

UNIVERSIDADE FEDERAL DO PARANÁ

CARLOS EURICO GALVÃO ROSA

PLANEJAMENTO FLORESTAL INTEGRADO: UM MODELO PLIM PARA
AGENDAMENTO DE COLHEITA E ROTEAMENTO DE ESTRADAS.

CURITIBA

2025

CARLOS EURICO GALVÃO ROSA

PLANEJAMENTO FLORESTAL INTEGRADO: UM MODELO PLIM PARA
AGENDAMENTO DE COLHEITA E ROTEAMENTO DE ESTRADAS.

Tese apresentada como requisito parcial para a obtenção do grau de Doutor no Programa de Pós-Graduação em Métodos Numéricos em Engenharia, Setores de Tecnologia e de Ciências Exatas da Universidade Federal do Paraná.

Orientador: Prof. Dr. Gustavo Valentim Loch
Coorientador: Prof. Dr. Cassius Tadeu Scarpin

CURITIBA

2025

DADOS INTERNACIONAIS DE CATALOGAÇÃO NA PUBLICAÇÃO (CIP)
UNIVERSIDADE FEDERAL DO PARANÁ
SISTEMA DE BIBLIOTECAS – BIBLIOTECA CIÊNCIA E TECNOLOGIA

Rosa, Carlos Eurico Galvão

Planejamento florestal integrado: um modelo PLIM para agendamento de colheita e roteamento de estradas.. / Carlos Eurico Galvão Rosa. – Curitiba, 2025.

1 recurso on-line : PDF.

Tese – (Doutorado) - Universidade Federal do Paraná, Setor de Tecnologia, Programa de Pós-Graduação em Métodos Numéricos em Engenharia.

Orientador: Prof. Dr. Gustavo Valentim Loch

Coorientador: Prof. Dr. Cassius Tadeu Scarpin

1. Algoritmo genético. 2. Madeira - Transporte. 3. Transporte - Planejamento. 4. Otimização matemática. I. Universidade Federal do Paraná. II. Programa de Pós-Graduação em Métodos Numéricos em Engenharia. III. Loch, Gustavo Valentim IV. Scarpin, Cassius Tadeu V. Título.

Bibliotecária: Roseny Rivelini Morciani CRB-9/1585

TERMO DE APROVAÇÃO

Os membros da Banca Examinadora designada pelo Colegiado do Programa de Pós-Graduação MÉTODOS NUMÉRICOS EM ENGENHARIA da Universidade Federal do Paraná foram convocados para realizar a arguição da tese de Doutorado de **CARLOS EURICO GALVAO ROSA**, intitulada: **PLANEJAMENTO FLORESTAL INTEGRADO: UM MODELO PLIM PARA AGENDAMENTO DE COLHEITA E ROTEAMENTO DE ESTRADAS**, sob orientação do Prof. Dr. GUSTAVO VALENTIM LOCH, que após terem inquirido o aluno e realizada a avaliação do trabalho, são de parecer pela sua APROVAÇÃO no rito de defesa.

A outorga do título de doutor está sujeita à homologação pelo colegiado, ao atendimento de todas as indicações e correções solicitadas pela banca e ao pleno atendimento das demandas regimentais do Programa de Pós-Graduação.

Curitiba, 14 de Novembro de 2025.

Assinatura Eletrônica
12/12/2025 07:44:42.0
GUSTAVO VALENTIM LOCH
Presidente da Banca Examinadora

Assinatura Eletrônica
09/12/2025 23:40:41.0
ROBERTO ZANETTI FREIRE
Avaliador Externo (UNIVERSIDADE TECNOLÓGICA FEDERAL DO PARANÁ)

Assinatura Eletrônica
29/11/2025 15:47:06.0
LUIZ CARLOS MATIOLI
Avaliador Interno (UNIVERSIDADE FEDERAL DO PARANÁ)

Assinatura Eletrônica
28/11/2025 04:44:03.0
JULIO EDUARDO ARCE
Avaliador Externo (UNIVERSIDADE FEDERAL DO PARANÁ)

*Para Márcia, Marcos, Paloma
e especialmente Dorival Aparecido Rosa (in memoriam)*

AGRADECIMENTOS

Ao Programa de Pós-Graduação em Métodos Numéricos da Universidade Federal do Paraná pela oportunidade de realizar esta pesquisa.

Aos meus orientadores por toda atenção dispensada durante o processo.

Aos membros das bancas de qualificação e de defesa pelas valiosas contribuições à presente pesquisa.

A todos que, em maior ou menor grau, colaboraram para a realização deste trabalho.

“Ut in omnibus glorificetur Deus, per Beatam Mariam Semper Virginem.”

RESUMO

A colheita florestal é uma atividade essencial na indústria madeireira, exigindo um planejamento que garanta a sustentabilidade e a eficiência econômica. Esta pesquisa investiga a otimização do planejamento da colheita florestal, integrando o uso e a manutenção da infraestrutura viária associada. O método desenvolvido inclui um modelo de Programação Linear Inteira Mista (PLIM) acrescido de restrições do Problema de Roteamento Periódico em Arcos Capacitados (PCARP) adaptadas à Colheita Florestal, visando otimizar todo o processo. O objetivo do PLIM é agendar as atividades respeitando restrições de sequenciamento; fundamentais para assegurar que a colheita ocorra nas áreas apropriadas sem comprometer a integridade das estradas ou as necessidades logísticas de transporte. O trabalho ressalta a importância da definição dos parâmetros a serem utilizados no PLIM para a obtenção de soluções viáveis, enfatizando que a ausência de uma calibração adequada desses dados pode comprometer a exequibilidade do empreendimento. Para solucionar essa questão empregou-se um algoritmo genético (AG) na calibração dos parâmetros, validando o modelo proposto e fornecendo valores que permitem ao solver Gurobi alcançar uma solução otimizada a partir de uma solução factível. Os resultados demonstram a eficácia do uso do AG para a obtenção de parâmetros que viabilizam a solução do modelo PLIM, mesmo que a solução inicial do AG não seja a ótima. Uma contribuição significativa é o desenvolvimento de um algoritmo para gerar visualizações das soluções obtidas, convertendo dados numéricos em imagens que facilitam a compreensão e a tomada de decisão. As imagens geradas foram fundamentais para identificar inconsistências e direcionar melhorias. Observou-se nas soluções a baixa colheita em períodos pares, atribuída às restrições de talhões adjacentes e à redução do valor de lucro ao longo do tempo.

Palavras-chaves: Agendamento de colheita florestal; Algoritmo genético; Otimização; Planejamento de malha viária.

ABSTRACT

Forest harvesting is an essential activity in the timber industry, requiring planning that ensures sustainability and economic efficiency. This research investigates the optimization of forest harvesting planning, integrating the use and maintenance of associated road infrastructure. The developed method includes a model of Mixed Integer Linear Programming (MILP) plus restrictions of the Periodic Capacitated Arc Routing Problem (PCARP) adapted to Forest Harvesting, aiming to optimize the whole process. The objective of MILP is to schedule activities respecting key sequencing constraints; this ensures that harvesting takes place in appropriate areas without compromising road integrity or transport logistics needs. The study highlights the importance of defining the parameters to be used in the MILP to obtain viable solutions, emphasizing that the absence of an adequate calibration of these data can compromise the feasibility of the project. To solve this problem, a genetic algorithm (GA) was used in the calibration of the parameters, validating the proposed model and providing values that allow the solver Gurobi to achieve an optimized solution from a feasible solution. The results demonstrate the effectiveness of the use of GA to obtain parameters that enable the solution of the MILP model, even if the initial solution of the GA is not optimal. A significant contribution is the development of an algorithm to generate visualizations of the obtained solutions, converting numerical data into images that facilitate understanding and decision making. The generated images were fundamental to identify inconsistencies and drive improvements. Low harvest in even periods was observed in the solutions, attributed to restrictions of adjacent plots and reduction of profit value over time.

Key-words: Forest harvesting scheduling. Genetic Algorithm. Optimization. Road network planning.

LISTA DE ILUSTRAÇÕES

FIGURA 1 – ÍNDICE DE CUSTO DO SETOR FLORESTAL	15
FIGURA 2 – CONCEITO TRADICIONAL DO PROCESSO ADMINISTRATIVO	16
FIGURA 3 – NÍVEIS ORGANIZACIONAIS E HORIZONTES DE PLANEJAMENTO ASSOCIADOS	16
FIGURA 4 – CATEGORIA DE ÁREAS DE CONSERVAÇÃO DO SETOR DE ÁRVORES PLANTADAS, 2022 – 2024 [EM MILHÕES DE HECTARES]	21
FIGURA 5 – EXEMPLO DE REDE VIÁRIA DE ACESSO À TALHÕES	22
FIGURA 6 – POSSÍVEIS CENÁRIOS DE COLHEITA DE TALHÕES PRÓXIMOS	24
FIGURA 7 – CENÁRIO HIPOTÉTICO DE COLHEITA	25
FIGURA 8 – RESULTADOS QUANTITATIVOS DA REVISÃO DE LITERATURA	27
FIGURA 9 – TÉCNICAS UTILIZADAS PARA RESOLUÇÃO	35
FIGURA 10 – ORIGEM DOS DADOS PARA SOLUÇÃO DO PROBLEMA	36
FIGURA 11 – MÉTRICAS ADOTADAS NO TRABALHO	37
FIGURA 12 – SEQUÊNCIA DA PROPOSTA HIBRIDIZADA	54
FIGURA 13 – OPERAÇÃO DE MUTAÇÃO	55
FIGURA 14 – OPERAÇÃO DE <i>CROSSOVER</i>	55
FIGURA 15 – FLUXOGRAMA DO AG	56
FIGURA 16 – LOCALIZAÇÃO DO EMPREENDIMENTO FLORESTAL	60
FIGURA 17 – EVOLUÇÃO DAS SOLUÇÕES	65
FIGURA 18 – IMAGEM GERADA A PARTIR DA SOLUÇÃO A	66
FIGURA 19 – IMAGEM GERADA A PARTIR DA SOLUÇÃO B	67
FIGURA 20 – IMAGEM GERADA A PARTIR DA SOLUÇÃO C	68
FIGURA 21 – IMAGEM GERADA A PARTIR DA SOLUÇÃO D	69
FIGURA 22 – IMAGEM GERADA A PARTIR DA SOLUÇÃO E	70
FIGURA 23 – IMAGEM GERADA A PARTIR DA SOLUÇÃO F	71
FIGURA 24 – IMAGEM GERADA A PARTIR DA SOLUÇÃO DO AG	72

LISTA DE QUADROS

QUADRO 1 – <i>STRINGS</i> DE BUSCA	28
QUADRO 2 – CRITÉRIOS DE INCLUSÃO E EXCLUSÃO	29
QUADRO 3 – <i>SOLVERS</i> E LINGUAGENS	37
QUADRO 4 – EQUIPAMENTOS EMPREGADOS	37
QUADRO 5 – VARIÁVEIS DE FOLGA E SUAS IMPLICAÇÕES	53
QUADRO 6 – VARIÁVEIS DE EXCESSO E SUAS IMPLICAÇÕES	53
QUADRO 7 – PARÂMETROS USADOS NO AG	55
QUADRO 8 – ARQUIVOS DA BASE PHYLLIS LEEPER	60
QUADRO 9 – PARÂMETROS ARBITRÁRIOS	62
QUADRO 10 – INFORMAÇÕES DO ARQUIVO JSON	63
QUADRO 11 – PARÂMETROS GERADORES DAS SOLUÇÕES	64

LISTA DE TABELAS

TABELA 1 – INFORMAÇÕES DAS SOLUÇÕES	64
TABELA 2 – EXCERTO DA TABELA DE VALOR PRESENTE LÍQUIDO DA BASE PHYLLIS LEEPER	73
TABELA 3 – CARREGAMENTOS, ABERTURAS E MANUTENÇÕES DE ES- TRADAS POR SOLUÇÃO	74

