



ConBRepro

XIV CONGRESSO BRASILEIRO DE ENGENHARIA DE PRODUÇÃO

I CIGELUBRA

Congresso Internacional de Gestão e Engenharia Luso-Brasileiro

04 a 06 de dezembro de 2024

Energias Limpas nas Engenharias

Otimização do Transporte Florestal: Um Novo Modelo Integrando Cargas Combinadas para Redução de Custos

Renata Naoko Correa

Grupo de Tecnologia Aplicado à Otimização (GTAO)/ Programa de Pós-Graduação em Métodos Numéricos em Engenharia (PPGMNE) - Universidade Federal do Paraná (UFPR)

Cassius Tadeu Scarpin

Departamento de Administração Geral e Aplicada - UFPR

Julio Eduardo Arce

Departamento de Ciências Florestais - UFPR

Resumo: Este estudo aborda a otimização do transporte de toras, uma atividade de alto custo no setor florestal, que possui grande importância na economia brasileira. O artigo propõe a comparação entre dois modelos de Programação Linear Inteira Mista (PLIM) para o roteamento de caminhões de uma frota heterogênea, sendo um deles capaz de realizar cargas combinadas. A função objetivo dos modelos visa minimizar os custos de transporte e as horas extras dos motoristas em um horizonte de planejamento semanal. Os cenários foram gerados com base em parâmetros observados na literatura, especificamente de estudos de caso de empresas brasileiras. Os resultados indicam que o modelo com cargas combinadas ofereceu para o cenário com maior operação uma redução de 3,63% nos custos totais de transporte, além de contribuir para a sustentabilidade ao reduzir a distância percorrida e, conseqüentemente, as emissões de gases poluentes.

Palavras-chave: Transporte de toras, Pesquisa Operacional, Programação Linear Inteira Mista, Cargas combinadas, Sustentabilidade.

Forestry Transport Optimization: A New Model Integrating Combined Loads to Reduce Costs

Abstract: This study addresses the optimization of log transport, a high-cost activity in the forestry sector, which plays a significant role in the Brazilian economy. The paper compares two Mixed Integer Linear Programming (MILP) models for routing trucks from a heterogeneous fleet, one of which allows for combined loads. The objective function of the models aims to minimize transport costs and driver overtime within a weekly planning horizon. The scenarios were generated based on parameters observed in the literature, specifically from case studies of Brazilian companies. The results indicate that the combined load model offered a 3.63% reduction in total transport costs for the scenario with the largest operation, while also contributing to sustainability by reducing the distance traveled and, consequently, emissions of polluting gases.

Keywords: Log transport, Operations Research, Mixed Integer Linear Programming, Combined loads, Sustainability.

1. Introdução

O Brasil ocupa uma posição de destaque no setor florestal mundial, com a segunda maior cobertura florestal e sendo o único país com uma vasta área de florestas tropicais (Serviço Florestal Brasileiro, 2019). O Brasil se destaca no mercado global de papel e celulose, posicionando esse produto como o 11º item mais exportado do país, de acordo com a Secretaria de Comércio Exterior do Ministério da Economia.

Assim como em qualquer atividade econômica de grande porte, garantir a eficácia das operações no setor florestal exige um planejamento detalhado e organizado, pois assim, garante uma floresta produtiva e sustentável (Correa; Scarpin, 2019). Desde o plantio até a distribuição dos produtos, é essencial considerar o tempo necessário para cada etapa, com um planejamento abrangendo os níveis estratégico, tático e operacional, visando precisão ao longo do Horizonte de Planejamento (HP). Isso se deve ao fato de que o desenvolvimento das árvores (tempo de crescimento), assim como as rotas para o transporte de toras, que muitas vezes incluem trechos dentro da floresta, onde é necessário considerar a criação e manutenção de estradas, precisam ser cuidadosamente levados em conta no planejamento. O impacto do planejamento das redes de estradas florestais pode ser aprofundado em (Ferrari *et al.*, 2022). Além disso, é fundamental incluir considerações ambientais e sociais, alinhando-as às metas específicas da empresa florestal. (Rönnqvist *et al.*, 2015) exploram esses aspectos, identificando 33 problemas de tomada de decisão que podem ser resolvidos por meio da Pesquisa Operacional (PO) no setor florestal.

Dentre os 33 problemas identificados por (Rönnqvist *et al.*, 2015), a tomada de decisão sobre o transporte de toras se destaca por representar mais de um terço do custo total do planejamento logístico. No Brasil, o transporte de toras, assim como a maioria das mercadorias, é predominantemente rodoviário. De acordo com a Confederação Nacional do Transporte (CNT; SEST SENAT, 2023), o transporte rodoviário responde por cerca de 65% das cargas no país, com uma malha rodoviária que se estende por 1,7 milhão de quilômetros e desempenha um papel estratégico na integração regional. No entanto, o transporte rodoviário está sujeito à regulamentação específica, como a Lei nº 13.103/2015 (Brasil, 2015), que estabelece normas sobre a jornada de trabalho e o tempo de direção dos motoristas profissionais, visando garantir a segurança nas operações logísticas e no trânsito.

