

UNIVERSIDADE ESTADUAL PAULISTA - UNESP
Faculdade de Engenharia – Campus de Bauru

KAMILA DE MACENA RODRIGUES

**PLANEJAMENTO OPERACIONAL E SEQUENCIAMENTO DOS
MÓDULOS DE CARREGAMENTO DE MADEIRA PARA O
ABASTECIMENTO FLORESTAL DE INDÚSTRIAS DE CELULOSE**

Bauru – SP
2026

KAMILA DE MACENA RODRIGUES

**PLANEJAMENTO OPERACIONAL E SEQUENCIAMENTO DOS
MÓDULOS DE CARREGAMENTO DE MADEIRA PARA O
ABASTECIMENTO FLORESTAL DE INDÚSTRIAS DE CELULOSE**

Dissertação apresentada à Universidade Estadual Paulista (UNESP), Faculdade de Engenharia de Bauru, para obtenção do título de Mestre em Engenharia de Produção.

Área de concentração: Pesquisa Operacional e métodos de Análise de Sistemas Produtivos

Orientadora: Profa. Dra. Sônia Cristina Poltroniere Silva

Bauru – SP
2026

R696p

Rodrigues, Kamila de Macena

Planejamento operacional e sequenciamento dos módulos de carregamento de madeira para o abastecimento florestal de indústrias de celulose / Kamila de Macena Rodrigues. -- Bauru, 2026
100 f. : il., tabs.

Dissertação (mestrado) - Universidade Estadual Paulista (UNESP), Faculdade de Engenharia, Bauru

Orientadora: Sonia Cristina Poltroniere Silva

1. Planejamento operacional. 2. Abastecimento florestal. 3. Celulose e papel. 4. Alocação. 5. Sequenciamento. I. Título.

ATA DA DEFESA PÚBLICA DA DISSERTAÇÃO DE MESTRADO DE KAMILA DE MACENA RODRIGUES, DISCENTE DO PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA DE PRODUÇÃO, DA FACULDADE DE ENGENHARIA - CÂMPUS DE BAURU.

Aos 12 de fevereiro de 2026, às 10h30min, por meio de Videoconferência, realizou-se a defesa de DISSERTAÇÃO DE MESTRADO de KAMILA DE MACENA RODRIGUES, intitulada "PLANEJAMENTO OPERACIONAL E SEQUENCIAMENTO DOS MÓDULOS DE CARREGAMENTO DE MADEIRA PARA O ABASTECIMENTO FLORESTAL DE INDÚSTRIAS DE CELULOSE ". A Comissão Examinadora foi constituída pelos seguintes membros: Profa. Dra. SONIA CRISTINA POLTRONIERE SILVA (Orientador(a) - Participação Virtual) do(a) Departamento de Matemática / UNESP / Câmpus de Bauru - FC, Prof. Dr. SILVIO ALEXANDRE DE ARAUJO (Participação Virtual) do(a) Departamento de Matemática / UNESP / Câmpus de São José do Rio Preto - Ibilce, Prof. Dr. HELIO YOCHIHIRO FUCHIGAMI (Participação Virtual) do(a) Departamento de Engenharia da Produção / Universidade Federal de São Carlos, Após a exposição pela mestranda e arguição pelos membros da Comissão Examinadora que participaram do ato, de forma presencial e/ou virtual, a discente recebeu o conceito final: APROVADA . Nada mais havendo, foi lavrada a presente ata, que após lida e aprovada, foi assinada pelo(a) Presidente(a) da Comissão Examinadora.

Documento assinado digitalmente
 gov.br SONIA CRISTINA POLTRONIERE SILVA
Data: 09/03/2026 14:12:56-0300
Verifique em <https://validar.iti.gov.br>

Profa. Dra. SONIA CRISTINA POLTRONIERE SILVA

AGRADECIMENTOS

Agradeço, inicialmente, à Profa. Dra. Sônia, pela orientação técnica, disponibilidade e contribuições ao longo de todo o desenvolvimento deste trabalho e por acreditar neste projeto desde o início de minha participação em suas aulas de Tópicos em Otimização, como aluna especial. As discussões conduzidas e as críticas realizadas foram fundamentais para o amadurecimento metodológico da pesquisa e para o rigor científico da modelagem proposta.

Aos docentes do Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Produção da Universidade Estadual Paulista (UNESP), agradeço pelas disciplinas ministradas e pelas contribuições acadêmicas que auxiliaram na consolidação da base teórica e metodológica deste estudo. À banca examinadora, registro meu agradecimento pela leitura atenta do trabalho e pelas sugestões apresentadas, que contribuíram para o aprimoramento dos resultados e da redação final.

Agradeço à empresa para a qual trabalho pelo apoio institucional e pela possibilidade de conciliar as atividades profissionais com o desenvolvimento desta pesquisa. O acesso a dados operacionais, bem como o incentivo à aplicação de métodos quantitativos no contexto real de planejamento e logística florestal, foram essenciais para a construção de um trabalho com caráter aplicado e alinhado à prática industrial.

Registro também meu agradecimento aos gestores e colegas de trabalho que contribuíram, direta ou indiretamente, por meio de discussões técnicas, validação de premissas e compartilhamento de conhecimento operacional, fortalecendo a aderência do modelo proposto à realidade do sistema estudado.

Por fim, agradeço à minha família pelo apoio constante e pela compreensão durante o período de dedicação às atividades acadêmicas, tornando possível a conclusão desta etapa de formação.

RESUMO

O abastecimento florestal de indústrias de celulose e papel exige a coordenação eficiente de decisões de carregamento, transporte e gestão de estoques, cuja complexidade é intensificada pela limitação e mobilidade dos módulos de carregamento. Este trabalho aborda o problema de planejamento operacional do abastecimento florestal para indústrias de celulose, com ênfase na alocação e sequenciamento de módulos de carregamento, integrado às decisões relacionadas ao transporte da madeira até a fábrica e à gestão de estoques no pátio fabril. Um modelo de programação linear inteira mista é proposto, no qual os módulos são tratados como recursos escassos e móveis, cuja alocação influencia os fluxos de transporte, a utilização da frota de caminhões e a dinâmica dos estoques. O objetivo consiste em minimizar os custos associados ao deslocamento dos módulos entre as fazendas, à madeira remanescente em campo e à manutenção de estoques no pátio da fábrica, assegurando simultaneamente o atendimento às demandas quantitativas e aos requisitos de composição do *mix* qualitativo de madeira, considerando as restrições operacionais relacionadas à capacidade de transporte, à expedição das fazendas, aos tipos de madeira demandados e aos limites de estoque. A abordagem proposta é avaliada por meio de experimentos computacionais baseados em condições operacionais práticas, permitindo analisar padrões de alocação e permanência dos módulos, número de realocações e de caminhões necessários, além do comportamento dos estoques. Os resultados indicam que a modelagem explícita do sequenciamento dos módulos contribui para uma alocação mais estável e eficiente dos recursos, promovendo melhor utilização dos ativos logísticos e redução dos custos operacionais.

Palavras-chave: Planejamento operacional; Abastecimento florestal; Celulose e papel; Alocação; Sequenciamento; Programação linear inteira mista; Logística florestal.

ABSTRACT

The forest supply of pulp and paper industries requires efficient coordination of loading, transportation, and inventory management decisions, whose complexity is intensified by the limited availability and mobility of loading modules. This study addresses the operational planning problem of forest supply for pulp industries, with an emphasis on the allocation and sequencing of loading modules, integrated with decisions related to wood transportation to the mill and inventory management in the mill yard. A mixed-integer linear programming model is proposed, in which the modules are treated as scarce and mobile resources whose allocation influences transportation flows, truck fleet utilization, and inventory dynamics. The objective is to minimize costs associated with the allocation of modules between farms, remaining wood in the field, and inventory holding at the mill yard, while simultaneously ensuring the fulfillment of quantitative demand and qualitative wood mix composition requirements, considering operational constraints related to transportation capacity, farm dispatch limits, demanded wood types, and inventory bounds. The proposed approach is evaluated through computational experiments based on practical operational conditions, allowing the analysis of module allocation and dwelling patterns, the number of reallocations and required trucks, as well as inventory behavior. The results indicate that explicitly modeling the sequencing of modules contributes to a more stable and efficient allocation of resources, promoting better utilization of logistics assets and a reduction in operational costs.

Keywords: Operational planning; Forest supply; Pulp and paper; Allocation; Sequencing; Mixed-integer linear programming; Forest logistics.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 - Publicações de artigos ao longo do tempo sobre a otimização florestal.....	3
Figura 2 - Principais países com pesquisas sobre a otimização do abastecimento florestal	4
Figura 3 - Possíveis rotas de um caminhão madeireiro	10
Figura 4 – Evolução da área de floresta plantada no Brasil (1985 – 2024).....	16
Figura 5 - Distribuição do mercado de celulose <i>kraft</i> branqueada no Brasil	18
Figura 6 - Distribuição geográfica do mercado de celulose <i>kraft</i> branqueada no Brasil.....	18
Figura 7 – Cadeia de abastecimento florestal.....	26
Figura 8 - Máquina de corte (<i>harvester</i>).....	27
Figura 9 - Máquina de baldeio (<i>forwarder</i>).....	27
Figura 10 - Grua de carregamento	28
Figura 11 - Caminhão do tipo "tritrem" carregado.....	28
Figura 12 - Mapa de uma fazenda dividida em talhões	29
Figura 13 – Esteira para manuseio de toras de madeira até as mesas de picagem	30
Figura 14 - Mesas de picagem das toras de madeira	30
Figura 15 - Estoque de toras em pilha em um pátio de madeira	31
Figura 16 - Estoque de cavacos	31
Figura 17 - Pátio de madeira visto de cima	32
Figura 18 - Interdependência das operações de abastecimento florestal.....	33
Figura 19 - Componentes de um módulo de carregamento	34
Figura 20 – Esquema de alocação e deslocamento de um módulo entre fazendas	35
Figura 21 - Escala do problema.....	56
Figura 22 - Coeficientes de variação (CV) por classe	56
Figura 23 - Distribuição do volume total de madeira disponível por classe	57
Figura 24 - Evolução do <i>gap</i> relativo médio em função da classe de instâncias	61
Figura 25 - <i>Gap</i> relativo por instância da Classe 2 (tempo de resolução de 1h).....	63
Figura 26 - Participação média dos componentes da FO na Classe 2 (1h)	65
Figura 27 - Sequenciamento dos módulos (Instância 4 da Classe 2 - 30 min).....	67
Figura 28 - Sequenciamento dos módulos (instancia 4 - 1h)	68
Figura 29 - Comparação de alocações e utilização (Classes 2 e 6)	75

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 – Principais estudos sobre otimização do abastecimento florestal	7
Tabela 2 - Ranking dos maiores exportadores de celulose do mundo em 2020.....	19
Tabela 3 - Comparações entre veículos de transporte	21
Tabela 4 - Comparações entre veículos de transporte	22
Tabela 5 - Parâmetros iniciais para as Classes 1-5	53
Tabela 6 – Parâmetro de controle dos tempos de <i>setup</i>	54
Tabela 7 – Parâmetros e intervalos para a geração das instâncias das Classes 1-5	54
Tabela 8 – Estatísticas por volume médio de madeira por classes.....	55
Tabela 9 - Estatísticas por demanda média de madeira por classes	55
Tabela 10 - Número de variáveis e restrições.....	60
Tabela 11 - Desempenho computacional médio por classe (Classe1-5)	61
Tabela 12 - Resultados consolidados da Classe 2 (tempo de resolução de 1h por instância) ..	63
Tabela 13 - Decomposição da função objetivo - Classe 2 (tempo de resolução de 1h)	64
Tabela 14 - Resumo comparativo da instância 4 (classe 2): 30 min vs 1h.....	66
Tabela 15 - Indicadores de sequenciamento dos módulos (1800s vs 3600s)	69
Tabela 16 - Indicadores de volume de madeira e transporte (Instância 4 – Classe 2).....	69
Tabela 17 - Indicadores operacionais de transporte e frota (Classes 1-5)	71
Tabela 18 - Comparação entre indicadores operacionais - caso base e cenário com +100% de setup.....	72
Tabela 19 - Indicadores principais caso base e cenários de distúrbio (Classes 6 - 10)	74
Tabela 20 - Comparação entre indicadores operacionais (Classes 2 e 7).....	76

SUMÁRIO

1. INTRODUÇÃO	1
2. REVISÃO DA LITERATURA	3
2.1 Otimização da cadeia de abastecimento no setor florestal	3
2.2 Problemas clássicos de otimização na cadeia de abastecimento florestal.....	8
2.2.1 <i>Problema de alocação de veículos</i>	<i>9</i>
2.2.2 <i>Problema de roteamento de veículos.....</i>	<i>9</i>
2.3 Sequenciamento de recursos operacionais	11
2.3.1 <i>Sequenciamento em modelos de dimensionamento e programação da produção ..</i>	<i>12</i>
2.3.2 <i>Sequenciamento como decisão intertemporal</i>	<i>12</i>
2.3.3 <i>Sequenciamento de frentes operacionais em sistemas agroindustriais.....</i>	<i>13</i>
3. INDÚSTRIA FLORESTAL NO BRASIL – PAPEL E CELULOSE	16
3.1 Panorama Florestal Brasileiro	16
3.2 Produção de Papel e Celulose no Brasil.....	17
3.3 Desafios do abastecimento de madeira para o setor de transporte florestal.....	19
3.3.1 <i>Custos de transporte florestal.....</i>	<i>20</i>
3.4 Soluções para o abastecimento de madeira: logística e tecnologia	22
3.5 A matéria-prima	24
4. A CADEIA DE ABASTECIMENTO DE MADEIRA	26
4.1 Operações do abastecimento.....	26
5. CONTEXTUALIZAÇÃO DO PROBLEMA E MODELAGEM MATEMÁTICA.....	33
5.1 Caracterização das operações de abastecimento abordadas nesta pesquisa.....	33
5.2 Modelagem matemática	36
5.2.1 <i>Parâmetros iniciais, índices e conjuntos</i>	<i>36</i>
5.2.2 <i>Demais parâmetros.....</i>	<i>37</i>
5.2.3 <i>Variáveis de decisão</i>	<i>38</i>
5.2.4 <i>Função objetivo</i>	<i>39</i>
5.2.6 <i>Conjuntos de restrições</i>	<i>39</i>
5.2.7 <i>Modelo matemático</i>	<i>42</i>
6. EXPERIMENTOS COMPUTACIONAIS.....	45
6.1 Geração das instâncias de testes.....	45
6.1.1 <i>Dimensões do problema e estrutura temporal</i>	<i>46</i>
6.1.2 <i>Oferta de madeira nas fazendas</i>	<i>47</i>
6.1.3 <i>Capacidade dos módulos e tempos de carregamento</i>	<i>47</i>
6.1.4 <i>Distâncias, tempos e custos de deslocamento entre as fazendas</i>	<i>48</i>
6.1.5 <i>Distâncias fazenda-fábrica e parâmetros de viagem</i>	<i>49</i>
6.1.6 <i>Geração de demanda da fábrica</i>	<i>49</i>
6.1.7 <i>Ajuste automático de oferta e viabilidade estrutural</i>	<i>50</i>
6.1.8 <i>Capacidade de transporte por período e disponibilidade operacional</i>	<i>50</i>
6.2 Organização das classes de instâncias para os testes computacionais.....	52

6.2.1 Classes de escala crescente (Classes 1 a 5)	53
6.2.2 Classes com tempo ampliado e classes com distúrbios (Classes 6-10)	57
6.3 Resultados e discussões	58
6.3.1 Desempenho computacional e escalabilidade (Classes 1-5)	59
6.3.2 Impacto do tempo de resolução na qualidade da solução (Classe 2)	62
6.3.3 Padrões de alocação e sequenciamento dos módulos de carregamento: análise detalhada da instância 4 da Classe 2	65
6.3.4 Indicadores operacionais de transporte e utilização da frota de caminhões.....	70
6.3.5 Impacto do aumento do tempo de setup sobre o sequenciamento dos módulos.....	72
6.3.6 Análise da sensibilidade a diferentes distúrbios operacionais (Classes 6 a 10).....	74
6.3.7 Consolidação e interpretação dos principais achados	77
7. COMENTÁRIOS FINAIS E PROPOSTAS FUTURAS	79
7.1 Principais contribuições	79
7.2 Limitações do estudo	79
7.3 Propostas para trabalhos futuros.....	80
REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	82
APÊNDICE A – Uso de ferramentas de inteligência artificial.....	89

1. INTRODUÇÃO

O abastecimento de madeira é uma das operações mais críticas da cadeia produtiva da indústria de celulose, pois conecta as operações florestais às etapas industriais, condicionando diretamente a continuidade e estabilidade do processo produtivo.

Em geral, as empresas do setor florestal enfrentam decisões em diferentes níveis – estratégico, tático e operacional – sendo este último o mais crítico no contexto de entregas diárias. No dia a dia operacional, essas decisões envolvem a coordenação entre frentes de carregamento, disponibilidade de recursos e atendimento às necessidades imediatas da fábrica, exigindo respostas rápidas e consistentes às condições operacionais vigentes.

Neste contexto e considerando a realidade do setor de celulose e papel, torna-se necessária a contínua tomada de decisões de curto prazo, a fim de garantir o fornecimento adequado de madeira às fábricas. Essas decisões envolvem, em especial, a alocação e sequenciamento temporal de módulos de carregamento de madeira nas fazendas, recursos cujos deslocamentos e interações com o transporte até a fábrica resultam em custos logísticos significativos ao longo do horizonte de planejamento.

De acordo com Hoff et al. (2010), a necessidade de reduzir os custos logísticos tem impulsionado ajustes frequentes e mais precisos na capacidade de transporte. Além disso, questões ambientais e mudanças climáticas vêm se tornando fatores determinantes na busca por maior eficiência operacional. Como consequência, observa-se uma tendência contínua de inovação e aprimoramento nos serviços de transporte, uma vez que a priorização da eficiência contribui para a identificação e eliminação de desperdícios, refletindo diretamente na lucratividade das empresas do setor florestal.

A operação de transporte de madeira deve ser tratada como um ciclo fechado, pois a cada carga transportada, um novo ciclo se inicia para o caminhão (EPSTEIN et al., 2007). Diversos fatores influenciam a eficiência do transporte, incluindo tempos de carregamento, rotas internas, número de caminhões direcionados a cada local, períodos de parada para refeição, troca de turno e manutenção. Esses aspectos são interdependentes e podem gerar tempos não produtivos, como a formação de filas, comprometendo o desempenho global da operação (MUNDIM, 2009).

Um dos principais desafios na operação de transporte florestal é o dimensionamento adequado da frota de caminhões para atender à demanda da fábrica em diferentes horizontes de tempo (diário, semanal e mensal). Esse dimensionamento, quando realizado predominantemente com base na experiência prática, pode carecer de embasamento técnico,

resultando em desequilíbrios operacionais, subutilização de recursos ou elevação dos custos logísticos (SILVA, 2015).

Tradicionalmente, o planejamento e a programação de transporte florestal têm sido abordados na literatura por meio da alocação de caminhões às frentes de carregamento e da definição das rotas diárias da frota. Conforme discutido por Epstein et al. (2007), o destino das cargas pode ser modelado como um problema de fluxo em rede, no qual as variáveis de decisão representam o fluxo da madeira desde os módulos de carregamento até a fábrica, com o objetivo de minimizar os custos totais de transporte. Contudo, na prática operacional de curto prazo, tais decisões são fortemente condicionadas pela alocação e sequenciamento dos módulos de carregamento, que determinam quais fazendas estarão aptas a expedir madeira em cada período, e, conseqüentemente, quais fluxos de transporte poderão ser realizados, conforme discutido por Junqueira e Morabito (2019), no contexto do planejamento e colheita da cana-de-açúcar.

Diante desse cenário, o objetivo desta pesquisa é propor uma abordagem de modelagem matemática para o planejamento operacional do abastecimento florestal, com foco no sequenciamento e na alocação temporal dos módulos de carregamento, integrando decisões de transporte e utilização de estoques de pátio. Busca-se, assim, otimizar o uso dos recursos disponíveis para minimizar os custos operacionais, ao mesmo tempo em que se atende às necessidades periódicas da fábrica quanto aos diferentes tipos de madeira requeridos para a produção de celulose. A partir das decisões em relação aos módulos de carregamento e ao volume a ser transportado em cada período, o modelo permite dimensionar a frota de caminhões efetivamente necessária para realizar o transporte até a fábrica. Experimentos computacionais foram realizados, com o apoio do *solver* CPLEX, considerando diferentes classes de instâncias e perturbações em parâmetros, visando validar o modelo proposto, além de avaliar a sua sensibilidade. Os resultados obtidos são apresentados.

Este trabalho está estruturado da seguinte forma: o Capítulo 2 apresenta a revisão da literatura, destacando os principais estudos relacionados à otimização do abastecimento florestal; o Capítulo 3 descreve o setor florestal brasileiro e a indústria de celulose e papel; o Capítulo 4 detalha a cadeia de abastecimento de madeira, com foco na indústria de celulose; o Capítulo 5 apresenta a descrição do problema e a modelagem matemática proposta; o Capítulo 6 discute os experimentos computacionais e os resultados obtidos. Por fim, o Capítulo 7 apresenta as conclusões e as perspectivas para trabalhos futuros.

2. REVISÃO DA LITERATURA

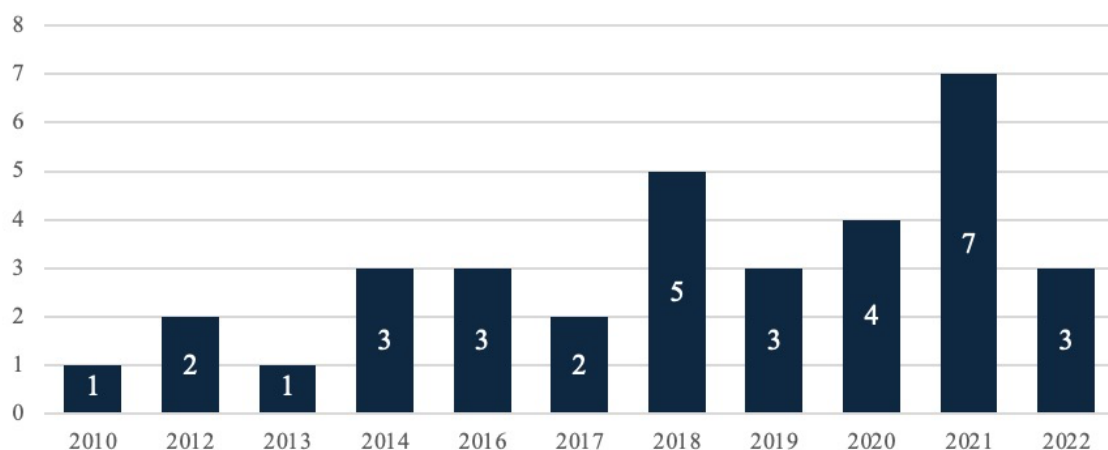
Com o intuito de assimilar os principais desafios encontrados acerca do abastecimento de madeira para a fabricação de celulose e papel, a revisão da literatura busca também abordar avanços em pesquisas, a partir da utilização de técnicas de otimização, para o entendimento e resolução dos problemas gerados pela cadeia de abastecimento florestal.

Embora não sejam tão numerosos, pesquisas sobre abastecimento de madeira para fábricas de papel e celulose têm aumentado nos últimos anos. As soluções para problemas de transporte e roteirização geralmente utilizam métodos conhecidos, como heurísticas e programação linear inteira mista. Alguns autores abordam a otimização de toda a cadeia de abastecimento, desde o corte da madeira até a entrega na fábrica, enquanto outros se concentram em partes específicas da cadeia de suprimentos, como será detalhado nesta seção.

2.1 Otimização da cadeia de abastecimento no setor florestal

Ao longo dos últimos 15 anos, o número de artigos que abordam o abastecimento, do ponto de vista do setor florestal, de indústrias que utilizam madeira como matéria-prima, cresceu consideravelmente. Uma busca por pesquisas que se relacionam com a otimização do abastecimento florestal nas bases ScienceDirect e Scopus mostra uma clara tendência de aumento das produções científicas sobre o tema, como pode ser visto no gráfico apresentado na Figura 1.

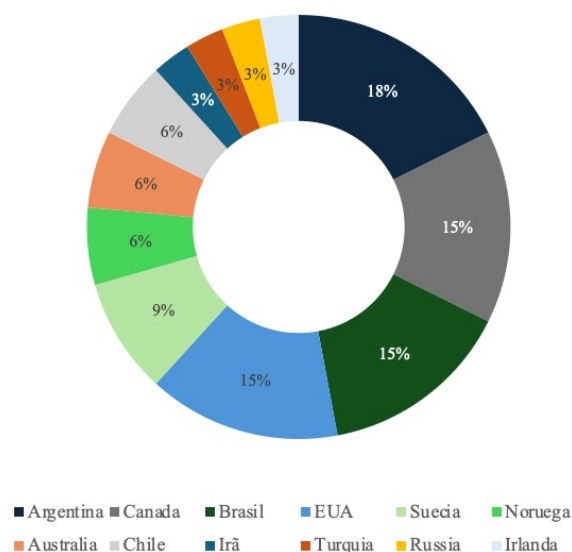
Figura 1 - Publicações de artigos ao longo do tempo sobre a otimização florestal



Fonte: Elaborado pela autora, 2025.

O gráfico da Figura 2 apresenta uma distribuição por países das pesquisas que relacionam técnicas de otimização ao planejamento do abastecimento florestal.

Figura 2 - Principais países com pesquisas sobre a otimização do abastecimento florestal



Fonte: Elaborado pela autora, 2025.

Os gráficos apresentados nas Figuras 1 e 2 mostram o número de artigos que estão de fato relacionados à otimização de alguma das operações da cadeia de abastecimento florestal e que apresentam modelos matemáticos e técnicas de otimização para a resolução dos problemas considerados.

Nesta pesquisa, observou-se uma elevada participação de publicações de autores afiliados a instituições argentinas na literatura sobre otimização aplicada ao setor florestal, representando 18% do total analisado. Em seguida, destacam-se publicações de autores vinculados a instituições do Canadá, do Brasil e dos Estados Unidos, cada uma correspondendo a aproximadamente 15% do total.

Observa-se, contudo, que a maior parte dos estudos conduzidos por autores afiliados a instituições argentinas concentra-se em problemas relacionados ao transporte e à colheita florestal voltados à indústria de serrarias e de produtos de madeira. Por outro lado, os trabalhos desenvolvidos por autores vinculados a instituições canadenses e brasileiras tendem a focar predominantemente na cadeia de suprimento de madeira destinada à produção de celulose.

Bordón et al. (2018), por exemplo, tratam do problema de roteamento de veículos no transporte de madeira para as fábricas, destacando as diferenças em relação ao problema de roteamento tradicional, pois, no caso em questão, geralmente, o caminhão é totalmente carregado no primeiro ponto, retorna à fábrica em seguida e pode retornar àquele ponto para uma nova carga ou para outro ponto. Os autores observam que a maioria dos trabalhos científicos resolvem o problema utilizando um procedimento inicial para gerar rotas viáveis e, posteriormente, um método heurístico para obter uma solução inteira como em Palmgren et al.

(2003, 2004), Rey et al. (2009), Rix et al. (2011, 2014) e El Hachemi et al. (2013, 2014). Neste contexto, os autores propõem um modelo de programação linear inteira mista para incorporar decisões de alocação de produtos para instalações e roteamento da frota de caminhões. Segundo os autores, a abordagem permite obter a solução ótima em um tempo computacional reduzido.

