, de forma integrada, o processo de alocação dos módulos de carregamento, planejamento de transporte e gestão dos estoques de madeira no pátio da fábrica. A proposta parte de uma realidade prática observada em uma indústria localizada no interior do estado de São Paulo, onde os recursos operacionais são limitados e a fábrica exige abastecimento contínuo com um mix qualitativo e quantitativo de madeira adequado à produção de celulose.

O modelo considera diversas restrições operacionais reais como capacidade de transporte por caminhão, tempo de operação, disponibilidade de módulos de carregamento, capacidade de expedição por fazenda, limitações de estoque e composição da demanda da fábrica. A abordagem proposta visa minimizar os custos envolvidos e aumentar o aproveitamento dos ativos logísticos, respeitando as exigências de produção.

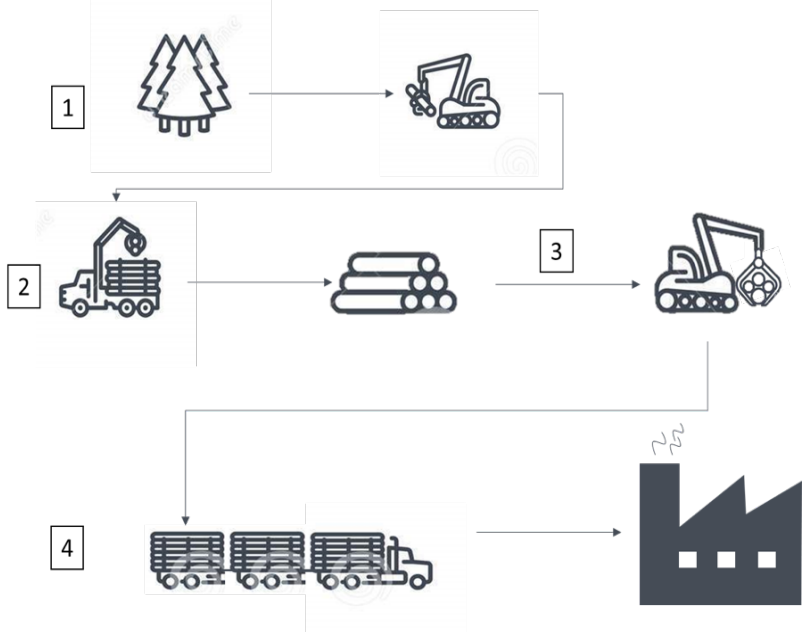
Com base em estudos recentes [Ferreira et al. 2019, Han et al. 2018, Bordón et al. 2021], entende-se que modelos de otimização aplicados ao transporte florestal têm se mostrado eficazes na geração de soluções viáveis e com ganhos operacionais relevantes. Dessa forma, a formulação proposta contribui para o avanço metodológico no planejamento da logística florestal e oferece suporte prático à tomada de decisão nas empresas do setor.

2. Descrição do problema

O transporte de madeira destinado à indústria de celulose apresenta elevado grau de complexidade, tanto pela diversidade das fontes de fornecimento (fazendas) quanto pela variedade dos recursos disponíveis e pelas restrições operacionais envolvidas [Silva et al. 2015]. A operação é composta por diversas etapas interdependentes, incluindo o corte da floresta, baldeio, carregamento, transporte até a fábrica e o armazenamento da madeira no pátio industrial [Dos Santos et al. 2019].

O abastecimento de madeira é composto por quatro operações principais: corte, empilhamento (baldeio), carregamento e transporte. A Figura 1 representa cada uma dessas operações florestais até que seja possível entregar a madeira do campo na fábrica.

Figura 1 - Fases da operação florestal - suprimento de madeira



Fonte: Elaborado pela autora, 2025.