LISTA DE ABREVIATURAS E DE SIGLAS

AG	Algoritmo Genético
APPS	Áreas de Preservação Permanente
CARP	<i>Capacitated Arc Routing Problem</i> — Problema de Roteamento em Arcos Capacitados
HP	Horizonte de Planejamento
IBÁ	Indústria Brasileira de Árvores
GA	<i>Genetic Algorithm</i>
MILP	<i>Mixed Integer Linear Programming</i>
PCARP	<i>Periodic Capacitated Arc Routing Problem</i> — Problema de Roteamento Periódico em Arcos Capacitados
PCARP-FH	<i>Periodic Capacitated Arc Routing Problem - Forest Harvesting</i> — Problema de Roteamento Periódico em Arcos Capacitados para Colheita Florestal
PLB	Programação Linear Binária
PLIM	Programação Linear Inteira Mista
PMFS	Plano de Manejo Florestal Sustentável
PO	Pesquisa Operacional
RL	Reserva Legal
RPPNS	Reservas Naturais do Patrimônio Particular

SUMÁRIO

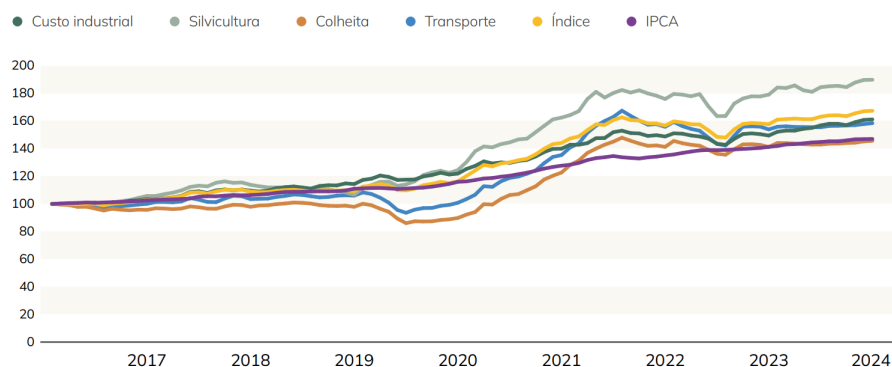
1	INTRODUÇÃO	15
1.1	OBJETIVOS	18
1.1.1	Objetivo Geral	19
1.1.2	Objetivos específicos	19
1.2	IMPORTÂNCIA E JUSTIFICATIVA	19
1.3	CONTRIBUIÇÃO CIENTÍFICA	20
1.4	ESTRUTURA DO TRABALHO	20
2	CONTEXTO FLORESTAL	21
2.1	GESTÃO FLORESTAL	21
2.1.1	Planejamento Hierárquico Florestal	22
2.1.2	Agendamento e Colheita	23
2.2	DESCRIÇÃO DA PROPOSTA - DO CARP AO PCARP-FH	24
3	REVISÃO DE LITERATURA	27
4	PROPOSTA	39
4.1	ANÁLISE DO PROBLEMA	39
4.1.1	Objetivo do problema	40
4.1.2	Pontos do problema	40
4.1.3	Simplificações	41
4.2	ELABORAÇÃO DAS RESTRIÇÕES	42
4.2.1	Ponto 1: Colheita e demanda	42
4.2.2	Ponto 2: Blocos e Distâncias entre talhões	43
4.2.3	Ponto 3: Veículos	46
4.2.4	Ponto 4 e Ponto 5: Abertura e uso de estradas	46
4.2.5	Ponto 6: Forma de carregamento	49
4.3	MODELAGEM	50
4.3.1	Considerações acerca da modelagem na programação	52
4.3.2	Variáveis de folga e excesso	52
4.3.3	Outros parâmetros que podem causar infactibilidade	54
4.4	IMPLEMENTAÇÃO	56
4.4.1	Adaptações do modelo na implementação	59
4.5	DADOS DE TESTE	60
5	RESULTADOS	63
5.1	EXECUÇÕES	63
5.2	SOLUÇÕES OBTIDAS	63
6	CONCLUSÕES	75
6.1	TRABALHOS FUTUROS	76
	REFERÊNCIAS	79
	APÊNDICE 1 – RESUMO EXPANDIDO PUBLICADO DA MODELAGEM DO PLIM	85

APÊNDICE 2 – ARTIGO PUBLICADO DO DESENVOLVIMENTO	
DO AG	94
APÊNDICE 3 – LETRAS E SÍMBOLOS USADOS NA MODELAGEM	112
APÊNDICE 4 – MAPA DA INSTÂNCIA PHYLLIS LEEPER	114

1 INTRODUÇÃO

O Brasil possui uma vasta extensão territorial de 8.510.295,914 km² segundo o IBGE (2020), sendo que quase 60% dessa área é composta por florestas, conforme dados do Serviço Florestal Brasileiro (Brasil, 2019). Desse total, as formações naturais ocupam 4.880.669,46 km² (57,31% do território), enquanto as florestas plantadas abrangem 98.396,86 km² (1,16%). O setor de base florestal, que atua majoritariamente sobre as áreas plantadas, desempenha um papel socioeconômico vital: gera mais de 700 mil empregos diretos e uma receita bruta próxima de R\$ 240 bilhões, conforme o relatório de 2025 da Indústria Brasileira de Árvores (IBÁ) (IBÁ, 2025). O referido documento destaca ainda a evolução dos índices de custos do setor desde 2017 (figura 1). Diante desse cenário de elevação de custos, torna-se evidente que iniciativas voltadas à otimização de processos e à redução de despesas são essenciais para manter a competitividade do setor.

FIGURA 1 – ÍNDICE DE CUSTO DO SETOR FLORESTAL
[Janeiro 2017 = 100]



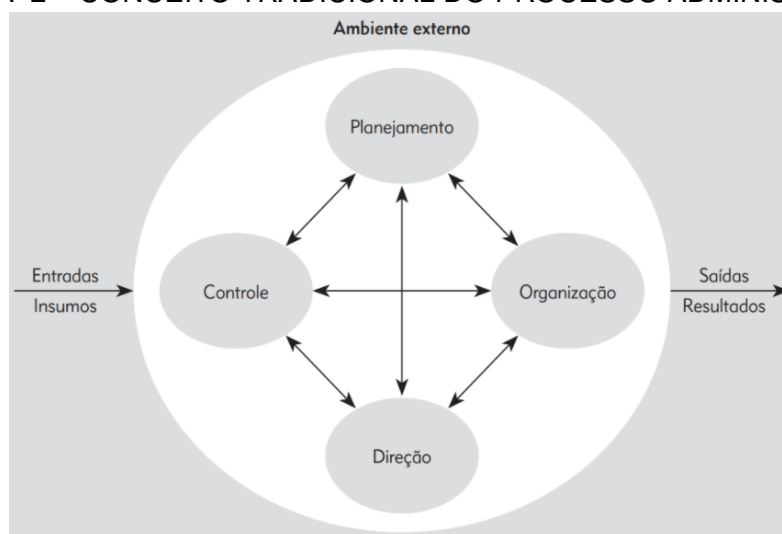
FONTE: IBÁ (2025, p. 24).

Toda essa produção é afetada por uma série de restrições, tanto de ordem legislativa quanto inerentes ao próprio contexto de cultivo e produção florestal, e necessita de um bom planejamento. A exploração de uma área florestal pode ser considerada, por analogia, como uma organização a ser administrada ou um empreendimento a ser executado. Com isso, conceitos próprios da administração, como níveis organizacionais e processo administrativo, cabem perfeitamente ao contexto.

Planejar, conforme Chiavenato (2011), é uma das etapas do processo de administrar uma organização, em um conceito mais geral, como mostra a figura 2.

O planejamento é conceituado por Bateman e Snell (2012, p. 74) como “o processo consciente e sistemático de tomada de decisões sobre metas e atividades que uma pessoa, um grupo, uma unidade, ou uma empresa tentará realizar no futuro”. As

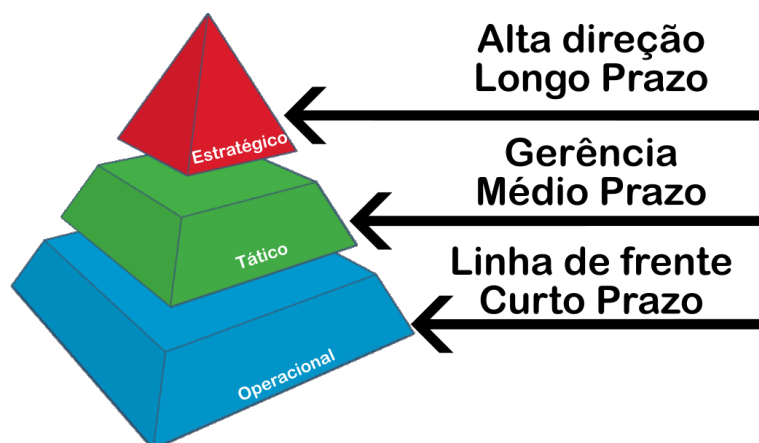
FIGURA 2 – CONCEITO TRADICIONAL DO PROCESSO ADMINISTRATIVO



FONTE: Chiavenato (2011, p. 14).

metas são os objetivos a serem alcançados e os planos são as atividades concorrentes para atingir as metas. A cada nível organizacional é associado um planejamento próprio, sendo que a especificação do planejamento é dividida em Estratégico, Tático e Operacional. Os níveis organizacionais nos quais o empreendimento se desdobra, bem como seu respectivo Horizonte de Planejamento (HP), são ilustrados na figura 3.

FIGURA 3 – NÍVEIS ORGANIZACIONAIS E HORIZONTES DE PLANEJAMENTO ASSOCIADOS



FONTE: O autor (2025).

No contexto florestal, Martell et al. (1998) recordam a importância do planejamento estratégico na gestão florestal desde o século XIX, considerado essência da silvicultura tradicional europeia na referida época. Ainda segundo os mesmos autores, a busca pela maximização do volume colhido foi substituída por uma gestão florestal sustentável. Enquanto se veem demandas crescentes tanto para produtos madeireiros quanto para produtos não madeireiros e serviços não consumíveis, como recreação, em espaços de plantio restritos, existem pressões e restrições vindas de grupos de

interesse. Desta forma, já é um grande desafio para os profissionais do ramo florestal encontrar soluções factíveis para o problema, mesmo que nem sempre sejam ótimas. A utilização da Pesquisa Operacional (PO) pode auxiliar os planejadores a encontrar soluções que satisfaçam as diversas restrições, otimizando uma função objetivo, seja minimizando ou maximizando seu valor.

A interpretação de Banhara (2009) da estratificação do planejamento para a gestão florestal, com base em diversos trabalhos por ele citados, traz as seguintes características:

- O Planejamento Estratégico Florestal trabalha com um HP de um ciclo florestal e meio, variando conforme o crescimento das espécies a serem colhidas. Neste nível, são trazidas as opções de manejo, os quantitativos de volume, os talhões a serem disponibilizados para a operação florestal (Banhara, 2009, p. 24) e outras necessidades.
- No Planejamento Tático Florestal são estabelecidas metas mensais e HP em torno de um a cinco anos. Banhara (2009) menciona a possível subdivisão deste planejamento em microplanejamento e macroplanejamento. Este trata o talhão como unidade de manejo, definindo, entre outras atividades, o sequenciamento da operação de colheita e transporte e o estabelecimento de melhoria ou ampliação da malha viária, que são ações ligadas à presente pesquisa. Já no microplanejamento, as ações estabelecidas são internas ao talhão.
- Por fim, no Planejamento Operacional Florestal são tratadas decisões semanais, com HP de um ano, como escolha de época de colheita, alocação de equipes e recursos, além de desenvolver, coordenar e executar mecanismos de aferição do progresso dos trabalhos, a fim de alcançar as metas estabelecidas.