Dentro desse contexto, o transporte de toras é amplamente estudado, especialmente no contexto do Problema de Roteamento de Veículos (PRV) (*Vehicle Routing Problem – VRP*), que visa encontrar rotas de menor custo para atender à oferta e demanda de produtos. No entanto, o roteamento florestal apresenta características específicas que o tornam uma variante mais complexa do PRV. Uma rota é definida por uma coleta em um ponto de abastecimento (por exemplo, área de colheita, talhão) e uma entrega em um ponto de demanda (por exemplo, fábrica). No transporte de toras, o mesmo trajeto pode ocorrer mais de uma vez no mesmo período do HP uma vez que o volume de demanda é superior à capacidade do caminhão (Rönnqvist; Martell; Weintraub, 2023). Estudos recentes na literatura já abordam essas particularidades, como o Problema de Roteamento de Veículos de Transporte de Madeira (*Timber Transport Vehicle Routing Problem – TTVRP*) e o Problema de Agendamento de Caminhões de Toras (*Log Truck Scheduling Problem – LTSP*). Para se aprofundar nesses temas, sugere-se a leitura dos artigos de Malladi e Sowlati (2017) e Audy *et al.* (2023).

Outro aspecto importante a ser considerado é que o peso de toras produzido em um determinado talhão nem sempre corresponde a um múltiplo exato da capacidade do caminhão. Isso gera cenários em que o veículo se desloca da área de colheita até a indústria com uma carga abaixo de sua capacidade total. Nesse contexto, Murphy e Hall (2003) propõe uma otimização de rotas com base em dados reais de duas empresas da

Nova Zelândia. Em uma das empresas, foram consideradas rotas com fornecimento combinado, permitindo que os caminhões transportassem cargas combinadas. Flisberg, Lidén e Rönqvist (2009) também discutem o uso de pilhas de madeira distribuídas em diferentes pontos de coleta, de forma que a combinação dessas pilhas resultasse em uma carga completa para os caminhões. Os resultados indicam que a solução desse problema de roteamento de caminhões de toras, utilizando essa técnica, levou a uma redução nos custos de transporte. A carga combinada no setor florestal não é tão trivial quanto em outros setores, pois para que o caminhão carregue as toras em múltiplos pontos de oferta, é necessário que nesses pontos estejam disponíveis as carregadeiras.

Dado a importância do setor florestal na economia brasileira, e por consequência a importância do planejamento logístico e operacional das empresas da área, fica evidente a relevância em pesquisar sobre a otimizar do transporte de toras a fins de atender os pilares da sustentabilidade das empresas brasileiras do setor florestal. Logo o objetivo do artigo é resolver o problema de roteirização e agendamento de caminhões de transporte de toras a partir de programação linear inteira mista (PLIM), minimizando os custos de transporte e de horas extras realizadas pelos motoristas num horizonte de planejamento semanal. Para isso, foi verificado na literatura alguns trabalhos correlatos para que tivesse como referência a quantidade de talhões, da velocidade, da quantidade e da capacidade dos caminhões utilizados nesse tipo de transporte, a quantidade de carregadeiras disponíveis, a distância média entre a indústria e os talhões, o peso de toras transportadas ao longo de uma semana. "A partir disso, foram gerados cinco cenários e propostos dois modelos de PLIM. A principal diferença entre eles é que um modelo considera apenas cargas originadas de um único talhão, enquanto o outro inclui tanto cargas de um único talhão quanto cargas combinadas de vários talhões.

Este artigo está organizado em quatro seções. A primeira, contextualiza o tema geral do trabalho, apresentando o problema e breve relato da metodologia. A segunda seção, é dedicado ao detalhamento da metodologia adotada. A terceira seção mostra os resultados obtidos no trabalho e na quarta seção é apresentada a conclusão.

2. Metodologia

A metodologia foi organizada por etapas e estão descritas a seguir.

2.1 Criação de Cenários

Com o objetivo de comparar dois modelos propostos, foi-se necessário a criação de cenários. No total foram criados cinco cenário de demanda e oferta de toras. Na Tabela 1 é apresentado os parâmetros de entrada considerados no algoritmo de geração de cenários. No cenário C3 é considerado parâmetros usados no caso de estudo apresentado em Monti *et al.* (2020) referente planejamento da roteirização semanal no transporte de toras. Já os cenários C4 e C5 possuem a mesma quantidade de indústria, talhões, dias e carregadeiras disponíveis nos cenários, baseado no planejamento de empresas florestais brasileiras, apresentados em dos Santos *et al.* (2019) no estudo de otimização de agendamento de colheita e transporte de produtos florestais. O restante dos parâmetros dos cenários C4 e C5 foram considerados os mesmos do cenário C3. A base da frota de caminhões foi considerado como sendo na própria indústria conforme os artigos de referência.