Dentre essas etapas, o transporte representa o maior custo logístico, e a eficiência dessa atividade depende da alocação adequada dos módulos de carregamento, da programação dos caminhões e do controle do nível de estoque, elementos que devem ser tratados de forma integrada [Alves et al. 2013]. O problema modelado neste estudo considera um horizonte de planejamento dividido em períodos discretos, onde é necessário definir quais fazendas serão ativadas, quantos módulos serão alocados, quais caminhões farão as viagens e como o estoque será mantido, respeitando as demandas da fábrica e minimizando os custos envolvidos.

O abastecimento da fábrica é feito com três tipos de madeira (denominados A, B e C), com diferentes densidades e rendimentos industriais, exigindo o atendimento de um mix de consumo específico por período [Gomide et al. 2010]. Cada módulo alocado em uma fazenda realiza a expedição até que todo o volume seja carregado, evitando custos de deslocamento entre áreas, conforme recomendado por modelos logísticos aplicados à silvicultura [Epstein et al. 2007]. Os caminhões disponíveis têm capacidades limitadas e tempos máximos de operação por período, que variam de acordo com a distância entre as fazendas e a fábrica [Han et al. 2018].

Adicionalmente, o modelo considera penalizações associadas a estoques elevados no pátio da fábrica, que impactam tanto os custos quanto a operação industrial. Essa abordagem está alinhada às boas práticas de gestão de estoque em sistemas de produção, comuns em indústrias de transformação [Silva 2015, Moraes et al. 2014].

3. Modelagem matemática

Para representar o problema descrito, foi desenvolvido um modelo de programação linear inteira mista (PLIM) que integra as decisões de alocação de módulos, transporte de madeira e controle de estoques. Essa abordagem tem sido amplamente utilizada em estudos sobre logística florestal por sua capacidade de tratar variáveis binárias (ativação de fazendas e módulos) e contínuas (volume transportado, estoque).

O principal objetivo neste momento é que a entrega de madeira na fábrica seja feita de maneira eficiente, uma combinação de volume ideal com mix qualitativo ideal. Para isso, pretende-se que os custos de transporte e estoque da madeira sejam minimizados, preservando a qualidade de entrega e atendimento das demandas periódicas da fábrica.

Os parâmetros utilizados e as variáveis de decisão estão definidos a seguir.

Parâmetros:

- T: número de períodos do horizonte de planejamento;
- F: número de fazendas com volume de madeira disponível para carregamento;
- M: número de tipos de madeira;
- N: número de caminhões disponíveis para o transporte de madeira;
- P: número de módulos disponíveis para o carregamento da madeira nos caminhões;
- Cap_j: capacidade (em m^3) do caminhão j;
- Exp_{it}: capacidade de expedição (carregamento) de madeira na fazenda i no período t;
- $Oper_{ij}$: tempo de operação do caminhão j na fazenda i (em horas), dado em função dos tempos de viagem de ida e de volta (por asfalto e/ou terra) até a fazenda i, tempo de carregamento da madeira, de descarregamento na fábrica e de limpeza do caminhão.
- $Disp_{jt}$: tempo de operação disponível (em horas) do caminhão j no período t;
- V_{ik}: volume total de madeira (em m^3) do tipo k disponível na fazenda i no início do horizonte de planejamento;
- D_t : demanda total (consumo) de madeira da fábrica no período t;
- α_k: porcentagem de madeira do tipo k demandada pela fábrica em cada período visando o mix ideal para a produção de celulose;
- β_{min}: volume mínimo de madeira (em m^3) que deve abastecer a fábrica em cada período;
- β_{max}: volume máximo de madeira (em m^3) que deve abastecer a fábrica em cada período (soma da capacidade máxima de processamento e o que é possível estocar no período)
- γ_{min}: volume mínimo de madeira (em m^3) em estoque na fábrica em cada período;
- γ_{max}: volume máximo de madeira (em m^3) em estoque na fábrica em cada período;
- cv_{ij}: custo de viagem do caminhão j para a fazenda i (associado a viagem de ida e volta, saindo da fábrica);
- ca_i : custo de alocação de um módulo na fazenda i;
- ce_t : custo de estoque (por m^3) de madeira no pátio da fábrica no período t, acima do mínimo exigido.