O manejo florestal, parte essencial do Planejamento estratégico, é definido na Lei de Gestão de Florestas Públicas como:

“administração da floresta para a obtenção de benefícios econômicos, sociais e ambientais, respeitando-se os mecanismos de sustentação do ecossistema objeto do manejo e considerando-se, cumulativa ou alternativamente, a utilização de múltiplas espécies madeireiras, de múltiplos produtos e subprodutos não madeireiros, bem como a utilização de outros bens e serviços de natureza florestal.” (Brasil, 2006b, Lei 11.284/2006, Art.3º, inciso VI)

Para tal gestão, é preciso estar atento aos mecanismos citados, buscando sempre obter o melhor aproveitamento dentro destes limites, seguindo o Plano de Manejo Florestal Sustentável (PMFS) a ser elaborado conforme o Decreto 5.975/2006 (Brasil, 2006a). A análise de D'Arace et al. (2019, p. 41) chega à conclusão de que o

uso de técnicas de manejo contribui para a redução dos efeitos negativos da exploração florestal, analisando recrutamento e mortalidade de árvores. Um ponto a ressaltar desta análise, considerando o exemplo prático analisado no mesmo trabalho, é o impacto causado pelas estradas secundárias na probabilidade dessa mortalidade. Isso ocorre porque um mau planejamento do acesso a determinado local pode colocar em risco o desenvolvimento de árvores que estejam próximas do trajeto, inviabilizando sua futura colheita.

A análise do uso e manutenção de estradas remete ao *Capacitated Arc Routing Problem* (CARP — Problema de Roteamento em Arcos Capacitados). Tomando um grafo $G(V, A)$, no qual V , o conjunto de vértices, representa pontos que precisam ser atendidos por veículos e A , o conjunto de arestas, as rotas que ligam estes vértices, o CARP tem por objetivo estabelecer rotas mínimas que atendam a todas as demandas do arco segundo as capacidades de atendimento da frota disponível. O CARP é acrescido de restrições específicas caso esse atendimento ocorra com periodicidade superior a um dia, passando a ser conhecido como *Periodic Capacitated Arc Routing Problem* (PCARP — Problema de Roteamento Periódico em Arcos Capacitados) e aumentando sua complexidade, segundo Batista et al. (2019). Essa abordagem é comum para problemas de coleta de lixo, limpeza de ruas devido à neve ou, como apresentado por Batista et al. (2019), manutenção periódica em estradas de ferro, dentre outros casos semelhantes, nos quais há demanda ao longo de todo um arco do grafo.

Consideradas tais situações, a presente tese busca contribuir para a melhoria dos cenários de manejo ao resolver um modelo de Programação Linear Inteira Mista (PLIM) incrementado com restrições do PCARP, aqui denominado de *Periodic Capacitated Arc Routing Problem – Forest Harvesting* (PCARP-FH – Problema de Roteamento Periódico em Arcos Capacitados para Colheita Florestal). Nesse aspecto, há um fator do Planejamento Estratégico que é a construção da rede viária florestal para todo o HP, podendo-se considerar fatores dos planejamentos tático e operacional. A definição do sequenciamento de colheita dos talhões no HP (do Planejamento Tático) também leva em conta as necessidades de manutenção da malha viária com as restrições do PCARP. Espera-se que o uso da malha viária de forma inteligente minimize a necessidade de manutenção ocasionada por longos períodos de desuso. O modelo PCARP-FH, resultante desta união, tem como base os modelos de Correa et al. (2020) nas restrições ligadas ao agendamento e sequenciamento da colheita e Batista et al. (2019) nas restrições do PCARP.

1.1 OBJETIVOS

Seguem os objetivos geral e específicos estabelecidos para esta tese.

1.1.1 Objetivo Geral

Propor um modelo de agendamento para a colheita florestal, considerando o PCARP-FH, que promova a otimização do processo de colheita e a adequada gestão e manutenção das estradas de acesso aos talhões, respeitando as restrições de sequenciamento da colheita e as demandas de coleta e transporte dos sortimentos.

1.1.2 Objetivos específicos

- Desenvolver um modelo PLIM para o agendamento de colheita;
- Incorporar ao modelo as restrições relativas à abertura e manutenção de estradas, sendo os vértices do grafo os talhões e os segmentos da malha viária entre talhões as arestas, formando o PCARP-FH;
- Estabelecer um método de estimativa de parâmetros das equações do modelo proposto, a fim de obter uma solução factível para o problema dentro das condições técnicas disponíveis.
- Validar o modelo desenvolvido com a base de dados disponível e os parâmetros estimados.

1.2 IMPORTÂNCIA E JUSTIFICATIVA

Ao iniciar a busca nas bases de dados, como relatado no capítulo 3, observa-se uma considerável quantidade de trabalhos retornados de diversas localidades. Muitos destes trabalhos apresentam enfoque na prevenção de riscos de incêndio ou não são relacionados à otimização viária; por isso, não foram selecionados para a fundamentação da presente pesquisa. Os trabalhos escolhidos podem ser agrupados em: operações de colheita sem abertura de estradas (Bellavenutte et al., 2020; Silva et al., 2020; Helo; Rouzafzoon, 2023); construção de traçado a partir de dados geográficos (Yildirim; Kadi, 2020; Aguiar et al., 2021; Tsiotas et al., 2023); preparação de estradas para uso considerando fluxo colhido sem agendamento (Mesquita et al., 2021; Constantino et al., 2025); construção de corredor ecológico (Yemshanov et al., 2021); agrupamento de pequenas fazendas (Hosaka et al., 2022; Kaneko et al., 2024); e otimização de agendamento com abertura de estradas (Naderializadeh; Crowe, 2020; Naderializadeh et al., 2020, 2022). Apenas este último grupo, e mais especialmente Naderializadeh et al. (2022), se aproxima do objetivo desta pesquisa, que é a resolução integrada de agendamento e construção das vias em uma única etapa, enquanto os trabalhos citados resolvem o problema em partes: primeiro é feito o agendamento da colheita para depois otimizar as estradas. Com isso, entende-se haver uma lacuna a ser preenchida por esta tese.

1.3 CONTRIBUIÇÃO CIENTÍFICA

A contribuição científica desta pesquisa consiste nas seguintes elaborações:

- Modelo matemático PCARP-FH que integra o agendamento da colheita florestal com previsão de abertura e manutenção de estradas para viabilização deste agendamento, com resumo expandido em evento e posterior publicação em revista, disponível em <https://doi.org/10.57077/monumenta.v12i12.302> inserido no Apêndice 1;
- Algoritmo Genético (AG) em versão original para a estimativa dos parâmetros necessários à resolução teórica do problema com obtenção de solução factível, descrito em artigo disponível em <https://doi.org/10.24857/rgsa.v19n4-072> e inserido no Apêndice 2;
- Aplicativo para resolução do problema com parâmetros sugeridos pelo AG e *solver* Gurobi, obtendo solução otimizada em relação aos resultados do AG;
- Aplicativo para geração de imagens das soluções obtidas com base em arquivo gerado pelo *solver* e dados da base selecionada, com registro de produção no Instituto Nacional da Propriedade Industrial.

1.4 ESTRUTURA DO TRABALHO

A presente tese se estrutura da seguinte forma: no capítulo 2, é feita uma descrição do problema de agendamento da colheita florestal. No capítulo 3, segue uma revisão de literatura com trabalhos relacionados à obtenção de solução para o problema, seja com modelos matemáticos ou heurísticos. Uma proposta de solução do problema é apresentada no capítulo 4, com os resultados obtidos expostos no capítulo 5, seguidos das considerações finais.

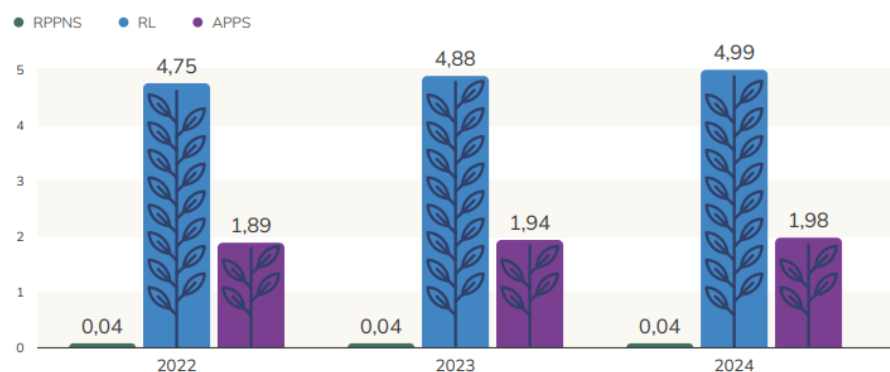
2 CONTEXTO FLORESTAL

Como visto na introdução, o planejamento é fundamental para a boa exploração da área, inclusive no cumprimento de exigências legais. Nas seções seguintes, são abordados tópicos relacionados ao tema desta tese, fornecendo uma contextualização geral do problema em investigação e da proposta de solução.

2.1 GESTÃO FLORESTAL

Produtos florestais fazem parte do dia a dia, muitas vezes de forma imperceptível. Desde itens facilmente associados à madeira, como papel (embalagens, livros, papéis sanitários), carvão vegetal, móveis e pisos laminados, passando por resinas, tintas e aromatizantes, até inovações tecnológicas da indústria da madeira, como roupas, bioplásticos e aço verde que é resultante do uso de biomassa na fundição do ferro-gusa, reduzindo, assim, a emissão de CO₂ em relação à fundição tradicional. A simples extração madeireira, sem cuidados com o replantio e o planejamento, além de contrariar a legislação vigente, é diretamente prejudicial ao próprio extrator por exaurir rapidamente os recursos que lhe estão disponíveis, sem perspectiva para futuras colheitas no mesmo local. Além disso, a falta de planejamento pode gerar eventuais perdas, impedindo assim o aproveitamento máximo do material colhido e exigindo elevado investimento futuro na aquisição de novas áreas, as quais nem sempre estão disponíveis. O relatório IBÁ (2025, p. 57) apresenta a evolução das áreas de preservação do setor florestal, divididas em reserva legal (RL), áreas de preservação permanente (APPs) e reservas particulares do patrimônio natural (RPPNs), ressaltando o compromisso do setor com as práticas de sustentabilidade, como ilustra a figura 4.

FIGURA 4 – CATEGORIA DE ÁREAS DE CONSERVAÇÃO DO SETOR DE ÁRVORES PLANTADAS, 2022 – 2024 [EM MILHÕES DE HECTARES]



FONTE: IBÁ (2025, p.57).

2.1.1 Planejamento Hierárquico Florestal

Como já descrito, há um paralelo entre a gestão de um empreendimento florestal e a de uma organização, aplicando-se o conceito de níveis organizacionais ao planejamento florestal. Recordando Banhara (2009), o planejamento estratégico tem um HP maior que o ciclo florestal, ensejando metas anuais; o planejamento tático baseia-se em um HP de alguns anos com metas mensais; o operacional foca em HP anual e metas semanais. É necessário, para o bom funcionamento do empreendimento, que esses níveis atuem em perfeita sintonia e colaboração mútua (Chiavenato, 2011, p. 16), sendo os planejamentos coerentes entre si, mutuamente apoiados e tendo como foco principal a busca de propósito e orientação compartilhados (Bateman; Snell, 2012, p. 79).

Banhara (2009) aborda aspectos fundamentais do planejamento florestal em seus diferentes níveis. No que diz respeito ao planejamento estratégico, são discutidos temas relevantes, como o manejo, o volume de produção, a disponibilidade dos talhões e questões de aquisições e arrendamentos, entre outros. Durante essa fase do planejamento, determina-se quais talhões serão colhidos em cada período, assim como os meios de acesso a esses locais. Para ilustrar, a figura 5 apresenta uma rede viária de acesso, contendo tanto as vias principais quanto as secundárias. A proposta da presente tese se encaixa inicialmente nesta fase, em que ocorre a definição da malha viária a ser utilizada para atender às demandas de cada talhão. Esta malha pode ser preexistente, construída de uma só vez ou construída segundo a necessidade.

FIGURA 5 – EXEMPLO DE REDE VIÁRIA DE ACESSO À TALHÕES



FONTE: O autor (2025).

Para o planejamento tático, Banhara (2009) ressalta as restrições ligadas a temas ambientais e físicos intrínsecos à operação. Na divisão deste plano em macroplanejamento e microplanejamento, as questões externas ao talhão ficam a cargo do macroplanejamento, enquanto as internas pertencem ao microplanejamento. Assim, a sequência de talhões a serem colhidos, o acesso a esses talhões e os equipamentos a serem utilizados na operação são tópicos relacionados ao macroplanejamento. Por sua vez, o microplanejamento abrange questões como os eixos de corte, a maneira de retirar a madeira do talhão e as áreas de corte proibidas. Mais uma vez, a presente tese se intersecta ao buscar o agendamento das colheitas, considerando a malha viária existente e sua capacidade.