Han et al. (2018) exploram a otimização do transporte e processamento de madeira para biomassa em uma rede viária em formato de árvore, comparando três estratégias: trituração no local de extração, em um pátio centralizado ou em um ponto intermediário antes do transporte. Para avaliar a alternativa mais eficiente, os autores desenvolveram um modelo de programação inteira mista (MIP) integrado a um algoritmo de caminho mínimo, considerando custos de mobilização e rotas de menor custo entre pares de nós. Implementado no CPLEX, o modelo revelou que a trituração centralizada no pátio pode reduzir os custos operacionais em até 7% para áreas menores e 11% para áreas maiores, destacando-se como uma solução otimizada para a tomada de decisões no setor florestal.

Dos Santos et al. (2019), por sua vez, tratam dos custos relacionados ao correto sequenciamento de corte da madeira e posterior transporte e sobre como representam um fator chave para a viabilidade de investimentos no setor florestal. Este estudo destaca que harmonizar essas operações é complexo, exigindo muitas decisões rápidas com recursos limitados. Os autores propõem um modelo de otimização para a programação diária da colheita baseado na demanda diária por diferentes produtos nos centros de demandas, levando em consideração os custos de transporte, que foi resolvido utilizando o Gurobi. A partir dos testes computacionais, concluem que os maiores custos em todos os cenários testados vêm do transporte da madeira das fazendas para as fábricas, representando cerca de 75% do custo total. O modelo proposto se mostrou efetivo e capaz de realizar a diferenciação entre os fatores componentes do custo total, facilitando o entendimento de todos os custos envolvidos na operação.

Ferreira et al. (2019) abordam a otimização do abastecimento de madeira em uma indústria brasileira de celulose envolvendo fomentos florestais (parceria entre produtores e empresas florestais), cujo objetivo principal consiste em identificar as melhores regiões para a alocação desses projetos de parceria. Eles modelam e avaliam seis cenários baseados nos custos totais da função objetivo, compostos por média de custo da madeira, da distância de transporte e do tempo de processamento, através de uma abordagem de programação linear inteira mista. Segundo os autores, os resultados obtidos foram satisfatórios e fornecem dados que facilitam a atualização das estratégias de expansão florestal das companhias de forma periódica de acordo com a variação da demanda por madeira, variação de custos operacionais e disponibilidade de novas áreas.

Li Luo et al. (2021) tratam da maximização dos benefícios de adotar uma integração vertical de todas as etapas da cadeia de suprimento florestal, visto que, em muitos casos, as operações florestais e as operações de processamento de matéria-prima ocorrem de maneiras desconexas entre planejamento e operação. O artigo propõe um modelo de programação linear inteira mista para o planejamento estratégico de longo prazo integrado com as operações de processamento de nível tático (meses e semanas). Apesar de não abordar exatamente o transporte de madeira para celulose, traz uma visão interessante sobre a importância da integração entre o planejamento estratégico e a execução, saindo de um horizonte de 40 anos e culminando nas operações diárias. O modelo foi implementado na linguagem Python e resolvido utilizando o Gurobi. Os testes computacionais apresentados mostram uma economia em torno de 20% a partir da abordagem integrada, que considera decisões florestais e industriais, como planos de colheita, padrões de corte, planos de venda, planos de transporte e planos de compra de madeira.

Bordón et al. (2021) abordam o planejamento tático do transporte de madeira, o roteamento de veículos e a alocação deles através do método de Geração de Colunas. Nesta abordagem, apenas um subconjunto de rotas foi gerado, não sendo necessário explicitar todas as possíveis, o que diminui consideravelmente o número de variáveis do modelo. O problema apresentado, como alguns outros citados, foi modelado e implementado utilizando GAMS e o CPLEX e trouxe alguns padrões interessantes que podem ser interpretados sob a ótica gerencial no contexto do país em que o estudo foi desenvolvido, como a proposta de resolver simultaneamente o problema de atribuição de matéria-prima e roteamento de veículos em uma região de grande dificuldade de predição e assertividade de disponibilidade de matéria-prima.

Melchiori et al. (2022) também propõem um modelo de programação linear inteira mista e utiliza o CPLEX para sua resolução. O problema de transporte é considerado sob o ponto de vista da programação diária de caminhões que precisam abastecer várias plantas com diferentes tipos de madeira, oriundos de diferentes locais de corte (fazendas). Neste trabalho, uma frota homogênea de caminhões (todos com a mesma capacidade) é distribuída entre bases regionais, em que todos os caminhões devem começar e terminar a rota em suas bases e precisam respeitar as janelas de tempo. Os autores observam que, em todos os contextos, resolver o problema de programação dos caminhões é extremamente desafiador devido à sua característica combinatória.

Observa-se que, apesar de os resultados das pesquisas nas bases científicas datarem de períodos anteriores a 2010, a maior concentração de artigos ocorre entre 2018 e 2022. Além disso, existem diversas abordagens para solucionar o problema do transporte florestal e ainda

há um considerável espaço para o desenvolvimento de novas pesquisas. Este é um problema complexo que pode ser tratado de várias maneiras, do nível estratégico até o operacional, buscando a otimização de todos os componentes da cadeia de abastecimento de madeira, ou de maneira segregada, focando especificamente nas operações em períodos mais curtos.

A Tabela 1 traz os principais estudos encontrados nas bases de dados utilizadas, destacando aspectos abordados por cada trabalho no contexto da otimização do abastecimento florestal e de problemas correlatos. A maior parte dos artigos propõe modelos com aplicação prática, evidenciando ganhos operacionais relevantes e confirmando o potencial de modelos de otimização como ferramentas de apoio às decisões gerenciais e operacionais no setor.

Tabela 1 – Principais estudos sobre otimização do abastecimento florestal

Artigos	Multi per.	Corte	Aloc. de módulos	Transp.	Planej. industrial	Propõe modelo	Mét. Exato	Heur.	Aplic.
Wysocki et al. (2022)						X	X		X
Flatberg et al. (2018)						X	X		X
Bordón et al. (2018)	X			X		X	X		X
Vanzetti et al (2018)		X				X	X		X
Sarrazin et al. (2018)				X	X	X	X		X
Melchiori et al. (2022)				X		X	X		X
Araújo Júnior et al. (2017)				X		X	X		X
Baghizadeh et al. (2021)		X		X		X		X	X
Han et al. (2018)				X		X		X	X
Eker et al. (2021)		X		X		X	X		X
Dos Santos, et al. (2019)		X				X	X		X
Bellavenutte et al. (2020)		X				X	X		X
Fuentealba et al. (2019)		X				X	X		X
Naderializadeh et al. (2020)		X		X		X		X	X
Ferreira et al. (2019)		X		X		X	X		X
Greulich et al. (2014)				X		X	X		X
Kumar et al. (2012)				X		X		X	X
Lin et al. (2016)				X				X	
Flatberg et al. (2018)		X		X		X		X	X
Nørstebø et al. (2013)				X		X	X		X
Kong e Ronnqvist. (2015)		X		X		X		X	X
Acuna et al. (2012)	X			X		X		X	X
Murphy et al. (2010)		X		X		X		X	X
Frisk et al. (2016)		X				X		X	X
Bajgiran et al. (2016)						X		X	X
Vitale et al. (2021)				X		X		X	X
Li Luo et al. (2021)	X			X		X	X		X
Vanzetti et al. (2018)						X	X		X
Bordón et al. (2021)				X		X		X	X

Ghotb et al. (2022)	X	X	X	X
Bordón et al. (2018)	X	X	X	X
Sfeir et al. (2019)		X	X	X

Fonte: Elaborado pela autora, 2025.

Apesar da diversidade de abordagens encontradas na literatura, observa-se que grande parte dos estudos se concentra em decisões relacionadas ao transporte e roteamento de veículos, tratando os pontos de carregamento como previamente definidos ao longo do horizonte de planejamento. No contexto do planejamento operacional de curto prazo, entretanto, a definição de quais fazendas estarão aptas a expedir madeira em cada período, depende da alocação e do sequenciamento de recursos operacionais móveis, como os módulos de carregamento. Esse aspecto, que condiciona diretamente as decisões de transporte e o atendimento da demanda industrial, ainda é pouco explorado nos estudos existentes.

2.2 Problemas clássicos de otimização na cadeia de abastecimento florestal

A cadeia de abastecimento florestal é composta por quatro operações principais, sendo elas: corte, empilhamento, carregamento e transporte. O Capítulo 4 traz uma descrição detalhada sobre tais operações. Este trabalho aborda, de forma integrada, as operações de carregamento de madeira e transporte das fazendas florestais para a fábrica, visando atender a uma demanda pré-determinada, além de considerar as condições operacionais do sistema e a gestão de estoques ao longo do tempo.

No Capítulo 5, um modelo de programação inteira mista (MILP) é proposto para realizar a alocação e o sequenciamento dos módulos de carregamento nas fazendas, integrado ao planejamento da operação de transporte até a fábrica, considerando restrições operacionais.

A cadeia de abastecimento florestal possui uma série de problemas de otimização que podem ser abordados sob diferentes horizontes de planejamento e níveis decisórios. No nível operacional, destacam-se problemas relacionados à alocação de recursos, sequenciamento de tarefas, dimensionamento de lotes e transporte. Tipicamente, esses problemas têm sido tratados na literatura por meio de modelos de alocação de veículos e de roteamento, os quais fornecem importantes contribuições metodológicas, mas nem sempre capturam de forma adequada a dinâmica observada na prática.

Nesta seção, são discutidos problemas clássicos de otimização, amplamente utilizados na literatura, que serviram como base para o modelo matemático proposto. O intuito é contextualizar suas aplicações no setor florestal e evidenciar suas limitações quando se trata do planejamento operacional do abastecimento florestal com foco em sequenciamento de módulos de carregamento.

2.2.1 Problema de alocação de veículos

O Problema de Alocação de Veículos (PAV) consiste em definir movimentos de uma frota de veículos que realiza viagens entre terminais geograficamente dispersos, ao longo de um horizonte de planejamento finito multi períodos, a fim de atender aos serviços de transporte solicitados. Os veículos podem realizar viagens (carregados ou vazios) ou permanecer em um terminal entre períodos, respeitando restrições de disponibilidade e capacidade.

Vasco e Morabito (2016), bem como Cruz et al. (2020) e Cruz et al. (2022) apresentam formulações para o PAV baseadas em programação linear inteira, modelados como extensões de problemas de fluxo de custo mínimo em redes. Nessas abordagens, as demandas de transporte são representadas por arcos ou nós em uma rede, e as decisões de alocação visam maximizar o lucro ou minimizar os custos associados às viagens carregadas e vazias.

No contexto florestal, o PAV tem sido utilizado para representar decisões relacionadas à alocação de caminhões entre diferentes frentes de carregamento e períodos, considerando restrições de disponibilidade da frota de atendimento das demandas da fábrica. Entretanto, essas abordagens assumem implicitamente que os pontos de carregamento estão previamente definidos e disponíveis ao longo do horizonte de planejamento, o que nem sempre reflete a realidade operacional do setor.

Na prática, a disponibilidade das frentes de carregamento é condicionada à presença de módulos de carregamento, recursos móveis e limitados que precisam ser alocados e sequenciados entre as fazendas ao longo do tempo. Assim, embora o PAV forneça uma base conceitual relevante para a alocação de recursos, ele não contempla explicitamente o sequenciamento temporal de recursos operacionais móveis, como os módulos de carregamento, que exercem papel central no planejamento operacional do abastecimento florestal.

Dessa forma, no problema abordado neste trabalho, a alocação de caminhões é fortemente condicionada pela alocação dos módulos de carregamento nas fazendas, o que exige uma modelagem mais abrangente que integre essas decisões de forma explícita.

2.2.2 Problema de roteamento de veículos

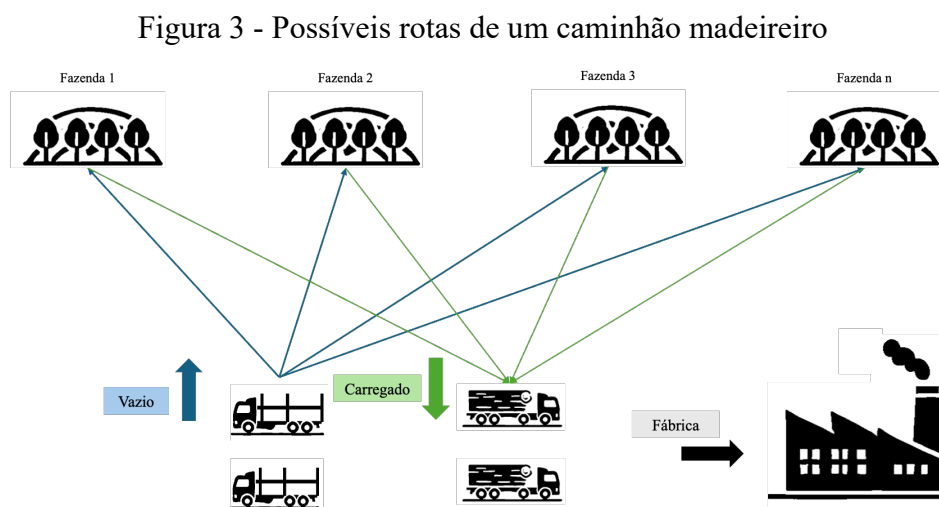
O problema de roteamento de veículos (PRV) consiste em definir rotas para uma frota de veículos, normalmente partindo de um depósito central, de modo a atender um conjunto de clientes com o menor custo possível de transporte, respeitando condições de capacidade, tempo e janelas de atendimento (ARENALES et al., 2015). Trata-se de um problema clássico de otimização combinatória, amplamente estudado na literatura e conhecido por sua elevada complexidade computacional.

No transporte florestal o PRV apresenta características específicas que o diferenciam do problema clássico. Conforme destacado por Bórdon et al. (2018) e Monti et al. (2020), as rotas geralmente envolvem ciclos simples, nos quais os caminhões se deslocam da fábrica ou de uma base até a fazenda, é totalmente carregado e retorna à fábrica, podendo repetir o ciclo mais de uma vez dentro de um mesmo período. Essa dinâmica reduz a relevância da definição detalhada de rotas complexas, típica do PRV clássico, e desloca o foco para o número de viagens realizadas e para o tempo de ciclo associado a cada fazenda.

Diversos trabalhos abordam o transporte florestal a partir de modelos de roteamento, utilizando heurísticas métodos exatos ou abordagens híbridas (PALMGREN et al., 2003, REY et al., 2009; BORDÓN et al., 2021). Embora esses modelos sejam eficazes para determinadas aplicações, eles partem, em geral, do pressuposto de que os pontos de carregamento estão previamente definidos e disponíveis, não considerando explicitamente as decisões relacionadas à movimentação e ao sequenciamento dos módulos de carregamento.

No planejamento operacional de curto prazo, contudo, verifica-se que a decisão sobre quais fazendas estarão aptas a expedir madeira em cada período precede a definição do transporte propriamente dito. Essa decisão é determinada pela alocação dos módulos de carregamento, que, ao serem posicionados em uma fazenda habilitam a realização das viagens de transporte. Assim, o transporte passa a ser uma consequência direta do sequenciamento desses módulos, estando sujeito a restrições de tempo de ciclo, disponibilidade de caminhões e capacidades operacionais.

A Figura 3 exemplifica e ilustra as possíveis rotas de um caminhão conforme a discussão apresentada.



Fonte: Elaborado pela autora, 2025.

A análise da literatura evidencia que os problemas de alocação e roteamento de veículos desempenham papel relevante no estudo do transporte florestal, fortalecendo importantes fundamentos metodológicos para a modelagem de sistemas logísticos. No entanto, tais abordagens tratam, em geral, o transporte como a decisão central, assumindo implicitamente a disponibilidade contínua dos pontos de carregamento.

Na realidade operacional do abastecimento florestal diário observa-se que a decisão central está associada à alocação e ao sequenciamento temporal dos módulos de carregamento nas fazendas, uma vez que esses recursos são limitados, móveis e apresentam custos significativos de deslocamento.

Assim, a próxima seção traz uma abordagem de sequenciamento fora do setor madeireiro e de indústrias de celulose, mas que serviram de base para a construção do modelo proposto no Capítulo 5.

2.3 Sequenciamento de recursos operacionais

O sequenciamento de recursos operacionais constitui uma classe relevante de problemas de planejamento de curto prazo, em que a decisão central envolve a definição da ordem temporal de utilização de recursos compartilhados e limitados ao longo de um horizonte de planejamento.

Diferente de problemas de alocação, nos quais geralmente se decide apenas se um recurso é atribuído a uma determinada atividade, os problemas de sequenciamento incorporam explicitamente a dependência temporal entre decisões e se consideram custos e restrições associados à troca, permanência e/ou deslocamento desses recursos entre períodos consecutivos.

Em variados contextos produtivos e logísticos, o sequenciamento está diretamente associado à presença de custos de *setup*, custos de mudança de estado (ligado ou desligado) ou custos de deslocamento, que tornam a ordem das decisões um elemento estruturante do problema. Nesses casos, decisões locais tomadas em um período influenciam significativamente os custos e a viabilidade das decisões nos períodos subsequentes, exigindo uma modelagem integrada ao longo do horizonte de planejamento.

Embora não haja na literatura clássica a aplicação do problema de sequenciamento para abastecimento florestal em indústrias de celulose, há várias abordagens de outros tipos de indústria que fornecem uma base conceitual sólida para o tratamento de problemas nos quais

recursos compartilhados precisam ser sequenciados ao longo do tempo. Nas subseções seguintes, comenta-se de forma ampla os trabalhos já existentes e seus principais destaques.

2.3.1 Sequenciamento em modelos de dimensionamento e programação da produção

Transformar a demanda de clientes em ordens de produção de forma a minimizar custos de *setup* ou troca de produtos e estoque tem sido um tópico de discussão intensiva ao longo das últimas décadas, de acordo com Fleischmann e Meyr (1997) e é justamente isso que o GLSP (“*General Lotsizing and Scheduling Problem*”, em português, “Problema Geral de Dimensionamento de Lotes e Sequenciamento”) busca resolver. O GLSP consiste em determinar tamanhos de lotes contínuos de vários produtos e então sequenciá-los em uma única máquina sujeita a restrições de capacidade, assim demandas determinísticas e dinâmicas, dadas em um horizonte finito de planejamento devem ser atendidas sem geração de acúmulo, de maneira a minimizar o estoque e custos de *setup* dependentes de sequência (FLEISCHAMANN e MEYR, 1996).

Meyr (2001) aborda o dimensionamento de lotes e sequenciamento de vários produtos em linhas de produção paralelas, caso em que a demanda de cada tipo de produto precisa ser satisfeita em tempo hábil e o limite de capacidade de cada linha precisa ser respeitado. Como os tempos de *setup* são dependentes do sequenciamento, a capacidade de produção disponível em determinada linha será conhecida apenas quando o tamanho e a sequência dos lotes estiverem definidos, dessa forma, o dimensionamento de lotes e o sequenciamento precisam ser feitos de maneira simultânea.

O GLSP e suas extensões, do ponto de vista da modelagem matemática, são formulados como problemas de programação inteira mista. Neles, as variáveis binárias controlam a ativação de *setups* e as variáveis contínuas representam quantidades produzidas ou estocadas. Wolsey (1997) traz ainda um fator extremamente sensível nesses casos de sequenciamento, que é o tempo, e como abordar sua modelagem utilizando formulações com indexações por tempo.

Como as indexações por tempo representam parte fundamental de problemas de sequenciamento, a Subseção 2.3.2 será utilizada para explicações sobre as formas de tratá-lo para a resolução dos problemas abordados.

2.3.2 Sequenciamento como decisão intertemporal

Meyr (2001) propõe uma abordagem para o sequenciamento e o dimensionamento de lotes baseada na divisão do horizonte de planejamento em intervalos de tempo mais amplos, denominados macro-períodos. Essa estrutura é adotada em função da possibilidade de variação

irrestrita do número de lotes ou produtos produzidos em cada período. Para esse fim, o autor utiliza o modelo GLSPST (*General Lot-Sizing Problem with Sequence-Dependent Setup Times*), que incorpora tempos de setup dependentes da sequência entre produtos.

Embora o GLSPST seja descrito como uma generalização do modelo DLSPSD (*Discrete Lot-Sizing and Scheduling Problem with Sequence-Dependent Setup Times*), proposto por Solomon et al. (1997), as duas abordagens apresentam diferenças conceituais importantes. No DLSPSD, o horizonte de planejamento é dividido em intervalos de tempo curtos, denominados micro-períodos, nos quais vigora a propriedade de produção do tipo tudo ou nada: em cada micro-período, um único produto é fabricado durante todo o intervalo ou nenhuma produção ocorre.

Vale ressaltar que Meyr (2001) faz uma extensão do GLSPST para GLSPPL (*General Lotsizing and Scheduling Problem for Parallel Production Lines*), que é o mesmo modelo, porém aplicado em casos em que há simultaneidade entre dimensionamento de lotes e sequenciamento de vários produtos em linhas de produção paralelas e não idênticas

Nesse sentido, apesar das diferenças na discretização temporal e na representação das decisões produtivas, os modelos podem ser vistos como complementares, uma vez que ambos buscam capturar a dependência sequencial dos setups e a interdependência temporal das decisões, oferecendo alternativas de modelagem adequadas a diferentes níveis de agregação do planejamento. Do ponto de vista metodológico, essas abordagens evidenciam a importância de penalizar as mudanças frequentes de estado, incentivando soluções mais estáveis ao longo do horizonte de planejamento.

Esses conceitos são particularmente relevantes para problemas de planejamento operacional em que recursos limitados precisam ser utilizados de forma coordenada ao longo do tempo, servindo como base conceitual para extensões que incorporam, adicionalmente, aspectos específicos do contexto aplicado, como a mobilidade espacial dos recursos.

2.3.3 Sequenciamento de frentes operacionais em sistemas agroindustriais

No setor agroindustrial, o sequenciamento de frentes operacionais tem sido reconhecido como uma decisão central no planejamento de curto prazo, especialmente em operações caracterizadas por recursos compartilhados, elevados custos de troca e forte dependência temporal entre decisões. Diferentemente de abordagens que tratam apenas a alocação pontual de recursos, esses problemas exigem a definição explícita da ordem temporal de utilização das frentes operacionais, uma vez que mudanças frequentes de local podem comprometer a eficiência global do sistema.

Junqueira e Morabito (2017) abordam o problema de sequenciamento de frentes de colheita de cana-de-açúcar por meio de um modelo de programação inteira mista, no qual as frentes são tratadas como recursos limitados que devem ser alocados e sequenciados entre diferentes áreas agrícolas ao longo do horizonte de planejamento. A decisão central do modelo consiste em determinar em quais períodos cada frente deve operar em cada área, considerando custos associados à troca de frentes, capacidades operacionais e a necessidade de atendimento da demanda industrial.

Do ponto de vista da modelagem matemática, o problema é estruturado de forma semelhante aos modelos clássicos de sequenciamento intertemporal, incorporando variáveis binárias que representam a alocação das frentes por período e penalizações associadas à mudança frequente de local. A formulação busca equilibrar a flexibilidade operacional, necessária para atender variações de demanda, com a estabilidade da operação, incentivando a permanência das frentes nas áreas sempre que possível.

Em trabalhos subsequentes, Junqueira e Morabito (2018, 2019) estendem essa abordagem, incorporando aspectos adicionais da logística agrícola e da coordenação entre colheita e transporte. Através do modelo do Problema Geral de Dimensionamento de Lotes e Sequenciamento com Linhas de Produção Paralelas (GLSPPL) de Meyr (2001) – apontado como de difícil solução para grandes instâncias – os autores demonstram que o sequenciamento adequado das frentes operacionais exerce impacto significativo sobre os custos totais e o desempenho do sistema, reforçando que a sequência adotada ao longo do tempo é um elemento estruturante do planejamento operacional.

Esses estudos evidenciam que problemas agroindustriais de curto prazo podem ser eficientemente representados por modelos de programação inteira mista que integram decisões de alocação e sequenciamento de recursos, penalizando trocas excessivas e promovendo maior estabilidade operacional. Do ponto de vista prático, as frentes de colheita apresentam características análogas a outros recursos operacionais móveis, como módulos de carregamento, uma vez que são limitadas, deslocáveis e associadas a grandes custos de mudança entre locais de operação.

Assim, embora aplicados a um contexto distinto do setor florestal, os trabalhos de Junqueira e Morabito (2017, 2018, 2019) fornecem uma base metodológica consistente para a modelagem do sequenciamento de recursos operacionais no horizonte operacional diário, servindo como referência direta para a adaptação desses conceitos ao planejamento do abastecimento florestal.

O Capítulo 3 traz uma contextualização detalhada e atual sobre o panorama do mercado florestal brasileiro. Em seguida, o Capítulo 4 detalha a cadeia de abastecimento florestal, servindo de base para a modelagem matemática proposta no Capítulo 5.

3. INDÚSTRIA FLORESTAL NO BRASIL – PAPEL E CELULOSE

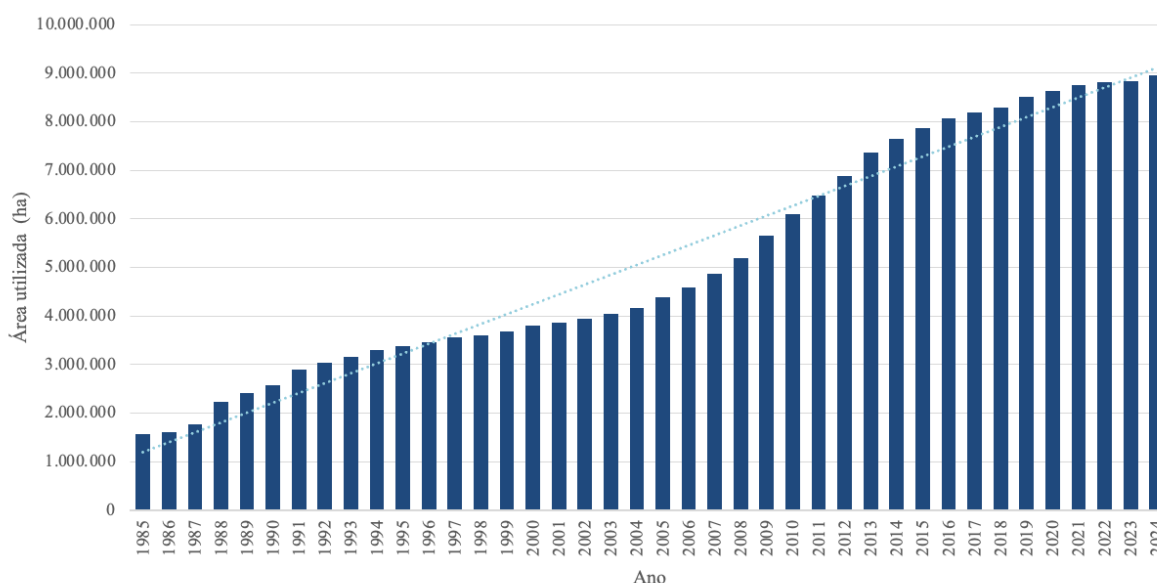
Neste capítulo o leitor será contextualizado sobre o panorama atual do mercado florestal no Brasil. Serão apresentados dados estatísticos e monetários do setor, buscando a exposição das circunstâncias deste estudo.

3.1 Panorama Florestal Brasileiro

Em 2015, a FAO, por meio de sua publicação FRA – *Global Forest Resources Assessment* informou que o total de florestas no mundo cobre cerca de 4 bilhões de hectares e que os cinco países com maiores áreas de florestas são Rússia, Brasil, Canadá, Estados Unidos e China, juntos representam mais de 54% de todas as áreas florestais do mundo.

Dados mais recentes confirmam a tendência observada e documentada pela FAO; a silvicultura, representada no Projeto MapBiomias (2025) pela classe Floresta Plantada, apresenta trajetória de expansão crescente ao longo das últimas décadas no Brasil. Conforme ilustrado na Figura 4, a área ocupada por florestas plantadas passou de aproximadamente 1,5 milhão de hectares em 1985 para cerca de 9 milhões de hectares em 2024, evidenciando o crescimento contínuo desse uso do solo no país.