Tabela 1 – Pesquisa qualitativa versus pesquisa quantitativa

Cenários	Indústria	Talhões	HP (dias)	Carregadeiras	Caminhões	Capacidade dos caminhões (ton)	Velocidade média do caminhão vazio (km/h)	Distância média entre indústria e talhão (km)
C1	1	3	5	2	20	18	50	20
C2	1	6	5	3	20	18	50	20
C3	1	10	6	5	48	19,9 e 47,7*	38	11,54
C4	1	12	7	5	48	19,9 e 47,7*	38	11,54
C5	1	20	7	10	48	19,9 e 47,7*	38	11,54

* Conforme referência, 33 caminhões de 19,9 toneladas e 15 caminhões de 47,7 toneladas

Fonte: Autores (2024)

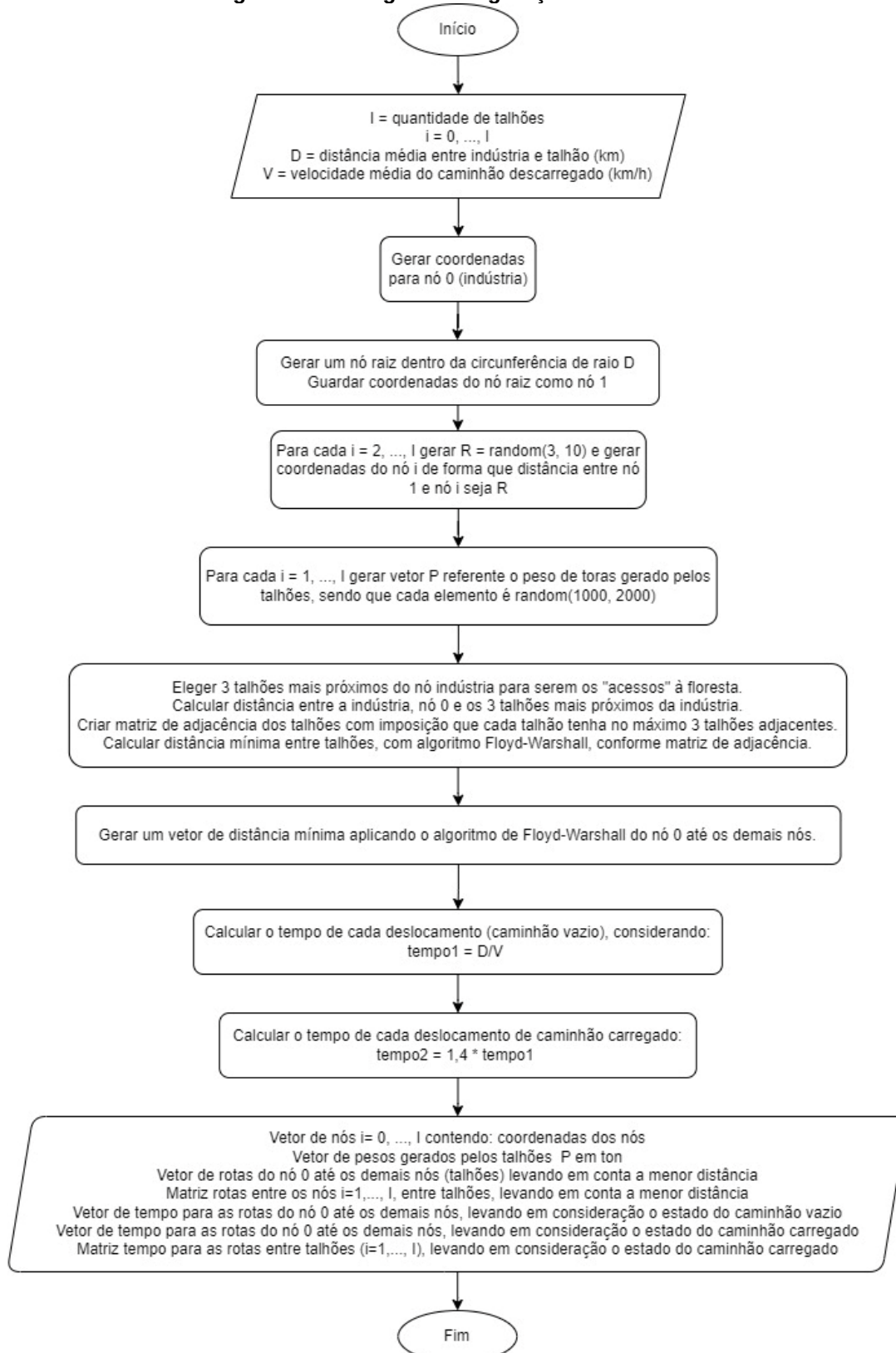
Na Figura 1 é apresentado o fluxograma do algoritmo de geração de cenários foi desenvolvido em *Python* utilizando a plataforma *Google Colaboratory*. A ideia é que precisariam ser geradas as coordenadas de cada ponto de oferta e de demanda para gerar o grafo e poder calcular a distância mínima, considerando a distância euclidiana entre eles. Para parecer mais próximo da realidade, os talhões, entre si poderiam ter uma distância entre 3 e 10 quilômetros (km). Além disso, seria necessário criar o peso de toras produzido por cada talhão, para isso foi considerado um valor inteiro aleatório entre 1000 e 2000 toneladas, conforme a literatura estudada. Além disso, foi considerado que alguns talhões se localizam de forma mais adentro da floresta, ou seja, para se chegar no talhão é necessário entrar dentro da floresta, pelas estradas criadas e seguir pelo caminho, algumas vezes passando próximo a alguns talhões, a partir disso foi gerado a matriz adjacência entre os talhões de forma randômica. Já o cálculo do tempo de deslocamento do caminhão quando está descarregado e quando está carregado, que é o acréscimo de 40% do tempo em relação ao estado descarregado, foram criadas conforme Monti *et al.* (2020).