Variáveis de decisão:

- x_{ijkt}: número de viagens do caminhão j transportando madeira do tipo k da fazenda i para a fábrica no período t;
- y_{it} : variável binária que indica a alocação dos módulos de carregamentos nas fazendas. Seu valor será 1 se um módulo de carregamento for alocado na fazenda i no período t e zero, caso contrário;
- I_{kt}: estoque de madeira do tipo k no pátio da fábrica no período t, em m^3.

Modelo matemático:

$$\text{Min} \quad \sum_{i=1}^{F}\sum_{j=1}^{N}\sum_{k=1}^{M}\sum_{t=1}^{T} cv_{ij}x_{ijkt} + \sum_{t=1}^{T} ce_t\left(\sum_{k=1}^{M} I_{kt} - \gamma_{min}\right) + \sum_{i=1}^{F}\sum_{t=1}^{T} ca_i y_{it} \qquad (1)$$

sujeito a:

$$\sum_{i=1}^{F}\sum_{k=1}^{M} Oper_{ij}x_{ijkt} \leq Disp_{jt}, \quad j = 1,..,N, \quad t = 1,..,T \tag{2}$$

$$\sum_{k=1}^{M}\sum_{j=1}^{N} Cap_j x_{ijkt} \leq Exp_{it}, \quad i = 1,..,F, \quad t = 1,..,T \tag{3}$$

$$\sum_{i=1}^{F} y_{it} \leq P, \quad t = 1,..,T \tag{4}$$

$$\sum_{k=1}^{M}\sum_{j=1}^{N} x_{ijkt} \leq \sum_{j=1}^{N} \frac{Disp_{jt}}{Oper_{ij}} y_{it}, \quad i = 1,..,F, \quad t = 1,..,T \tag{5}$$

$$\sum_{j=1}^{N}\sum_{t=1}^{T} Cap_j x_{ijkt} \leq V_{ik}, \quad i = 1,..,F, \quad k = 1,\dots,M \tag{6}$$

$$\sum_{i=1}^{F}\sum_{j=1}^{N} Cap_j x_{ijkt} + I_{k,t-1} = \alpha_k D_t + I_{kt}, \quad k = 1,\dots,M, \quad t = 1,..,T \tag{7}$$

$$\beta_{min} \leq \sum_{i=1}^{F}\sum_{j=1}^{N}\sum_{k=1}^{M} Cap_j x_{ijkt} \leq \beta_{max}, \quad t = 1,..,T \tag{8}$$

$$\gamma_{min} \leq \sum_{k=1}^{M} I_{kt} \leq \gamma_{max}, \quad t = 1,..,T \tag{9}$$

$$x_{ijkt} \in \mathbb{Z}_+, \quad i = 1,..,F, j = 1,..,N, k = 1,\dots,M, t = 2,..,T \tag{10}$$

$$y_{it} \in \{0,1\}, \quad i = 1,\dots,M, \quad t = 1,..,T \tag{11}$$

$$I_{kt} \in \mathbb{R}_+, \quad k = 1,\dots,M, \quad t = 1,..,T \tag{12}$$

A função objetivo (1) visa minimizar a soma dos custos de deslocamento dos caminhões até as fazendas (ida e volta), dos custos de estoque de madeira na fábrica além do mínimo desejado em cada período, e dos custos de alocação dos módulos nas fazendas. O tempo total de operação (em horas) de cada caminhão em cada período deve ser respeitado, conforme descrito na desigualdade (2), cada fazenda possui um volume máximo de expedição de madeira por período, que é dado pela capacidade de carregamento do módulo alocado na fazenda (desigualdade 3). Como o número de fazendas com madeira disponível geralmente é maior que a quantidade de recursos para carregamento (módulos), não é possível transportar madeira de todas as fazendas ao

mesmo tempo. Dessa forma, as restrições (4) limitam o número de fazendas em operação no período.