No planejamento operacional, as ações abrangem a alocação de equipes, a definição de épocas de colheita, o gerenciamento do transporte, além da aferição do andamento das metas estabelecidas. Considera-se que a proposta da presente tese não tenha ligação direta com este planejamento, embora informações dos planejamentos de nível inferior contribuam para as decisões a serem tomadas nos níveis superiores.

2.1.2 Agendamento e Colheita

Como descrito no planejamento tático, é preciso definir o conjunto de talhões a serem colhidos em cada período, dentro do HP. Sobre essa escolha recaem questões ambientais, logísticas e de produtividade. A colheita de muitos talhões adjacentes prejudica a biodiversidade local, retirando a possibilidade de que espécimes da vida selvagem, habitantes do talhão a ser colhido, possam se abrigar em um local próximo não operado. Por outro lado, uma colheita reduzida resulta em uma menor produtividade, que pode vir a não atender à demanda especificada do período. Com isso, é preciso designar a colheita de dois talhões que sejam o mais próximos possível, a fim de minimizar os custos operacionais, mas que sejam suficientemente distantes para minimizar o impacto ambiental. É nesse sentido que são estabelecidas as restrições que envolvem a definição de áreas mínimas e máximas para colheita em área contígua, bem como o distanciamento entre talhões a serem colhidos.

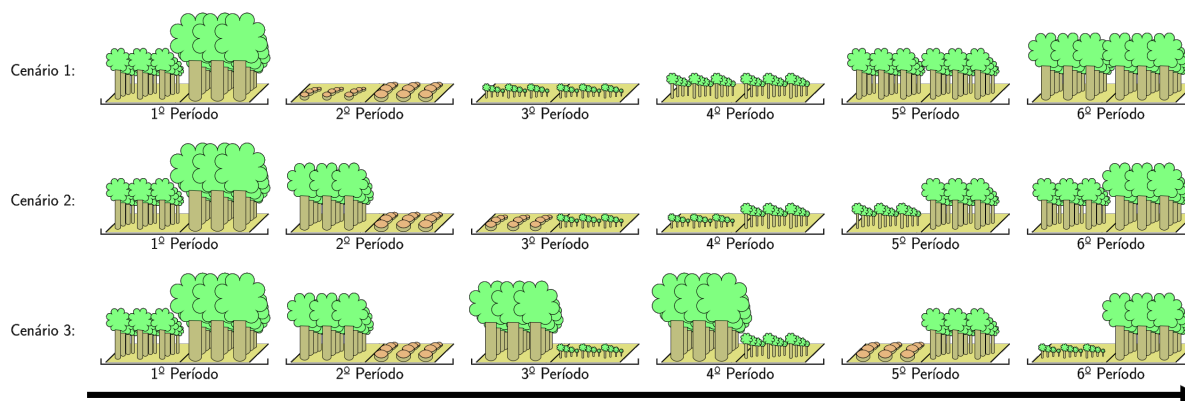
Como não há relação determinística entre os mencionados limites de área para colheita e a área individual de cada talhão, é possível considerar a formação dos chamados blocos de colheita, que funcionam como um *cluster* de talhões. Assume-se a existência de um bloco de colheita inicial em cada período. Novos blocos serão criados sempre que o volume previsto para colheita for insuficiente para atender à demanda máxima esperada do período, considerada uma tolerância nesse valor. Caso o primeiro bloco formado já atenda a toda a demanda, ao menos este foi criado validando o pressuposto acima. Desse modo, a soma das áreas dos talhões colhidos em um determinado bloco deverá respeitar os limites estabelecidos de áreas mínimas e

máximas de colheita, contanto que dois talhões de um mesmo bloco só sejam colhidos se estiverem a uma distância maior que um mínimo predeterminado, mas não tão longe que onere a operação.

Outra questão ambiental levantada neste tópico envolve a colheita de talhões próximos no intervalo de tempo da operação. Não basta evitar a colheita de talhões adjacentes no mesmo período, devido à distância já mencionada, mas é necessário também evitar a colheita em período imediatamente posterior, garantindo tempo para que a vegetação do talhão colhido possa se recuperar. Nesse sentido, são impostas restrições que impedem que talhões adjacentes sejam colhidos em um curto intervalo de tempo. Também deve ser respeitada a idade de cada talhão, a fim de evitar colheitas prematuras que não geram a melhor receita possível naquele espaço.

A figura 6 ilustra três cenários de desenvolvimento de dois talhões adjacentes, numerados com referência aos períodos de operação. Em todos os exemplos, o talhão mais desenvolvido é colhido no segundo período. A diferenciação dos cenários está na colheita do outro talhão: no cenário 1, os talhões adjacentes são colhidos no mesmo período; no cenário 2, os talhões adjacentes são colhidos em períodos subsequentes; e, no cenário 3, há um intervalo entre a colheita dos talhões adjacentes.

FIGURA 6 – POSSÍVEIS CENÁRIOS DE COLHEITA DE TALHÕES PRÓXIMOS



FONTE: O autor (2025).

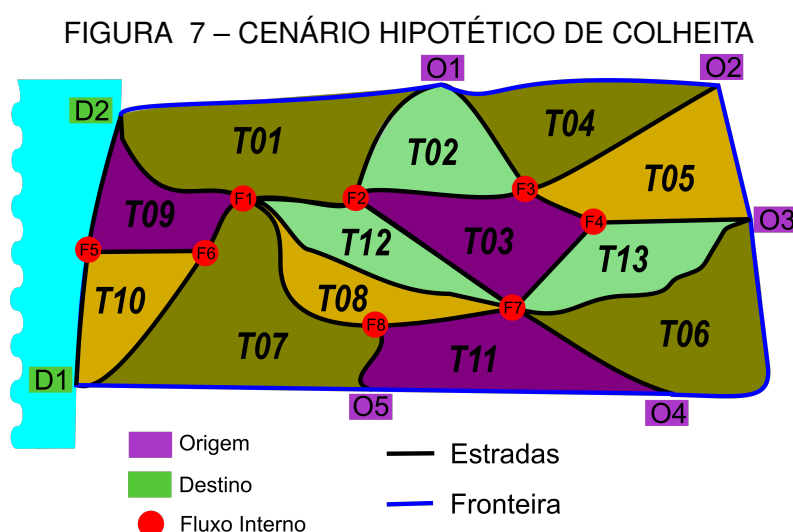
Nota-se, nos dois primeiros cenários, que, ao colher a área contígua sem respeitar um período de recomposição da floresta, a área mais exposta diminui a possibilidade de refúgio para a biodiversidade local, gerando um problema ambiental.

2.2 DESCRIÇÃO DA PROPOSTA - DO CARP AO PCARP-FH

O CARP é um problema do tipo *NP-hard* com diversas aplicações, sendo as mais comuns a limpeza de estradas com neve, a prevenção de acúmulo de neve mediante a aplicação de sal nas vias e a coleta de lixo, conforme enunciado desde

Assad e Golden (1995) até os mais recentes Liu et al. (2021) e Wang et al. (2022), dentre tantos outros. Resumidamente, o CARP tem por objetivo minimizar o custo do atendimento das demandas nas arestas do grafo mediante uma rota otimizada.

No problema deste estudo, há um conjunto de talhões no agendamento a serem colhidos em um determinado bloco e período. As fronteiras entre esses talhões são as estradas de acesso, que terão como demanda de abertura ou manutenção consoante a necessidade de colheita. A figura 7 ilustra um empreendimento fictício para facilitar a compreensão dos conceitos.



FONTE: O autor (2025).

Os pontos **O** são os pontos de origem de arestas. Estes, por estarem no limite do empreendimento florestal, não têm necessariamente ligação pela fronteira e, por isso, são considerados pontos que não devem receber fluxo de produtos. O oposto destes são os pontos identificados como **D**, chamados de destino ou sumidouro. Correspondem a saídas da malha viária, podendo ser o destino dos produtos ou um ponto de transbordo para outra forma de transporte não considerada na otimização. Os demais são chamados pontos de fluxo interno, recebendo o **F** em sua nomenclatura.

O volume colhido por um talhão específico se torna demanda de um de seus vértices, que será o local de carregamento. Para que esse volume colhido chegue a seu destino, o veículo que fará a coleta precisa percorrer uma trajetória, a qual consiste em um conjunto de estradas obtido pelo algoritmo de Floyd-Warshall buscando o menor custo de deslocamento desde o vértice da coleta até um dos pontos de transbordo.

O algoritmo de Floyd-Warshall foi proposto por Floyd (1962), baseado no trabalho com matrizes booleanas de Warshall (1962), como uma proposta de obter o caminho mais curto entre dois pontos de um grafo orientado. Inicia-se com uma matriz $M_{n \times n}$ de distâncias dos n vértices do grafo. Quando há ligação direta entre dois pontos i e j , a distância desta ligação é o valor associado à M_{ij} , enquanto se atribui um valor

elevado para ligações inexistentes, sendo que Floyd (1962) propõe $M_{ij} = 10^{10}$ como este valor. Com essa matriz, para cada par (i, j) é verificado se algum k possui valor $M_{ik} + M_{kj} < M_{ij}$, representando que a distância passando por k é menor que a ligação direta. O valor de M_{ij} passa a ser o menor entre M_{ij} e $M_{ik} + M_{kj}$. Após passar por todos os pares (i, j) , a matriz conterá em todos os seus elementos a menor distância entre os pontos. Em aplicações mais recentes, também é proposta a criação de uma matriz $P_{n \times n}$ de predecessores, sendo trabalhada em conjunto com M . Na inicialização, se $M_{ij} < 10^{10}$, define-se $P_{ij} = i$. Posteriormente, se $M_{ik} + M_{kj} < M_{ij}$ se atribui $P_{ij} = P_{kj}$, possibilitando construir uma trajetória entre dois pontos do grafo ao buscar a sequência dos predecessores desde o destino até a origem.