Figura 4 – Evolução da área de floresta plantada no Brasil (1985 – 2024)



Fonte: Adaptado de MapBiomias, 2025.

Esse crescimento está associado à consolidação da indústria de base florestal, especialmente do setor de papel e celulose, bem como aos avanços tecnológicos que permitiram ganhos significativos de produtividade florestal. Apesar de ocupar uma parcela relativamente reduzida do território nacional, a floresta plantada desempenha papel estratégico no abastecimento industrial, demandando elevado nível de planejamento operacional e logístico.

No contexto do abastecimento florestal, a expansão das florestas plantadas ocorre sob restrições crescentes de uso da terra e exigências ambientais, o que reforça a necessidade de modelos de planejamento capazes de otimizar a utilização dos recursos disponíveis. Em particular, decisões de curto prazo relacionadas à alocação e ao sequenciamento de recursos operacionais tornam-se determinantes para assegurar a continuidade do suprimento de madeira às fábricas.

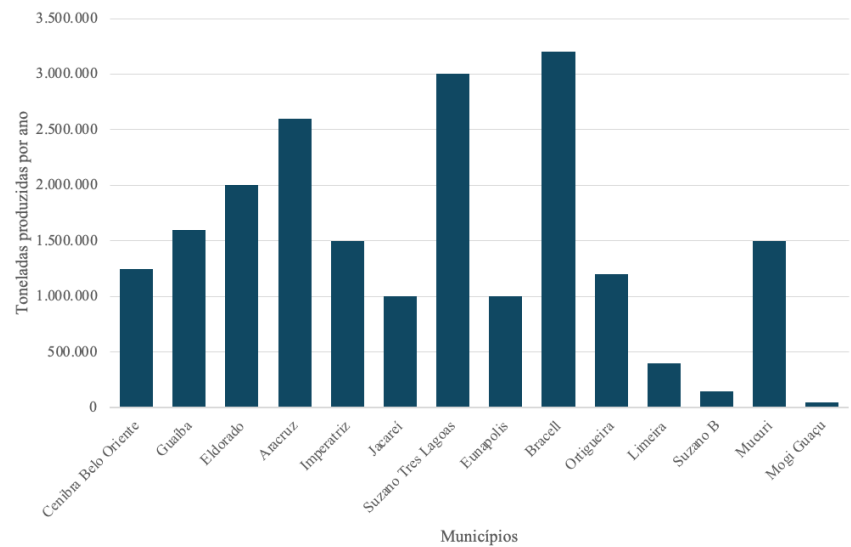
3.2 Produção de Papel e Celulose no Brasil

Ortega et al. (2024) trazem um panorama de crescente demanda para a celulose *kraft* branqueada que é uma celulose de alta qualidade, derivada de fibras de eucalipto e é utilizada como matéria-prima para produtos da linha *tissue*, papel para impressão e embalagens. De acordo com os autores, a alta demanda por celulose desse tipo se deve à sua capacidade de proporcionar os produtos mais macios da linha premium.

Ainda, para atingir o *mix* perfeito de maciez e força nesses produtos premium, a celulose *kraft* branqueada é geralmente misturada à celulose *kraft* branqueada de coníferas do norte, produzida principalmente no Canadá e isso faz com que ambos os países desempenhem papéis de grande importância na indústria de papel e celulose mundial (DE ASSIS et al., 2019; ORTEGA et al., 2024).

Além disso, Ortega et al. (2024) citam a participação da indústria brasileira como responsável por cerca de 60% da produção mundial da celulose *kraft* branqueada e trazem representações gráficas, que são apresentadas nas Figuras 5 e 6, para a compreensão da distribuição deste tipo de indústria no Brasil.

Figura 5 - Distribuição do mercado de celulose *kraft* branqueada no Brasil



Fonte: Adaptado de Ortega et al., 2024.

Como se observa na Figura 5, anualmente são produzidas mais de 20M de toneladas de celulose do tipo *kraft* branqueada no Brasil. A Figura 6 traz a distribuição das fábricas produtoras pelo país e, com isso, vê-se com mais clareza que, de fato há fábricas povoando praticamente todas as regiões do Brasil, o que corrobora a ideia de potência mundial no setor abordado.

Figura 6 - Distribuição geográfica do mercado de celulose *kraft* branqueada no Brasil



Fonte: Adaptado de Ortega et al., 2024.

Sendo assim, com a atual posição do Brasil no mercado mundial de celulose e a demanda crescente por matéria-prima para sua produção, o abastecimento de madeira é um fator preponderante. Como a logística e os fatores operacionais inerentes a esse processo tem impacto direto em custos e eficiência produtiva, a próxima seção aborda os principais desafios do transporte de madeira para a indústria de celulose no Brasil.

3.3 Desafios do abastecimento de madeira para o setor de transporte florestal

De acordo com o Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística (IBGE) (2024), em 2023 foram produzidas 24,3 milhões de toneladas de celulose no Brasil. Como não há dados diretos e específicos sobre o número de viagens de caminhões carregados de madeira para essa produção, uma simplificação, de acordo com o consumo específico teórico de madeira por tonelada de celulose foi feita. Moraes et al. (2014) apontaram que para cada tonelada de celulose são consumidos aproximadamente 4,05 m³ de madeira, considerando que cada caminhão carrega em média 55 m³ de madeira por viagem, isso resulta em 12, 2 toneladas de celulose por viagem. Com base nesta conta, estima-se que em 2024 foram feitas cerca de 2 milhões de viagens de fazendas para fábricas de celulose somente no Brasil. Para fins de comparação, em 2014, segundo o Conselho de Segurança Florestal da Columbia Britânica (2015), no Canadá, foram realizadas 1,4 milhão de viagens.

A Tabela 2 apresenta os dados relacionados à porcentagem de produção de celulose dos principais produtores do mundo, os dados foram levantados pela Indústria brasileira de Árvores (IBÁ) em 2021.

Tabela 2 - Ranking dos maiores exportadores de celulose do mundo em 2020

País	Produção (10⁶ t)	% da produção
Brasil	15,6	22,8%
Canadá	9,0	13,2%
Estados Unidos	7,8	11,5%
Indonésia	5,4	7,9%
Chile	4,7	6,9%
Finlândia	4,3	6,4%
Suécia	4,3	6,4%
Uruguai	2,6	3,8%
Rússia	2,4	3,6%
Portugal	1,3	2,0%

Fonte: IBA e FAO, 2021.

Como se verifica na Tabela 2, Brasil e Canadá foram os dois maiores exportadores de celulose no mundo no ano do estudo e o Brasil precisa realizar cerca de 600 mil viagens a mais que o Canadá para atender às demandas internas e externas por celulose anualmente.

Por outro lado, Ghotb et al. (2023) falam sobre a ampla utilização de caminhões para o transporte de madeira por todo o mundo e devido ao alto volume de abastecimento e espaço limitado, são necessários muitos caminhões para suprir a demanda. Contudo, o desembolso com transporte acaba se tornando responsável por cerca de 45% de todos os custos operacionais, como é o caso do Chile, de acordo com Audy et al. (2012).

No Brasil, segundo Alves et al. (2013), o transporte rodoviário corresponde a 59% da carga transportada e a grande maioria do transporte florestal é realizada através do transporte rodoviário devido à extensa malha viária, oferta de diferentes tipos de veículos, baixo valor de instalação se comparado a outros tipos de modais, além do histórico de tendência nacional, entre outros fatores.

Assim sendo, a otimização do planejamento de transporte no nível diário é de extrema importância para a redução de custos operacionais e pode trazer ganhos milionários para as empresas do setor.

É importante, ainda, ressaltar que apesar do transporte rodoviário ser o mais utilizado e objeto deste estudo, a utilização de outros modais também pode representar economia em custos operacionais. Os terminais intermodais, por exemplo, são parte de sistemas logísticos ainda mais complexos, geralmente conectam rodovias com ferrovias ou rios e existe a possibilidade de conexão com dutos subterrâneos ou aeroportos e isso permite a circulação de produtos com maior conveniência e visando maior economia (SOBRINHO, 2019). Porém, como há falta de infraestrutura e condições desiguais de oportunidades para o desenvolvimento de novos modais de transporte ao longo do país, para este estudo, apenas o transporte de madeira por rodovias e estradas de terra é considerado.

Neste ponto, vale lembrar que o transporte florestal, além de fundamental para o abastecimento das fábricas com matéria-prima, é responsável por uma parcela significativa dos custos de operação e para que seja possível compreender os impactos financeiros que permeiam o processo, a próxima subseção abordará custos de transporte de forma detalhada.

3.3.1 Custos de transporte florestal

Como parte dos desafios do abastecimento de madeira para o setor florestal é imprescindível falar sobre custos, uma vez que representam quase metade ou mais da metade do valor total de transporte. Antes disso, entretanto, é importante tratar dos componentes do

ciclo operacional de transporte, muito bem descrito por Alves et al. (2013). Segundo os autores, o transporte florestal pode ser subdividido em alguns componentes parciais, que são:

- 1) Viagem vazio – tempo consumido com o deslocamento do caminhão da fábrica até a fazenda ou ponto de carregamento.
- 2) Carregamento – tempo consumido para o carregamento do caminhão.
- 3) Viagem carregado – tempo consumido com o deslocamento do caminhão carregado até a fábrica.
- 4) Descarregamento – tempo consumido com o descarregamento da madeira na fábrica (momento de entrada até sua saída do local).
- 5) Pausas ou interrupções – eventos não mencionados que ocasionem a interrupção de qualquer uma das atividades descritas.

Além disso, também devem ser considerados os fatores de disponibilidade mecânica e eficiência operacional e os tipos de caminhões utilizados (bitrem – composição rodoviária de 6 eixos ou tritrem – composição rodoviária de 9 eixos). Por fim, é possível definir o ciclo que cada veículo consegue executar e quantas viagens por distância cada um é capaz de realizar.

Com base nas distâncias, é possível determinar os custos por tipo de caminhão, como feito em Alves et al. (2013) e mostrado na Tabela 3. Nela serão mostrados os custos por região, levando em consideração a eficiência operacional (EF) e a disponibilidade mecânica (DM).

Tabela 3 - Comparações entre veículos de transporte

Região	EF	DM	Custo (R\$/m ³ - /km)	CMF (R\$/m ³)
Guanhães – tritrem	89,12%	97,85%	0,201	27,14
Nova Era – bitrem	88,50%	97,80%	0,341	25,23
Rio Doce – tritrem	83,81%	94,09%	0,208	15,18
Rio Doce - bitrem	89, 58%	94,76%	0,249	18,18

Fonte: ALVES et al., 2013.

Os autores não compartilharam as distâncias exatas entre a fábrica e as localizações que foram alvo das análises, contudo, afirmam que Guanahães era a mais distante e que Rio Doce era a mais próxima e isso já é suficiente por hora e para esta breve análise, pois verifica-se que quanto mais distante, mais caro será o frete (reais por metro cúbico) e proporcionalmente, pelo volume de madeira que cada tipo de caminhão consegue transportar, quanto menor o caminhão e mais distante a madeira estiver, mais cara será a operação.

A Tabela 4 apresenta uma comparação entre os tipos de caminhão para esclarecer a afirmação sobre a distância e ao tipo de caminhão utilizado para o transporte com base nos dados da Tabela 3.

Tabela 4 - Comparações entre veículos de transporte

Tipo de caminhão	Qtde. de madeira (m³)	% do volume de tritrem	% do total de R\$/m³
Bitrem	44	70%	80%
Tritrem	63	100%	100%

Fonte: ALVES et al., 2013.

Observa-se que a quantidade de madeira que os caminhões do tipo bitrem podem carregar para atender às normas da legislação representa 70% do volume de madeira que um tritrem pode transportar e os custos relacionados ao transporte da madeira representam 80% dos de caminhões do tipo tritrem, ou seja, paga-se mais para transportar menos madeira. Casos de transporte com bitrens, todavia, são extremamente comuns devido a restrições de rodagem de caminhões maiores em certas rodovias ou certos pontos delas, condições internas de fazendas (subidas muito íngremes ou curvas muito fechadas).

Desse modo, para que a operação de transporte florestal seja viável, é extremamente importante que haja o balanceamento dos tipos de caminhões utilizados sempre que necessário, considerando-se todos os fatores operacionais influenciadores.

O desafio do transporte florestal engloba muitos fatores, como distâncias, números de caminhões, frentes disponíveis para carregamento, demanda diária da fábrica, entre outros, por isso, é importante analisar todos esses fatores de forma integrada e como um problema de transporte. Com isso, a busca por soluções tecnológicas e logísticas que otimizem o processo de logística florestal visando minimização de custos e atendimento da demanda torna-se indispensável. Na próxima seção serão apresentadas algumas das alternativas que têm sido desenvolvidas para aperfeiçoar o abastecimento de madeira.

3.4 Soluções para o abastecimento de madeira: logística e tecnologia

De acordo com Arenales et al. (2007), o Problema de Transporte consiste em determinar a forma mais eficiente de transportar produtos, de um único ou de diferentes tipos, de determinados centros de produção para os mercados consumidores, de forma a minimizar o custo total de transporte. Em sua formulação clássica, considera-se que a quantidade ofertada

em cada centro de produção e a quantidade demandada em cada mercado consumidor são conhecidas, devendo respeitar as restrições de oferta e atender integralmente à demanda.

No contexto do transporte florestal, os centros de produção correspondem às fazendas onde se instalam os módulos (ou frentes) de carregamento a partir das quais os caminhões retiram madeira para transporte até as fábricas, que desempenham papel de mercados consumidores. Esse fluxo apresenta particularidades operacionais que tornam o problema mais complexo do que sua formulação tradicional, uma vez que envolve múltiplos recursos, decisões interdependentes e restrições operacionais específicas.

Segundo Palmgren et al. (2003), o planejamento de abastecimento de madeira é um processo complexo que envolve muitas operações e recursos ao longo da cadeia produtiva. Epstein et al. (2007) complementam que as decisões relacionadas ao transporte de madeira ocorrem em diferentes horizontes de planejamento, exigindo uma gestão integrada e eficiente para garantir o atendimento da demanda industrial com custos controlados.

Na prática, observa-se que em grande parte das empresas do setor florestal brasileiro, o planejamento de transporte de madeira ainda é realizado de forma predominantemente manual, muitas vezes por meio de planilhas eletrônica, como o Microsoft Excel, sem o apoio de ferramentas formais de otimização ou, em alguns casos, sem o domínio conceitual dessas técnicas. Em contrapartida, algumas organizações utilizam softwares específicos ou pacotes computacionais com o objetivo de apoiar o processo decisório, buscando a maior eficiência operacional.

Nesse contexto, diversos estudos têm proposto abordagens baseadas em técnicas de otimização e heurísticas. Oliveira et al. (2022), por exemplo, realizam uma análise combinatória e testam três algoritmos não exatos em quatro estratégias operacionais, utilizando a teoria dos grafos e meta heurística. Os autores obtiveram resultados promissores e mais interessantes do que se comparados a cenários sem qualquer tipo de otimização. Entretanto, destacaram que métodos aproximados apresentam como principal desvantagem a ausência de garantias de otimalidade, enquanto modelos baseados em programação inteira mista, apesar de fornecerem soluções ótimas, tendem a apresentar elevada complexidade matemática e maior tempo de processamento.

Abordagens semelhantes são observadas em Monti et al. (2020), que propuseram um modelo de otimização de rotas denominado Forest Routing Optimization Model – FRoM – implementado no software LINGO. Os resultados indicaram ganhos de significativos de eficiência no transporte florestal, da ordem de 89,32%, demonstrando o potencial dessas ferramentas para o planejamento do setor logístico florestal.

Além disso, há soluções mais robustas que integram, modelos de otimização com informações geoespaciais. Na Suécia, Skogforsk desenvolveu o FlowOpt que integra um Sistema de Informação Geoespacial (GIS) com uma base de dados e utiliza um método heurístico baseado no algoritmo de *Tabu Search* cujo intuito é facilitar o processo de planejamento para gerentes e diretores em empresas do ramo florestal (FORSBERG et al., 2005).

Acuna (2017) também apresentou dois tipos de soluções para a otimização de transporte florestal, um é o MACPLAN e o outro é o FastTRUCK. O MACPLAN é uma solução desenvolvida para otimizar toda a cadeia de suprimento de madeira e possui soluções espaciais e temporais, levando em consideração o processo todo, desde o corte até o transporte. Já o FastTRUCK, é uma ferramenta mais específica para ser utilizada no dia a dia, é voltada para o controle operacional e funciona como um despacho dinâmico e pode ser usada em integração com a FastTRUCK.

Apesar dos resultados positivos apresentados na literatura e da aplicabilidade dessas ferramentas em diferentes contextos, observa-se que muitos dos estudos e sistemas desenvolvidos consideram cenários com escalas operacionais reduzidas quando comparados à realidade de grandes empresas do setor florestal brasileiro, particular o MACPLAN e o FastTRUCK, o número de caminhões considerados nos experimentos não ultrapassa 12 unidades, o que limita a generalização dos resultados para ambientes com maior complexidade operacional, múltiplos módulos de carregamento e elevados volumes de madeira a serem movimentados diariamente.

Assim, fica evidente a necessidade de modelos de apoio à decisão que sejam capazes de representar de forma realista as restrições operacionais do transporte florestal, conciliando rigor matemático, capacidade de escala e aplicabilidade prática, especialmente no contexto do planejamento operacional diário do abastecimento de madeira para indústria de celulose.

Na próxima seção, serão abordadas características da madeira destinada à indústria de celulose, incluindo os principais aspectos de consumo, os tipos de madeira e as propriedades que influenciam o rendimento do processo de produção da polpa.

3.5 A matéria-prima

Barrichelo e Brito (1979) destacam que a madeira é o produto mais valioso obtido de florestas, pois além de ser utilizada como combustível (geração de energia), também é importante matéria-prima para a produção de celulose para papel e derivados. Contudo, a

escolha da madeira de eucalipto como matéria-prima não se limita apenas à questão tecnológica, mas também econômica, uma vez que vários fatores precisam ser considerados, como porcentagem de fibras, características anatômicas, morfológicas, físicas e químicas, quantidade disponível, facilidade de acesso, possibilidade de regeneração em prazos médios e curtos e a existência de mercado para o tipo de celulose a ser produzido.

De acordo com Gomide et al. (2010), nos últimos anos o Brasil apresentou uma grande evolução na produtividade de florestas de eucalipto, que se mostrou o melhor tipo de madeira para a produção de celulose. Os estudos para caracterização de qualidade da madeira para a produção de polpa celulósica envolvem uma série de testes laboratoriais nos quais geralmente são determinados a densidade básica da madeira, o teor de lignina Klason, insolúvel e solúvel, o teor de extrativos solúveis em uma mistura álcool e tolueno ou em acetona. Todas essas características da madeira influenciam no processo produtivo de celulose, por exemplo, os autores verificaram que o teor de lignina e extrativos são características fundamentais de qualidade da madeira e afetam o rendimento do processo de polpação, enquanto a densidade básica da madeira está fortemente correlacionada com o consumo de madeira para a produção de celulose.

Sendo assim, quanto mais assertivo for o planejamento para a entrega dos tipos de madeira, mais estabilidade de produção e mais preparo para lidar com os possíveis gargalos inerentes ao tipo de madeira que se espera a fábrica terá e, conseqüentemente, será mais produtiva, como resumiram Segura et al. (2017).

O abastecimento de madeira para fábricas de celulose depende de um conjunto de operações heterogêneas que precisam acontecer de forma coordenada, sendo, portanto, um processo complexo e de grande sensibilidade. Assim, o planejamento das operações de corte, baldeio e transporte, bem como a escolha dos corretos tipos de madeira e a adoção de ferramentas tecnológicas são substanciais para a efetividade e sustentabilidade do suprimento de matéria-prima.

No Capítulo 4, será detalhada a cadeia de abastecimento de madeira florestal, com foco para o abastecimento da indústria de celulose. Na sequência, o Capítulo 5 descreve o problema objeto desta pesquisa e apresenta uma proposta de modelagem matemática.

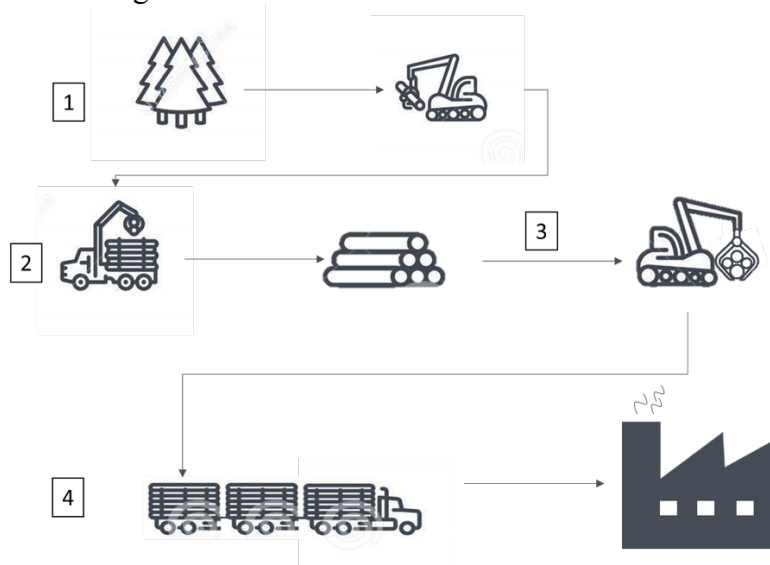
4. A CADEIA DE ABASTECIMENTO DE MADEIRA

Este capítulo tem caráter descritivo e visa contextualizar o sistema real de abastecimento de madeira, servindo de base para a modelagem matemática proposta no Capítulo 5.

4.1 Operações do abastecimento

O abastecimento de madeira é composto por quatro operações principais: (1) corte, (2) empilhamento (baldeio), (3) carregamento e (4) transporte. A Figura 7 representa a cadeia de abastecimento florestal, identificando cada uma dessas componentes, que possibilitam a entrega da madeira do campo para a fábrica.

Figura 7 – Cadeia de abastecimento florestal



Fonte: Rodrigues e Poltroniére, 2023.

A operação 1 representa o corte das florestas em pé, realizada por uma equipe especializada, com equipamentos chamados *harvesters* (gruas mecânicas, com esteiras equipadas com implemento específico para corte e descascamento de toras). Após o corte, as toras que medem, em média 6,5 m, são deixadas no chão, comumente chamadas de “eito”. Em seguida, inicia-se a operação 2, que é o baldeio, geralmente realizado com um equipamento chamado *forwarder*, responsável por coletar as toras do chão, organizá-las em sua carroceria e empilhá-las nas extremidades dos talhões (divisões internas das fazendas onde as mudas são plantadas), formando as pilhas de madeira. As Figuras 8 e 9 ilustram as máquinas geralmente utilizadas para o corte e o empilhamento de madeira em campo, respectivamente.

Figura 8 - Máquina de corte (*harvester*)



Fonte: Jhon Deere, 2024

Figura 9 - Máquina de baldeio (*forwarder*)



Fonte: Jhon Deere, 2024.

A operação 3 consiste no carregamento dos caminhões com as toras empilhadas. O equipamento utilizado para carregamento é muito parecido com a grua de colheita. A diferença principal é o implemento que, para esta operação, é uma garra. Esta operação dura em média 30 minutos por caminhão. A Figura 10 mostra uma grua de carregamento com esteira, usualmente empregada no carregamento de madeira de eucalipto para celulose.

Figura 10 - Grua de carregamento



Fonte: Jhon Deere, 2024.

Por fim, a operação 4 consiste no transporte da madeira das fazendas até a fábrica. Os caminhões, carregados de madeira, devem levar a carga até a fábrica, de onde retornará vazio para um novo carregamento, iniciando um novo ciclo. Para representar esta última operação, a Figura 11 traz um caminhão padrão carregado de madeira para celulose.

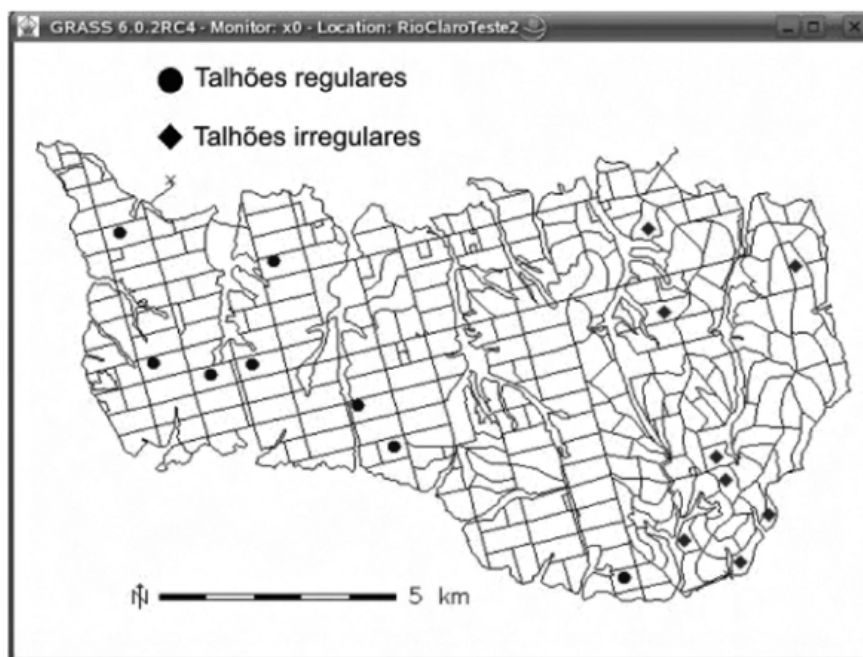
Figura 11 - Caminhão do tipo "tritrem" carregado



Fonte: Agência 14 news, 2022.

Comumente, as fazendas onde as árvores são plantadas para posteriormente serem colhidas são divididas em talhões, o que facilita a produção do plantio e do corte e a distribuição da madeira para a operação de carregamento. A Figura 12 representa o mapa, geralmente utilizado nas operações, para a localização da madeira em campo.

Figura 12 - Mapa de uma fazenda dividida em talhões



Fonte: Malinovski et al., 2008.

A madeira plantada em cada talhão pode variar em relação ao material genético, densidade, rendimento, entre outras características, principalmente em plantações feitas por terceiros (proprietários de fazendas), que possuem pouco conhecimento sobre os melhores clones de eucalipto para a produção de celulose. Tais variações caracterizam a madeira disponível para carregamento e transporte em diferentes tipos. Portanto, é de grande relevância considerar esse fator no momento de planejar e programar o corte, o carregamento e o transporte da madeira, visando obter o melhor *mix* de tipos de madeira para o abastecimento da fábrica. Neste sentido, na maioria das operações de abastecimento de fábricas de celulose, não é comum que os caminhões sejam parcialmente carregados com madeira de um talhão e completos em outro. Geralmente, as cargas são feitas com madeira de apenas um talhão, ou seja, de um único tipo.

Ao chegar na fábrica, cada caminhão carregado passa por uma portaria equipada com balança, onde a pesagem da madeira é realizada. Em seguida, um sistema mede a densidade da madeira, permitindo a conversão de toneladas para metros cúbicos. As informações referentes à massa e ao volume ficam disponíveis em um sistema *online*, o que possibilita o monitoramento das operações e a destinação do material para o estoque ou para as mesas de picagem.

A Figura 13 representa o manuseio das toras de madeira que irão passar pelo processo de picagem. As toras são retiradas dos caminhões carregados e colocadas em um tipo de esteira que as transportará até as mesas de picagem, representadas pela Figura 14.

Figura 13 – Esteira para manuseio de toras de madeira até as mesas de picagem



Fonte: Zanella, Engenharia e Indústria de Máquinas LTDA., 2025.