O transporte de madeira de determinada fazenda em determinado período só pode ocorrer se um módulo de carregamento está alocado na fazenda. Dessa forma, as restrições (5) relacionam as variáveis de transporte com as variáveis de alocação. As restrições (6) consideram o volume máximo de madeira disponível em cada fazenda. Ou seja, a quantidade transportada de cada tipo de madeira em cada fazenda deve respeitar a quantidade disponível no horizonte de planejamento. As restrições (7) garantem o atendimento da demanda (consumo) da fábrica, de cada tipo de madeira em cada período e as restrições (8) e (9) garantem, respectivamente, um volume mínimo e um volume máximo de madeira que deve abastecer a fábrica em cada período e a quantidade disponível de madeira em estoque no pátio da fábrica em cada período que deve respeitar limites mínimo e máximo. As restrições (10)-(12) definem o domínio das variáveis do modelo.

Experimentos computacionais foram realizados com o objetivo inicial de avaliar o comportamento do modelo matemático proposto e a próxima seção apresenta de forma detalhada os dados (parâmetros) dos testes realizados e os resultados obtidos.

O modelo busca considerar questões operacionais e de capacidade do processo de carregamento, transporte e utilização da madeira para a produção de celulose de qualidade. No entanto, a movimentação dos módulos de carregamento entre as fazendas nos períodos do horizonte de planejamento não está sendo contemplada. Para isso, pretende-se aperfeiçoar o modelo baseando-se em uma modelagem da literatura para o problema de alocação de veículos e sequenciamento dos módulos.

4. Experimentos computacionais

A fim de avaliar o desempenho do modelo proposto na Seção 3, foram conduzidos experimentos computacionais considerando diferentes cenários operacionais para o abastecimento de madeira a uma fábrica de celulose. Os testes foram realizados no IBM ILOG CPLEX Optimization Studio (versão 22.1.1), utilizando linguagem OPL (Optimization Programming Language), executado em um computador MacBook Air com chip Apple M2 e 8 GB de memória RAM. A entrada de dados foi realizada por meio de arquivos .dat gerados a partir de planilhas em Microsoft Excel e os resultados foram exportados para arquivos .csv para posterior análise.

O modelo proposto foi avaliado quanto à sua capacidade de minimizar os custos totais relacionados à alocação de módulos de carregamento, ao transporte de madeira e ao estoque em pátio, respeitando simultaneamente as restrições de demanda da fábrica e a disponibilidade operacional dos recursos. Para isso, foram construídas instâncias com características operacionais variadas.

4.1 Classe de dados

Os testes foram agrupados em três classes de 10 exemplos cada, totalizando 30 testes. Para a Classe 1 foram utilizados parâmetros considerados representativos de um cenário realista da operação. Os volumes de madeira por fazenda, os custos de transporte, os tempos de operação dos caminhões e os limites de estoque foram definidos dentro de faixas médias, com pequenas variações entre os testes, de modo a verificar a estabilidade do modelo em condições operacionais padrão. O número de fazendas, tipos de madeira e períodos de planejamento foram fixados, permitindo avaliar a alocação de módulos de carregamento, a utilização da frota de caminhões e o comportamento do estoque.

Enquanto na Classe 2 foram feitas alterações no volume disponível de madeira por fazenda, reduzindo-se a oferta sem alterar significativamente os demais parâmetros operacionais. O objetivo foi testar a capacidade do modelo em lidar com restrição de oferta, avaliando a reação do sistema quanto ao uso dos estoques de pátio e à manutenção do mix de madeira exigido pela fábrica. Os custos de transporte e os tempos de operação permaneceram constantes em relação à Classe 1.

Por fim, a Classe 3 contou com mudanças mais expressivas nos parâmetros, pois além da redução da disponibilidade de madeira, houve variação nos tempos de operação dos caminhões e

aumento nos custos de transporte, representando cenários com maior complexidade operacional. Essa Classe buscou representar situações de escassez real, em que foi necessário que o planejamento da alocação dos módulos e da frota de caminhões fossem mais precisos para evitar estoques excessivos e custos elevados.