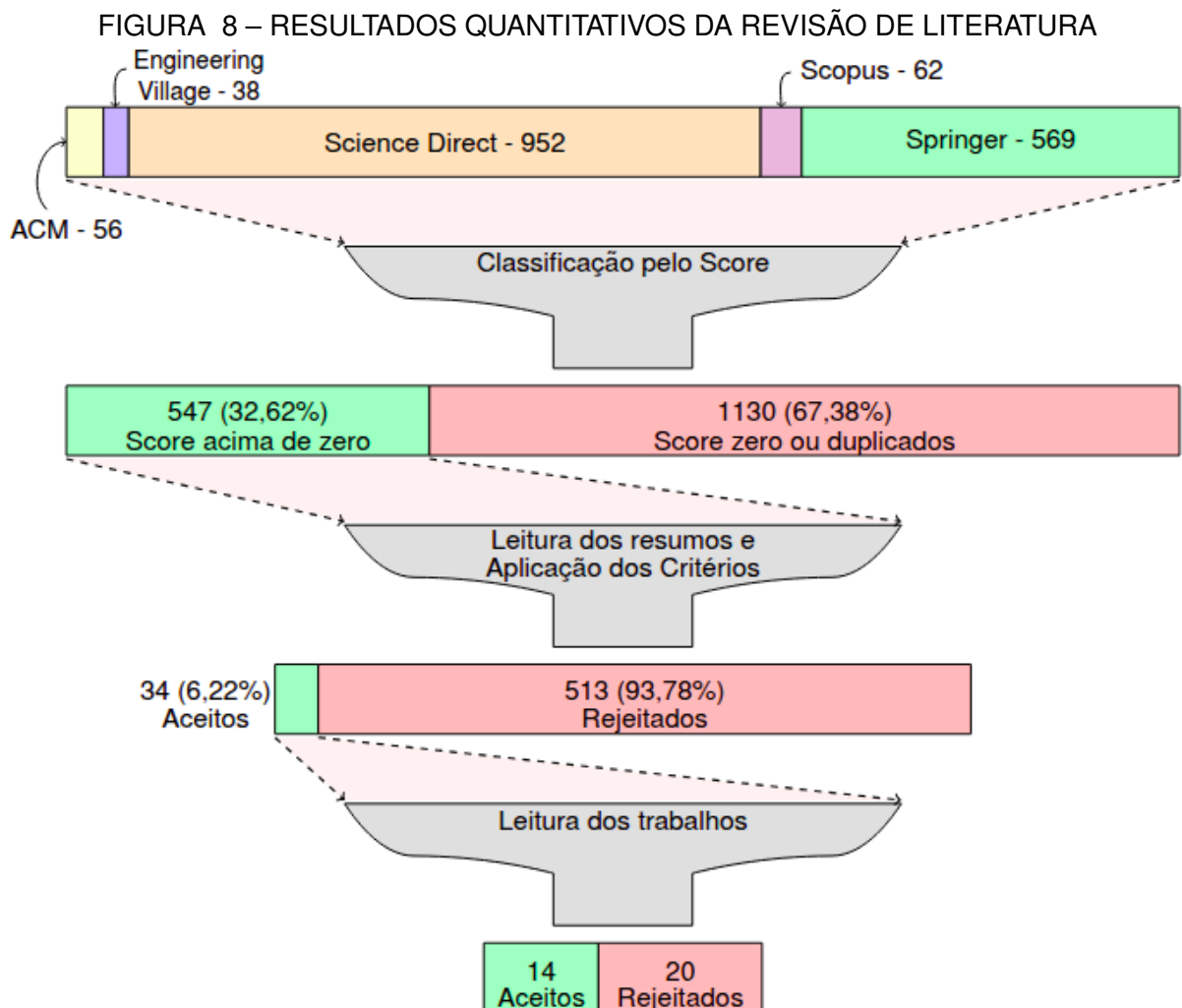
Essas características formam um grafo $(V, A \cup E)$, composto de vértices V , arestas orientadas A , sendo as que contêm pontos extremos **O** ou **D**, e arestas não orientadas E , que contêm apenas pontos **F** como extremos. Nesse grafo, pode-se aplicar o PCARP para definir as rotas de atendimento dos talhões, visto que, em cada período do HP, será atendido um conjunto de talhões agendados, ocorrendo a repetição desse atendimento apenas após o fim do HP. O incremento do PCARP para PCARP-FH ocorre pela necessária manutenção ou abertura de estradas em uma trajetória de acesso ao talhão no período $p - 1$, caso ele esteja agendado para colheita no período p . Enquanto se obtém a rota necessária para os atendimentos, gera-se a demanda de manutenção prévia, buscando-se um valor otimizado de colheita que considere os custos de transporte e manutenção.

O custo de manutenção de um arco será impactado pela necessidade de abertura dessa via, bem como pelo tempo de desuso, partindo do pressuposto de que isso cause acúmulo de resíduos e crescimento de vegetação, encarecendo sua manutenção. Por outro lado, não é justificável manter um arco que não terá utilização em um horizonte próximo. Pode ser testada, para fins teóricos, a abertura de novos arcos entre os talhões; entretanto, pesa contra essa possibilidade a necessidade de minimizar a extensão das estradas, uma vez que cada área destinada ao tráfego representa uma redução na área disponível para plantio. Além disso, é preciso considerar aspectos topográficos para rotas inexistentes, os quais podem tornar proibitiva tal ligação. Devido a isso, nesta pesquisa trabalha-se com as ligações já existentes entre talhões, deixando a abordagem com criação de novas conexões para uma análise tridimensional futura.

São dados necessários para a modelagem do problema: a quantidade de talhões; a demanda por período; as áreas mínimas e máximas de colheita; a distância mínima para colheitas em um mesmo bloco; a distância mínima para colheitas em períodos consecutivos; a malha viária existente; o custo estimado de manutenção dos trechos da malha e a sua capacidade de tráfego. Espera-se, como resposta do modelo, a definição dos talhões a serem colhidos por período e a melhor rota para atendê-los.

3 REVISÃO DE LITERATURA

Para fundamentar a presente pesquisa, foi executada uma revisão de literatura inspirada nas orientações de Kitchenham (2004), com o auxílio do programa StArt. Nessa metodologia, são previstas as seguintes etapas: planejamento, execução e sumarização. A busca dos artigos foi atualizada no primeiro semestre de 2025, limitando-se a publicações com menos de cinco anos; escolheu-se esse intervalo temporal para avaliar como o assunto tem sido abordado atualmente. A figura 8 apresenta um resumo do fluxo de seleção dos trabalhos, ilustrando cada etapa de execução, as quais serão descritas na sequência.



FONTE: O autor (2025).

No planejamento, são traçados os direcionamentos da revisão. O processo inicia-se com as perguntas que precisam ser respondidas, destacando o problema que a pesquisa busca abordar para implementar melhorias na área de estudo. Neste trabalho,

procurou-se por iniciativas que, ao serem aplicadas à colheita florestal, integrassem soluções com a otimização da malha rodoviária, além de classificar diferentes maneiras de resolver essa questão. Essas restrições foram estabelecidas com o intuito de identificar projetos semelhantes à proposta inicial desta pesquisa. A principal questão de pesquisa formulada foi: “Como aprimorar a colheita florestal utilizando métodos de otimização de estradas?”

Na sequência do planejamento, são designados os motores de busca e, devido à facilidade de acesso, foram escolhidos, em ordem alfabética: ACM, Engineering Village, Science Direct, Scopus e Springer. Os idiomas selecionados para a busca foram inglês e português, sendo definidos os descritores “forest harvest”; “forest harvesting”; “forest management”; “forest road”; “optimal harvesting”; “optimization”; “road network” e “routing optimization”. Para cada motor de busca, foi construída a *string* de pesquisa, conforme quadro 1.

QUADRO 1 – *STRINGS* DE BUSCA

Motor	<i>String</i>	Resultados
ACM	[[All: “forest harvest”] OR [All: “forest management”]] AND [All: “optimization”] AND [[All: “road”] OR [All: “network”]]	56
Engineering Village	((“Forest Harvest” OR “Forest Management”) AND “Optimization” AND (“Road” OR “Network”)) WN ALL)	38
Science Direct	(“Forest Harvest” OR “Forest Management”) AND “Optimization” AND (“Road” OR “Network”)	952
Scopus		62
Springer		569
Total		1677

FONTE: O autor (2025).

O primeiro filtro, aplicado aos 1677 trabalhos obtidos, é a atribuição de score aos resumos, um recurso do programa StArt. De cada motor de busca, é exportado um arquivo no formato “.bib”, contendo as referências retornadas pela busca e seus respectivos resumos. Esse arquivo é importado no StArt como uma *session search*. Uma pontuação é calculada contabilizando-se quantas vezes os descritores da pesquisa se repetem em cada publicação, sendo atribuídos cinco pontos para ocorrência no título, três pontos nas palavras-chave e dois pontos no resumo. A não ocorrência dos descritores em nenhum desses três campos resulta em score zero, o que significa que tais termos não são tópicos centrais do trabalho, ensejando sua rejeição. Nesse ponto do processo, também é possível eliminar artigos duplicados, retornados por mais de um motor de busca. Considerando os trabalhos duplicados e aqueles com score zero, foram eliminados 1130 trabalhos.

Aos 547 resumos aceitos pelo primeiro filtro, são aplicados critérios de inclusão e exclusão previamente estabelecidos. O intuito é destacar as produções relevantes para responder à questão proposta. O quadro 2 apresenta a quantidade de artigos aos quais esses critérios foram aplicados. É importante ressaltar que é possível a aplicação de mais de um critério a cada trabalho; assim, se um critério de exclusão for utilizado,

o trabalho será descartado, independentemente de ter atendido a outros critérios de inclusão. Portanto, as somas dos critérios aplicados não refletem a totalidade dos trabalhos analisados. Dessa etapa, permaneceram 34 produções, cujos textos foram pesquisados na íntegra para a seleção final. Uma leitura crítica detalhada foi realizada, permitindo a retificação da classificação, o que resultou na rejeição de 20 trabalhos que haviam sido aprovados com base apenas em seus resumos.

QUADRO 2 – CRITÉRIOS DE INCLUSÃO E EXCLUSÃO

Tipo	Critério	Trabalhos aceitos	Trabalhos rejeitados
Inclusão	Obras relacionadas à área de manejo florestal	14	80
	Usa otimização de rotas no manejo florestal	8	3
	Aborda rotas e carregamentos no manejo florestal	10	4
	Aborda a manutenção/otimização de rotas	13	12
Exclusão	Acesso não disponível em sua totalidade de forma gratuita ou via acesso institucional nas bases científicas procuradas	0	1
	Não cobre o manejo florestal	0	17
	Não disponível nos idiomas de pesquisa	0	0
	Compilações de artigos	0	1
	Não aborda rotas no manejo florestal	0	15
	Foco no risco de incêndio florestal	0	38
	Tema alheio à pesquisa	0	476

FONTE: O autor (2025).

Finalizando o protocolo com os 14 trabalhos que passaram por todos os filtros, descreve-se a etapa de extração das informações, com perguntas a serem consideradas na leitura dos textos e contribuirão para o entendimento do tema. Segue uma breve análise de cada trabalho, em ordem cronológica, antes de explorar as perguntas formuladas.

Bellavenutte et al. (2020) enfrentam o problema de agendamento de colheita florestal de larga escala utilizando heurísticas do tipo *k*-opt para clusterizar os talhões, tendo como base a distância entre eles, e quebrar o PLIM original em subproblemas. A resolução desses subproblemas usa o *solver* Gurobi, e a junção das soluções é feita por método heurístico, sendo comparado se a resolução de um par aleatório de subproblemas unido é superior à soma das resoluções separadas. A combinação obtida é usada como *warm start* da solução completa do PLIM.

Em uma análise comparativa, Silva et al. (2020) investigaram a eficiência e os ganhos do planejamento florestal otimizado frente ao método tradicional, focando especificamente na localização de pátios de estocagem de toras. A pesquisa foi realizada em uma área de 126,41 hectares da Floresta Nacional Saracá-Taquera, um local de manejo florestal sustentável na Amazônia brasileira. Foram separados 57,75 hectares onde se aplicou o manejo otimizado usando *p*-medianas enquanto a área contígua restante, de 68,66 hectares, seguiu o plano tradicional. Os resultados demonstraram que a otimização elevou a produtividade de arraste em 32,05% (em árvores por

hectare) e 29,74% (em m³ por hectare), além de reduzir a distância média de arraste em 17,16%. Tais ganhos operacionais refletiram-se em uma redução do custo de arraste de tora por m³ em 25,76%. Em conclusão, Silva et al. (2020) confirmaram que o planejamento otimizado é uma prática viável e robusta para elevar a produtividade na exploração florestal, sendo de fácil adoção pelas empresas visto que o esforço tecnológico concentra-se na fase de planejamento, preservando as rotinas operacionais e a estrutura de treinamento das equipes de campo.

Naderializadeh e Crowe (2020) apresentam uma formulação PLIM para o modelo integrado de agendamento de colheita florestal, maximizando a receita de colheita com desconto dos custos de construção de estradas e transporte. O objetivo central foi desenvolver inovações no modelo para lidar com grandes conjuntos de estradas candidatas, que apresentam muitos circuitos, visando gerar soluções aprimoradas pela redução dos custos totais de infraestrutura. A estratégia da nova formulação consistiu em representar cada estrada candidata por dois arcos direcionados, em vez de uma única aresta não direcionada, e introduzir um conjunto de restrições de fortalecimento, incluindo restrições de clique, explorando essa propriedade de direcionamento. Testada em oito instâncias de problemas, sendo duas reais e seis artificiais, variando de 900 a quase 5 mil talhões e de 3 a 20 mil estradas candidatas, a nova formulação produziu soluções com considerável redução no erro máximo, mesmo com o aumento da complexidade do problema. Os resultados indicaram que a melhoria na função objetivo decorreu mais da redução dos custos do que do aumento de receita. Além disso, a formulação obteve melhor desempenho em conjuntos de dados reais, mais complexos, em comparação com as grades artificiais. Os autores concluem que a proposta provou ser robusta para reduzir os custos da rede viária.