2.2 Modelos Matemáticos

Os modelos de PO propostos para a comparação, mencionados na seção anterior, têm como objetivo minimizar os custos de transporte de toras e as horas extras dos motoristas. Isso possibilita a comparação entre os dois modelos para avaliar se há vantagens no uso de cargas combinadas no setor florestal. Para isso, foi considerado o grafo $G(V, A)$, definido por um conjunto de vértices V , que representa os nós de demanda e oferta — ou seja, a indústria e os talhões na floresta — e um conjunto de arcos A . Os elementos de A indicam a conexão entre pares de vértices, sejam eles talhões ou a ligação entre a indústria e um talhão, formando um conjunto com conexões entre todos os vértices.

As formulações serão apresentadas a seguir de forma individual. Na Tabela 2 são mostradas as notações usadas em ambos os modelos propostos. Vale destacar que, devido aos cenários gerados, nos quais se considera apenas uma única indústria como ponto de demanda, foi possível definir que o nó 0 sempre representa a indústria, enquanto os demais nós correspondem aos talhões.

Figura 1 – Fluxograma da geração de cenários



Fonte: Autores (2024)

Tabela 2 – Notações

Conjuntos	Descrição
I	Conjunto de nós do grafo que representa talhões e a indústria
$T = I - \{0\}$	Conjunto de nós do grafo que representa talhões
L	Conjunto de caminhões da frota
D	Conjunto dos períodos ao longo do HP em dias
C	Conjunto das carregadeiras disponíveis
Índices	Descrição
i, j	Nó do grafo: $0, \dots, (I - 1)$
l	Caminhão: $1, \dots, L $
d	Período do HP: $1, \dots, D $
c	Carregadeira: $1, \dots, C $
Parâmetros	Descrição
c^A	Constante que converte o valor de quilômetros rodados em unidade monetária
c^B	Constante pago pela ineficiência no transporte da madeira ($US\$/tonelada$)
c^C	Custo fixo do veículo pela utilização do veículo por dia ($US\$/dia$)
c^D	Custo da unidade de hora extra em valor monetário ($US\$/hora$)
D_{ij}	Distância percorrida do nó i para o nó j (km)
Q_l	Capacidade de carga do caminhão l
V_i	Peso produzido pelo talhão i , $i \neq 0$ (tonelada)
t^A	Tempo de viagem dos caminhões quando vazio (hora)
t^B	Tempo de viagem dos caminhões quando carregados (hora)
H	Limite do horário de trabalho diário do caminhão
G	Limite do horário de trabalho diário da carregadeira
Δ	Decimal representando a porcentagem de variação do número de viagens realizadas pelos caminhões
η	Indicador produção/hora das carregadeiras (toneladas/hora)
M	Valor positivo suficientemente grande
Variáveis	Descrição
n_{ijld}	Número de viagens que o caminhão l , com carga completa, realiza na rota do nó i para o nó j no dia d
m_{ijld}	Assume 1 se o caminhão l for designado para a rota do nó i para o nó j no dia d transportando uma carga incompleta, 0 caso contrário
y_{ijld}	Peso transportado como carga incompleta do caminhão l do nó i para o nó j no dia d (toneladas)
s_{ijld}	Peso da folga da carga incompleta que o caminhão l transporta do nó i para o nó j no dia d (toneladas)
k_{ld}	Assume 1 se o caminhão l realiza transporte no dia d , 0 caso contrário
he_{ld}	Horas extras realizadas pelo caminhão l no dia d (horas)
g_{id}	Assume 1 se no nó i , $i \neq 0$, for acessado no dia d , 0 caso contrário

Fonte: Autores (2024)

2.2.1 Modelo Matemático 1

Nesta modelagem de PLIM, é considerado apenas cargas em que são retiradas de um único talhão. A seguir será mostrado a formulação de forma detalhada.