Figura 14 - Mesas de picagem das toras de madeira



Fonte: Zanella – Engenharia e Indústria de Máquinas LTDA., 2025.

Os caminhões que não são direcionados para as mesas de picagem, são direcionados para o estoque em pátio, representado pela Figura 15. Neste caso, uma grua mecânica, parecida com a grua de carregamento, fica disponível e próxima à pilha de madeira na qual os caminhões serão descarregados. A madeira é retirada do caminhão e depositada em pilhas, separadas por tipos, contribuindo, assim, para o estoque de toras no pátio da fábrica.

Figura 15 - Estoque de toras em pilha em um pátio de madeira



Fonte: Perfil News, 2017.

Em períodos que não há o abastecimento de madeira a partir de caminhões oriundos das fazendas, ocorre uma operação interna na fábrica, comumente chamada de “recheço”, que abastece as mesas de picagem com madeira em estoque no pátio. A operação de recheço ocorre quando um caminhão do pátio (exclusivo para esse tipo de operação) é carregado com a madeira em estoque e descarregado nas mesas de picagem.

Na operação de picagem, as toras são transformadas em cavacos e depositadas em grandes pilhas, por vezes chamadas de silo ou estoque de cavacos. A Figura 16 representa um estoque de cavacos no pátio da fábrica.

Figura 16 - Estoque de cavacos



Fonte: G1 – Globo, 2023.

Para o entendimento da integração de toda a operação do pátio, a Figura 17 mostra um pátio de madeira visto de cima, com o estoque tanto em toras, quanto em cavacos.

Figura 17 - Pátio de madeira visto de cima



Fonte: Google Maps – Suzano Três Lagoas, 2024.

A partir deste ponto, os cavacos são transportados por correias até os silos dos digestores onde se inicia a operação de cozimento. Nesta etapa, os cavacos são submetidos a uma ação química em uma mistura de soda cáustica com sulfeto de sódio e em vapor d'água para que a lignina existente entre as fibras da madeira se dissocie. As fibras dissociadas são chamadas de celulose industrial ou polpa de celulose (BRUMANO, 2023).

No Capítulo 5, o carregamento dos caminhões, o transporte e a entrega da madeira na fábrica de celulose, objeto desta pesquisa, são detalhados, visando facilitar o entendimento e destacar as operações consideradas na abordagem proposta neste trabalho. Em seguida, é proposta uma modelagem matemática para otimizar o planejamento das operações de alocação e sequenciamento dos módulos de carregamento nas fazendas, integradas ao transporte e a entrega de madeira na fábrica.

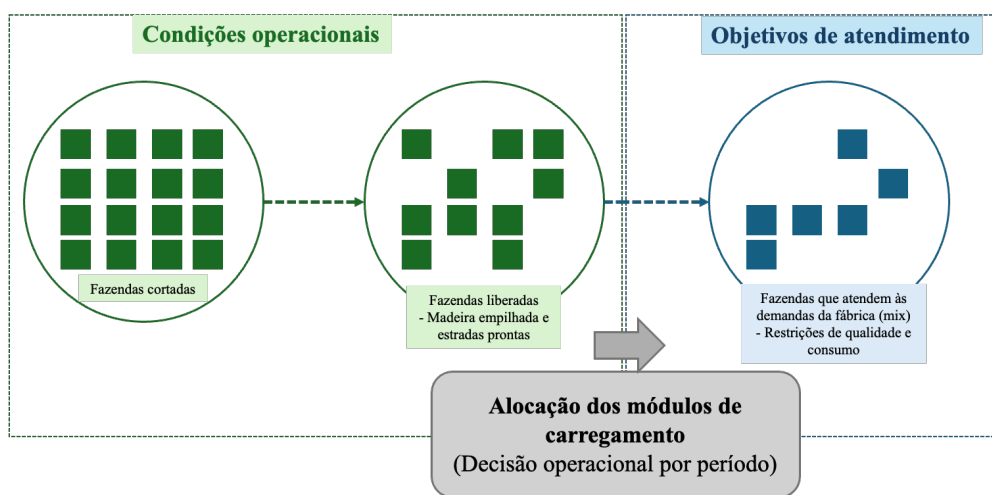
5. CONTEXTUALIZAÇÃO DO PROBLEMA E MODELAGEM MATEMÁTICA

5.1 Caracterização das operações de abastecimento abordadas nesta pesquisa

O problema abordado neste trabalho é baseado em um estudo de caso, cujos dados foram gerados a partir de experiências práticas que refletem o funcionamento do sistema real de abastecimento de madeira para uma fábrica de celulose. Periodicamente, a fábrica necessita ser abastecida com volumes de madeira de diferentes densidades (tipos), de modo a atender tanto à quantidade demandada quanto às exigências de qualidade do processo produtivo.

O abastecimento da fábrica é realizado a partir de um conjunto de fazendas florestais, nas quais a madeira passa por etapas prévias de corte e empilhamento. Entretanto, nem todas as fazendas cortadas encontram-se simultaneamente disponíveis para as operações de carregamento e transporte, uma vez que a liberação depende da conclusão do empilhamento da madeira e da disponibilidade de estradas internas e rotas de acesso adequadas. A Figura 18 traz uma representação dessa interdependência.

Figura 18 - Interdependência das operações de abastecimento florestal



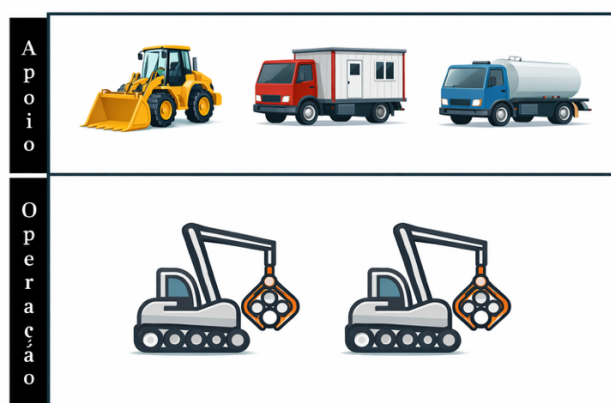
Fonte: Elaborado pela autora, 2026.

Assim, o planejamento é realizado para um conjunto fixo e previamente conhecido de fazendas disponíveis, que permanecem acessíveis para as operações de carregamento e transporte ao longo dos períodos considerados. Nesse contexto, assume-se que as fazendas selecionadas estão liberadas para operação durante todo o horizonte, permitindo que as decisões de alocação e sequenciamento dos módulos de carregamento sejam tomadas com base em critérios operacionais, como distâncias, capacidades e custos associados.

A madeira disponível nas fazendas pode apresentar diferentes características físicas, especialmente no que se refere à densidade, sendo comumente classificada em três classes, A, B e C, correspondentes, respectivamente, à madeira de baixa, média e alta densidade. Essas diferenças influenciam diretamente na formação do *mix* de madeira ideal para o atendimento das demandas da fábrica, o que torna o planejamento do abastecimento um problema de natureza multidimensional.

A operação de carregamento dos caminhões nas fazendas é limitada pela quantidade de módulos de carregamento de madeira disponíveis. Um módulo de carregamento consiste em um conjunto de equipamentos e recursos humanos necessários para realizar o carregamento dos caminhões, incluindo grua, operadores, veículos de apoio e infraestrutura auxiliar. A Figura 19 representa cada um dos equipamentos componentes de um módulo de carregamento.

Figura 19 - Componentes de um módulo de carregamento



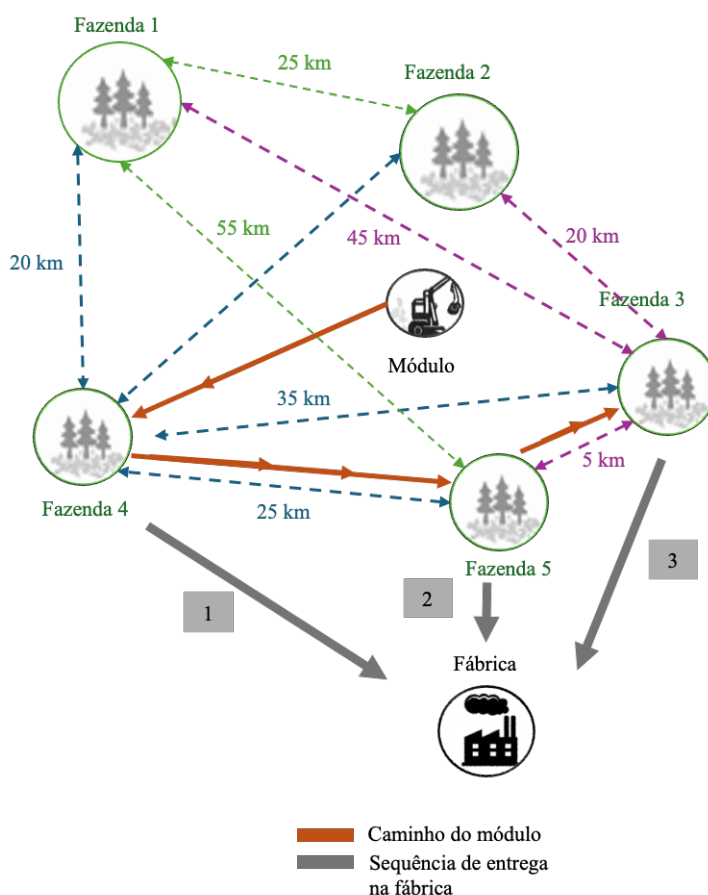
Fonte: Elaborado pela autora, 2026.

Como o número de módulos é inferior ao número de fazendas com madeira potencialmente disponível, torna-se necessário decidir, em cada período do planejamento das operações, em quais fazendas esses módulos serão alocados. A alocação de um módulo de carregamento em uma fazenda viabiliza a operação de carregamento e transporte de madeira disponível, mas não implica, necessariamente, que todo o volume existente será transportado no período considerado. O volume efetivamente transportado depende de decisões integradas e alocações de módulos, disponibilidade de caminhões, duração dos ciclos de transporte e necessidades de atendimento da demanda da fábrica, podendo haver madeira remanescente nas fazendas ao final de cada período.

A Figura 20 traz um esquema baseado na realidade operacional, contendo fazendas dispersas geograficamente, com madeira empilhada e pronta para carregamento. Estão

representados os possíveis caminhos que um módulo de carregamento pode fazer entre as fazendas, além de uma possível alocação e movimentação do módulo. Na Seção 6.3 será apresentado um exemplo em que o modelo seleciona apenas um desses caminhos, com o intuito de priorizar a permanência e reduzir as movimentações entre as fazendas.

Figura 20 – Esquema de alocação e deslocamento de um módulo entre fazendas



Fonte: Elaborado pela autora, 2026

Os caminhões disponíveis para o transporte da madeira das fazendas até a fábrica podem realizar múltiplas viagens ao longo de um período, dependendo da distância entre a fazenda e a fábrica e do tempo necessário para completar o ciclo de transporte. Um ciclo de transporte do caminhão envolve o deslocamento até a fazenda, o carregamento completo (de acordo com sua capacidade), o deslocamento da fazenda até a fábrica e o descarregamento da madeira na fábrica. Assume-se que cada viagem transporta madeira proveniente de uma única fazenda e de um único tipo, evitando a mistura de diferentes classes de madeira em uma mesma carga.

As decisões de alocação dos módulos de carregamento e de transporte dos caminhões são interdependentes e devem ser tomadas de forma integrada. Fazendas mais próximas da fábrica tendem a apresentar menores custos de transporte. Por outro lado, fazendas mais

distantes podem oferecer tipos de madeira necessários para a composição do *mix* desejado, exigindo um balanceamento entre custos logísticos e atendimento qualitativo da demanda.

Adicionalmente, a realocação frequente dos módulos entre fazendas gera custos associados à movimentação dos equipamentos e das equipes. Dessa maneira, embora seja desejável que os módulos permaneçam alocados em uma mesma fazenda o maior tempo possível, essa decisão deve ser avaliada economicamente, considerando *trade-offs* entre custos de movimentação, disponibilidade de madeira e necessidades de abastecimento da fábrica.

O sistema de abastecimento conta ainda com um estoque de madeira no pátio da fábrica, que pode ser utilizado para complementar o *mix* de madeira necessário em cada período. Esse estoque atua como um elemento de flexibilidade do sistema, permitindo maior robustez no atendimento da demanda, ao mesmo tempo em que gera custos adicionais quando mantido em níveis elevados. Assim, a gestão do estoque em pátio também se configura como um aspecto relevante do problema de planejamento abordado.

5.2 Modelagem matemática

Esta seção apresenta a modelagem matemática proposta para o planejamento de curto prazo do abastecimento de madeira de uma fábrica de celulose ao longo de um horizonte finito dividido em períodos.

O problema é formulado como um modelo de programação linear inteira mista (MILP), baseado no modelo GLSPPL proposto em Meyr (2001), em português, Problema Geral de Dimensionamento de Lotes e Sequenciamento com Linhas de Produção Paralelas. A abordagem proposta nesta pesquisa incorpora decisões de realocação dos módulos de carregamento nas fazendas, dependentes da sequência, enquanto integra o dimensionamento da frota de caminhões para o transporte, os requisitos de *mix* de madeira de diferentes tipos e a gestão de estoques ao longo do tempo.

A seguir, os conjuntos de parâmetros e variáveis de decisão são definidos para, posteriormente, o modelo matemático ser apresentado e discutido.

5.2.1 Parâmetros iniciais, índices e conjuntos

Definem-se os seguintes parâmetros e índices:

F número de fazendas, indexadas por $i, j = 1, \dots, F$;

K número de tipos de madeira disponíveis nas fazendas e demandados pela fábrica, indexados por $k = 1, \dots, K$;

- M número de módulos de carregamento de madeira, indexados por $m = 1, \dots, M$;
 T número de períodos do horizonte de planejamento, indexados por $t = 1, \dots, T$.

Para realizar o sequenciamento dos módulos de carregamento nas fazendas, os períodos são divididos em subperíodos de mesma amplitude. Para isso, seja S_t o conjunto de subperíodos que pertencem ao período t . Sendo assim, o número total de subperíodos no horizonte de planejamento, indexados por s , é dado por:

$$S = \sum_{t=1}^T |S_t|.$$

Por fim, define-se S_t^0 como sendo o conjunto que contém o primeiro subperíodo do período t , que será necessário em um conjunto de restrições do modelo matemático.

A introdução de subperíodos, aos quais Salomon et al. (1997) chamam de micro períodos, permite representar explicitamente a permanência e a movimentação dos módulos de carregamento entre as fazendas ao longo do horizonte de planejamento.

5.2.2 Demais parâmetros

Custos na função objetivo:

- cd_{ij} custo de deslocamento do módulo da fazenda i para a fazenda j ;
 cp_{kj} custo por m^3 de madeira do tipo k que permanece na fazenda j ao final do horizonte de planejamento;
 ce_t custo por m^3 de madeira em estoque no pátio da fábrica no final do período t .

Relacionados à demanda e ao estoque de madeira:

- D_t demanda total de madeira (em m^3) 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;
 I_k^0 estoque inicial de madeira do tipo k na fábrica (em m^3);
 β_t^{max} volume máximo de madeira (em m^3) que pode abastecer a fábrica no período t (capacidade máxima de processamento + estoque admissível no período);
 γ_{kt}^{min} volume mínimo de madeira do tipo k (em m^3) em estoque no pátio da fábrica ao final do período t .

Relacionados à disponibilidade e carregamento de madeira nas fazendas:

- C_{mt} capacidade de carregamento (em horas) do módulo m no período t ;
- ct_{mj} tempo necessário para o carregamento de cada m^3 de madeira pelo módulo m na fazenda j (em h/m^3);
- st_{mij} tempo de deslocamento (em horas) do módulo m da fazenda i para a fazenda j ;
- q_{mj} lote mínimo, isto é, quantidade mínima de madeira (em m^3) a ser carregada e transportada na fazenda j ;
- p_{jk} total de madeira do tipo k (em m^3) disponível na fazenda j ;
- B_j número máximo de módulos em operação, por subperíodo, na fazenda j .

Relacionados ao transporte de madeira das fazendas até a fábrica:

- N_t número de caminhões disponíveis no período t para o transporte de madeira;
- Cap capacidade de transporte de cada caminhão (em m^3);
- θ_{mjt} número máximo de viagens que um caminhão consegue realizar no período t , para transportar madeira da fazenda j carregada pelo módulo m ;
- H_t número de horas efetivamente disponíveis no período t para a operação de transporte.

5.2.3 Variáveis de decisão

As variáveis de decisão que irão compor o modelo matemático são definidas a seguir:

- x_{mjks} quantidade de madeira do tipo k carregada pelo módulo m e transportada da fazenda j para a fábrica no subperíodo s (em m^3);
- I_{kt} estoque de madeira do tipo k na fábrica no final do período t ;
- v_{mjt} número de viagens necessárias para transportar madeira carregada pelo módulo m na fazenda j no período t ;
- y_{mjs} variável binária que indica a alocação dos módulos de carregamento nas fazendas; seu valor é 1 se o módulo m está na fazenda j no subperíodo s , e zero, caso contrário;
- z_{mij} variável binária que indica a movimentação dos módulos de carregamento entre as fazendas; seu valor é 1 se o módulo m se desloca da fazenda i para a fazenda j no subperíodo s , e zero, caso contrário;

w_{jk} volume de madeira do tipo k (em m^3) remanescente na fazenda j ao final do horizonte de planejamento;

5.2.4 Função objetivo

O objetivo consiste em minimizar os custos de movimentação dos módulos de carregamento entre as fazendas, além dos custos associados aos estoques de madeira na fábrica nos períodos do horizonte de planejamento e dos custos relacionados à quantidade de madeira remanescente nas fazendas no final do planejamento. Assim, a função objetivo é definida por:

$$\text{Minimizar} \quad \sum_{m=1}^M \sum_{i,j=1}^F \sum_{s=1}^S cd_{ij} z_{mij s} + \sum_{t=1}^T \sum_{k=1}^K ce_t I_{kt} + \sum_{j=1}^F \sum_{k=1}^K cp_k w_{jk} \quad (1)$$

5.2.6 Conjuntos de restrições

- Atendimento de demanda e balanceamento dos estoques de madeira

As restrições (2) garantem o atendimento da demanda de cada tipo k de madeira em cada período t , realizando um balanceamento entre os estoques na fábrica e a quantidade a ser carregada e transportada no período. Para isso, considere $I_{k0} = I_k^0$.

$$\sum_{m=1}^M \sum_{j=1}^F \sum_{s \in S_t} x_{mjks} + I_{k,t-1} = \alpha_k D_t + I_{kt}, \quad k = 1, \dots, K, \quad t = 1, \dots, T \quad (2)$$

- Capacidade temporal dos módulos de carregamento dos caminhões nas fazendas

As restrições (3) asseguram que a capacidade de carregamento (em horas) de cada módulo m em cada período t seja respeitada. São considerados tempos de *setup* (st_{mij}), que representam o tempo necessário para o deslocamento do módulo m da fazenda i para a fazenda j . Assim, a soma dos tempos de carregamento dos caminhões nas fazendas com os tempos de *setup* não deve ultrapassar a capacidade total do módulo no período.

$$\sum_{j=1}^F \sum_{k=1}^K \sum_{s \in S_t} ct_{mj} x_{mjks} + \sum_{i,j=1}^F st_{mij} z_{mij s} \leq C_{mt}, \quad m = 1, \dots, M, t = 1, \dots, T \quad (3)$$

- Dimensionamento e capacidade da frota de caminhões baseado no tempo de ciclo

As equações (4) têm o objetivo de dimensionar o número de viagens necessárias no período t para transportar a madeira da fazenda j até a fábrica, a ser carregada pelo módulo m .

$$v_{mjt} = \sum_{k=1}^K \sum_{s \in S_t} \frac{x_{mjks}}{Cap}, \quad m = 1, \dots, M, \quad j = 1, \dots, F, \quad t = 1, \dots, T \quad (4)$$

Cada caminhão consegue realizar, no máximo, θ_{mjt} viagens no período t para atender a fazenda j com o módulo m . Assim, o número de caminhões necessários para atender à combinação (m, j) no período t é calculado por:

$$\frac{v_{mjt}}{\theta_{mjt}}$$

O número total de caminhões necessários no período t não pode exceder a frota total disponível, conforme garantem as restrições (5).

$$\sum_{m=1}^M \sum_{j=1}^F \frac{v_{mjt}}{\theta_{mjt}} \leq N_t, \quad t = 1, \dots, T \quad (5)$$

Essas restrições incorporam explicitamente o tempo de ciclo do caminhão (tempos de ida, de carregamento, de volta e de descarga).

- Lote mínimo de operação do módulo

Sempre que um módulo é alocado em uma fazenda, deve-se considerar um lote mínimo q_{mj} de carregamento e transporte, como é assegurado pelas restrições (6). Observa-se que um módulo, ao ser alocado em uma fazenda, pode permanecer mais de um subperíodo realizando o carregamento nesta fazenda. Neste caso, o lote mínimo é exigido somente no primeiro subperíodo. Nos demais, o módulo pode permanecer na fazenda sem estar realizando a operação de carregamento efetivamente.

$$\sum_{k=1}^K x_{mjks} \geq q_{mj}(y_{mjs} - y_{m,j,s-1}), \quad m = 1, \dots, M, \quad j = 1, \dots, F, \quad s = 2, \dots, S \quad (6)$$

▪ As restrições (7) integram as variáveis de alocação dos módulos (y_{mjs}) e as de carregamento e transporte da madeira (x_{mjks}). Dessa forma, o carregamento e transporte só ocorre na fazenda j no subperíodo s , se há um módulo alocado.

$$\sum_{k=1}^K x_{mjks} \leq \min\left(\frac{C_{mt}}{ct_{mj}}, N_t \theta_{mjt} Cap\right) y_{mjs}, \quad m = 1, \dots, M, j = 1, \dots, F, t = 1, \dots, T, \forall s \in S_t \quad (7)$$

▪ Disponibilidade de madeira nas fazendas:

Para cada fazenda j e cada tipo de madeira k , o volume total carregado e transportado ao longo do horizonte, somado ao remanescente, deve ser igual à disponibilidade:

$$\sum_{m=1}^M \sum_{s=1}^S x_{mjks} + w_{jk} = p_{kj}, \quad j = 1, \dots, F, \quad k = 1, \dots, K \quad (8)$$

▪ Volume máximo de madeira e estoque mínimo no pátio:

As restrições (9) limitam o volume de madeira a ser transportado das fazendas até a fábrica, enquanto as restrições (10) garantem um estoque mínimo de madeira no pátio da fábrica em cada período.

$$\sum_{m=1}^M \sum_{s=1}^S x_{mjks} \leq \beta_t^{max}, \quad t = 1, \dots, T \quad (9)$$

$$\sum_{k=1}^K I_{kt} \geq \gamma_t^{min}, \quad t = 1, \dots, T \quad (10)$$

▪ Restrições de alocação e sequenciamento dos módulos de carregamento

Um módulo consegue operar em, no máximo, uma fazenda por subperíodo, como asseguram as restrições (11).

$$\sum_{j=1}^F y_{mjs} \leq 1, \quad m = 1, \dots, M, \quad s = 1, \dots, S \quad (11)$$

Como há limitações em relação às rotas de transporte e à operacionalização dentro das fazendas, as restrições (12) impõem um limite máximo de módulos de carregamento em operação, por subperíodo, em cada fazenda.

$$\sum_{m=1}^M y_{mjs} \leq B_j, \quad j = 1, \dots, F, \quad s = 1, \dots, S \quad (12)$$

As restrições (13) e (14) definem o sequenciamento dos módulos de carregamento nas fazendas, ao integrar as respectivas variáveis ($z_{mij s}$), consistentes com as de alocação nos subperíodos s e $s - 1$.

$$y_{m,i,s-1} = \sum_{j=1}^F z_{mij s}, \quad m = 1, \dots, M, \quad i = 1, \dots, F, \quad s = 2, \dots, S \quad (13)$$

$$\sum_{i=1}^F z_{mij s} = y_{mjs}, \quad m = 1, \dots, M, \quad j = 1, \dots, F, \quad s = 1, \dots, S \quad (14)$$

Para garantir a continuidade da operação dos módulos ao longo dos subperíodos, as restrições (15) evitam subperíodos ociosos ao longo de cada período, permitindo que ocorram somente do final do período.

$$y_{m,j,s-1} \geq y_{mjs}, \quad m = 1, \dots, M, \quad j = 1, \dots, F, \quad t = 1, \dots, T, \quad s \in S_t - S_t^0 \quad (15)$$

A seguir, é apresentado o modelo matemático completo desenvolvido para o problema abordado nesta pesquisa.

5.2.7 Modelo matemático

$$\text{Minimizar} \quad \sum_{m=1}^M \sum_{i,j=1}^F \sum_{s=1}^S cd_{ij} z_{mij s} + \sum_{j=1}^F \sum_{k=1}^K cp_k w_{jk} + \sum_{t=1}^T \sum_{k=1}^K ce_t I_{kt} \quad (1)$$

sujeito a:

$$\sum_{m=1}^M \sum_{j=1}^F \sum_{s \in S_t} x_{mjks} + I_{k,t-1} = \alpha_k D_t + I_{kt}, \quad k = 1, \dots, K, \quad t = 1, \dots, T \quad (2)$$

$$\sum_{j=1}^F \sum_{k=1}^K \sum_{s \in S_t} ct_{mj} x_{mjks} + \sum_{i,j=1}^F \sum_{s \in S_t} st_{mij} z_{mij s} \leq C_{mt} \quad m = 1, \dots, M, t = 1, \dots, T \quad (3)$$

$$v_{mjt} = \sum_{k=1}^K \sum_{s \in S_t} \frac{x_{mjks}}{Cap}, \quad m = 1, \dots, M, \quad j = 1, \dots, F, \quad t = 1, \dots, T \quad (4)$$

$$\sum_{m=1}^M \sum_{j=1}^F \frac{v_{mjt}}{\theta_{mjt}} \leq N_t, \quad t = 1, \dots, T \quad (5)$$

$$\sum_{k=1}^K x_{mjks} \geq q_{mj}(y_{mjs} - y_{m,j,s-1}), \quad m = 1, \dots, M, \quad j = 1, \dots, F, \quad s = 2, \dots, S \quad (6)$$

$$\sum_{k=1}^K x_{mjks} \leq \min\left(\frac{C_{mt}}{ct_{mj}}, N_t \theta_{mjt} Cap\right) y_{mjs}, \quad m = 1, \dots, M, j = 1, \dots, F, t = 1, \dots, T, \forall s \in S_t \quad (7)$$

$$\sum_{m=1}^M \sum_{s=1}^S x_{mjks} + w_{jk} = p_{kj}, \quad j = 1, \dots, F, \quad k = 1, \dots, K \quad (8)$$

$$\sum_{m=1}^M \sum_{s=1}^S x_{mjks} \leq \beta_t^{max}, \quad t = 1, \dots, T \quad (9)$$

$$\sum_{k=1}^K I_{kt} \geq \gamma_t^{min}, \quad t = 1, \dots, T \quad (10)$$

$$\sum_{j=1}^F y_{mjs} \leq 1, \quad m = 1, \dots, M, \quad s = 1, \dots, S \quad (11)$$

$$\sum_{m=1}^M y_{mjs} \leq B_j, \quad j = 1, \dots, F, \quad s = 1, \dots, S \quad (12)$$

$$y_{m,i,s-1} = \sum_{j=1}^F z_{mij s}, \quad m = 1, \dots, M, \quad i = 1, \dots, F, \quad s = 2, \dots, S \quad (13)$$

$$\sum_{i=1}^F z_{mij s} = y_{mjs}, \quad m = 1, \dots, M, \quad j = 1, \dots, F, \quad s = 1, \dots, S \quad (14)$$

$$y_{m,j,s-1} \geq y_{mjs}, \quad m = 1, \dots, M, \quad j = 1, \dots, F, \quad t = 1, \dots, T, \quad s \in S_t - S_t^0 \quad (15)$$

$$x_{mjks} \geq 0, \quad m = 1, \dots, M, \quad j = 1, \dots, F, \quad k = 1, \dots, K, \quad s = 1, \dots, S \quad (16)$$

$$y_{mjs} \in \{0,1\}, \quad z_{mij s} \geq 0, \quad m = 1, \dots, M, \quad i, j = 1, \dots, F, \quad s = 1, \dots, S \quad (17)$$

$$I_{kt} \geq 0, \quad w_{jk} \geq 0, \quad v_{mjt} \geq 0, \quad m = 1, \dots, M, \quad j = 1, \dots, F, \quad k = 1, \dots, K, \quad t = 1, \dots, T \quad (18)$$

As restrições (16)-(18) definem o domínio das variáveis de decisão. As variáveis de sequenciamento dos módulos de carregamento, $z_{mij s}$, são declaradas como variáveis reais não negativas, visto que as restrições (12) e (13), juntamente com a função objetivo (1), garantem que elas sejam binárias.