A Tabela 1 traz os parâmetros utilizados em cada uma das classes de testes.

Tabela 1 – Parâmetros utilizados nas classes de testes

Parâmetros	Classe 1	Classe 2	Classe 3
T	7	7	7
F	12	12	12
M	3	3	3
N	300	300	300
P	8	8	8
Cap_j	62 m^3	62 m^3	62 m^3
Exp_{it}	4.000 m^3	4.000 m^3	4.000 m^3
β_{min}	20.000 m^3	20.000 m^3	20.000 m^3
β_{max}	40.000 m^3	40.000 m^3	40.000 m^3
γ_{min}	100.000 m^3	100.000 m^3	100.000 m^3
γ_{max}	400.000 m^3	400.000 m^3	400.000 m^3
$Disp_{jt}$	24 h	24 h	24 h
$\boldsymbol{V_{ik}}$	**3.000 – 12.000 $\boldsymbol{m^3}$**	**3.000 – 7.000 $\boldsymbol{m^3}$**	**3.000 – 6.000 $\boldsymbol{m^3}$**
D_t	30.000 – 35.000 m^3	30.000 – 35.000 m^3	30.000 – 35.000 m^3
α_k	0,3; 0,4; 0,3	0,3; 0,4; 0,3	0,3; 0,4; 0,3
$\boldsymbol{cv_{ij}}$	**2.000 – 4.000 $\boldsymbol{u.m.}$**	**2.000 – 15.000 $\boldsymbol{u.m.}$**	**2.000 – 15.000 $\boldsymbol{u.m.}$**
cs_{it}	30.000 – 50.000 $u.m.$	30.000 – 50.000 $u.m.$	30.000 – 50.000 $u.m.$
h_t	250 $u.m.$	250 $u.m.$	250 $u.m.$

Fonte: Elaborado pela autora, 2025.

Os valores para os parâmetros $Oper_{ij}$ são definidos com base nas distâncias de terra e asfalto, bem como os custos por viagem (ida e volta), que dependem das distâncias, quanto mais distantes as fazendas, maiores os custos por viagem.

Como pode-se observar, além das métricas econômicas, a análise dos testes considerou indicadores operacionais como: número de caminhões utilizados por período, número de viagens por tipo de madeira, variação dos estoques ao longo do horizonte e tempo médio de operação por caminhão. Os dados gerados possibilitaram uma visão ampla do impacto de cada classe de parâmetros na tomada de decisão do modelo, servindo como base para a análise comparativa apresentada na próxima seção.

4.2 Resultados e discussões

A Tabela 2 apresenta os principais indicadores obtidos para cada classe. Os valores são as médias aritméticas dos testes realizados em cada uma das Classes, o tempo médio estipulado para que o CPLEX apresentasse uma solução foi de 15 minutos e, como é possível observar, todos foram positivos, o que indica que não houve solução ótima, mas sim aproximada.

Tabela 2 – Resultados médios por classe de testes

	Classe 1	**Classe 2**	**Classe 3**
Valor da Função Objetivo (em milhões de u.m.)	50,7	56,2	56,8
Estoque de pátio ao final do período (em 1000 m^3)	100,03	100,05	100,02
Número de viagens	2.544	2.569	2.491

	Classe 1	Classe 2	Classe 3
Gap médio	0,33%	0,38%	0,38%
Número de factíveis	10	10	8

Fonte: Elaborado pela autora, 2025.

Os resultados evidenciam a capacidade do modelo em fornecer soluções factíveis e de boa qualidade computacional, com gaps médios inferiores a 0,4% em todos as Classes. A Classe 1, representando cenários com parâmetros operacionais moderados, obteve os menores custos totais e apresentou comportamento mais estável quanto à alocação dos recursos logísticos. Os módulos de carregamento foram alocados de forma contínua até o esgotamento da madeira das fazendas com as características demandadas, minimizando movimentações desnecessárias e, consequentemente, custos.