Em outro trabalho publicado pouco depois, Naderializadeh et al. (2020) retomam a importância de integrar os custos de transporte de madeira ao agendamento da colheita e à construção de estradas em modelos de otimização. São comparados dois modelos PLIM: o Modelo A, que inclui os custos de transporte na função objetivo, e o Modelo B, que os exclui. Ambos são aplicados a três florestas com áreas entre 6 e 20 mil hectares, localizadas em Ontário, Canadá. Os resultados evidenciam que o modelo A gera soluções com reduções significativas nos custos de transporte e nos custos totais, desproporcionalmente ao tamanho da área. À medida que a área da floresta triplicou, a redução percentual nos custos totais aumentou mais de cinco vezes — saltando de 3,9% para 21%. Essa descoberta ressalta que a integração dos custos de transporte é de grande relevância econômica, especialmente para grandes florestas, e sugere que a pesquisa deve focar no desenvolvimento de algoritmos que incorporem essa integração de forma realista, o que representa um desafio atual para os algoritmos meta-heurísticos. Os pesquisadores concluem que a integração dos custos de transporte nos modelos de planejamento tático florestal tem importância econômica

considerável e indicam a necessidade de métodos de solução meta-heurística para resolver o modelo integrado em florestas de larga escala.

Yildirim e Kadi (2020) apresentam dois objetivos envolvendo malha viária florestal: examinar o risco da rede existente na região de Maçka, na Turquia, e gerar rotas florestais ótimas para compará-las com as vias atuais. A análise do status de risco começou com a produção do mapa de adequação da rede de estradas florestais, utilizando nove fatores ambientais e topográficos, como declividade, aspecto e ocorrência de deslizamentos, ponderados pelo Processo Analítico Hierárquico. Foi implementado um algoritmo de caminho ótimo em MATLAB para geração de rotas que minimizam o risco e o comprimento, sendo os resultados obtidos mais adequados que as estradas existentes. Um diferencial da ferramenta desenvolvida é a possibilidade de inclusão de áreas restritivas que não podem ser atravessadas, como propriedades privadas ou locais de mineração, o que confere maior realismo e aplicabilidade ao planejamento.

Aguiar et al. (2021) avaliaram a eficácia de métodos computacionais para o planejamento otimizado de estradas rurais na Floresta Nacional Saracá-Taquera, mesmo local de estudo de Silva et al. (2020), comparando-o aos métodos tradicionais de definição do traçado. Reconhecendo o alto custo e o impacto ambiental inerentes à abertura de vias, o estudo substituiu a intuição do gestor por um modelo de Programação Linear Binária (PLB) e algoritmos de caminho mais curto (Dijkstra, Bellman-Ford, Dial e D'Esopo-Pape) para navegar por seis instâncias de complexidade distinta, incorporando restrições ecológicas e espaciais do PMFS, como APPS e árvores inventariadas. Entre as técnicas avaliadas, o algoritmo D'Esopo-Pape demonstrou o melhor desempenho em termos de tempo de processamento em todas as instâncias. Os resultados evidenciaram que os métodos computacionais foram altamente eficazes, superando o empírico ao gerar rotas mais curtas e com menor impacto sobre o ecossistema. Com isso, o planejamento automatizado provou ser uma ferramenta viável para conciliar a viabilidade econômica com a sustentabilidade do manejo florestal.

O trabalho de Mesquita et al. (2021) busca desenvolver uma abordagem integrada e eficiente para o planejamento florestal, focando na otimização do traçado e na manutenção da rede de estradas, na localização dos pontos de carregamento e na logística de transporte, visando minimizar a soma dos custos de construção e manutenção de estradas, carregamento e frete. Para isso, foi proposto um modelo PLIM para representar o problema, complementado por um algoritmo heurístico que utiliza um procedimento de simplificação de grafos, baseado em informação geográfica, e um módulo de estimação big-M para resolver o complexo problema de otimização. Os resultados da aplicação a um caso de grande escala no noroeste de Portugal, em uma área florestal superior a 7 mil hectares com 1.137 unidades de manejo, demonstraram que essa abordagem auxilia efetivamente os gestores florestais a integrar as

decisões de infraestrutura e logística. As simulações computacionais indicaram que as melhorias na função objetivo foram impulsionadas principalmente pela redução dos custos de construção e manutenção de estradas, ainda que com um aumento nos custos de carregamento e transporte. Isso confirma que a abordagem é robusta para o planejamento florestal tático e essencial para obter soluções de alta qualidade, superando as dificuldades do uso direto de *solvers* comerciais em modelos de tamanha complexidade.

Um pouco diferente dos demais, Yemshanov et al. (2021) apresentam uma abordagem PLIM para integrar o planejamento florestal e a construção de estradas à proteção de corredores de vida selvagem, um desafio comum na silvicultura industrial em regiões como o Canadá boreal, onde o desmatamento e a infraestrutura viária impactam negativamente o caribu-da-floresta (*Rangifer tarandus caribou*). O modelo proposto aloca um corredor de largura fixa, onde atividades econômicas são proibidas, visando minimizar a resistência total à movimentação da espécie, e o vincula a um problema de planejamento de colheita que maximiza a receita líquida deduzidos os custos de construção e manutenção de estradas. Os resultados revelaram dois possíveis locais para o corredor: sua localização ideal dependia de como o impacto das estradas era percebido e dos objetivos de decisão. Priorizar a maximização da receita de colheita ou atribuir um alto impacto negativo às estradas (similar ao de áreas recém-colhidas) direcionava o corredor para o leste, área com menor densidade de estradas, resultando em aumento no custo de \$1,1 a \$1,8 por m³ de madeira. Por outro lado, se o impacto das estradas fosse ignorado ou se o corredor mais curto fosse priorizado, a localização ideal era no oeste, uma área mais próxima do mercado, porém com aumento do custo de \$3,6 a \$5,4 por m³, valor superior à primeira opção. Concluiu-se pela robustez da otimização integrada no equilíbrio entre conservação e os objetivos econômicos.

Diferente de boa parte das pesquisas que buscam lidar com a malha viária de grandes áreas, Hosaka et al. (2022) focam na otimização da agregação de pequenos talhões florestais no Japão para operações de desbaste, um desafio no país onde a maioria das propriedades é de pequena escala, prejudicando a eficiência econômica. Foi desenvolvido um modelo de otimização de PLB espacialmente explícito, que busca padrões ótimos de agregação chamados “hiperunidades”. O modelo é sequencial, o que significa que considera a conectividade das estradas florestais, tratando as unidades mais distantes somente após a colheita das unidades que servem como acesso à malha existente. Aplicado a uma região de 876 hectares em Nasushiobara, no Japão, o estudo comparou seis cenários com diferentes restrições, como fluxo de volume e número máximo de unidades agregadas. Os resultados demonstraram que o modelo fornece informações úteis para o planejamento, considerando o crescimento da floresta e a conectividade potencial da rede viária. Contudo, a inclusão de restrições de conectividade e de limite de unidades reduziu o volume total de desbaste e resultou

em um número significativamente maior de talhões não atendidos em áreas remotas, reforçando o dilema do abandono de manejo em locais de difícil acesso. Hosaka et al. (2022) concluem que a abordagem de otimização é valiosa para desenvolver planos de agregação, quantificar os impactos das restrições espaciais e apoiar a comunicação eficaz entre os gestores.

Naderialzadeh et al. (2022) revisitam o tema ao avaliar um modelo integrado que combina, em uma única função objetivo, as decisões de alocação de talhões, a definição das estradas de acesso e os custos de transporte resultantes. Esse modelo almeja reduzir os custos de infraestrutura viária e transporte de madeira que, dentre os operacionais, são os mais elevados da silvicultura. O PLIM, nas dimensões aplicadas nessa pesquisa, é classificado como *NP-hard*, e métodos de solução exata só são viáveis para florestas menores. Por isso a pesquisa, diferentemente de trabalhos anteriores, focou na criação de uma meta-heurística que inclui, de forma interdependente na função objetivo, os três elementos: colheita, construção e transporte. O procedimento de solução ocorre em duas etapas: a primeira utiliza o algoritmo *Simulated Annealing* para selecionar os talhões para corte; a segunda, para otimizar a rede de estradas, aplica uma meta-heurística baseada em permutação cíclica. Os resultados da aplicação em três florestas no Canadá, com até 900 polígonos, demonstraram que a proposta gerou soluções de boa qualidade, em média apenas 2,92% inferiores às soluções encontradas pelo CPLEX 12.5 em 24 horas, porém com um tempo de computação de apenas 90 minutos. Além disso, a otimização na segunda etapa levou a uma redução média de 6,7% nos custos totais em relação à primeira, e de 12,9% em comparação com o método de solução exata. Com isso, valida-se essa meta-heurística como um passo promissor para resolver o modelo integrado em problemas reais de grande escala. Destaca-se que o processamento foi realizado em uma CPU Intel® Xeon X5650 hex-core com 96 GB de RAM.

Tsiotas et al. (2023) propõem um novo modelo de rede multicamadas para analisar estradas florestais na região de Kilkis, na Grécia, visando promover o desenvolvimento do transporte florestal sustentável. O modelo se baseia na conceituação de ambiente total (incluindo atmosfera, litosfera, hidrosfera, biosfera e antroposfera) e no paradigma de redes, integrando múltiplas variáveis ambientais e de uso da terra em cinco camadas distintas. A metodologia, estruturada em oito passos, envolveu: a coleta e classificação de dados; a construção do grafo multicamadas (no qual cada esfera é representada por uma camada); a normalização e agregação dos pesos dos segmentos de estrada (representados no grafo pelas arestas); e a aplicação de uma análise de detecção de comunidades. O estudo dividiu a área em 21 comunidades funcionais, revelando zonas de consistência em termos de uso da terra e atributos ambientais. A análise de cada comunidade permitiu configurar perfis funcionais especializados, o que levou à formulação de políticas e boas práticas personalizadas para a recuperação,

melhoria e gestão sustentável da malha viária. Em suma, o trabalho oferece uma estrutura metodológica quantitativa e robusta que integra a complexidade do ambiente total em um único modelo.

Helo e Rouzafzoon (2023) propõem um modelo de simulação baseado em agentes e otimização logística para modelar e minimizar os custos de transporte na coleta de toras de diversas regiões e entrega nos pontos de coleta mais próximos, abordando a gestão da incerteza na demanda das cadeias de suprimentos florestais. No caso, a abordagem é pela localização dos pontos de carga e transbordo, devido às diferentes modalidades de transporte: rodoviário e ferroviário. O modelo baseado em agentes é abrangente, incorporando elementos como informações geográficas para roteamento, possíveis locais para instalações de coleta de toras, dimensionamento da frota, distância de viagem e transporte multimodal usando caminhões e trens. O trabalho demonstra a aplicação em um caso real na Finlândia, comparando dois cenários táticos: o transporte direto da floresta para a fábrica via caminhões e um modelo utilizando trens. Por meio da otimização com mecanismo de busca meta-heurística, o estudo identificou as localizações ótimas das instalações e o dimensionamento ideal da frota de caminhões, mostrando que o cenário multimodal resultou em uma economia de cerca de 18% nos custos de transporte. Reforça-se que o modelo, ao combinar informações geoespaciais com a simulação dinâmica de múltiplos componentes, atua como uma ferramenta pragmática de apoio à decisão tática, sendo de grande importância para gestores que lidam com a complexidade e a interdependência de problemas na coleta de madeira.