O desenvolvimento do modelo matemático (1)-(18) baseou-se nos trabalhos de Junqueira e Morabito (2017, 2018, 2019), que propuseram abordagens de modelagem do problema de colheita e transporte da cana-de-açúcar. Assim como os autores consideram o sequenciamento das frentes de colheita nos talhões de cana, este trabalho considera o sequenciamento dos módulos de carregamento nas fazendas. No entanto, é importante destacar algumas diferenças do modelo (1)-(18) para os modelos propostos em Junqueira e Morabito (2017, 2018, 2019). Primeiramente, as fazendas disponibilizam diferentes tipos de madeira que irão compor o *mix* desejado para a produção de celulose, ou seja, o carregamento e transporte é de diferentes produtos, sendo que os caminhões podem transportar madeira de um único tipo por vez, introduzindo um novo índice nas variáveis de decisão. Além disso, o modelo permite o cálculo da frota de caminhões para realizar o transporte da madeira até a fábrica no horizonte de planejamento, a partir das variáveis v_{mjt} , que indicam o número de viagens necessárias em cada período para o atendimento da demanda da fábrica. Adicionalmente, são incluídas restrições específicas do abastecimento de indústrias de celulose, representando condições operacionais práticas, como as restrições (9), (10) e (12).

O Capítulo 6 descreve os experimentos computacionais realizados para a validação do modelo, buscando se aproximar da realidade.

6. EXPERIMENTOS COMPUTACIONAIS

Este capítulo apresenta e discute os experimentos computacionais realizados com o objetivo de avaliar o desempenho, a robustez e a escalabilidade do modelo matemático proposto no Capítulo 5. O desenho experimental foi estruturado de modo a permitir a análise do comportamento do modelo sob diferentes escalas operacionais, níveis de complexidade associados ao sequenciamento dos módulos de carregamento e condições de estresse decorrentes de distúrbios operacionais controlados.

Os experimentos foram organizados em três blocos principais. No primeiro, são analisadas classes de instâncias com dimensões progressivamente maiores, utilizadas para validação e avaliação de escalabilidade do modelo. No segundo bloco, uma classe de referência é resolvida com tempo computacional ampliado, permitindo examinar a evolução da qualidade das soluções à medida que se aumenta o esforço computacional disponível. No terceiro bloco, são avaliados cenários de distúrbio operacional, nos quais parâmetros específicos do sistema são alterados individualmente, mantendo-se constantes as demais características das instâncias.

A implementação do modelo matemático foi realizada na linguagem de programação Julia, utilizando o pacote JuMP e o solver IBM ILOG CPLEX, versão 22.1.1. Os experimentos computacionais foram executados em um computador pessoal equipado com processador Apple Silicon M2, arquitetura ARM, 8 GB de memória RAM e sistema operacional macOS. Essa configuração foi utilizada de forma consistente em todos os testes, garantindo comparabilidade entre os resultados obtidos para as diferentes classes de instâncias analisadas.

Os dados de entrada foram gerados de forma sintética por meio de um gerador desenvolvido em Julia, garantindo consistência dimensional, controle estatístico e reprodutibilidade das instâncias. As instâncias foram resolvidas em lote, e os resultados obtidos foram exportados para arquivos estruturados no formato de Excel, os quais serviram de base para a análise e consolidação dos resultados apresentados nas seções subsequentes.

6.1 Geração das instâncias de testes

As instâncias utilizadas nos experimentos computacionais, organizadas em classes, foram geradas automaticamente por meio de um gerador desenvolvido em Julia, especificamente concebido para produzir dados compatíveis com a estrutura do modelo matemático apresentado na Seção 5.2. O gerador é totalmente parametrizado e permite controlar

explicitamente as dimensões do problema, os parâmetros operacionais e os níveis de complexidade considerados nos experimentos.

O processo de geração é baseado em sementes pseudoaleatórias e garante a reprodutibilidade das instâncias. Para cada classe, são definidos o número de fazendas, módulos de carregamento, períodos, subperíodos e tipos de madeira, sem valores padrão adotados para essas dimensões, de modo a evitar a criação de instâncias inconsistentes com o modelo.

A demanda total da fábrica é gerada de forma intrínseca, proporcional à capacidade total dos módulos de carregamento ao longo do horizonte de planejamento. A oferta de madeira nas fazendas é automaticamente escalonada para garantir viabilidade estrutural do problema, respeitando um fator mínimo de segurança entre oferta e demanda. De forma análoga, a capacidade máxima de transporte, em número de caminhões disponíveis, é calculada automaticamente, a partir das características de tempo de ciclo e demanda por período.

Os tempos de carregamento dos caminhões nas fazendas, os tempos de realocação dos módulos de carregamento e os tempos de ciclo de transporte entre fazendas e fábrica são gerados de forma sintética, porém calibrada, de modo a representar condições operacionais realistas e evitar a formação de cenários com fazendas excessivamente distantes entre si. Da mesma forma, são gerados os custos associados à realocação dos módulos, à manutenção de estoques e ao volume de madeira remanescente nas fazendas ao final do horizonte de planejamento, buscando garantir coerência entre as informações de entrada do modelo.

6.1.1 Dimensões do problema e estrutura temporal

Para cada classe de instâncias foram definidos previamente o número de fazendas, tipos de madeira, módulos de carregamento, períodos e subperíodos. O horizonte de planejamento é interpretado em períodos semanais divididos em subperíodos diários. Ou seja, nas instâncias consideradas, os períodos são semanas e os subperíodos são dias, o que permite representar decisões de curto prazo sem perder a agregação temporal necessária ao planejamento operacional.

Cada subperíodo é associado de forma determinística a um único período, o que garante que restrições de capacidade, custos e decisões de sequenciamento sejam aplicados de maneira consistente em diferentes níveis temporais. Essa estrutura é fundamental para capturar o acoplamento entre decisões intra e interperíodos, característico do abastecimento modelado.

6.1.2 Oferta de madeira nas fazendas

A oferta de madeira é definida a partir de volumes totais disponíveis em cada fazenda. Para cada fazenda j , um volume total disponível (V_j) é sorteado no intervalo de números reais $[20.000, 35.000]$ (em m^3), baseado nos volumes médios disponíveis nas fazendas em casos reais.

Em todas as instâncias, são considerados três tipos de madeira disponíveis e demandadas. O volume V_j é distribuído entre os tipos de madeira, de acordo com um vetor de proporções base $[0,35; 0,35; 0,30]$. Para cada fazenda, aplica-se a cada componente uma perturbação multiplicativa controlada de até $\pm 3\%$ em torno do valor base e, em seguida, o vetor é normalizado, assegurando que a soma das proporções por fazenda seja igual a 1. Além disso, impõe-se um piso positivo para evitar participações nulas. Esse procedimento introduz heterogeneidade entre fazendas, preservando, em média, um perfil global de oferta próximo ao mix base.

Em suma, a oferta de madeira por fazenda e por tipo é obtida diretamente pelo produto entre o volume total da fazenda e a proporção atribuída a cada tipo. A partir dessas informações, calcula-se também a participação agregada de cada tipo de madeira na oferta total do sistema, utilizada em restrições e análises agregadas do modelo.

6.1.3 Capacidade dos módulos e tempos de carregamento

A capacidade operacional dos módulos de carregamento (C_{mt}) é expressa em horas disponíveis por período. Para todas as instâncias, adotou-se uma configuração padrão de dois equipamentos por módulo e 18 horas disponíveis por equipamento em cada subperíodo. Dessa forma, cada módulo dispõe de 36 horas de capacidade por subperíodo e, considerando que cada período é composto por 7 subperíodos, o total de horas disponíveis por módulo por período é igual a 252. Essa capacidade é mantida constante dentro de cada classe de instâncias, permitindo isolar os efeitos de escala e do sequenciamento nas análises de desempenho.

O tempo de carregamento de cada módulo em cada fazenda (ct_{mj}) foi definido de modo a refletir condições operacionais observadas na prática. Considerando caminhões com capacidade nominal de $60 m^3$, o tempo total de carregamento por viagem varia entre 25 e 45 minutos. Esse intervalo contempla desde situações mais eficientes de carregamento até cenários menos favoráveis, associados, por exemplo, à variabilidade do material ou à organização da frente de carregamento.

Esses tempos são convertidos para unidades compatíveis com o modelo matemático (tempo necessário para carregar cada m^3 de madeira, ou seja, h/m^3), de modo que o consumo de capacidade dos módulos seja consistente com os volumes efetivamente carregados ao longo dos subperíodos.

6.1.4 Distâncias, tempos e custos de deslocamento entre as fazendas

A heterogeneidade espacial do sistema é representada por meio da atribuição de coordenadas às fazendas em um plano bidimensional. A distância entre fazendas i e j é calculada por meio da distância euclidiana, dada por:

$$dist_{ij} = \sqrt{(x_i - x_j)^2 + (y_i - y_j)^2}.$$

Essa medida é utilizada na geração dos tempos e dos custos de *setup*, ou seja, tempos e custos de deslocamento, associados à realocação dos módulos entre fazendas.

Os custos de *setup* (cd_{ij}), dependentes da sequência, são dados por meio de uma matriz e são estruturados em duas componentes: uma parcela fixa, que representa os custos administrativos e operacionais independente das distâncias; e uma parcela variável, que é proporcional à distância percorrida.

Os tempos de *setup* (st_{mij}), dependentes da sequência, representam parte da capacidade operacional dos módulos de carregamento e englobam o deslocamento físico, a preparação da frente de carregamento e os ajustes necessários para o reinício das operações em uma nova fazenda.

Para gerar as instâncias, os tempos de *setup* foram definidos de forma proporcional à distância entre as fazendas, assegurando que as realocações mais longas impliquem maior consumo de tempo operacional. Para evitar valores excessivos e manter coerência com a capacidade disponível dos módulos, um limite máximo para tempo de *setup* associado a uma realocação foi definido como uma fração da capacidade operacional do módulo no período.

Para compreensão, seja C a capacidade total do módulo em um período e S o número de subperíodos por período. Definiu-se um parâmetro de controle de tempo de *setup* $\lambda \in (0,1)$, que representa a fração máxima do tempo do módulo que pode ser consumida por operações de *setup* em um subperíodo. O limite máximo para o tempo de *setup* por realocação no período é calculado por:

$$st^{max} = \lambda \frac{C}{S}$$

Seja d_{ij} a distância entre as fazendas i e j e d^{max} a maior distância observada entre todos os pares de fazendas. O tempo de *setup* associado ao deslocamento do módulo m da fazenda i para a fazenda j é calculado como:

$$st_{mij} = \begin{cases} 0, & \text{se } i = j, \\ \frac{d_{ij}}{d^{max}} st^{max}, & \text{se } i \neq j. \end{cases}$$

Dessa forma, os tempos de *setup* são sempre limitados superiormente por st^{max} e variam de maneira consistente com a distância entre as fazendas, permitindo representar diferentes níveis de perda de tempo operacional associados à realocação dos módulos, sem introduzir decisões adicionais no processo de geração dos dados de entrada.

6.1.5 Distâncias fazenda-fábrica e parâmetros de viagem

Para o transporte da madeira até a fábrica, as distâncias são decompostas em dois trechos: vias não pavimentadas (terra) e vias pavimentadas (asfalto). As distâncias (d_j^{terra}) em vias não pavimentadas pertencem ao intervalo de números reais $[5, 60]$ km, enquanto as distâncias em vias pavimentadas ($d_j^{asfalto}$) variam entre $[10, 110]$ km, refletindo a diversidade de acessos observada em operações florestais reais.

Com base nessas distâncias e nas velocidades médias adotadas ($v_{terra} = 15\text{km/h}$ em vias não pavimentadas e $v_{asfalto} = 40\text{km/h}$ em vias pavimentadas), o tempo de ciclo de uma viagem é calculado considerando o tempo de deslocamento da fábrica até a fazenda (ida e volta), acrescido do tempo de carregamento na fazenda e de um tempo fixo de descarga na fábrica, definido como 0,3 hora.

De forma simplificada, o tempo de ciclo associado à fazenda j atendida pelo módulo m pode ser representado por:

$$t_{mj}^{ciclo} = 2 \left(\frac{d_j^{terra}}{v_{terra}} + \frac{d_j^{asfalto}}{v_{asfalto}} \right) + ct_{mj}Cap + t_{desc}$$

Esse cálculo permite estimar tempos de viagem coerentes com a realidade operacional, preservando a variabilidade entre fazendas.

6.1.6 Geração de demanda da fábrica

A demanda da fábrica em cada período (D_t) é gerada de forma dependente da capacidade total de carregamento disponível no sistema, evitando cenários em que a demanda

seja incompatível com o potencial operacional dos módulos. Inicialmente, calcula-se uma estimativa da capacidade volumétrica máxima do sistema, considerando o pior caso de tempo de carregamento.

A demanda total ao longo do horizonte de planejamento é então definida como uma fração dessa capacidade máxima, variando entre 80% e 90%. Esse intervalo foi escolhido para representar cenários de elevada utilização do sistema, nos quais as decisões de alocação e sequenciamento dos módulos nas fazendas tornam-se relevantes, sem exigir o uso integral da capacidade disponível.

A demanda total é distribuída ao longo dos períodos com uma variação temporal controlada, limitada a $\pm 5\%$ em relação ao valor médio por período, e posteriormente normalizada para garantir que a soma das demandas periódicas seja igual à demanda total definida.

Além disso, a demanda total da fábrica em cada período é, posteriormente, desagregada por tipo de madeira e para isso, utiliza-se o parâmetro α_k , que representa a participação relativa do tipo de madeira k na oferta total disponível. Assim, a demanda do tipo k no período t é calculada como:

$$D_{kt} = \alpha_k D_t,$$

garantindo coerência entre a composição da demanda e a disponibilidade agregada de madeira por tipo nas fazendas.

6.1.7 Ajuste automático de oferta e viabilidade estrutural

Após a definição da demanda, uma verificação da oferta agregada inicial das fazendas é feita com o intuito de identificar se aquele volume será suficiente para atender à demanda ao longo do horizonte de planejamento. Caso a oferta total seja inferior a um fator mínimo de segurança multiplicado pela demanda total, os volumes disponíveis nas fazendas são escalados proporcionalmente.

O fator de segurança adotado foi de 1,05, assegurando uma margem de 5% entre oferta e demanda. Esse procedimento reduz a ocorrência de instâncias inviáveis por insuficiência estrutural de suprimento e permite concentrar análise nos *trade-offs* operacionais do modelo, e não em inconsistências nos dados de entrada.

6.1.8 Capacidade de transporte por período e disponibilidade operacional

O número máximo de caminhões disponíveis por período (N_t) é definido de forma a ser consistente com a demanda periódica, D_t , os tempos de ciclo de transporte das fazendas, os tempos de carregamento e a disponibilidade operacional de horas por caminhão em cada período. O objetivo é evitar que o transporte se torne um gargalo artificial por construção, preservando a interpretação dos resultados como consequência dos *trade-offs* do modelo, em especial aqueles associados às decisões de alocação, sequenciamento e estoques, e não por restrições arbitrárias impostas à frota.

Primeiramente, define-se a disponibilidade de horas por caminhão em cada período t , a partir da disponibilidade por subperíodo:

$$H_t = (\text{subperíodos por período}) H_{\text{sub_cam}}.$$

Considerando sete subperíodos (dias) por período e sendo $H_{\text{sub_cam}} = 18h$, obtém-se $H_t = 126 h$ por caminhão por período.

Para a geração de dados, a produtividade do transporte associada a um caminhão é definida como o número máximo de viagens que esse caminhão pode realizar em um período t entre a fábrica e as fazendas. Como os pares módulo-fazenda possuem tempos de ciclo distintos, inicialmente, uma produtividade auxiliar θ_{mjt} é calculada para o par potencial (m, j) , que representa o número máximo de viagens que um caminhão poderia realizar, no período t , para transportar madeira da fazenda j até a fábrica, carregada pelo módulo m , a partir de:

$$\theta_{mjt} = \frac{H_t}{t_{mj}^{\text{ciclo}}},$$

em que t_{mj}^{ciclo} o tempo de ciclo de uma viagem completa entre a fábrica e a fazenda j , atendida pelo módulo m .

Fixando o período t , o conjunto $\{\theta_{mjt}\}$ representa as produtividades potenciais de um caminhão associadas às distintas possibilidades operacionais de atendimento. A partir desse conjunto, define-se uma produtividade representativa do sistema no período, denotada por θ_t^{rep} , obtida como percentil de 30% (P30) da distribuição ordenada de $\{\theta_{mjt}\}$. Assim, θ_t^{rep} corresponde a um valor conservador de produtividade por caminhão, para o qual aproximadamente 30% das possibilidades módulo-fazenda, os pares (m, j) , apresentam produtividade menor ou igual.

Simplificando, os 30% são utilizados apenas para a seleção dos valores a serem considerados para o cálculo, é efetivamente, a posição correspondente a 0,3 vezes o número

total de produtividades auxiliares disponíveis no período, após a ordenação crescente dos valores.

Esse procedimento evita que a estimativa da capacidade de transporte seja influenciada por fazendas com tempos de ciclo excepcionalmente baixos, ao mesmo tempo em que não se baseia no pior caso absoluto.

Além disso, uma estimativa para o número total de viagens requeridas para atender à demanda da fábrica no período t é determinada por:

$$R_t = \frac{D_t}{Cap},$$

em que Cap é a capacidade de carga de um caminhão (em m^3) por viagem.

Assim, a capacidade máxima de transporte no período t , representada em número de caminhões disponíveis N_t , é então definida como o menor número inteiro capaz de atender ao número de viagens requeridas, considerando a produtividade representativa do sistema e uma margem de segurança operacional:

$$N_t = \left\lceil \frac{\eta R_t}{\theta_t^{rep}} \right\rceil,$$

em que $\eta > 1$ representa o fator de segurança adotado neste trabalho, com valor $\eta = 1,10$.

6.2 Organização das classes de instâncias para os testes computacionais

As instâncias geradas foram organizadas em classes de testes, com o objetivo de avaliar o desempenho do modelo sob diferentes condições operacionais. Inicialmente, foram definidas cinco classes de escala crescente, denominadas Classes 1 a 5, que diferem, principalmente, quanto ao número de fazendas e módulos de carregamento, períodos e subperíodos considerados. Nessas classes, um parâmetro de controle de *setup* é gradualmente aumentado, de modo a refletir cenários progressivamente mais complexos do ponto de vista operacional.

Além das classes de escala (Classes de 1 a 5), foram definidas cinco classes adicionais de distúrbio controlado, denominadas Classes 6 a 10, todas baseadas na configuração da Classe 2. Nessas classes, apenas um fator operacional é perturbado por vez, mantendo-se constantes as demais características das instâncias da Classe 2. Essa abordagem permite avaliar de forma isolada a sensibilidade do modelo a diferentes tipos de estresse operacional.

Em particular, as Classes de 6 a 10 consideram, respectivamente, (i) aumento de demanda total da fábrica; (ii) redução da frota disponível de caminhões; (iii) aumento do tempo de deslocamento dos módulos entre as fazendas; (iv) redução do tempo de deslocamento dos

módulos entre as fazendas; e (v) aumento da heterogeneidade espacial e dos custos de deslocamento entre as fazendas. Para cada classe, foram geradas 10 instâncias, permitindo análises estatísticas do comportamento do modelo.

A escolha da Classe 2 como base para os experimentos adicionais deve-se ao fato de essa classe apresentar um equilíbrio entre representatividade operacional e viabilidade computacional. Enquanto a Classe 1 é utilizada principalmente para validação e calibração do modelo e as Classes 3, 4 e 5 se aproximam de escalas industriais mais elevadas, a Classe 2 permite análises mais detalhadas de sensibilidade e robustez sem inviabilizar a resolução dos problemas em tempos computacionais controlados.

6.2.1 Classes de escala crescente (Classes 1 a 5)

As Classes de 1 a 5 foram definidas de forma crescente em complexidade, tanto em termos combinatórios quanto operacionais, com o objetivo de avaliar a escalabilidade computacional do modelo matemático. Essas classes diferem principalmente quanto ao número de fazendas, módulos de carregamento e períodos considerados no horizonte de planejamento, sendo que os demais parâmetros, descritos na Seção 6.1, foram mantidos constantes. A Tabela 5 apresenta os parâmetros iniciais adotados para cada uma dessas cinco classes.

Tabela 5 - Parâmetros iniciais para as Classes 1-5

Classe	F	M	T	S_t
1	5	2	2	7
2	10	3	4	7
3	10	4	6	7
4	20	6	8	7
5	30	8	10	7

Fonte: Elaborado pela autora, 2026.

Em todas as instâncias, considerou-se $K = 3$ tipos de madeira disponíveis nas fazendas, de modo a representar a heterogeneidade típica observada em operações reais de abastecimento florestal destinadas à produção de celulose.

Observa-se que, à medida que se avança das classes iniciais para as finais, há aumento no número de possíveis alocações de módulos em fazendas, maior número de decisões de sequenciamento ao longo do horizonte, intensifica-se o acoplamento temporal entre períodos e subperíodos e eleva-se a dimensão do problema de programação inteira mista. desta forma, o funcionamento das Classes 1 e 2 como instâncias de validação e calibração do modelo, enquanto as Classes 3, 4 e 5 se aproximam de aplicações em escalas industriais.

A Tabela 6 traz, para cada classe, o valor adotado para o parâmetro de controle dos tempos de *setup* gerados (tempos de deslocamento dos módulos entre fazendas), que é gradualmente aumentado, buscando gerar cenários progressivamente mais complexos do ponto de vista operacional.

Tabela 6 – Parâmetro de controle dos tempos de *setup*

Classe	λ
1	0,05
2	0,07
3	0,10
4	0,12
5	0,14

Fonte: Elaborado pela autora, 2026.

A variação do parâmetro de controle de *setup* entre as classes foi adotada com o objetivo de gerar instâncias com diferentes níveis de restrição operacional associados à realocação dos módulos de carregamento. Valores menores de λ resultam em instâncias mais folgadas, com baixo impacto do sequenciamento sobre a capacidade dos módulos. Contudo, à medida que aumentam, a movimentação dos módulos entre as fazendas passa a consumir uma parcela relevante do tempo disponível, ampliando o *trade-off* entre manter o módulo alocado na mesma fazenda ou realocá-lo para atender melhor à demanda e reduzir custos de estoque.

A Tabela 7 resume as informações sobre a geração dos parâmetros para as instâncias de testes, permitindo ao leitor relacionar diretamente os dados utilizados nos experimentos computacionais com a formulação matemática proposta no Capítulo 5.

Tabela 7 – Parâmetros e intervalos para a geração das instâncias das Classes 1-5

Parâmetros	Valores
Volume total de madeira por fazenda (V_f)	[20.000, 35.000] m^3
Proporção base do <i>mix</i> por tipo de madeira	[0,35; 0,35; 0,30]
Variação do <i>mix</i>	$\pm 3\%$
Ajuste automático de oferta	Ativado
Fator de segurança de oferta	1,05
Capacidade do caminhão (Cap)	60 m^3 (por viagem)
Máquinas por módulo	2
Horas por máquina por subperíodo	18h
Subperíodos por período	7
Capacidade do módulo por subperíodo	36h
Capacidade do módulo por período (C_{mt})	252h
Tempo de descarga na fábrica	0,3h
Tempo de carregamento por caminhão	[25, 45] <i>min</i>
Demanda total em relação à capacidade	[80%, 90%]
Variação temporal da demanda	$\pm 5\%$
Distribuição da demanda	Normalizada por período
Estoque inicial (I_k^0)	0
Horas de caminhão por subperíodo	18h

Auto escala da frota	Ativada
Fator de segurança da frota (η)	1,10
Velocidade em terra (v_{terra})	15 km/h
Velocidade em asfalto ($v_{asfalto}$)	40 km/h
Distância em terra (d_j^{terra})	[5, 60] km
Distância em asfalto ($d_j^{asfalto}$)	[10, 110] km
Espaço de coordenadas das fazendas	100
Custo de realocação do módulo (cd_{ij})	Proporcional a distância
Tempo de <i>setup</i> (st_{mij})	Proporcional à distância normalizada
Custo de estoque por período (ce_t)	$0,30 \pm 0,05 R\$$
Custo por tipo de madeira remanescente (cp_{kj})	$0,05 \pm 0,02 R\$$
Limite máximo fábrica (β_{max})	$1,05D_t$
Estoque mínimo (γ_{min})	$0,05D_t$
Limite de módulos por fazenda (B_j)	1
Lote mínimo de ativação (q_{mj})	[100, 300] m ³
<i>Solver</i>	CPLEX
Tempo limite por instância	1.800s
Número de instâncias por classe	10
Controle de sementes	Sementes controladas

Fonte: Elaborado pela autora, 2026.

6.2.1.1 Análise estatística dos dados gerados das Classes 1-5

Como parte do processo de validação do modelo, é importante também analisar o conjunto de dados gerados a partir do processo de geração apresentado e discutido na Seção 6.1. As Tabelas 8 e 9 apresentam as estatísticas descritivas das instâncias geradas por classe, para volume e demanda de madeira, respectivamente.

Tabela 8 – Estatísticas por volume médio de madeira por classes

Classes	S	M	F	Volume médio (m ³)	Desvio Padrão	N (volume)	CV
Classe1	14	2	5	136.160	5.526	10	4%
Classe2	28	3	10	274.433	13.064	10	5%
Classe3	42	4	10	426.156	16.542	10	4%
Classe4	56	6	20	872.878	28.948	10	3%
Classe5	70	8	30	1.448.978	44.785	10	3%

Fonte: Elaborado pela autora, 2026.