Nas Classes 2 e 3, observou-se uma elevação no valor da função objetivo, ambos apresentaram cenários com disponibilidade restrita de madeira e custos operacionais mais elevados, o que se refletiu em maior complexidade na alocação de módulos e caminhões, e a Classe 3 foi infactível em duas instâncias, porém ainda assim, o modelo demonstrou robustez ao encontrar soluções otimizadas em 80% dos casos.

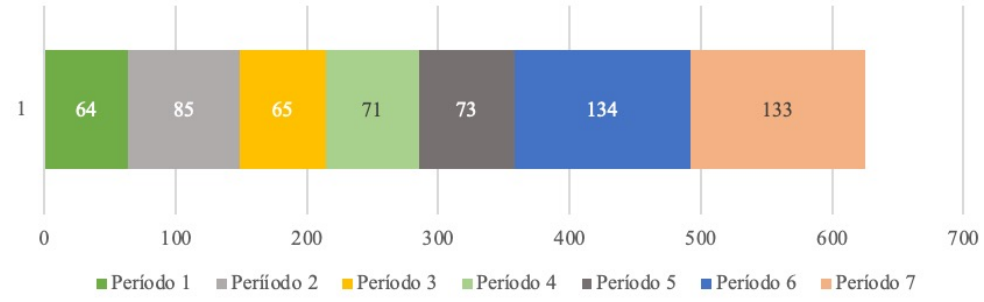
O número total de viagens permaneceu relativamente constante entre as classes indicando que a diferença de custo não decorre da quantidade de transporte realizado, mas da localização das fazendas atendidas e da eficiência da alocação dos recursos. Além disso, o controle do estoque final de madeira em pátio foi satisfatório, com todas as classes mantendo volumes médios próximos a 100 mil m³, dentro dos limites estabelecidos pelo modelo. Isso demonstra a eficácia da formulação em equilibrar o uso dos estoques com o atendimento das demandas periódicas da fábrica.

Em síntese, o modelo apresentou desempenho consistente frente a diferentes graus de complexidade operacional, revelando-se uma ferramenta promissora para apoiar o planejamento do transporte florestal em ambientes industriais que exigem decisões integradas sobre alocação de recursos, roteirização e controle de estoques.

4.3 Resultados e discussões – Teste 1, Classe 1

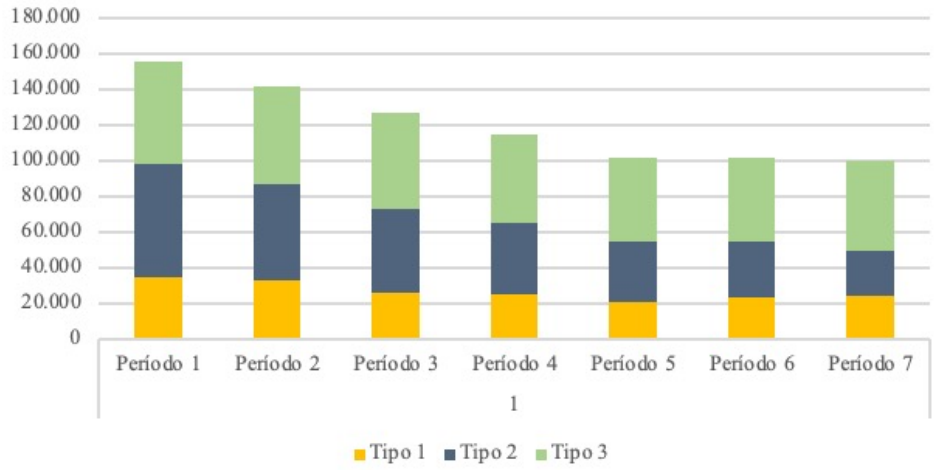
Para ilustrar brevemente os resultados de um dos testes realizados, serão apresentados alguns gráficos de resultados do Teste 1 da Classe 1. As Figuras 2 e 3 apresentam, respectivamente, o número de caminhões utilizados e o volume de estoque de pátio ao final de cada período, de acordo com os resultados do teste.