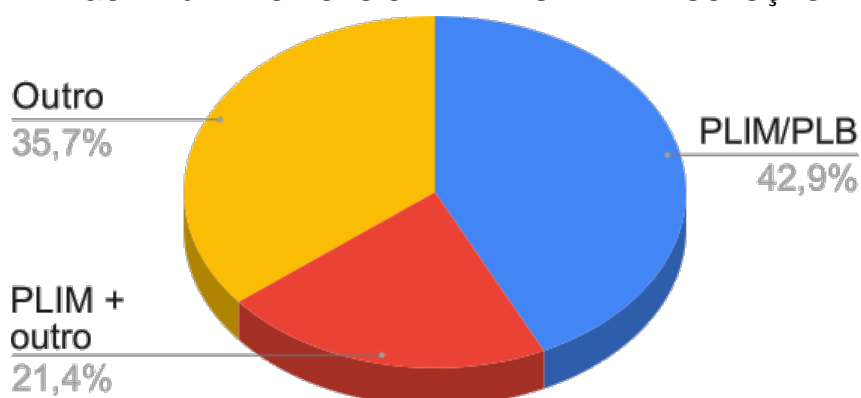
Kaneko et al. (2024) apresentam um modelo baseado na Teoria dos Grafos e em informação geográfica para o planejamento de redes de estradas florestais no Japão. O objetivo é garantir a sustentabilidade e a eficiência econômica em um cenário de aumento da demanda por colheita em florestas maduras, por meio da união de pequenas propriedades. A metodologia desenvolvida integra o traçado da rede rodoviária a um plano de manejo florestal de longo prazo, assegurando que a extração de madeira esteja alinhada aos cenários de negócios anuais. O processo envolveu: a identificação de pontos de passagem necessários para as novas estradas; o uso do algoritmo da árvore de extensão mínima para determinar um traçado estratégico inicial; e o ajuste tático dos caminhos via algoritmo de Dijkstra com pesos de arestas calibrados por penalidades de declividade. Aplicado a uma floresta perto de Tóquio, o modelo gerou um traçado com declividade média apropriada (13 a 14%) e atingiu uma densidade de rede superior à meta de desenvolvimento local. A validação da precisão do traçado, realizada por meio da distância de Hausdorff, indicou alta proximidade geográfica com as estradas reais, confirmando a robustez da abordagem.

Constantino et al. (2025) apresentam duas formulações PLIM para o problema

integrado de otimização da rede rodoviária, localização de pátios de estocagem e roteamento de transporte de madeira, com foco em florestas de pequenos proprietários. O problema é classificado como *NP-hard*, especialmente pela presença de restrições Big-M na formulação padrão de três índices (F3i), que resultam em limites de relaxação linear fracos. Os autores propuseram uma nova formulação de quatro índices (F4i e seu aprimoramento F4ii), que desagrega as variáveis de fluxo de madeira por unidade de manejo de origem, eliminando a necessidade das restrições Big-M e resultando em limites de relaxação linear mais fortes. Para tornar a formulação de quatro índices viável, frente ao alto número de variáveis, Constantino et al. (2025) introduzem procedimentos que exploram as características das pequenas propriedades: a simplificação da rede que reduz a dimensão das instâncias em mais de 40%; e um procedimento de seleção de variáveis baseado na densa rede rodoviária municipal existente para limitar o fluxo de madeira por setor, reduzindo drasticamente o número de variáveis de fluxo. Os resultados de um estudo de caso real em Portugal, com três instâncias florestais e quatro cenários de custos, confirmaram que a formulação F4ii, que inclui variáveis binárias direcionadas, é robusta e altamente eficiente, resolvendo todos os problemas de teste até a otimalidade em no máximo 90 minutos, com *gaps* de relaxação linear reduzidos. O trabalho conclui que a otimização pode ser efetivamente aplicada em florestas de pequenos proprietários ao utilizar a estrutura inerente do problema para fortalecer a formulação matemática.

Após concluir o detalhamento das pesquisas, iniciou-se a extração de informações. Em um primeiro momento, buscou-se identificar a técnica de otimização utilizada no roteamento de veículos ou no planejamento viário de manejo florestal, conforme ilustra a figura 9.

FIGURA 9 – TÉCNICAS UTILIZADAS PARA RESOLUÇÃO



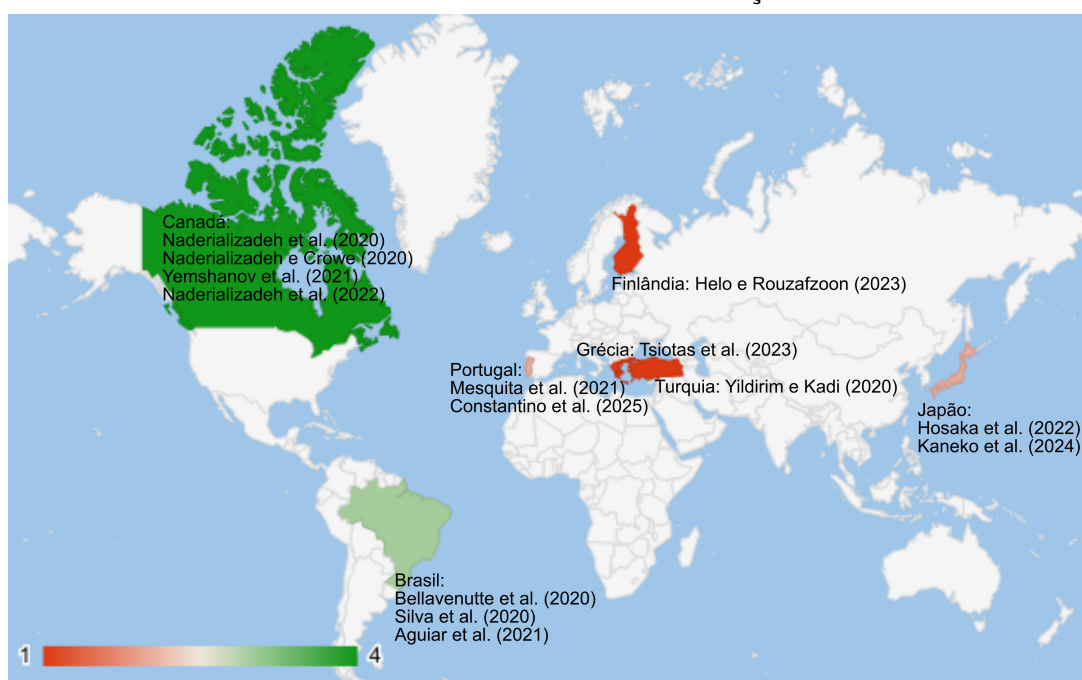
FONTE: O autor (2025).

A maioria dos trabalhos apresenta alguma forma de Programação Linear, seja inteira, binária ou combinada com outros métodos. As heurísticas integradas ao PLIM incluem: p-medianas (Silva et al., 2020); simplificação de grafos e estimativa Big-M

(Mesquita et al., 2021); e regras heurísticas de partição em subproblemas (Bellavenutte et al., 2020). Os autores que não utilizam PLIM recorreram ao Processo Analítico Hierárquico (Yildirim; Kadi, 2020), ao *Simulated Annealing* (Naderalizadeh et al., 2022), à análise de detecção de comunidades (Tsiotas et al., 2023), à modelagem baseada em agentes (Helo; Rouzafzoon, 2023) e ao algoritmo da árvore de extensão mínima (Kaneko et al., 2024). Considerando que nenhuma dessas técnicas foi aplicada em mais de um trabalho, percebe-se a variedade de proposições de resolução para um mesmo tipo de problema.

Quanto à procedência dos dados dos empreendimentos florestais, a figura 10 indica quatro trabalhos com dados do Canadá, três do Brasil, dois em Portugal e no Japão e um para Finlândia, Grécia e Turquia.

FIGURA 10 – ORIGEM DOS DADOS PARA SOLUÇÃO DO PROBLEMA

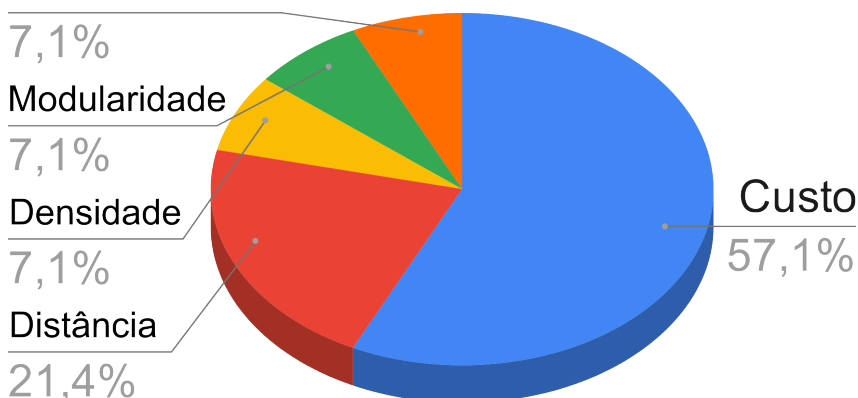


FONTE: O autor (2025).

Como ilustra a figura 11, a maior parte dos trabalhos utilizou a avaliação dos custos operacionais, sejam pela maximização da receita líquida ou pela minimização de despesas, como métrica para a validação da solução proposta. Silva et al. (2020), Yildirim e Kadi (2020) e Aguiar et al. (2021) optaram pela minimização de distâncias e obtenção dos caminhos mais curtos. O trabalho de Hosaka et al. (2022) visa a maximização do volume de desbaste. Tsiotas et al. (2023) utilizou a modularidade da rede viária e Kaneko et al. (2024) buscou atingir metas de densidade da malha.

Quanto ao *solver* ou à linguagem de programação escolhida, conforme quadro 3, constata-se a preferência pelos *solvers* CPLEX e Gurobi, ambos proprietários e com licenças acadêmicas. Foram identificados também o uso do FICO Xpress e do

FIGURA 11 – MÉTRICAS ADOTADAS NO TRABALHO
Volume colhido



FONTE: O autor (2025).

AnyLogic, além de desenvolvimentos diretos em MATLAB e Python. O único trabalho que não indica explicitamente a ferramenta utilizada é o de Tsiotas et al. (2023), embora este se fundamente em outro estudo que disponibiliza seus códigos em C++.

QUADRO 3 – SOLVERS E LINGUAGENS

Tipo	Nome	Versão	Trabalhos
Solvers	CPLEX	12.5	Naderialzadeh et al. (2020), Naderialzadeh e Crowe (2020) e Naderialzadeh et al. (2022)
		12.6.3	Aguiar et al. (2021)
		12.7	Silva et al. (2020)
		12.8	Mesquita et al. (2021)
	Gurobi	5.6	Hosaka et al. (2022)
		8.1	Bellavenutte et al. (2020)
9.1		Yemshanov et al. (2021)	
Outros	MATLAB	—	Yildirim e Kadi (2020)
	AnyLogic	—	Helo e Rouzafzoon (2023)
	Python	—	Kaneko et al. (2024)
	FICO-Xpress	2023	Constantino et al. (2025)
	Não consta	—	Tsiotas et al. (2023)

FONTE: O autor (2025).

Encerrando a extração de informações, levantou-se a configuração de *hardware* disponível aos pesquisadores. Nos trabalhos que mencionaram as capacidades dos equipamentos utilizados, as especificações encontram-se indicadas no quadro 4.

QUADRO 4 – EQUIPAMENTOS EMPREGADOS

CPU	RAM	Trabalho
Intel i5 2.9 GHz	32 Gb	Constantino et al. (2025)
Intel i7-2620M 2.70 GHz	8 Gb	Mesquita et al. (2021)
Intel i7-7500U 2.70 GHz	16 Gb	Aguiar et al. (2021)
Intel i7-7700U 3.60GHz	16 Gb	Bellavenutte et al. (2020)
Intel Xeon X5650 hex-core 2.66 GHz	96 Gb	Naderialzadeh et al. (2020) Naderialzadeh e Crowe (2020) Naderialzadeh et al. (2022)

FONTE: O autor (2025).

O presente levantamento bibliográfico fornece indicativos de como a pesquisa de otimização da colheita florestal tem sido conduzida, enfatizando os trabalhos que visam integrar o agendamento da colheita à abertura e manutenção de estradas. Dentre as obras selecionados, o estudo de Naderializadeh et al. (2022) é o que apresenta maior convergência com a presente pesquisa.