Minimizar

$$c^A \cdot \left[\sum_{j \neq 0}^I D_{0j} \cdot \left(\sum_l^L \sum_d^D n_{0jld} \right) \right] + c^A \cdot \left[\sum_{i \neq 0}^I D_{i0} \cdot \left(\sum_l^L \sum_d^D n_{i0ld} \right) \right] + c^A \cdot \left[\sum_{j \neq 0}^I D_{0j} \cdot \left(\sum_l^L \sum_d^D m_{0jld} \right) \right] + c^A \cdot \left[\sum_{i \neq 0}^I D_{i0} \cdot \left(\sum_l^L \sum_d^D m_{i0ld} \right) \right] + c^B \cdot \left(\sum_{i \neq 0}^I \sum_l^L \sum_d^D s_{i0ld} \right) + c^C \cdot \left(\sum_l^L \sum_d^D k_{ld} \right) + c^D \cdot \left(\sum_l^L \sum_d^D he_{ld} \right) \quad (1)$$

Sujeito a

$$n_{0jld} = n_{jold} \quad \forall j \in I, l \in L, d \in D, j \neq 0 \quad (2)$$

$$m_{0jld} = m_{jold} \quad \forall j \in I, l \in L, d \in D, j \neq 0 \quad (3)$$

$$y_{i0ld} + s_{i0ld} = Q_l \cdot m_{i0ld} \quad \forall i \in I, l \in L, d \in D, i \neq 0 \quad (4)$$

$$\sum_{i \neq 0}^I \sum_l^L n_{i0ld} + m_{i0ld} > (1 - \Delta) \cdot \sum_{i \neq 0}^I \sum_l^L n_{i0l(d-1)} + m_{i0l(d-1)} \quad \forall d \in D, d \neq 1 \quad (5)$$

$$\sum_{i \neq 0}^I \sum_l^L n_{i0ld} + m_{i0ld} < (1 + \Delta) \cdot \sum_{i \neq 0}^I \sum_l^L n_{i0l(d-1)} + m_{i0l(d-1)} \quad \forall d \in D, d \neq 1 \quad (6)$$

$$\sum_l^L \sum_d^D (Q_l \cdot n_{i0ld} + y_{i0ld}) = V_i \quad \forall i \in I, i \neq 0 \quad (7)$$

$$\sum_{i=1}^I \left[(t_{0i}^A \cdot n_{0iold} + t_{0i}^A \cdot m_{0iold} + t_{i0}^B \cdot n_{i0ld} + t_{i0}^B \cdot m_{i0ld}) + \frac{2}{\eta} \cdot \sum_{j \neq i}^I (Q_l \cdot n_{i0ld} + y_{i0ld}) \right] - H \cdot k_{ld} \leq he_{ld} \quad \forall l \in L, d \in D \quad (8)$$

$$he_{ld} \leq 2 \quad \forall l \in L, d \in D \quad (9)$$

$$\sum_{j=1}^I (n_{0jld} + m_{0jld}) \leq M \cdot k_{ld} \quad \forall l \in L, d \in D \quad (10)$$

$$\sum_{i=1}^I g_{id} \leq |C| \quad \forall d \in D \quad (11)$$

$$\eta \cdot G \cdot g_{id} - Q_l \cdot n_{i0ld} - y_{i0ld} \geq 0 \quad \forall i \in I, l \in L, d \in D, i \neq 0 \quad (12)$$

$$m_{ijld}, k_{ld}, p_{id} \in \{0, 1\} \quad \forall i, j \in I, l \in L, d \in D \quad (13)$$

$$n_{ijld} \in \mathbb{Z}_+ \quad \forall i, j \in I, l \in L, d \in D \quad (14)$$

$$y_{ijld}, s_{ijld}, he_{ld} \in \mathbb{R}_+ \quad \forall i, j \in I, l \in L, d \in D \quad (15)$$

A função objetivo (1) minimizar o custo de transporte de toras, tanto os custos variáveis que dependem da distância percorrida, mas também o custo fixo do uso do caminhão. Além dos custos de penalização por tonelada de folga que o caminhão possuir ao transportar toras e o custo com horas extras. Levando em consideração a dinâmica do transporte florestal, sabe-se que pode ocorrer várias viagens de cargas de um único talhão para a indústria. Logo, as variáveis n_{ijld} e m_{ijld} se referem sobre o roteamento dos caminhões, levando em conta se está com carga completa (sendo assim uma variável inteira) ou se está com carga incompleta (sendo uma variável binária), respectivamente. Foi considerado que a possibilidade de realizar uma única viagem de carga incompleta, por isso a variável m_{ijld} é binária.

As restrições (2) e (3) lidam com o fluxo dos caminhões, uma vez que o nó $i = 0$ é considerado a indústria que também é a base dos caminhões. Na equação (2) é considerado que toda saída do caminhão da base até o local da retirada impõe que ocorra a volta a indústria na mesma quantidade de vezes. Já a restrição (3), obriga o caminhão sair da base até o talhão e, por se tratar de uma carga incompleta, deve voltar a indústria, para o ponto de demanda.

A equação (4) impõe que uma carga incompleta é composta pelo peso transportado y_{iold} e seu complementar, que é o peso de folga s_{ijld} , em relação a capacidade do caminhão. As restrições (5) e (6) lidam com a linearidade do número de viagens dos caminhões ao longo da semana. No estudo, foi considerado $\Delta = 0,15$, ou seja, uma variação de 15% no número de viagens diárias dos caminhões em relação ao dia anterior. O conjunto de restrições (7) impõe a retirada completa do peso detoras produzido no talhão i .