Figura 2 – Número de caminhões utilizados – Teste 1



Fonte: Elaborado pela autora, 2025.

Figura 3 – Estoque de pátio por tipo de madeira – Teste 1



Fonte: Elaborado pela autora, 2025.

Com os testes da Classe 1 foi possível verificar que nem todas as fazendas foram utilizadas para atender a demanda da fábrica. A preferência foi pelas fazendas com custos menores de viagem. Algumas fazendas que tinham custos por viagem variando entre 9.000 e 15.000 u.m. foram preteridas, enquanto as fazendas que tinham custos variando entre 2.000 e 9.000 u.m. foram aproveitadas. Além disso, nota-se que em alguns períodos, os módulos de carregamento foram retirados das fazendas em que estavam e depois foram realocados nas mesmas. Ou seja, mesmo que o modelo esteja penalizando essa movimentação na função objetivo, foi priorizado o abastecimento qualitativo em detrimento dos custos.

Custos mais elevados de alocação dos módulos podem ser utilizados em testes futuros, visando evitar realocações. É interessante destacar também que o número de módulos alocados ficou abaixo do número de módulos disponíveis em todos os períodos, variando entre 6 e 8, sendo que na maioria dos períodos, para todos os testes executados, apenas 6 módulos foram alocados em fazendas. Em todos os testes realizados, o estoque de pátio no início do horizonte de planejamento foi considerado igual a 170.000 m^3, dividido em 40.000 m^3 para a madeira de tipo 1, 70.000 m^3 para a de tipo 2 e 60.000 m^3 para a de tipo 3. Assim, pelo gráfico da Figura 3, é possível perceber que o estoque de todos os tipos de madeira foi diminuindo ao longo do tempo, colaborando com o comportamento dos resultados do gráfico da Figura 2 para o número de caminhões utilizados (dado pela variável x_{ijkt}). Assim, confirma-se que a otimização do modelo está priorizando a minimização dos custos, utilizando o estoque de pátio ao longo do tempo, realizando menos viagens e garantindo o abastecimento qualitativo de maneira que, ao chegar ao último período, tenha o mínimo de volume em estoque permitido, isso porque todo metro cúbico extra de estoque (acima de 100.000 m^3) é penalizado pela função objetivo.

5. Conclusões e propostas futuras

Este trabalho apresentou uma proposta de modelagem matemática para o planejamento integrado do transporte florestal, voltada à minimização dos custos logísticos no abastecimento de uma fábrica de celulose. O modelo desenvolvido contempla, de forma conjunta, decisões relacionadas à alocação de módulos de carregamento nas fazendas, à programação de viagens dos caminhões e à gestão dos estoques no pátio da indústria, respeitando as restrições operacionais da cadeia e os requisitos de mix de madeira.

Os testes computacionais demonstraram a capacidade do modelo em fornecer soluções de boa qualidade, com gaps médios inferiores a 0,4%, mesmo diante de cenários com diferentes níveis de complexidade. Observou-se que o desempenho do modelo está fortemente associado à estratégia

de alocação dos recursos, mais do que ao número absoluto de viagens realizadas. A manutenção do estoque final em níveis controlados reforça a efetividade da formulação na utilização equilibrada dos volumes disponíveis, atendendo à demanda fabril com regularidade e minimizando penalizações por excesso ou falta de madeira.

A principal contribuição do estudo reside na integração das decisões logísticas em um modelo único e flexível, capaz de representar com fidelidade o processo de planejamento florestal em ambientes industriais. A estrutura proposta possibilita adaptações para diferentes configurações operacionais e níveis de dados, o que a torna aplicável em contextos reais de tomada de decisão. Além disso, a abordagem adotada permite avaliar, de forma transparente, os efeitos das restrições e dos parâmetros sobre o desempenho logístico do sistema.