Tabela 9 - Estatísticas por demanda média de madeira por classes

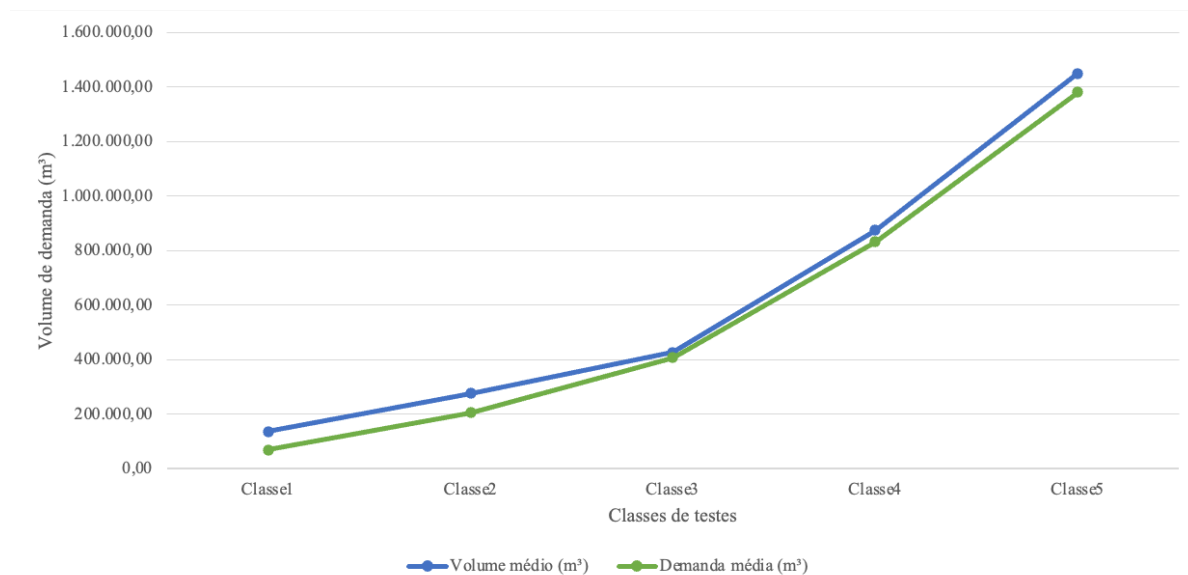
Classes	S	M	F	Dem. média (m ³)	Desvio Padrão	N (demanda)	CV
Classe1	14	2	5	67.833	2.844	10	4%
Classe2	28	3	10	205.237	7.174	10	3%
Classe3	42	4	10	405.862	15.754	10	4%
Classe4	56	6	20	831.312	27.569	10	3%
Classe5	70	8	30	1.379.979	42.652	10	3%

Fonte: Elaborado pela autora, 2026.

Verifica-se o crescimento consistente da escala temporal (total de subperíodos S) e espacial (M módulos e F fazendas), acompanhados pelo aumento do volume e da demanda totais e, apesar da ampliação da magnitude dos parâmetros, os coeficientes de variação (CV) permanecem baixos (entre 3% e 5%), indicando que o gerador produz instâncias diversas, porém estatisticamente controladas dentro de cada classe.

Além disso, no gráfico da Figura 21, é possível visualizar nitidamente o crescimento da escala do problema.

Figura 21 - Escala do problema

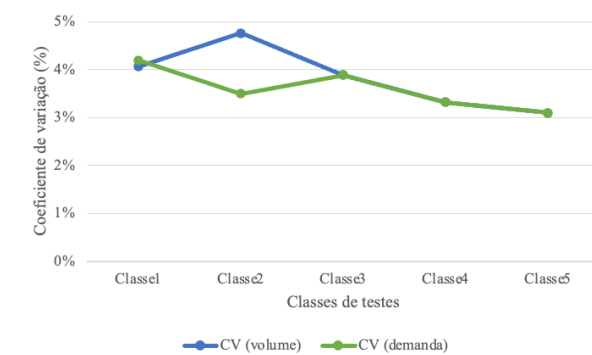


Fonte: Elaborado pela autora, 2026.

O crescimento é aproximadamente linear, a demanda está sempre abaixo do volume e há, portanto, uma coerência do desenho experimental.

O gráfico da Figura 22 mostra os coeficientes de variação de volume e demanda (em %) por classe.

Figura 22 - Coeficientes de variação (CV) por classe

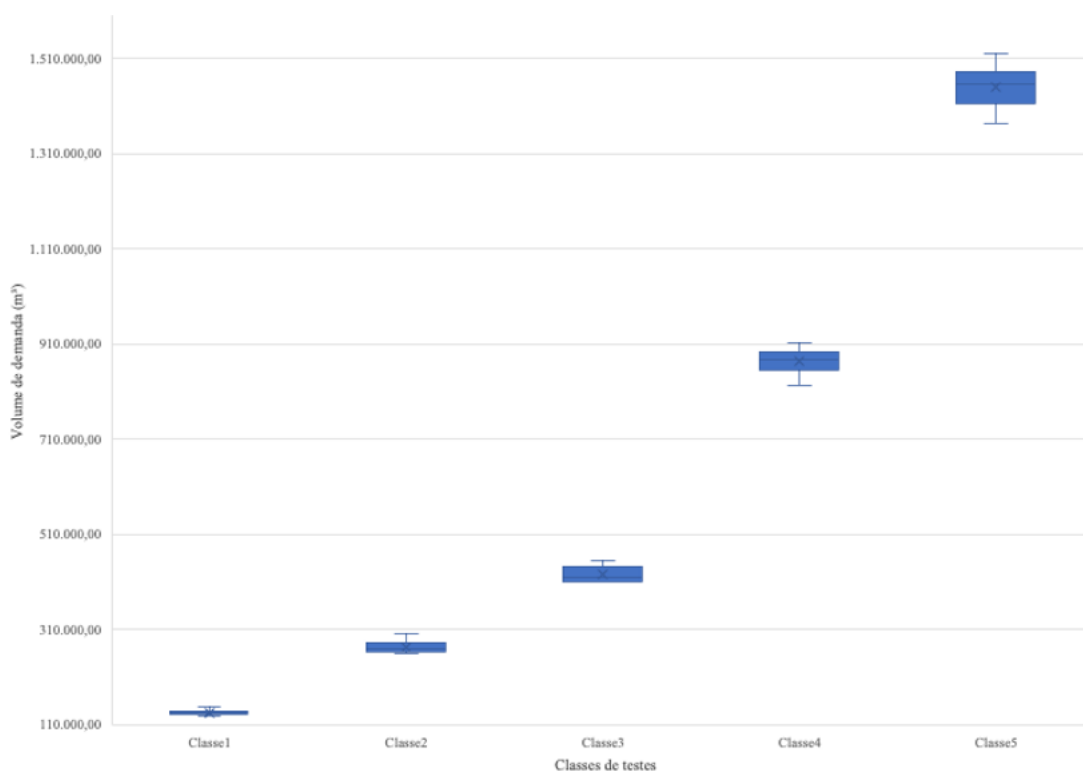


Fonte: Elaborado pela autora, 2026.

Com isso, ratifica-se que o coeficiente de variação (CV) não cresce com a classe e demonstra que o gerador se mantém estável mesmo com o aumento da escala.

Complementado, a Figura 23 traz a distribuição do volume total de madeira disponível por instância, agrupado por classe. Observa-se um crescimento progressivo e bem definido do volume total médio por instância à medida que se avança nas Classes 1 a 5, comportamento já antecipado pelas médias apresentadas na Tabela 9.

Figura 23 - Distribuição do volume total de madeira disponível por classe



Fonte: Elaborado pela autora, 2026.

A variabilidade intraclasse permanece relativamente controlada em todas as classes e como se averiguou, os coeficientes de variação estão baixos, o que indica um processo de geração de instâncias produzindo conjuntos homogêneos dentro de cada classe. Como não são observados pontos que se distanciam significativamente do comportamento predominante do conjunto de dados, se reforça a consistência dos parâmetros adotados na construção dos dados de entrada.

6.2.2 Classes com tempo ampliado e classes com distúrbios (Classes 6-10)

Após a definição das classes de escala (Classes 1-5), a Classe 2 foi selecionada para a realização de experimentos adicionais com tempo de resolução ampliado. Nessas instâncias, o

limite máximo de tempo computacional foi estendido para 1 hora, com o objetivo de avaliar a evolução da qualidade das soluções em termos de redução de *gap* relativo e do valor da função objetivo, à medida que se disponibiliza maior esforço computacional ao *solver*.

Com base nessa classe de referência, um cenário de teste adicional foi destinado à análise da sensibilidade do modelo em relação aos tempos de *setup* associados ao deslocamento dos módulos entre as fazendas. Nesse cenário, os tempos de *setup* foram aumentados em 100% em relação aos valores originais e todos os demais parâmetros do modelo, como demanda, capacidade de transporte, disponibilidade de caminhões, limites de estoque, custos e tempo computacional, foram mantidos inalterados, o que permite a comparação direta entre os resultados do caso base e os do cenário com distúrbio, como se verificará nas próximas seções.

A partir da configuração da Classe 2, foram também construídas classes adicionais de instâncias, denominadas Classes 6 a 10, nas quais foram introduzidos distúrbios controlados com parâmetros específicos. Em cada uma dessas classes, apenas um parâmetro foi perturbado por vez, enquanto as demais características do problema foram mantidas constantes, de forma a permitir a análise isolada da sensibilidade do modelo a cada tipo de distúrbio.

Os distúrbios considerados em parâmetros das instâncias da Classe 2, gerando as Classes de 6 a 10, foram, respectivamente: (i) aumento da demanda total da fábrica; (ii) redução da frota de caminhões disponível; (iii) aumento do tempo de realocação dos módulos de carregamento; (iv) redução do tempo de realocação dos módulos; (v) aumento da heterogeneidade espacial dos custos de deslocamento entre fazendas.

6.3 Resultados e discussões

Nesta seção são apresentados e discutidos os resultados obtidos a partir dos experimentos computacionais realizados com as instâncias descritas na Seção 6.2, organizadas nas Classes de 1 a 10. A análise busca avaliar o desempenho computacional do modelo, a qualidade das soluções geradas, os padrões operacionais das decisões de alocação e sequenciamento dos módulos de carregamento, bem como seu comportamento frente a distúrbios operacionais. Os resultados são discutidos de forma integrada, relacionando aspectos quantitativos e interpretativos, com foco na coerência das soluções geradas e em suas implicações práticas para o planejamento do abastecimento florestal.

6.3.1 Desempenho computacional e escalabilidade (Classes 1-5)

Esta subseção analisa o desempenho computacional do modelo proposto considerando as Classes 1 a 5, que representam instâncias de escala crescente em termos do número de fazendas, módulos de carregamento, períodos e subperíodos. O objetivo é avaliar como o aumento da dimensão do problema afeta o tempo de resolução e, principalmente, a qualidade das soluções.

Do ponto de vista computacional, o CPLEX emprega algoritmos baseados em relaxação linear combinados com estratégias de *Branch-and-Bound* e *Branch-and-Cut* para a resolução de problemas de programação inteira mista. Inicialmente, o problema é resolvido em sua versão relaxada, permitindo a obtenção de um limitante inferior para a função objetivo. A partir dessa solução, o espaço de busca é explorado por meio de uma árvore de decisão, na qual soluções inteiras viáveis são progressivamente identificadas e a partir disso, atualiza-se o limitante superior.

Durante esse processo, o CPLEX mantém simultaneamente esses limitantes, o que permite a avaliação da qualidade das soluções ao longo da busca por meio do *gap* de otimalidade. Como o problema apresenta complexidade combinatória elevada, nem sempre é possível garantir a obtenção da solução ótima dentro de um tempo computacional viável. Assim, o critério de parada adotado baseia-se em um tempo limite de execução e/ou em um nível aceitável de *gap* e as soluções obtidas são acompanhadas de seus respectivos limitantes. Nos experimentos realizados, o *gap* de otimalidade foi utilizado como principal indicador de qualidade das soluções, permitindo analisar o desempenho do modelo em diferentes classes de instâncias e avaliar o impacto do tempo de processamento na qualidade das soluções encontradas.

Assim, antes de analisar os resultados econômicos e operacionais obtidos, apresenta-se uma caracterização estrutural das instâncias resolvidas, com o objetivo de explicitar a dimensão do modelo matemático a cada classe de teste. A Tabela 10 sintetiza o número total de restrições e de variáveis de decisão do modelo, associados a cada instância das Classes de 1 a 5, evidenciando o crescimento da complexidade estrutural do problema, à medida que se ampliam o número de fazendas, módulos de carregamento e períodos considerados no horizonte de planejamento.

Tabela 10 - Número de variáveis e restrições

Classe	No. Restrições	No. Variáveis
1	819	1.301
2	4.600	11.922
3	9.038	23.808
4	29.448	135.284
5	86.650	573.720

Fonte: Elaborado pela autora, 2026.

Essa caracterização é fundamental para contextualizar o esforço computacional observado nos experimentos, uma vez que o aumento da dimensão do modelo a ser resolvido impacta diretamente o espaço de busca do *solver* e a dificuldade associada à prova de otimalidade, especialmente em problemas de programação inteira mista com forte acoplamento temporal e espacial.

A Tabela 10 permite situar o porte dos problemas resolvidos nos testes computacionais e fornece a base para a análise dos resultados apresentada a seguir. Com base nessa caracterização estrutural, discutem-se inicialmente os aspectos computacionais das soluções obtidas e, na sequência, os principais indicadores operacionais associados aos planos gerados, tais como volumes transportados, número de viagens e utilização da frota.

Os resultados mostram que a Classe 1 é resolvida de forma trivial, com obtenção de soluções ótimas em tempos computacionais desprezíveis, menores do que 2 segundos. A partir da Classe 2, contudo, todas as instâncias atingem o limite máximo de tempo de resolução estabelecido, de 1800 segundos, e não se observa a convergência para soluções ótimas dentro do tempo disponível, com exceção da instância 10 da Classe 2, para a qual se obteve solução ótima após 26 minutos (1590 s). Nesse contexto, o tempo computacional deixa de atuar como um fator discriminante entre as classes e passa a ser determinado pelo limite máximo de resolução.

A Tabela 11 evidencia que a qualidade das soluções se deteriora à medida que a escala do problema aumenta. Esse comportamento é refletido no crescimento acentuado do *gap* relativo médio entre as classes.

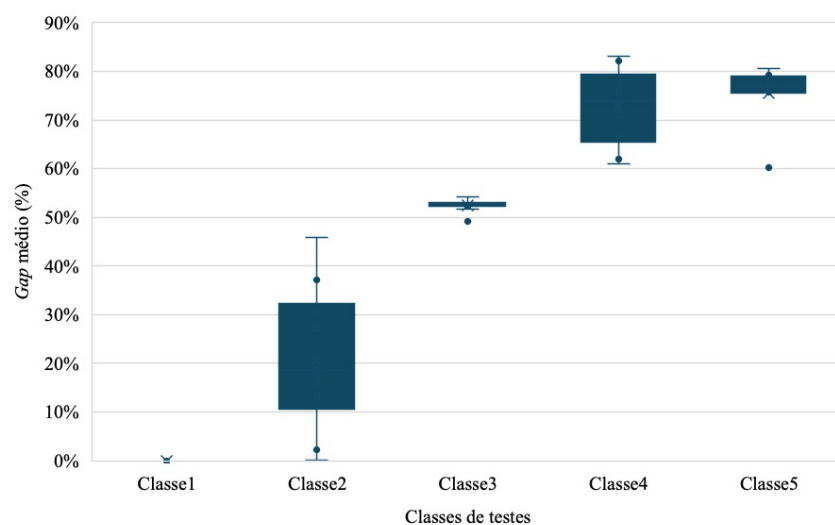
Tabela 11 - Desempenho computacional médio por classe (Classe1-5)

Classes	FO (R\$)	Gap relativo (média)	Status predominante	Infactíveis
Classe1	7.859	0%	Ótimo	0
Classe2	18.314	21%	Limite de tempo	0
Classe3	23.009	52%	Limite de tempo	0
Classe4	88.230	73%	Limite de tempo	0
Classe5	173.240	76%	Limite de tempo	2
Total	57.501	43%	-	2

Fonte: Elaborado pela autora, 2026.

Enquanto a Classe 2 apresenta *gaps* médios da ordem de 20%, a Classe 3 já alcança valores superiores a 50%, indicando dificuldades substanciais de aprimoramento da solução incumbente. Nas Classes 4 e 5, os *gaps* médios ficaram em torno de 75%, com duas infactibilidades observadas na Classe 5, o que evidencia que o solver permanece distante de limites inferiores informativos. Nesses casos, as soluções obtidas não devem ser interpretadas como aproximações razoáveis do ótimo, mas sim como soluções viáveis iniciais, pouco refinadas.

A Figura 24 representa a evolução do *gap* relativo em função da classe de instância e observa-se sua explícita escalada em relação ao aumento da dimensão do problema, reforçando que a principal limitação computacional observada está associada à qualidade da solução, não ao tempo necessário para encontrar uma solução viável.

Figura 24 - Evolução do *gap* relativo médio em função da classe de instâncias

Fonte: Elaborado pela autora, 2026.

Esse padrão é característico de problemas de programação inteira mista com forte acoplamento temporal e decisões de sequenciamento, nos quais o relaxamento linear tende a fornecer limites inferiores pouco informativos e o espaço de busca cresce de forma combinatória, resultando em árvores de *Branch-and-bound* e *gaps* persistentes (NEMHAUSER; WOLSEY, 1988; POCHET; WOLSEY, 2006).

Dessa forma, as Classes 4 e 5 devem ser interpretadas como instâncias de estresse computacional, cujo principal papel é evidenciar os limites práticos da abordagem exata adotada nesta pesquisa. Essas classes permitem identificar o ponto a partir do qual a formulação proposta, sem o uso de estratégias adicionais como heurísticas ou métodos de decomposição, torna-se inadequada para aplicações operacionais que demandam soluções de boa qualidade em tempos compatíveis com a tomada de decisão.

Por outro lado, as Classes 1 a 3 delimitam um conjunto de instâncias no qual o modelo produz soluções viáveis e interpretáveis, sendo adequadas para análises mais detalhadas do comportamento operacional do sistema, conforme discussão das subseções seguintes.

A análise de escalabilidade apresentada nesta seção mostra que a partir da Classe 2, o tempo de resolução deixa de ser um fator discriminante, uma vez que as instâncias passam a atingir sistematicamente o limite máximo de tempo estabelecido. Nesse contexto, torna-se relevante investigar se a ampliação do tempo computacional disponível é capaz de melhorar a qualidade das soluções obtidas, sem alterar de forma substancial o comportamento do processo de resolução. Com esse objetivo, a próxima subseção é dedicada a uma análise detalhada dos resultados da Classe 2 com tempo de resolução ampliado para 3600 s (1 h).

6.3.2 Impacto do tempo de resolução na qualidade da solução (Classe 2)

Esta subseção faz uma análise dos efeitos da extensão do tempo de resolução sobre a qualidade das soluções obtidas para a Classe 2. A escolha dessa classe justifica-se por seu equilíbrio entre representatividade operacional e viabilidade computacional, permitindo uma avaliação mais aprofundada do impacto do esforço computacional adicional sem a interferência dos efeitos mais severos de escala observados em classes de maior porte, como discutido na Subseção 6.3.1.

Os resultados mostram que, mesmo com o tempo de resolução ampliado para uma hora, das 10 instâncias da Classe 2, oito continuam atingindo o limite máximo de tempo, enquanto apenas duas chegam a uma solução ótima antes do tempo limite, indicando que o padrão de desempenho computacional do problema não se altera substancialmente. Ainda assim, observa-

se uma melhora na qualidade das soluções, evidenciada principalmente pela redução do *gap* relativo médio e pela obtenção de soluções ótimas em casos pontuais, como indica a Tabela 12.

Tabela 12 - Resultados consolidados da Classe 2 (tempo de resolução de 1h por instância)

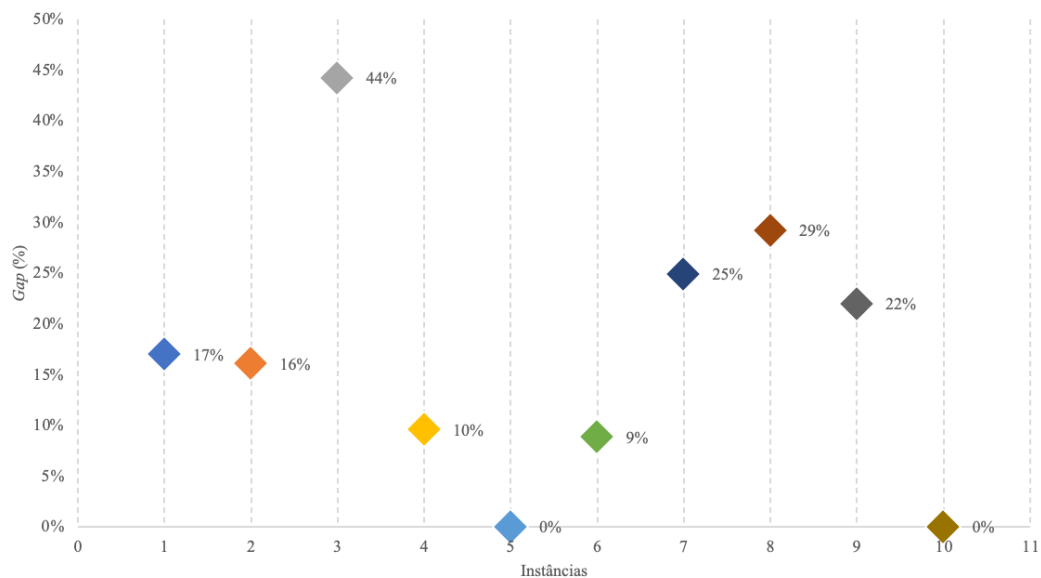
Métrica	Valor
FO (média)	18.296
<i>Gap</i> médio	17%
<i>Gap</i> mínimo	0%
Tempo médio	3542 s
Instâncias Ótimas	2
Instâncias Limite de Tempo	8

Fonte: Elaborado pela autora, 2026.

O aumento do tempo computacional contribuiu para a obtenção de soluções de melhor qualidade em termos de valor da função objetivo, embora esse efeito não seja uniforme entre as instâncias. Enquanto algumas apresentaram reduções significativas de *gap*, outras não superaram as melhores soluções encontradas até aquele momento, mesmo com maior tempo disponível. Esse comportamento evidencia que instâncias com características semelhantes podem demandar esforços computacionais distintos.

A Figura 25 apresenta a dispersão dos valores de *gap* das 10 instâncias da Classe 2, evidenciando que a ampliação do tempo computacional beneficia algumas instâncias de forma expressiva, enquanto outras apresentam ganhos marginais.

Figura 25 - *Gap* relativo por instância da Classe 2 (tempo de resolução de 1h)



Fonte: Elaborado pela autora, 2026.

Além da melhoria global da função objetivo, a decomposição dos custos envolvidos, que pode ser visualizada na Tabela 13, fornece informações relevantes sobre a natureza das melhorias obtidas com o aumento do tempo de resolução.

Tabela 13 - Decomposição da função objetivo - Classe 2 (tempo de resolução de 1h)

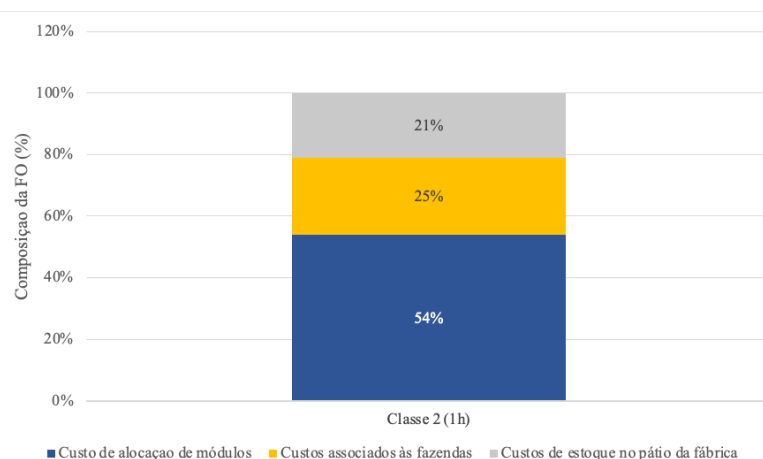
Componente da função objetivo	Valor médio (R\$)	Participação (%)
Custo de deslocamento dos módulos (cd_{ij})	9.889	54%
Custos com a madeira remanescente (cp_{kj})	4.563	25%
Custos de estoque de madeira no pátio (ce_t)	3.844	21%
Valor total da função objetivo	18.296	100%

Fonte: Elaborado pela autora, 2026.

A análise da Tabela 13 indica que os custos associados ao deslocamento e à realocação dos módulos nas fazendas constituem o principal componente do custo total, representando aproximadamente 54%. Em seguida, destacam-se os custos relacionados ao volume de madeira remanescente nas fazendas ao final do horizonte de planejamento e os custos de estoque no pátio da fábrica. Esses resultados evidenciam o papel central das decisões de sequenciamento e realocação na composição do custo operacional, ressaltando a importância de manter o módulo alocado à mesma fazenda por conjuntos de subperíodos adjacentes sempre que possível, de modo a evitar custos adicionais decorrentes de novas realocações.

A Figura 26 complementa a análise apresentada sobre a Tabela 12, demonstrando de forma gráfica a predominância dos custos de realocação de módulos na composição da função objetivo da Classe 2. Nota-se que, posto que os custos de estoque e os custos associados à madeira remanescentes nas fazendas representam parcelas relevantes, o padrão de sequenciamento e realocação dos módulos estabelece o principal deliberativo do custo total, reforçando a importância dessas decisões no planejamento operacional do abastecimento florestal.

Figura 26 - Participação média dos componentes da FO na Classe 2 (1h)



Fonte: Elaborado pela autora, 2026.

Além da avaliação econômica e computacional das soluções obtidas, o modelo proposto permite extrair indicadores diretamente associados à execução operacional dos planos de transporte, como o número de viagens efetivamente necessárias para o transporte da madeira demandada pela fábrica e o consequente dimensionamento da frota de caminhões ao longo do horizonte de planejamento. Esses indicadores fornecem uma leitura complementar das soluções geradas e permitem a avaliação da intensidade operacional do sistema e a coerência entre demanda, capacidade de carregamento e disponibilidade de transporte. Esses aspectos são discutidos na subseção seguinte.

6.3.3 Padrões de alocação e sequenciamento dos módulos de carregamento: análise detalhada da instância 4 da Classe 2

Considerando os resultados apresentados nas Subseções 6.3.1 e 6.3.2, esta subseção é dedicada à análise detalhada da instância 4 da Classe 2, selecionada por representar um caso particularmente informativo tanto do ponto de vista computacional quanto operacional. Para essa instância, a ampliação do tempo de resolução de 1800 s (30 minutos) para 3600 s (1 hora) resultou em melhoria da qualidade da solução, evidenciada pela redução do *gap* relativo e pelo aprimoramento do valor da função objetivo, sem que, contudo, tenha sido possível certificar a otimalidade.

Essa configuração permite avaliar, de forma controlada, em que medida o esforço computacional adicional se traduz em mudanças efetivas nas decisões operacionais. Em particular, busca-se verificar se a melhoria observada nos indicadores econômicos implica alterações estruturais nas decisões de alocação e sequenciamento dos módulos de carregamento, na utilização da frota de caminhões, nos volumes transportados entre fazendas e a fábrica ao

longo do horizonte de planejamento, bem como na formação de estoques ao longo do horizonte considerado.

A análise é conduzida de forma comparativa entre as soluções obtidas com 30 minutos e uma hora de tempo computacional, sendo organizada em quatro blocos: (i) comparação econômica e computacional das soluções; (ii) decisões espaciais e temporais associadas à alocação e ao sequenciamento dos módulos de carregamento; (iii) atendimento da demanda e evolução dos estoques no pátio da fábrica; e (iv) indicadores de transporte e utilização da frota. Essa abordagem permite examinar não apenas a melhoria quantitativa da solução, mas também a estabilidade e a coerência operacional dos planos gerados pela resolução do modelo.

6.3.3.1 Comparação computacional econômica

A Tabela 14 sintetiza os principais indicadores computacionais e econômicos das duas execuções da mesma instância. Observa-se que a ampliação do tempo computacional resulta em uma redução do *gap* relativo e em uma melhora do valor da função objetivo, indicando que o *solver* foi capaz de refinar a solução incumbente quando lhe foi concedido tempo adicional. No entanto, mesmo com o tempo limite de resolução de uma hora, a solução não atingiu a otimalidade, permanecendo com *gap* relativo positivo.

Tabela 14 - Resumo comparativo da instância 4 (classe 2): 30 min vs 1h

Instância 4 – Classe 2	Solução em 1800 s	Solução em 3600 s
FO	18.066,35	17.819,15
Status	Tempo Limite	Tempo Limite
Tempo de solução (s)	Tempo Limite	Tempo Limite
Gap relativo	37%	10%

Fonte: Elaborado pela autora, 2026.