A restrição (8) contabiliza o tempo total necessário para realizar o cronograma de transporte, incluindo horas extras, em relação a cada caminhão e a cada período do HP. O conjunto de restrição (9) atende uma limitação trabalhista na quantidade máxima de horas extras conforme artigo 235-C da lei nº 13.103/2015 (Brasil, 2015). Na inequação (10), lida com o relacionamento entre as variáveis n_{ijld} , m_{ijld} e k_{ld} , para considerar o custo fixo do caminhão quando designado a uma rota.

O conjunto de restrições (11) impõe que a quantidade de talhões acessados pelos caminhões seja no máximo a quantidade de carregadeiras disponíveis. Já a restrição (12) associa a condição que o transporte de toras realmente ocorra apenas nos talhões que estão habilitados para o acesso, conforme a disponibilidade das carregadeiras, além de considerar o peso transportado ser no máximo equivalente ao peso carregados pelas carregadeiras conforme sua jornada de trabalho e coeficiente η que é o indicador produção/hora das carregadeiras. Por fim, o conjunto de restrição (13) garante que as variáveis de decisão assumam valores binários, (14) garante que as variáveis de decisão assumam valores inteiros não negativos e (15) garante que as variáveis assumam valores contínuos não negativos.

2.2.2 Modelo Matemático 2

Nesta modelagem de PLIM, é considerado, na dinâmica do transporte de toras, múltiplas viagens de cargas completas e a possibilidade de realizar transportes de cargas complementadas por produtos de múltiplos talhões, as chamadas, cargas combinadas. Pela característica já citada do volume de oferta em um talhão ser muito superior a capacidade do caminhão, a carga combinada considerada no modelo, leva em consideração uma rota combinada de no máximo dois talhões para complementar a carga. A seguir, será mostrado a formulação matemática e explicações da mesma.

Minimizar

$$c^A \cdot \left[\sum_{j \neq 0}^I D_{0j} \cdot \left(\sum_l^L \sum_d^D n_{0jld} \right) \right] + c^A \cdot \left[\sum_{i \neq 0}^I D_{i0} \cdot \left(\sum_l^L \sum_d^D n_{i0ld} \right) \right] + c^A \left[\sum_i^I \sum_{j \neq i}^I D_{ij} \cdot \left(\sum_l^L \sum_d^D m_{ijld} \right) \right] \quad (16)$$

$$+ c^B \cdot \left(\sum_i^I \sum_{j \neq i}^I \sum_l^L \sum_d^D s_{ijld} \right) + c^C \cdot \left(\sum_l^L \sum_d^D k_{ld} \right) + c^D \cdot \left(\sum_l^L \sum_d^D h e_{ld} \right)$$

Sujeito a

$$m_{0jld} = \sum_{i \neq 0}^I m_{ijld} \quad \forall j \in I, l \in L, d \in D, j \neq 0 \quad (17)$$

$$m_{i0ld} = \sum_{j \neq 0}^I m_{ijld} \quad \forall i \in I, l \in L, d \in D, i \neq 0 \quad (18)$$

$$y_{i0ld} + s_{i0ld} + \sum_{j \neq i}^I y_{ijld} = Q_l \cdot m_{i0ld} \quad \forall i \in I, l \in L, d \in D, i \neq 0 \quad (19)$$

$$y_{ijld} + s_{ijld} = Q_l \cdot m_{ijld} \quad \forall i, j \in I, l \in L, d \in D, i \neq 0, \quad (20)$$

$$i \neq j, j \neq 0$$

$$\sum_l^L \sum_d^D \left(Q_l \cdot n_{i0ld} + \sum_{j \neq i}^I y_{ijld} \right) = V_i \quad \forall i \in I, i \neq 0 \quad (21)$$

$$\sum_{i=1}^I \left[\left(t_{0i}^A \cdot n_{0i0ld} + t_{0i}^A \cdot m_{0i0ld} + t_{i0}^B \cdot n_{i0ld} + \sum_{j \neq i}^I (t_{ij}^B \cdot m_{ijld}) \right) \right. \quad (22)$$

$$\left. + \frac{2}{\eta} \cdot \sum_{j \neq i}^I (Q_l \cdot n_{i0ld} + y_{ijld}) \right] - H \cdot k_{ld} \leq h e_{ld}$$

$$\forall l \in L, d \in D$$

$$\eta \cdot G \cdot g_{id} - Q_l \cdot n_{i0ld} - \sum_{j \neq i}^I y_{ijld} \geq 0 \quad \forall i \in I, l \in L, d \in D, i \neq 0 \quad (23)$$

$$(2), (5), (6), (9) - (11), (13) - (15)$$

A função objetivo (16) minimizar o custo de transporte de toras, tanto os custos variáveis que dependem da distância percorrida, mas também o custo fixo do uso do caminhão. Além dos custos de penalização por tonelada de folga que o caminhão possuir ao transportar toras e o custo com horas extras, similar à equação (1), porém considerando a possibilidade de carga combinada, que está representada pela variável m_{ijld} . Os conjuntos de restrições (17) e (18) lidam com o fluxo de caminhões transportando cargas combinadas ou incompletas, permitindo que o caminhão se desloque do talhão i para qualquer outro nó do grafo, seja indo diretamente para a indústria com carga incompleta ou para outro talhão, completando a carga antes de seguir para descarregar na indústria.