Como continuidade deste trabalho, recomenda-se o aprimoramento da modelagem por meio da inclusão de aspectos ainda não tratados, como os custos e tempos de movimentação dos módulos entre fazendas ao longo dos períodos, o que evitaria decisões inviáveis na prática. A extensão para cenários com múltiplas fábricas ou centros consumidores também representa um avanço relevante, dada a realidade de operações florestais com destinos diversos. A realização de estudos de sensibilidade sobre parâmetros-chave pode oferecer insights importantes sobre o comportamento do modelo, enquanto a integração com ferramentas de georreferenciamento e sistemas de gestão empresarial poderia facilitar sua implementação em ambientes corporativos.

Dessa forma, conclui-se que o modelo proposto representa uma base sólida para o apoio à tomada de decisão no transporte florestal, oferecendo ganhos em eficiência operacional e contribuindo para a sustentabilidade econômica das cadeias logísticas no setor de base florestal.

Referências

Alves, R. T.; Fiedler, N. C.; Da Silva, E. N.; Lopes E. S.; Do Carmo, F. C. A. (2013). Análise técnica e de custos do transporte de madeira com diferentes composições veiculares. Revista Árvore, Viçosa, v. 37, n. 5, p. 897-904.

Audy, J.; D'Amours, S.; Rönquivst, M. (2012). Planning methods and decision support systems in vehicle routing problems for timber transportation: a review. Montreal: Cirrelt, v. 45.

Bordón, M. R.; Montagna, J. M.; Corsano, G. (2021). Solution approaches for solving the log transportation problem. Applied Mathematical Modelling.

Bordón, M. R.; Montagna, J. M.; Corsano, G. (2018). An exact mathematical formulation for the optimal log transportation. Forest Policy and Economics.

Dos Santos, P. A. V. H.; Da Silva, A. C. L.; Arce, J. E.; Augustynczik, A. L. D. (2019). A mathematical model for the integrated optimization of harvest and transport scheduling of forest products. Forests.

Epstein, R., Weintraub, A., Sapunar, P. e Nieto, E. (2007). A combinatorial approach for the integrated planning of harvesting and transportation of forest products. Pesquisa Operacional, 27(2):113–126.

Ferreira, M. A.; Silva, C. S. J.; Gomide, L. R.; Contreras, M. A.; Lopes, E. T.; Rodrigues, R. C.; De Mello, J. M.; Mendonça, N. de P. (2019). Wood supply optimization in Brazilian pulp industry involving forestry outgrower scheme. Revista Árvore.

Gomide, J. L.; Neto, H. F.; Regazzi, A. J. (2010). Análise de critérios de qualidade da madeira de eucalipto para a produção de celulose kraft. Revista Árvore, v. 34, n. 2, p. 339-344.

Han, H.; Chung, W.; Wells, L.; Anderson, N. (2018). Optimizing biomass feedstock logistics for forest residue processing and transportation on a tree-shaped road network. Forests.

IBGE (2024) - Instituto Brasileiro De Geografia e Estatística. PEVS - Produção da Extração Vegetal e da Silvicultura. Disponível em: https://www.ibge.gov.br/estatisticas/economicas/agricultura-e-pecuaria/9105-producao-da-extracao-vegetal-e-da-silvicultura.html. Acesso em: 2024-11-20.

Mundim, J. U. C. Uso de simulação de eventos discretos para o dimensionamento de frota para a colheita e transporte de cana-de-açúcar. (2009). Dissertação (Mestrado em Engenharia de Transportes) – Escola Politécnica, Universidade de São Paulo, São Paulo.

Ortega, R.; Forfora, N.; Urdaneta, I.; Azuaje, I.; Vivas, K.; Vera, R.; Frazier, R.; Abbati, C.; Saloni, D.; Jameel, H.; Venditti, R.; Gonzalez, R. (2024). Life cycle assessment of Brazilian bleached Eucalyptus kraft Pulp: Integrating bleaching processes and biogenic carbon impacts. Cleaner Environmental Systems, v. 15.

Rodrigues, K. M.; Poltroniere, S. C. (2023). Alocação da frota de caminhões entre frentes de carregamento florestal utilizando otimização em grafos. In *Anais XXX SIMPEP*, Bauru.