Os resultados obtidos para esta instância são consistentes com o padrão observado de forma agregada na Classe 2, conforme discutido na Seção 6.3.2, e reforçam a dificuldade inerente à prova de otimalidade em problemas de programação inteira mista com forte acoplamento temporal e decisões de sequenciamento.

Do ponto de vista econômico, a melhoria observada no valor da função objetivo indica ganhos marginais de eficiência, ainda que o impacto absoluto seja limitado. Essa característica sugere que, embora o *solver* continue explorando o espaço de soluções, as decisões mais relevantes do ponto de vista operacional já foram identificadas na solução obtida com 30

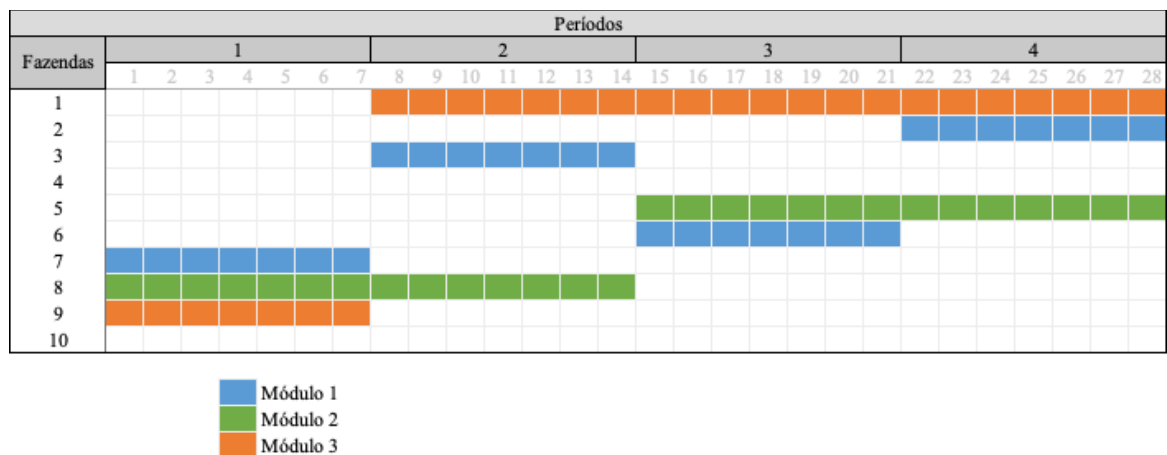
minutos e o tempo adicional provavelmente foi empregado principalmente no refinamento dessas decisões.

A análise apresentada nesta subseção fornece, portanto, a base para investigar, nas subseções seguintes, se a melhoria econômica observada se traduz em alterações estruturais nas decisões operacionais do plano — em particular, no sequenciamento dos módulos de carregamento, na utilização dos caminhões disponíveis e na evolução dos estoques ao longo do horizonte de planejamento.

6.3.3.2 Sequenciamento dos módulos de carregamento

As Figuras 27 e 28 ilustram o sequenciamento obtido para cada módulo de carregamento ao longo dos períodos considerados, comparando as soluções obtidas com o limite de tempo 1800 s e de 3600 s. A análise visual permite identificar, de forma direta, eventuais diferenças no padrão de permanência dos módulos nas fazendas, bem como na ocorrência e no momento das realocações ao longo do horizonte.

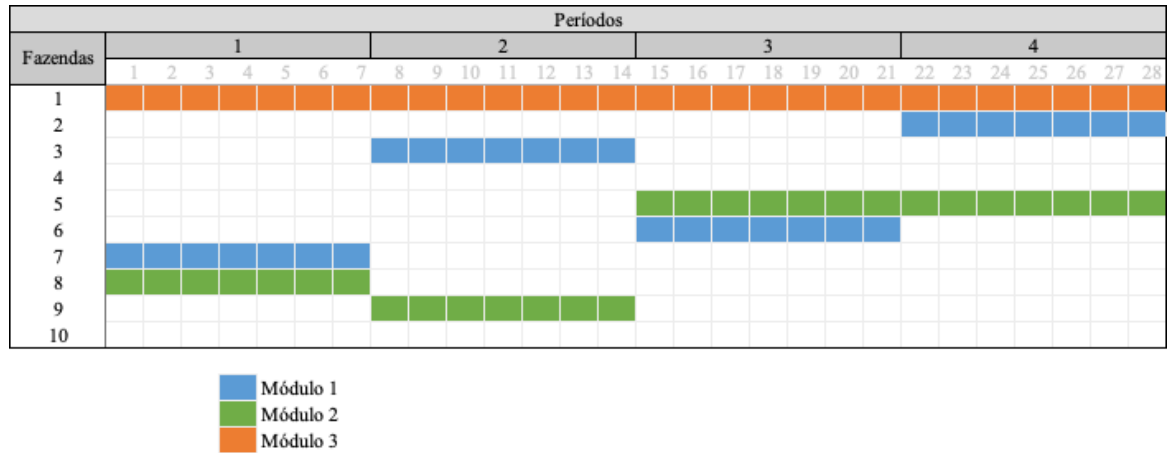
Figura 27 - Sequenciamento dos módulos (Instância 4 da Classe 2 - 30 min)



Fonte: Elaborado pela autora, 2026.

A comparação entre as Figuras 27 e 28 evidencia que a ampliação do tempo computacional não altera a lógica estrutural do sequenciamento dos módulos de carregamento para a instância 4 da Classe 2, mas promove ajustes relevantes no sequenciamento espacial-temporal de parte dos módulos de carregamento. Em particular, observa-se que o módulo 1 mantém o mesmo padrão de alocação ao longo de todo o horizonte de planejamento, permanecendo associado às mesmas fazendas nos mesmos períodos em ambas as soluções.

Figura 28 - Sequenciamento dos módulos (instancia 4 - 1h)



Fonte: Elaborado pela autora, 2026.

Em contraste, os módulos 2 e 3 apresentam diferenças na configuração espacial quando comparadas as soluções obtidas com tempo limite de 30 minutos e de uma hora. Essas diferenças manifestam-se por meio de uma reorganização dos blocos de permanência ao longo dos períodos, com redistribuição das fazendas atendidas por cada módulo, sem aumento do número total de realocações ou fragmentação do sequenciamento.

Esse comportamento indica que o tempo computacional adicional é utilizado pelo *solver* para explorar alternativas de sequenciamento igualmente factíveis do ponto de vista operacional, refinando o arranjo espacial dos módulos 2 e 3, enquanto preserva decisões já bem estabelecidas, como o padrão de alocação do módulo 1. Assim, o modelo identifica rapidamente um núcleo estável de decisões, ao passo que ajustes mais sutis na configuração espacial demandam maior esforço computacional.

Do ponto de vista operacional, ambas as soluções permanecem coerentes, com permanências contínuas dos módulos nas fazendas e ausência de realocações excessivas. As diferenças observadas não refletem mudanças na intensidade operacional do sistema, mas sim na forma como a capacidade de carregamento é distribuída espacialmente ao longo do horizonte, assim, se evidencia que o tempo adicional permite revelar configurações alternativas de sequenciamento com qualidade semelhante.

A estabilidade do sequenciamento também pode ser observada a partir dos indicadores apresentados na Tabela 15, que resume o número total de realocações, a permanência média dos módulos nas fazendas e o consumo total de horas disponíveis.

Tabela 15 - Indicadores de sequenciamento dos módulos (1800s vs 3600s)

Indicador	30 min	1h
Número total de realocações	5	5
Realocações por módulo	1,67	1,67
Permanência média na fazenda	1,67	2,11
Horas totais usadas	2.024	1.944

Fonte: Elaborado pela autora, 2026.

A análise comparativa dos indicadores de sequenciamento para a instância considerada mostra que, embora o número total de realocações e a média de realocações por módulo permaneçam inalterados entre as soluções obtidas com 30 minutos e uma hora de tempo computacional, a estrutura espacial do sequenciamento apresenta diferenças relevantes.

Observa-se que a reconfiguração dos módulos 2 e 3 resulta em um aumento da permanência média dos módulos nas fazendas, que passa de aproximadamente 1,67 períodos na solução de 30 minutos para cerca de 2,11 períodos na solução de 1 hora, confirmando a impressão inicial que se tem ao observar a Figura 28.

Esse resultado indica que o tempo computacional adicional não é utilizado para reduzir o número de realocações, mas para redistribuí-las de forma mais eficiente entre os módulos, prezando por maior estabilidade espacial sem comprometer a flexibilidade do sistema. Assim, mesmo sem o fechamento completo do *gap* relativo, o esforço computacional adicional contribui para o refinamento estrutural das decisões de alocação e sequenciamento.

Também se verificou ser relevante avaliar se o refinamento obtido com o aumento do tempo computacional era refletido em alterações nos principais indicadores operacionais associados à execução do plano. A Tabela 16 apresenta uma comparação entre as soluções obtidas com 30 minutos e uma hora de tempo de resolução para a instância analisada, considerando o volume total entregue no horizonte de planejamento, o número de viagens necessárias para o transporte da madeira, o dimensionamento da frota de caminhões efetivamente necessária para o horizonte de planejamento, além do nível de estoque no pátio da fábrica.

Tabela 16 - Indicadores de volume de madeira e transporte (Instância 4 – Classe 2)

Indicador (média)	Tempo de 1800s	Tempo de 3600s
Volume transportado (m ³) (x_{mjs})	52.788	52.788
Viagens realizadas	880	880
Número de caminhões	62	61
Estoque total (m ³) (I_{kt})	2.612	2.608

Fonte: Elaborado pela autora, 2026.

Observa-se que o volume total transportado e o número de viagens permanecem inalterados entre as duas soluções, indicando que a intensidade global do atendimento à demanda não foi modificada com o aumento do tempo computacional. No entanto, verificam-se diferenças sutis na utilização da frota e nos níveis de estoque.

Em particular, a utilização média de caminhões por período é reduzida de 62 para 61 na solução com maior tempo de resolução, ao mesmo tempo em que se observa uma leve redução nos níveis de estoque no pátio, em termos de volume total. Esses resultados indicam que o esforço computacional adicional contribuiu para uma organização operacional mais eficiente, ainda que sem alterar o volume atendido ou o número de viagens realizadas.

Essa evidência reforça que o ganho promovido pelo maior tempo de resolução não está associado à intensificação do transporte, mas sim a um melhor arranjo espacial e temporal das decisões de alocação e sequenciamento dos módulos, permitindo reduzir marginalmente a pressão sobre a frota e o pátio. Assim, mesmo sem o fechamento completo do gap relativo, o modelo é capaz de identificar soluções estruturalmente superiores do ponto de vista operacional.

6.3.4 Indicadores operacionais de transporte e utilização da frota de caminhões

Os resultados obtidos permitem analisar métricas operacionais diretamente associadas à execução dos planos gerados, em especial o número de viagens realizadas e a utilização da frota de caminhões ao longo do horizonte de planejamento.

Ressalta-se que o objetivo do modelo proposto, inicialmente, não é o dimensionamento da frota de transporte, uma vez que o número de caminhões disponíveis por período é definido como dado de entrada no processo de geração das instâncias, de forma a evitar a criação de gargalos artificiais. Ainda assim, a partir das soluções obtidas, é possível extrair informações relevantes sobre a intensidade operacional do sistema, como o volume de viagens necessárias para atender à demanda e o nível de utilização da frota ao longo do horizonte de planejamento.

A Tabela 17 apresenta os indicadores médios de viagens e de utilização de frota para as Classes 1 a 5. Esses indicadores correspondem, inicialmente, à soma do número total de viagens realizadas e do número de caminhões requeridos ao longo de todos os períodos do horizonte de planejamento, para cada instância.

Interpretando operacionalmente, esses valores foram normalizados pelo número de períodos, o que resultou no número médio de viagens e no número médio de caminhões necessários por período, em cada instância. Em seguida, foram calculadas as médias desses indicadores considerando as 10 instâncias de cada classe, cujos valores são apresentados nas

colunas correspondentes da tabela. Por fim, a última coluna da Tabela 17 indica a média, entre as 10 instâncias da classe, do pico de utilização de caminhões entre os períodos.

Observa-se que, à medida que a escala das instâncias aumenta, há um crescimento consistente no número total de viagens realizadas e na utilização média da frota, refletindo diretamente o aumento da demanda agregada e a ampliação do horizonte de planejamento considerados em cada classe.

Tabela 17 - Indicadores operacionais de transporte e frota (Classes 1-5)

Classe	Número médio de viagens por período	Número médio de caminhões por período	Média do número máximo de caminhões entre os períodos
Classe1	579	42	51
Classe2	866	59	67
Classe3	1.137	75	88
Classe4	1.743	119	132
Classe5	2.324	154	170

Fonte: Elaborado pela autora, 2026.

Os resultados mostram que os níveis de utilização da frota permanecem compatíveis com o volume transportado e com a estrutura das instâncias analisadas, sem a ocorrência de picos excessivos ou períodos prolongados de ociosidade. Observa-se que a intensidade do transporte evoluiu de forma consistente com a demanda da fábrica e com a capacidade de carregamento dos módulos e isso indica que as soluções geradas satisfazem simultaneamente às restrições de carregamento, transporte e atendimento da demanda.

Embora a frota não seja uma variável de decisão do modelo, os indicadores derivados das soluções permitem quantificar sua utilização ao longo do horizonte de planejamento, o que possibilita avaliar, de forma integrada, não apenas os custos e as decisões de alocação e sequenciamento dos módulos, mas também o nível de esforço imposto ao sistema de transporte, ampliando o uso do modelo como ferramenta de apoio ao planejamento operacional.

Adicionalmente, os indicadores de transporte e de utilização da frota complementam a análise computacional ao demonstrar que, mesmo nos casos em que a qualidade da solução — medida pelo *gap* relativo — se deteriora com o aumento da escala do problema, os planos gerados permanecem operacionalmente coerentes. O número de viagens cresce de maneira proporcional ao volume total transportado, enquanto os níveis médios e máximos de utilização da frota refletem picos operacionais plausíveis, sem a ocorrência de soluções degeneradas ou artificialmente restritivas.

Dessa forma, ainda que a prova de otimalidade se torne progressivamente mais difícil em instâncias de maior porte, o modelo mostra-se capaz de produzir planos viáveis e interpretáveis do ponto de vista operacional, característica fundamental para sua aplicação em contextos de planejamento de curto prazo.

6.3.5 Impacto do aumento do tempo de *setup* sobre o sequenciamento dos módulos

Nesta subseção, avalia-se o comportamento do modelo de acordo com a variação dos tempos de *setup* associados à realocação e sequenciamento dos módulos de carregamento, com o objetivo de explorar a sensibilidade das soluções quando submetido a um distúrbio operacional considerável. Investiga-se em que medida o aumento do tempo necessário para a realocação dos módulos afeta os padrões de sequenciamento, os custos totais e a utilização dos demais mecanismos de flexibilidade do sistema, em especial os estoques no pátio da fábrica.

A avaliação é conduzida a partir de testes com as instâncias da Classe 2 (caso base) e, como destacado na Subseção 6.2, todos os demais parâmetros foram mantidos constantes e foram alterados exclusivamente os tempos de *setup*. Essa escolha permite isolar os efeitos do distúrbio introduzido e evita interferências decorrentes de mudanças simultâneas na escala do problema ou estrutura da demanda.

Operacionalmente, o tempo de *setup* representa um elemento crítico no planejamento do abastecimento florestal, pois está associado ao deslocamento dos módulos, embarque e desembarque em caminhões prancha e movimentação de operadores e equipamentos de apoio. A elevação desse tempo pode ocorrer, por exemplo, por restrições climáticas, deterioração das estradas de acesso às fazendas ou limitações na disponibilidade de equipes de apoio.

A Tabela 18 apresenta os principais indicadores operacionais do Caso base e do cenário Setup +100%, definido a partir do Caso base com os tempos de *setup* multiplicados por 2 e sem alterações nos demais parâmetros.

Tabela 18 - Comparação entre indicadores operacionais - caso base e cenário com +100% de *setup*

Indicador operacional	Caso base	Setup +100%	Variação
Realocações totais	45	45	0,0%
Realocações por módulo	1,5	1,5	0,0%
Permanência média do módulo na mesma fazenda (períodos)	1,6	1,6	0,0%
Horas totais de <i>setup</i>	23,23	43,51	87,3%
Horas por realocação	0,52	0,97	87,3%
Percentual da capacidade consumido por <i>setup</i> (%)	0,08	0,15	100,0%
Estoque médio no pátio (m ³)	2.566	2.565	0,0%
Função objetivo total (R\$)	18.314	18.258	-0,3%

Fonte: Elaborado pela autora, 2026.

A Tabela 18 evidencia que o aumento expressivo dos tempos de *setup* resulta em um incremento proporcional das horas totais destinadas às operações de realocação dos módulos, bem como do tempo médio de *setup* associado a cada realocação. No entanto, esse acréscimo não se traduz em alterações nos padrões de decisão do modelo, uma vez que o número total de realocações agregadas considerando as 10 instâncias da classe, assim como a permanência média dos módulos nas fazendas, permanecem inalterados em relação ao Caso base.

O comportamento observado aponta que, nas condições representadas pela Classe 2, o tempo de *setup* não se estabelece como um fator limitante para as decisões de sequenciamento dos módulos. Isso, dado que, mesmo com o distúrbio imposto, o modelo mantém a estrutura de alocação ao longo do horizonte de planejamento, absorvendo o aumento do consumo de capacidade sem necessidade de ajustes adicionais no padrão de realocações.

A estabilidade verificada também se reflete nos níveis de estoque no pátio da fábrica, que permanecem praticamente constantes entre os dois cenários analisados. Isso sugere que o modelo não recorre a uma intensificação do uso do estoque como forma de compensação, uma vez que a folga de capacidade disponível é o suficiente para acomodar o aumento do tempo de *setup* sem comprometer o atendimento da demanda.

Em termos econômicos, a variação no valor da função objetivo é irrisória, inferior a 1%, o que reforça que o aumento do tempo de *setup*, apesar de relevante do ponto de vista operacional, não altera de forma significativa o custo total do sistema nesse contexto. Esse comportamento indica que para a Classe 2 a composição do custo permanece dominada pelas decisões de alocação e permanência dos módulos nas fazendas, enquanto o consumo adicional de capacidade alinhado às realocações exerce impacto próximo de zero ao valor da função objetivo.

Logo, a análise de sensibilidade realizada nesta subseção aponta que o modelo apresenta comportamento estável frente ao aumento dos tempos de *setup* nas condições analisadas, preservando os padrões de sequenciamento e os níveis de estoque e custo. Esse resultado se mostra coerente com a elevada ociosidade de capacidade observada no caso base e indica que, para instâncias de porte moderado, o sistema é capaz de absorver perturbações operacionais sem a necessidade de grandes reconfigurações do plano.

Com base nessas evidências, torna-se relevante ampliar a análise de sensibilidade para outros tipos de distúrbios operacionais, tomando como referência o caso base representado pela Classe 2. Ainda que o tempo de *setup* não tenha provocado alterações estruturais nas decisões do modelo, outros distúrbios podem afetar de forma distinta os *trade-offs* entre estabilidade,

flexibilidade e custo operacional. Essa investigação será conduzida na subseção seguinte, por meio da análise dos resultados das Classes 6 a 10.

6.3.6 Análise da sensibilidade a diferentes distúrbios operacionais (Classes 6 a 10)

Nesta subseção são analisados resultados obtidos para as Classes de 6 a 10, construídas com base na Classe 2 e caracterizadas pela introdução de diferentes distúrbios operacionais controlados, como detalhado na Subseção 6.2.2. O objetivo é avaliar sensibilidade do modelo em casos de alterações específicas nos parâmetros de entrada do sistema, identificando quais fatores exercem maior influência sobre as decisões de alocação e sequenciamento dos módulos de carregamento, sobre a utilização da capacidade disponível e sobre o custo total do abastecimento florestal.

As classes em estudo nesta seção não representam variações na dimensão ou na complexidade estrutural do problema, mas sim modificações paramétricas aplicadas individualmente a um mesmo cenário operacional de referência. Em cada classe, apenas um fator é perturbado por vez e as demais características do problema são mantidas constantes.

A Tabela 19 apresenta um resumo dos principais indicadores operacionais obtidos para o caso base (Classe 2) e para os diferentes cenários de distúrbio analisados (Classes 6 -10).

Tabela 19 - Indicadores principais caso base e cenários de distúrbio (Classes 6 - 10)

Classe	Distúrbio	FO (R\$)	Realoc./mód.	Permanência	Utilização (%)	Estoque (m ³)	Status
2	-----	18.314,02	1,50	1,60	63%	2.565,86	Tempo Limite
6	Aumento da demanda	20.734,70	2,17	1,26	74%	3.113,28	Tempo Limite
7	Redução da frota	18.234,30	1,30	1,74	65%	2.575,53	Tempo Limite
8	Setup +100%	18.179,42	1,53	1,58	65%	2.578,61	Tempo Limite
9	Setup -30%	18.381,54	1,50	1,60	63%	2.549,51	Tempo Limite
10	Aumento da heterogeneidade de custos	12.669,20	1,47	1,62	64%	2.530,84	Ótima

Fonte: Elaborado pela autora, 2026.

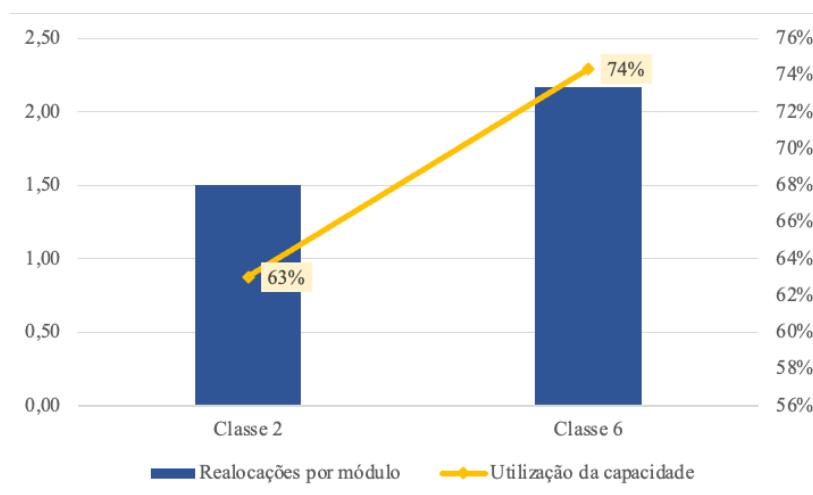
A comparação direta entre essas classes permite a identificação de quais perturbações exerceram maior influência sobre as decisões de alocação e sequenciamento dos módulos, bem como sobre a utilização da capacidade e o custo total do sistema.

Os resultados da Classe 6, associados ao aumento da demanda total da fábrica, apresentaram os efeitos mais pronunciados sobre o comportamento do modelo. Observou-se

um aumento significativo do valor da função objetivo, acompanhado por um maior número médio de realocações por módulo (2,17) e redução da permanência média dos módulos nas fazendas (1,26 períodos). Esse comportamento indica um aumento na frequência de realocação dos módulos como estratégia para assegurar o atendimento da demanda, resultando em maior rotatividade e elevação da pressão sobre a capacidade operacional, uma vez que neste caso, a utilização da capacidade é mais do que 10% superior à do caso base e alcança 75% do total disponível.

A Figura 29 ilustra, graficamente, as diferenças observadas entre o caso base e o cenário de aumento da demanda, evidenciando a intensificação das alocações e da utilização da capacidade.

Figura 29 - Comparação de alocações e utilização (Classes 2 e 6)



Fonte: Elaborado pela autora, 2026.

No cenário de redução da frota de caminhões (Classe 7), o modelo apresentou um comportamento distinto. Apesar da limitação imposta à capacidade de transporte, observou-se uma redução no número médio de alocações por módulo e aumento do tempo médio de permanência nas fazendas, o que sugere que o modelo responde à restrição de frota priorizando maior estabilidade no sequenciamento dos módulos e recorrendo de forma moderada ao estoque no pátio como elemento de balanceamento ao longo dos períodos. O valor da função objetivo permaneceu próximo ao valor do caso base e isso sugere que exista uma adaptação às restrições impostas.

A Tabela 20 traz uma comparação entre as Classes 2 e 7 e nela se observa que, apesar da menor disponibilidade de caminhões, o estoque médio no pátio permanece praticamente inalterado, enquanto a permanência média dos módulos aumenta e o número de realocações

diminui. Esse resultado mostra que o modelo lida com a restrição de transporte mantendo a estabilidade do sequenciamento dos módulos, sem utilizar o estoque como variável de ajuste.

Tabela 20 - Comparação entre indicadores operacionais (Classes 2 e 7)

Indicador	Classe 2	Classe 7	$\Delta(\%)$
Realocações por módulo	1,50	1,30	-13,3
Permanência média (períodos)	1,60	1,74	8,7
Estoque médio no pátio (m ³)	2.566,00	2.576,00	0,4

Fonte: Elaborado pela autora, 2026.

Cabe destacar que, no cenário da Classe 7, verificou-se maior variabilidade no comportamento computacional das instâncias, com a obtenção de uma solução ótima em um dos casos e a ocorrência de infactibilidade em outro, o que sugere que a viabilidade do sistema se torna mais sensível à combinação entre demanda, disponibilidade de frota e parâmetros operacionais, reforçando o caráter crítico desse tipo de distúrbio.

Nos cenários associados às variações nos tempos de *setup* para a realocação dos módulos (Classes 8 e 9), os resultados permanecem muito próximos aos observados no caso base. Tanto o aumento de 100% quanto a redução de 30% nos tempos de *setup* resultam em variações muito baixas nos principais indicadores operacionais, sem alterações estruturais no padrão de alocação e sequenciamento dos módulos, nos níveis de utilização da capacidade ou nos estoques médios no pátio da fábrica.

Assim, as conclusões apresentadas na Subseção 6.3.4 são confirmadas por esse comportamento, apontando que, nas condições representadas pela Classe 2, os tempos de *setup* não constituem um fator limitante para as decisões do modelo. A folga de capacidade disponível permite que o aumento ou a redução desses tempos seja absorvido sem a necessidade de ajustes adicionais no sequenciamento ou de maior utilização dos estoques como mecanismo compensatório.

Já em relação ao cenário associado ao aumento da heterogeneidade espacial dos custos de deslocamento entre fazendas (Classe 10), é possível observar que há um comportamento qualitativamente distinto em relação aos demais distúrbios analisados. Como indicado na Tabela 19, verifica-se uma redução expressiva do valor da função objetivo em comparação ao caso base, ao mesmo tempo em que os indicadores operacionais relacionados ao sequenciamento dos módulos – número médio de realocações por módulo e permanência média nas fazendas – permanecem próximos aos valores observados na Classe 2.

Esse efeito sugere que a maior diferenciação econômica entre as alternativas espaciais permite ao modelo identificar de forma mais clara as combinações de alocação e sequenciamento com menor custo total. A ampliação da heterogeneidade dos custos reduz a existência de soluções economicamente equivalentes, direcionando o processo de decisão para configurações mais eficientes do ponto de vista global.

Adicionalmente, esse cenário foi o único entre as Classes 6 a 10 em que se obteve solução ótima dentro do tempo computacional disponível. Observou-se, dessa forma, o alinhamento entre esses resultados com resultados clássicos da literatura, que apontam que uma maior dispersão dos coeficientes de custo tende a reduzir simetrias na formulação e a tornar o espaço de busca mais estruturado, o que favorece a convergência de métodos de *Branch-and-bound* (NEMHAUSER; WOLSEY, 1988; POCHET; WOLSEY, 2006). Dessa maneira, o distúrbio de heterogeneidade espacial dos custos não apenas impacta o desempenho econômico das soluções, como também influencia o comportamento computacional do modelo.