A equação (19) ajusta a carga do caminhão em um determinado período do HP ao lidar com cargas combinadas. Nesse caso, a capacidade do caminhão será equivalente ao peso carregado no talhão i , somado ao peso coletado em outros talhões, além da possível folga existente na carga, considerando sempre o retorno à indústria. A restrição (20) aborda algo similar, observando o deslocamento entre talhões durante a complementação de

carga, contabilizando a folga para viabilizar essa complementação conforme a disponibilidade. O conjunto de restrições (21) garante a retirada completa do volume de toras produzido no talhão i .

A restrição (22), semelhante à restrição (8), contabiliza o tempo total necessário para cumprir o cronograma de transporte, incluindo as horas extras, para cada caminhão e em cada período do HP. A inequação (23) é similar à restrição (12), porém também considerando o peso das toras em cargas combinadas.

3. Resultados

Para fácil compreensão dos resultados, a notação usada para se referenciar o modelo proposto 1 será M1, enquanto o modelo proposto 2 terá como notação M2. Os modelos foram desenvolvidos no *Visual Studio* 2022 versão 17.8.6 em linguagem C++ e resolvidos por meio do *software Gurobi* 10.0.1, em um computador com processador *Intel® Core™ i5-10300H*, 2.50 GHz e 16.0 GB de RAM. Foi considerado o limite de tempo computacional de 1 hora, conforme a metodologia de Monti *et al.* (2020) e dos Santos *et al.* (2019) para um planejamento de transporte semanal.

3.1 Parâmetros

Alguns parâmetros apresentados na Tabela 1, foram geradas no algoritmo de geração de cenários. Outros parâmetros foram considerados conforme Monti *et al.* (2020). O valor considerado para H foi de 8 horas, conforme a lei nº 13.103/2015 (Brasil, 2015). Já o parâmetro G foi se adaptando conforme a factibilidade do cenário, ou seja, a primeira tentativa era de considerar a jornada de trabalho das carregadeiras como sendo $G = 8$, para atender normas trabalhistas brasileiras. Porém, ao observar os resultados obtidos, foi constatado que a quantidade de caminhões disponíveis era suficiente para o transporte de toras, mas a infactibilidade ocorrida pela necessidade de ter carregadeira disponível para carga do caminhão e ter um número baixo de carregadeiras. Logo, se o resultado quando $G = 0$ é a solução infactível, então era considerado $G = 12$, equivalendo, por exemplo, casos de dois turnos de trabalho de 6 horas, trazendo mais flexibilidade e chance de factibilidade da solução.

3.2 Analisando os resultados

Nenhum dos testes realizados conseguiu atingir a solução ótima dentro do limite de 1 hora. Na Tabela 3, é possível observar que, nos cenários onde houve soluções, o modelo M2 apresentou resultados melhores que o modelo M1, já que o objetivo é minimizar. No cenário C4, com $G = 8$, o modelo M1 gerou uma solução infactível em 145,2 segundos, enquanto o modelo M2 alcançou o tempo limite de 1 hora sem retornar qualquer solução, nem mesmo de infactibilidade. Isso demonstra que o modelo M2, por lidar com uma maior complexidade ao considerar não apenas o transporte de carga de um único talhão, mas também a complementação de carga, demanda mais recursos computacionais.

No cenário C5, também com $G = 8$, o modelo M1 conseguiu uma solução, enquanto o modelo M2 não obteve nenhuma, reforçando a maior complexidade do M2 em relação ao M1. Isso ocorre porque o número de rotas possíveis no modelo M1 é de 10, enquanto no M2, que utiliza um grafo orientado, o número de rotas é de 30, o que aumenta a dificuldade de encontrar uma solução.

Tabela 3 – Resultados

Cenários	M1			M2			Diferença (US\$)	Diferença (%)
	G (h)	Valor (US\$)	GAP (%)	Valor (US\$)	GAP (%)			
C1	8	19.624,58	1,64%	19.387,82	0,97%	236,76	1,21%	
C2	12	41.171,82	2,65%	40.827,56	2,59%	344,26	0,84%	
C3	8	24.968,80	5,76%	24.409,81	7,74%	558,99	2,24%	
C4	8	infactível		atingiu tempo limite				
C4	12	22.150,51	7,75%	21.776,58	16,50%	373,93	1,69%	
C5	8	140.095,15	5,31%	atingiu tempo limite				
C5	12	138.755,41	4,30%	133.721,82	8,41%	5.033,59	3,63%	

Fonte: Autores (2024)

Ao comparar a diferença percentual entre as soluções dos modelos, o cenário C5 com $G = 12$ apresentou a maior discrepância, com 3,63%, o que representa US\$ 5.033,59. Considerando que esse planejamento é semanal, o impacto econômico de adotar o modelo M2 seria significativo. No cenário C4, também com $G = 12$, a diferença foi de 1,69%, porém o GAP de 16,50% no M2 sugere que, caso fosse obtida a solução ótima, a diferença poderia ser maior. Vale lembrar que o GAP no modelo PLIM indica o quão distante a solução atual está da ótima.