Sob a ótica operacional, não se observa a redução do custo total em decorrência das alterações na intensidade de uso da capacidade ou nos níveis de estoque, mas sim de uma reorganização mais eficiente da alocação espacial dos módulos. Essa consequência reforça a importância da correta representação da estrutura de custos no planejamento do abastecimento florestal, uma vez que pequenas variações na diferenciação econômica entre fazendas podem produzir efeitos relevantes tanto na qualidade das soluções quanto na eficiência operacional.

Assim, os resultados apresentados nesta subseção permitem compreender o comportamento do modelo frente a diferentes distúrbios operacionais aplicados ao caso base. A consolidação desses achados e sua interpretação integrada são apresentadas na subseção final deste capítulo.

6.3.7 Consolidação e interpretação dos principais achados

O conjunto de evidências apresentado ao longo das subseções deste capítulo permite consolidar os principais achados relativos ao comportamento do modelo proposto. De forma geral, nota-se que o modelo é capaz de gerar planos operacionalmente consistentes, ajustando as decisões de alocação e de sequenciamento de módulos de carregamento de acordo com as condições impostas ao sistema, sem comprometer o atendimento à demanda da fábrica.

Os achados evidenciam que a resposta do modelo varia conforme a natureza do distúrbio considerado. Perturbações associadas ao aumento da demanda e à estrutura espacial dos custos produzem efeitos maiores sobre o padrão de decisões e sobre o custo total do abastecimento, enquanto variações nos tempos de *setup* e restrições moderadas de frota tendem a ser absorvidas

por ajustes estruturais no sequenciamento dos módulos, com impacto limitado sobre os níveis de estoque no pátio da fábrica.

Além disso, constatou-se que o modelo buscou preservar padrões sem a necessidade de mudanças abruptas no plano gerado. Em contrapartida, os cenários considerados também evidenciaram limites claros de viabilidade, o que indica que determinadas combinações de demanda elevada e restrições de capacidade tornam o sistema mais sensível e podem levar à inviabilidade.

De modo integrado, esses achados reforçam a adequação da formulação proposta como instrumento de apoio ao planejamento operacional de curto prazo do abastecimento florestal. A consolidação apresentada nesta subseção estabelece, assim, a base conceitual para a discussão das contribuições, limitações e possibilidades de extensão do modelo, a ser desenvolvida no capítulo final deste trabalho.

7. COMENTÁRIOS FINAIS E PROPOSTAS FUTURAS

7.1 Principais contribuições

Este trabalho teve como objetivo propor e avaliar um modelo de otimização para o planejamento operacional do abastecimento florestal, com foco na alocação e no sequenciamento de módulos de carregamento, considerando restrições operacionais e o atendimento de uma demanda pré-estabelecida de madeira de diferentes tipos, visando a minimização dos custos logísticos associados. Ao longo da pesquisa, buscou-se compreender como perturbações em diferentes parâmetros do modelo influenciavam as decisões operacionais e os *trade-offs* envolvidos no atendimento da demanda da fábrica.

As contribuições do trabalho podem ser destacadas sob três perspectivas complementares. Do ponto de vista metodológico, a formulação proposta integra decisões de alocação, sequenciamento e atendimento da demanda em um único modelo, incorporando a dinâmica de realocação dos módulos e seus impactos sobre custos de deslocamento. Além disso, o modelo permite dimensionar a frota de caminhões efetivamente necessária para o transporte da madeira até a fábrica.

Sob a perspectiva operacional, o modelo mostrou-se capaz de gerar planos consistentes em diferentes cenários hipotéticos e de ajustar o sequenciamento dos módulos conforme alterações em parâmetros como demanda, disponibilidade e utilização de frota e estrutura de custos. Os comportamentos observados evidenciam a relevância das realocações dos módulos como forma de ajuste em cenários de maior pressão operacional, assim como o papel do estoque como elemento complementar no balanceamento do sistema.

Por fim, do ponto de vista prático, o modelo desenvolvido pode ser utilizado como ferramenta de apoio à decisão no planejamento de curto prazo. Sua aplicação permite avaliar cenários alternativos e compreender os impactos operacionais associados a diferentes estratégias. A possibilidade de explorar distúrbios controlados amplia o potencial de uso do modelo em ambientes reais, nos quais incertezas e variações operacionais são recorrentes.

7.2 Limitações do estudo

Apesar das contribuições apresentadas, este trabalho possui limitações que precisam ser consideradas. Primeiramente, a formulação proposta foi avaliada a partir de instâncias geradas com base em parâmetros representativos, simplificados em relação à complexidade total de

sistemas reais de abastecimento florestal. Aspectos como variabilidade estocástica de tempos de viagem, flutuações de demanda, atrasos logísticos e falhas de equipamentos não foram explicitamente modelados. Em cenários mais críticos, tais incertezas podem influenciar de forma relevante a viabilidade e a qualidade dos planos gerados.

Do ponto de vista computacional, os resultados indicam que, para determinadas combinações de parâmetros — em especial aquelas associadas a níveis mais elevados de demanda e a maior pressão sobre as restrições de capacidade —, o esforço de resolução do problema se intensifica de forma significativa. Nas Classes 2 a 5, observa-se que o *solver* encontra soluções viáveis iniciais, porém apresenta dificuldade em reduzir de forma substancial o *gap* relativo e em certificar a otimalidade dentro do tempo computacional disponível, mesmo quando se permite maior tempo de resolução.

Esse comportamento está associado à dimensão e à estrutura do modelo, que envolve um número grande de variáveis e restrições, fortemente acopladas no tempo. Nesse contexto, o aumento da demanda amplia o conjunto de combinações possíveis de alocação e sequenciamento ao longo do horizonte de planejamento, característica típica de problemas de programação inteira mista com decisões de sequenciamento, conforme discutido por Pochet e Wolsey (2006). Como consequência, verifica-se que, embora as soluções obtidas para as Classes 2 a 5 apresentem coerência operacional, a comprovação de otimalidade torna-se computacionalmente onerosa dentro dos limites de tempo considerados.

Finalmente, o horizonte de planejamento adotado e o nível de agregação dos dados representam escolhas metodológicas que influenciam os resultados obtidos. Embora adequadas ao escopo do planejamento operacional de curto prazo, tais escolhas limitam a análise de efeitos de médio e longo prazo, como decisões estratégicas de dimensionamento de frota, localização de módulos ou expansão da capacidade.

7.3 Propostas para trabalhos futuros

Uma primeira e mais imediata possibilidade de avanço está associada ao aprimoramento computacional do modelo, em função dos *gaps* elevados observados e da dificuldade do *solver* em determinar soluções ótimas para instâncias de maior porte. Nesse sentido, a exploração de heurísticas, métodos de decomposição ou abordagens híbridas mostra-se um caminho natural para reduzir os tempos de solução e ampliar a escalabilidade do modelo, especialmente em aplicações de grande escala ou em contextos operacionais que demandam respostas rápidas.

Além disso, cabe destacar que o modelo proposto pode ser aprimorado a partir de estruturas clássicas da literatura de otimização combinatória. Nesse contexto, Guimarães et al. (2014) destacam que o Problema do Caixeiro Viajante Assimétrico pode ser utilizado como uma importante fonte de inspiração para o desenvolvimento de formulações mais eficientes em problemas de sequenciamento com tempos e custos dependentes da sequência. A partir dessa perspectiva, pesquisas futuras podem explorar reformulações do modelo proposto neste trabalho, com o objetivo de reduzir o espaço de busca, obter limitantes inferiores de melhor qualidade para a solução e melhorar o desempenho computacional, especialmente em instâncias de maior porte.

A partir das contribuições e limitações identificadas, outras extensões podem ser exploradas. Uma linha de investigação consiste na incorporação explícita de incertezas ao modelo, por meio de abordagens estocásticas, permitindo representar de forma mais realista variações de demanda, tempos de transporte e disponibilidade de recursos, por exemplo.

Ainda sob a perspectiva operacional, trabalhos futuros podem incorporar maior nível de detalhamento das atividades de campo, incluindo restrições específicas de carregamento, janelas operacionais, condições de acesso às fazendas e a interação com outras etapas da cadeia florestal, como colheita e baldeio. Essas extensões contribuiriam para aproximar a abordagem proposta das condições observadas em ambientes reais e ampliar seu potencial como ferramenta de apoio à decisão.

Por fim, outra possibilidade relevante envolve a ampliação do horizonte de planejamento, com a integração de decisões operacionais de curto prazo e decisões táticas de médio prazo. Essa abordagem permitiria avaliar de forma conjunta políticas de alocação e sequenciamento dos módulos, estratégias de dimensionamento de frota e decisões relacionadas à formação de estoques.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ACUNA, M. Timber and biomass transport optimization: a review of planning issues, solution techniques and decision support tools. *Croatian Journal of Forest Engineering: Journal for Theory and Application of Forestry Engineering*, v. 38, n. 2, p. 279–290, 2017.

AGÊNCIA 14 NEWS. Lençóis tem 200 vagas para motorista de carretas. Disponível em: <https://14news.com.br/regiao/empresa-contrata-mais-200-motoristas-na-regiao-de-lencois/>. Acesso em: 10 fev. 2025.

AGRCULTURE (COLLECTION 9). Area data (hectares) for agricultural use classes, irrigation systems (2000–2023), and cropping frequency (2017–2023) for each biome, state, and municipality. Disponível em: <https://brasil.mapbiomas.org/en/estatisticas/>.. Acesso em: 12 dez. 2025. DOI: <https://doi.org/10.58053/MapBiomias/JNJGVT>.

ALVES, R. T.; FIEDLER, N. C.; SILVA, E. N.; LOPES, E. S.; CARMO, F. C. A. Análise técnica e de custos do transporte de madeira com diferentes composições veiculares. *Revista Árvore*, v. 37, n. 5, p. 897–904, 2013.

ARAÚJO JÚNIOR, C. A.; LEITE, H. G.; SOARES, C. P. B.; BINOTI, D. H. B.; SOUZA, A. P.; SANTANA, A. F.; TORRE, C. M. M. E. A multi-agent system for forest transport activity planning. *Cerne*, v. 23, n. 4, p. 437–446, 2017. DOI: <https://doi.org/10.1590/01047760201723042454>.

ARENALES, M.; ARMENTANO, V.; MORABITO, R.; YAMASHITA, D. Pesquisa operacional: para cursos de engenharia. Rio de Janeiro: Elsevier, 2007.

AUDY, J.; D'AMOURS, S.; RÖNNQVIST, M. Planning methods and decision support systems in vehicle routing problems for timber transportation: a review. Montreal: CIRRELT, 2012.

BAGHIZADEH, K.; ZIMON, D.; JUM'A, L. Modeling and optimization sustainable forest supply chain considering discount in transportation system and supplier selection under uncertainty. *Forests*, v. 12, n. 7, p. 964, 2021. DOI: <https://doi.org/10.3390/f12080964>.

BAJGIRAN, O. S.; ZANJANI, M. K.; NOURELFATH, M. The value of integrated tactical planning optimization in the lumber supply chain. *International Journal of Production Economics*, v. 204, p. 205–216, 2018. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.ijpe.2018.08.010>.

BARRICHELLO, L. E. G.; BRITO, J. O. A utilização da madeira na produção de celulose. Circular Técnica - Instituto de Pesquisas e Estudos Florestais, n. 68, 1979.

BELLAVENUTTE, P.; CHUNG, W.; DIAZ-BALTEIRO, L. Partitioning and solving large-scale tactical harvest scheduling problems for industrial plantation forests. *Forest Policy and Economics*, v. 103, p. 24–33, 2019. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.forpol.2019.03.002>.

BIOMES, STATES AND MUNICIPALITIES (COLLECTION 10). Coverage – area data (hectares) by land cover and land use class for cross-referencing each biome, state, and Brazilian municipality for the period 1985 to 2024. Disponível em:

<https://brasil.mapbiomas.org/en/estatisticas/>. Acesso em: 12 dez. 2025. DOI: <https://doi.org/10.58053/MapBiomias/IBQPF6>.

BORDÓN, M. R.; MONTAGNA, J. M.; CORSANO, G. An exact mathematical formulation for the optimal log transportation problem. *Forest Policy and Economics*, v. 95, p. 115–122, 2018. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.forpol.2018.06.007>.

BORDÓN, M. R.; MONTAGNA, J. M.; CORSANO, G. Solution approaches for solving the log transportation problem. *Applied Mathematical Modelling*, v. 98, p. 611–627, 2021. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.apm.2021.05.023>.

BRITISH COLUMBIA FOREST SAFETY COUNCIL. Logging trucks in British Columbia. 2015. Disponível em: https://www2.bcforestsafes.org/files/ref_LoggingTrucksInBritishColumbia.pdf. Acesso em: 20 nov. 2024.

BRUMANO, P. Produção de celulose e sistema kraft. Termo Blog, 2023. Disponível em: <https://termoblog.com.br/producao-de-celulose-e-sistema-kraft/>. Acesso em: 19 fev. 2025.

CRUZ, C. A.; COSTA, A. M.; MUNARI, P.; MORABITO, R. The vehicle allocation problem: alternative formulation and branch-and-price method. *Computers & Operations Research*, v. 144, 2022.

CRUZ, C. A.; MUNARI, P.; MORABITO, R. A branch-and-price method for the vehicle allocation problem. *Computers & Industrial Engineering*, 2020.

DE ASSIS, T.; PAWLAK, J.; PAL, L.; JAMEEL, H.; VENDITTI, R.; REISINGER, L. W.; KAVALEW, D.; GONZALEZ, R. W. Comparison of wood and non-wood market pulps for tissue paper application. *BioResources*, v. 14, p. 6781–6810, 2019.

DOS SANTOS, P. A. V. H.; SILVA, A. C. L.; ARCE, J. E.; AUGUSTYNICZIK, A. L. D. A mathematical model for the integrated optimization of harvest and transport scheduling of forest products. *Forests*, v. 10, n. 9, p. 743, 2019. DOI: <https://doi.org/10.3390/f10090743>.

EKER, M.; SESSIONS, J. Refocusing on operational harvest planning model for state-owned forestry in Turkey. *European Journal of Forest Engineering*, v. 6, n. 2, p. 96–106, 2020. DOI: <https://doi.org/10.33904/ejfe.829946>.

EL HACHEMI, N.; GENDREAU, M.; ROUSSEAU, L.-M. A heuristic to solve the synchronized log-truck scheduling problem. *Computers & Operations Research*, v. 40, p. 666–673, 2013. DOI: 10.1016/j.cor.2011.02.002.

EL HACHEMI, N.; EL HALLAOUI, I.; GENDREAU, M.; ROUSSEAU, L.-M. Flow-based integer linear programs to solve the weekly log-truck scheduling problem. *Annals of Operations Research*, v. 232, p. 87–97, 2014. DOI: 10.1007/s10479-014-1527-4.

EPSTEIN, R.; RÖNNQVIST, M.; WEINTRAUB, A. Forest transportation. In: WEINTRAUB, A. et al. *Handbook of Operations Research in Natural Resources*. New York: Springer, 2007. p. 391–403.

FAO - FOOD AND AGRICULTURE ORGANIZATION OF THE UNITED NATIONS.

Online data FAOSTAT 2021. Disponível em: <https://www.fao.org/faostat/en/#data/FO>.

Acesso em: 30 nov. 2024.

FERREIRA, M. A.; SILVA, C. S. J.; GOMIDE, L. R.; CONTRERAS, M. A.; LOPES, E. T.; RODRIGUES, R. C.; MELLO, J. M.; MENDONÇA, N. P. Wood supply optimization in Brazilian pulp industry involving forestry outgrower scheme. *Revista Árvore*, 2019.

FLATBERG, T.; NØRSTEBØ, V. S.; BJØRKELO, K.; ASTRUP, R.; SØVDE, N. E. A mathematical model for infrastructure investments in the forest sector of coastal Norway. *Forest Policy and Economics*, v. 92, p. 202–209, 2018.

FLEISCHMANN, B.; MEYR, H. The general lotsizing and scheduling problem. *OR Spectrum*, v. 19, n. 1, p. 11–21, 1997. DOI: <https://doi.org/10.1007/s002910050069>.

FORSBERG, M.; FRISK, M.; RÖNNQVIST, M. FlowOpt – a decision support tool for strategic and tactical transportation planning in forestry. *International Journal of Forest Engineering*, v. 16, n. 2, p. 101–114, 2005.

FRISK, M.; FLISBERG, P.; RÖNNQVIST, M.; ANDERSSON, G. Detailed scheduling of harvest teams and robust use of harvest and transportation resources. *Scandinavian Journal of Forest Research*, v. 31, n. 7, p. 716–732, 2016. DOI: <https://doi.org/10.1080/02827581.2016.1206144>.

FUENTEALBA, S.; PRADENAS, L.; LINFATI, R.; FERLAND, J. A. Forest harvest and sawmills: an integrated tactical planning model. *Computers and Electronics in Agriculture*, v. 156, p. 275–281, 2019. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.compag.2018.11.026>.

G1 GLOBO. Diferente do caminho do país, indústria de MS tem avanço de 4,5% em janeiro deste ano. Disponível em: <https://g1.globo.com/ms/mato-grosso-do-sul/noticia/2023/04/06/diferente-do-caminho-do-pais-industria-de-ms-tem-avanco-de-45percent-em-janeiro-deste-ano.ghml>.. Acesso em: 13 fev. 2025.

GHOTB, A.; SOWLATI, T.; MORTYN, J. An optimization model for detailed scheduling of heterogeneous fleet of log trucks considering synchronization. *International Journal of Forest Engineering*, v. 35, n. 2, p. 313–325, 2024.

GOMIDE, J. L.; NETO, H. F.; REGAZZI, A. J. Análise de critérios de qualidade da madeira de eucalipto para a produção de celulose kraft. *Revista Árvore*, v. 34, n. 2, p. 339–344, 2010.

GOOGLE MAPS. Suzano S.A – Unidade Três Lagoas. Disponível em: <https://www.google.com/maps/search/suzano+tres+lagoas/>. Acesso em: 15 fev. 2025.

GUIMARÃES, L.; KLABJAN, D.; ALMADA-LOBO, B. Modeling lotsizing and scheduling problems with sequence-dependent setups. *European Journal of Operational Research*, v. 239, n. 3, p. 644–662, 2014. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.ejor.2014.05.048>.

HAN, H.; CHUNG, W.; WELLS, L.; ANDERSON, N. Optimizing biomass feedstock logistics for forest residue processing and transportation on a tree-shaped road network. *Forests*, v. 9, n. 10, p. 613, 2018. DOI: <https://doi.org/10.3390/f9100613>.

HOFF, A.; ANDERSSON, H.; CHRISTIANSEN, M.; HASLE, G.; LOKKETANGEN, A. Industrial aspects and literature survey: fleet composition and routing. *Computers & Operations Research*, v. 37, n. 12, p. 2041–2061, 2010.

IBÁ - INDÚSTRIA BRASILEIRA DE ÁRVORES. Relatório anual IBÁ 2021. Disponível em: <https://www.iba.org/publicacoes/relatorios>. Acesso em: 30 nov. 2024.

IBGE - 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: 20 nov. 2024.

JOHN DEERE. Harvesters de esteira série 800 MH. Disponível em: <https://jdflorestal.com.br/maquinas/harvester/>. Acesso em: 4 jan. 2025.

JOHN DEERE. 1510 G. Disponível em: <https://jdflorestal.com.br/maquinas/forwarder/>. Acesso em: 4 jan. 2025.

JOHN DEERE. 2144G (cabine elevada). Disponível em: <https://jdflorestal.com.br/maquinas/carregamento/>. Acesso em: 4 jan. 2025.

JUNQUEIRA, R. A. R.; MORABITO, R. Optimization approaches for sugarcane harvest front programming and scheduling. *Gestão & Produção*, v. 24, p. 407–422, 2017. DOI: <http://dx.doi.org/10.1590/0104-53X1882-16>.

JUNQUEIRA, R. A. R.; MORABITO, R. Programação e sequenciamento das frentes de colheita de cana de açúcar: modelo e métodos de solução para problemas de grande porte. *Gestão & Produção*, v. 25, p. 132–147, 2018.

JUNQUEIRA, R. A. R.; MORABITO, R. Modeling and solving a sugarcane harvest front scheduling problem. *International Journal of Production Economics*, v. 213, p. 150–160, 2019.

KONG, J.; RÖNNQVIST, M. Coordination between strategic forest management and tactical logistic and production planning in the forestry supply chain. *International Transactions in Operational Research*, v. 22, n. 4, p. 703–722, 2015. DOI: <https://doi.org/10.1111/itor.12089>.

LUO, L.; O'HEHIR, J.; REGAN, C. M.; MENG, L.; CONNOR, J. D.; CHOW, C. W. K. An integrated strategic and tactical optimization model for forest supply chain planning. *Forest Policy and Economics*, 2021.

MALINOVSKI, R. A.; FENNER, P. T.; SCHACK-KIRCHENER, H.; MALINOVSKI, J. R.; MALINOVSKI, R. A. Otimização da distância de extração da madeira com forwarder. *Scientia Forestalis*, v. 36, n. 79, p. 171–179, 2008.

- MELCHIORI, L.; NASINI, G.; MONTAGNA, J. M.; CORSANO, G.** A mathematical modeling for simultaneous routing and scheduling of logging trucks in the forest supply chain. *Forest Policy and Economics*, v. 136, 2022. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.forpol.2021.102693>.
- MEYR, H.** Simultaneous lotsizing and scheduling on parallel machines. *European Journal of Operational Research*, v. 139, p. 277–292, 2001.
- MONTI, C.; GOMIDE, L.; OLIVEIRA, R.; FRANÇA, L.** Optimization of wood supply: forestry routing optimization model. *Annals of the Brazilian Academy of Sciences*, 2020.
- MORAES, F. A. B.; PIRATELLI, C. L.; ACHCAR, J. A.** Condições ideais para o consumo de madeira na produção de celulose. *Production*, v. 24, n. 3, p. 712–724, 2014. DOI: <http://dx.doi.org/10.1590/S0103-65132013005000074>.
- 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, 2009.
- NADERIALIZADEH, N.; CROWE, K. A.; PULKKI, R.** On the importance of integrating transportation costs into the tactical forest harvest scheduling model. *Canadian Journal of Forest Research*, v. 50, n. 3, p. 239–250, 2020. DOI: <https://doi.org/10.1139/cjfr-2019-0230>.
- NEMHAUSER, G. L.; WOLSEY, L. A.** Integer and combinatorial optimization. New York: Wiley, 1988.
- NØRSTEBØ, V. S.; JOHANSEN, U.** Optimal transportation of logs and location of quay facilities in coastal regions of Norway. *Forest Policy and Economics*, v. 26, p. 71–81, 2013. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.forpol.2012.09.007>.
- OLIVEIRA, R. M.; MONTI, C. A. U.; LACERDA, C. H. S.; GOMIDE, L. R.** Vehicle routing strategies and optimization for wood transportation. *Revista Floresta*, v. 52, n. 4, p. 431–440, 2022.
- ORTEGA, R.; FORFORA, N.; URDANETA, I.; AZUAJE, I.; VIVAS, K.; VERA, R.; FRAZIER, R.; ABBATI, C.; SALONI, D.; JAMEEL, H.; VENDITTI, R.; GONZALEZ, R.** Life cycle assessment of Brazilian bleached Eucalyptus kraft pulp: integrating bleaching processes and biogenic carbon impacts. *Cleaner Environmental Systems*, v. 15, 2024.
- PALMGREN, M.; RÖNNQVIST, M.; VARBRAND, P.** A solution approach for log truck scheduling based on composite pricing and branch and bound. *International Transactions in Operational Research*, v. 10, p. 433–447, 2003. DOI: 10.1111/1475-3995.00420.
- PALMGREN, M.; RÖNNQVIST, M.; VARBRAND, P.** A near-exact method for solving the log-truck scheduling problem. *International Transactions in Operational Research*, v. 11, p. 447–464, 2004. DOI: 10.1111/j.1475-3995.2004.00469.x.
- POCHET, Y.; WOLSEY, L. A.** Production planning by mixed integer programming. New York: Springer, 2006.

REY, P. A.; MUÑOZ, J. A.; WEINTRAUB, A. A column generation model for truck routing in the Chilean forest industry. *INFOR: Information Systems and Operational Research*, v. 47, p. 215–221, 2009. DOI: 10.3138/infor.47.3.215.

RIX, G.; ROUSSEAU, L.-M.; PESANT, G. A column generation algorithm for tactical timber transportation planning. *Journal of the Operational Research Society*, v. 66, p. 278–287, 2015.

RODRIGUES, K. M.; POLTRONIERE, S. C. Alocação da frota de caminhões entre frentes de carregamento florestal utilizando otimização em grafos. In: XXX SIMPEP, 2023.

SARRAZIN, F.; LEBEL, L.; LEHOUX, N. Analyzing the impact of implementing a logistics center for a complex forest network. *Canadian Journal of Forest Research*, v. 48, n. 2, p. 179–188, 2018. DOI: <https://doi.org/10.1139/cjfr-2017-0183>.

SEGURA, T. E. S.; PIMENTA, L. R.; MATTIAZZO, F. B.; SILVA, F. M.; CRUZ, J. A.; SOUZA, L. O. Programa de controle da qualidade da madeira na Eldorado Brasil Celulose. *O Papel*, v. 78, n. 7, p. 82–89, 2017.

SFEIR, T. A.; PÉCORA JUNIOR, J. E.; RUIZ, A.; LEBEL, L. Integrating natural wood drying and seasonal trucks' workload restrictions into forestry transportation planning. *Omega*, 2019. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.omega.2019.102135>.

SILVA, N. R. G. Análise e dimensionamento de frota de caminhões em circuito fechado para fornecimento de madeira. 2015. Dissertação (Mestrado em Engenharia de Transportes) — Escola Politécnica, Universidade de São Paulo, São Paulo, 2015.

SOLOMON, M. M.; VAN WASSENHOVE, L. N.; DUMAS, Y.; DAUZÈRE-PÉRÈS, S. Solving the discrete lotsizing and scheduling problem with sequence dependent set-up costs and set-up times using the traveling salesman problem with time windows. *European Journal of Operational Research*, v. 100, p. 494–513, 1997.

SOWOLE, O. S. A comparative analysis of search algorithms for solving the vehicle routing problem. *IntechOpen*, 2023. DOI: 10.5772/intechopen.112067.

VANZETTI, N.; BROZ, D.; CORSANO, G.; MONTAGNA, J. M. An optimization approach for multiperiod production planning in a sawmill. *Forest Policy and Economics*, v. 97, p. 1–8, 2018.

VITALE, I.; BROZ, D.; DONDO, R. Optimizing log transportation in the Argentinean forest industry by column generation. *Forest Policy and Economics*, v. 92, p. 123–134, 2018. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.forpol.2018.04.003>.

WOSEY, L. A. MIP modeling of changeovers in production planning and scheduling problems. *European Journal of Operational Research*, v. 99, p. 154–165, 1997.

WYSOCKI, A.; GAUTAM, S.; RIJAL, B.; DORUSKA, P.; BURNS, K. Quantifying the value of log sorting based on the location of timber harvest sites across Wisconsin. *Forest Science*, v. 68, p. 193–199, 2022. DOI: <https://doi.org/10.1093/forsci/fxac005>.

ZANELLA, ENGENHARIA E INDÚSTRIA DE MÁQUINAS. Produtos: pátios de madeira e biomassa. Disponível em: <https://www.zanellamaquinas.com.br/pt/patios-de-madeira-e-biomassa.htm>. Acesso em: 12 fev. 2025.

APÊNDICE A – Uso de ferramentas de inteligência artificial

Ferramentas de inteligência artificial foram utilizadas de forma pontual como apoio à revisão textual e à organização da redação, sem interferência no conteúdo científico, nos dados, nos métodos ou nas análises apresentadas neste trabalho. A responsabilidade integral pelo conteúdo, interpretações e conclusões é da autora.