Uma observação relevante é que, no modelo M2, apesar de algumas rotas com cargas incompletas terem sido consideradas na solução, a folga gerada (s_{ijld}) foi zero, o que se deve à ausência de uma restrição que impusesse que a carga incompleta (y_{ijld}) fosse estritamente menor que a capacidade do caminhão. Para o planejamento do transporte florestal, isso não representa qualquer prejuízo.

No cenário C1, o modelo M2 sugeriu uma carga combinada apenas no penúltimo dia do HP. O modelo M1 utilizou 19 caminhões ao longo do HP, enquanto o M2 utilizou 18. Em média, o modelo M1 resultou em 0,94 hora extra por motorista de 18 caminhões durante a semana. Em contraste, o modelo M2 reduziu esse número para 0,73 hora extra por motorista de 17 caminhões.

4. Conclusões

O transporte de toras é um processo altamente custoso para as empresas do setor florestal. Além de tratar de um tema relevante, sendo que o setor florestal tem grande importância para a economia brasileira, o estudo propôs dois modelos para o roteamento de caminhões heterogêneos, atendendo tanto a requisitos econômicos quanto trabalhistas. O objetivo foi comparar os dois modelos, uma vez que o modelo M2 incluía a possibilidade de carga combinada. Os resultados indicam que o uso da carga combinada no transporte de toras traz benefícios significativos. Ao minimizar os custos, também ocorre a redução da distância percorrida pelos caminhões, o que contribui para a diminuição das emissões de gases poluentes, tornando a solução mais sustentável para a indústria. Como sugestão para trabalhos futuros, a modificação da função objetivo para incluir uma penalização pelas emissões de poluentes poderia gerar resultados interessantes, algo que não foi possível implementar devido à falta de dados técnicos sobre os caminhões utilizados em cenários reais.

Referências

AUDY, J.-F. *et al.* Planning methods and decision support systems in vehicle routing problems for timber transportation: a review. **International Journal of Forest Engineering**, [s. l.], v. 34, n. 2, p. 143–167, 2023. Disponível em: <https://doi.org/10.1080/14942119.2022.2142367>.

BRASIL. **Lei nº 13.103/2015**. [S. l.: s. n.], 2015.

CNT; SEST SENAT. **Pesquisa CNT de rodovias - 2023**. [S. l.: s. n.], 2023.

CORREA, R. N.; SCARPIN, C. T. Problema de agendamento de colheita florestal : comparação entre dois modelos matemáticos considerando aspectos ambientais e econômicos. **IX Congresso Brasileiro de Engenharia de Produção**, Ponta Grossa, p. 1–13, 2019.

DOS SANTOS, P. A. V. H. *et al.* A mathematical model for the integrated optimization of harvest and transport scheduling of forest products. **Forests**, [s. l.], v. 10, n. 12, 2019.

FERRARI, L. S. *et al.* IMPACTO FINANCEIRO DA NÃO-INTEGRAÇÃO DE ESTRADAS EM MODELOS DE AGENDAMENTO TÁTICO DE COLHEITA. **BIOFIX Scientific Journal**, [s. l.], v. 7, p. 98–103, 2022.

FLISBERG, P.; LIDÉN, B.; RÖNNQVIST, M. A hybrid method based on linear programming and tabu search for routing of logging trucks. **Computers & Operations Research**, [s. l.], v. 36, p. 1122–1144, 2009.

MALLADI, K. T.; SOWLATI, T. Optimization of operational level transportation planning in forestry: a review. **International Journal of Forest Engineering**, [s. l.], v. 28, n. 3, p. 198–210, 2017. Disponível em: <https://doi.org/10.1080/14942119.2017.1362825>.

MONTI, C. A. U. *et al.* Optimization of Wood Supply: The Forestry Routing Optimization Model. **Anais da Academia Brasileira de Ciências**, [s. l.], v. 92, n. 3, p. 1–17, 2020. Disponível em: http://www.scielo.br/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S0001-37652020000501017&tlng=en.

MURPHY, G.; HALL, P. Reducing Trucks on the Road through Optimal Route Scheduling and Shared Log Transport Services. **Southern Journal of Applied Forestry**, [s. l.], v. 27, n. 3, p. 198–205, 2003.

RÖNNQVIST, M. *et al.* Operations Research challenges in forestry: 33 open problems. **Annals of Operations Research**, [s. l.], v. 232, n. 1, p. 11–40, 2015.

RÖNNQVIST, M.; MARTELL, D.; WEINTRAUB, A. Fifty years of operational research in forestry. **International Transactions in Operational Research**, [s. l.], v. 30, n. 6, p. 3296–3328, 2023.

SERVIÇO FLORESTAL BRASILEIRO. **Informações Florestais**. [S. l.], 2019.