4 PROPOSTA

Considerando a descrição apresentada no capítulo 2, apresenta-se nesta seção a proposta hibridizada do PCARP-FH. Para guiar a modelagem sugerida, é importante salientar algumas características simplificadoras que podem, em trabalhos futuros, merecer atenção e desenvolvimento:

- Embora considere uma capacidade estimada para os caminhões de transporte e busque o número ideal de viagens para o atendimento das demandas, o presente modelo pressupõe uma frota disponível virtualmente ilimitada. Ao estipular o número de viagens para atender a um determinado talhão como um parâmetro conhecido, assume-se que o volume será coletado por uma frota homogênea. Em aplicações práticas, a modelagem poderá demandar a inclusão de restrições quanto ao tamanho da frota disponível.
- A alocação da frota para o atendimento de um talhão específico não considera a possibilidade de aproveitamento de capacidade ociosa; ou seja, o espaço não ocupado em um veículo, ao finalizar o carregamento de um talhão, não é utilizado para a coleta em outros talhões situados em sua trajetória.
- A quantidade e a disponibilidade das equipes de manutenção e abertura de estradas devem ser moduladas consoante o intervalo de tempo estipulado para cada período, garantindo que a capacidade operacional dessas frentes de trabalho seja compatível com as demandas geradas.
- Os custos de viagem contemplam o deslocamento dos veículos vazios desde o ponto de saída até o local de colheita e o retorno carregados. Para aplicações práticas, é necessário considerar a disponibilidade de veículos para essa trajetória e a possibilidade de fluxos não circulares, nos quais um veículo parte vazio de um ponto de transbordo, realiza o carregamento em um talhão e descarrega em um destino distinto de sua origem.
- Os custos de carga e descarga são considerados homogêneos por período em todas as estradas, adotando-se um valor que englobe ambos os serviços a cada operação de carregamento.

4.1 ANÁLISE DO PROBLEMA

Nesta análise são detalhadas as características que levam a construção do PCARP-FH.

4.1.1 Objetivo do problema

O objetivo central consiste em otimizar a colheita dos talhões, transportando a totalidade da carga para um ou mais sumidouros. A meta é atender à demanda estipulada para cada período, respeitando as restrições de distanciamento e conectividade, de modo a maximizar o lucro total da operação.

4.1.2 Pontos do problema

Ponto 1 - Um conjunto de talhões deve ser colhido a cada período para suprir a demanda, não sendo permitida a colheita de um mesmo talhão mais de uma vez ao longo do HP. O atendimento à demanda por período admite uma tolerância percentual λ . Adicionalmente, a colheita de cada talhão deve respeitar sua idade mínima de corte.

Ponto 2 - A seleção dos talhões para colheita é condicionada à formação de blocos, sujeita às seguintes restrições espaciais:

- Talhões adjacentes não podem ser colhidos no mesmo período nem em períodos consecutivos;
- Talhões dentro de um raio Δ_b de um talhão colhido no período p podem ser integrados ao mesmo bloco e período, desde que não sejam adjacentes;
- Talhões dentro de um raio Δ_a de um talhão colhido no período p podem ser colhidos no mesmo período, porém em blocos distintos, desde que não sejam adjacentes;
- Talhões dentro de um raio Δ_c de um talhão colhido no período p podem ser colhidos no período subsequente em qualquer bloco, desde que não sejam adjacentes.

Ponto 3 - Cada talhão colhido requer o dimensionamento de veículos para o transporte do volume produzido.

Ponto 4 - Os veículos dependem da disponibilidade da malha viária para realizar o deslocamento entre os pontos de carregamento no talhão e o sumidouro.

Ponto 5 - Estradas que tenham sido utilizadas em períodos imediatamente anteriores demandam apenas manutenção periódica. Estradas que permaneçam sem uso por um intervalo superior a um limite preestabelecido requerem reabertura total.

Ponto 6 - O carregamento dos veículos ocorre em vértices específicos do talhão. Cada vértice do grafo pode apresentar as seguintes condições:

- Receber um volume colhido em um dos talhões incidentes para carregamento local;
- Atuar como ponto de transbordo para volumes carregados em outros locais que acessam o ponto via rede viária;
- Caso o vértice não seja o sumidouro, deve-se respeitar a conservação de fluxo: todo volume que ingressa no ponto deve sair no mesmo período.

4.1.3 Simplificações

Visando à objetividade da pesquisa, foram adotadas as seguintes simplificações, as quais representam oportunidades para exploração em estudos futuros:

- Não se considera explicitamente a rota de ida ao talhão sendo esse deslocamento incorporado ao custo da viagem de retorno (veículo carregado).
- A capacidade de tráfego das vias não é limitada, permitindo que qualquer fluxo de veículos utilize o mesmo arco da rede no período.
- Não há restrição quanto ao tamanho da frota, sendo disponibilizada a quantidade necessária de veículos em cada período. Alternativamente, a variável de frota pode ser interpretada como o número total de viagens necessárias. A determinação do tamanho real da frota, considerando janelas de tempo de carregamento e durações de ciclo (coleta, transporte e descarga), remete ao Problema de Roteamento de Veículos com Janelas de Tempo (*Vehicle Routing Problem with Time Windows* — VRPTW), o qual não é o escopo desta modelagem.
- A frota é considerada homogênea. O número de veículos (ou viagens) necessários para cada talhão é definido pelo menor inteiro que supera a razão entre o volume total colhido e a capacidade nominal do veículo padrão.
- Cada veículo atende a apenas um talhão por viagem, independentemente de sua capacidade de carga estar totalmente ocupada.
- A quantidade de equipes para abertura e manutenção de estradas não é objeto de otimização; assume-se que as intervenções necessárias ocorrem integralmente no período planejado.
- Não é detalhado o escalonamento operacional das equipes de colheita em um mesmo período, visto que tal ordenação pertence ao nível operacional do planejamento florestal.

4.2 ELABORAÇÃO DAS RESTRIÇÕES

Atendendo aos pontos enunciados do problema, apresenta-se a seguir a formulação matemática das restrições que modelam o PCARP-FH. Para a adequada compreensão, os símbolos utilizados e de seus respectivos significados foram relacionados no Apêndice 3.

4.2.1 Ponto 1: Colheita e demanda

Define-se a variável de decisão binária x_{tpb} para indicar a colheita de cada talhão $t \in F$. A variável é estruturada da seguinte forma:

$$x_{tpb} = \begin{cases} 1, & \text{se o talhão } t \text{ foi colhido no período } p \text{ no bloco } b; \\ 0, & \text{caso contrário.} \end{cases}$$

Devem ser previamente conhecidos os seguintes parâmetros:

- v_{tsp} , volume estimado a ser colhido no talhão t de cada sortimento $s \in S$ no período $p \in P$ e;
- v_{tsp} valor presente líquido do montante total a ser colhido no talhão t de cada sortimento s no período p .

Existem diversas situações nas quais $p = 0$ (o período inicial) possui aplicações distintas de $p \neq 0$. Assim, denota-se $P^* = P \setminus \{0\}$. No caso da variável de colheita, $x_{t0b} = 1$ indica que o talhão t não será colhido em nenhum momento do HP. Para as demais variáveis e parâmetros, este período pode ser considerado o registro de ocorrências anteriores ao início da operação, representando as condições pré-existentes do sistema.

Define-se uma demanda d_{sp} a ser atendida por sortimento para cada período. O parâmetro η_t indica a idade mínima para colheita do talhão, enquanto n_t é a idade do talhão no início do HP.

O atendimento ao Ponto 1 é garantido pelas seguintes restrições:

$$\sum_p \sum_b x_{tpb} \leq 1 \quad \forall t \in F \quad (4.2.1)$$

$$\sum_t \sum_b v_{tsp} x_{tpb} \geq (1 - \lambda) d_{sp} \quad \forall s \in S, \forall p \in P^* \quad (4.2.2)$$

$$\sum_t \sum_b v_{tsp} x_{tpb} \leq (1 + \lambda) d_{sp} \quad \forall s \in S, \forall p \in P^* \quad (4.2.3)$$

$$(n_t + p - 1) \sum_b x_{tpb} \geq \eta_t \sum_b x_{tpb} \quad \forall t \in F, \forall p \in P^* \quad (4.2.4)$$

4.2.2 Ponto 2: Blocos e Distâncias entre talhões

Para a modelagem das restrições espaciais, devem ser previamente informados os seguintes parâmetros:

- um conjunto F_{adj} de pares de talhões adjacentes, ($\subset F \times F$);
- as distâncias euclidianas δ_{tr} entre dois talhões t e r distintos.

Para a formação dos blocos, define-se a variável binária β_{bp} , em que:

$$\beta_{bp} = \begin{cases} 1, & \text{se o bloco } b \text{ for gerado no período } p; \\ 0, & \text{caso contrário.} \end{cases}$$

sendo B o conjunto de todos os blocos possíveis para cada período p . Estabelece-se a obrigatoriedade da criação de ao menos um bloco inicial por período para viabilizar a operação de colheita:

$$\beta_{0p} = 1 \quad \forall p \in P \quad (4.2.5)$$

Uma vez ativado um bloco, selecionam-se os talhões que o comporão, sendo tais escolhas dependentes das distâncias entre as unidades de manejo. Inicialmente, estabelecem-se as restrições que proíbem a colheita de talhões adjacentes no mesmo período ou em períodos consecutivos, expressas por:

$$\sum_b x_{tpb} + \sum_b x_{rpb} \leq 1 \quad \forall p \in P^*, \forall (t, r) \in F_{adj} \quad (4.2.6)$$

$$\sum_b x_{tpb} + \sum_b x_{r(\rho+1)b} \leq 1 \quad \begin{matrix} \rho = 1, 2, \dots, HP - 1 \\ \forall (t, r) \in F_{adj} \end{matrix} \quad (4.2.7)$$

A permissão para a colheita de talhões em um mesmo período e bloco, condicionado a um raio de distância Δ_b , é modelada por:

$$\delta_{tr} (x_{tpb} + x_{rpb} - 1) \leq \Delta_b \quad \forall t, r \in F, \forall p \in P^*, \forall b \in B \quad (4.2.8)$$

Como o bloco $b = 0$ é sempre criado, conforme a restrição 4.2.5, define-se, de forma análoga ao conjunto P^* , o conjunto $B^* = B \setminus \{0\}$, que exclui o bloco inicial. Após a alocação de todos os talhões possíveis dentro do raio Δ_b , a demanda estipulada para o período pode ou não ter sido atingida. A decisão de criar o bloco subsequente $b \in B^*$ depende do volume acumulado nos $b - 1$ blocos precedentes. Esse volume é expresso por $\Upsilon_{bsp} = \sum_{h=0}^{b-1} \sum_t v_{tsp} x_{tph}$, representando a somatória de todos os volumes colhidos nos blocos já existentes. Caso $\Upsilon_{bsp} \geq (1 - \lambda)d_{sp}$, a restrição 4.2.2 já terá sido satisfeita, tornando desnecessária a abertura de um novo bloco de colheita.

Para a verificação do atendimento da demanda, avalia-se a razão entre a folga residual para o limite máximo, dada por $(1 + \lambda)d_{sp} - \Upsilon_{bsp}$, e a própria demanda máxima prevista na equação 4.2.3. Define-se $\sigma \in [0, 1]$ como o percentual crítico dessa demanda máxima. O interesse reside em que a ativação de um novo bloco ocorra conforme a seguinte lógica condicional:

$$\begin{cases} \frac{(1 + \lambda)d_{sp} - \Upsilon_{bsp}}{(1 + \lambda)d_{sp}} \geq \sigma \Rightarrow \beta_{bp} = 1 \\ \frac{(1 + \lambda)d_{sp} - \Upsilon_{bsp}}{(1 + \lambda)d_{sp}} < \sigma \Rightarrow \beta_{bp} = 0 \end{cases} \Leftrightarrow \begin{cases} (1 + \lambda)d_{sp} - \Upsilon_{bsp} \geq \sigma(1 + \lambda)d_{sp} \Rightarrow \beta_{bp} = 1 \\ (1 + \lambda)d_{sp} - \Upsilon_{bsp} < \sigma(1 + \lambda)d_{sp} \Rightarrow \beta_{bp} = 0 \end{cases}.$$

Caso o montante remanescente a ser colhido supere o percentual $\sigma(1 + \lambda)d_{sp}$, ativa-se um novo bloco. Estas inequações podem ser reescritas para evidenciar o limite superior do volume acumulado:

$$\Leftrightarrow \begin{cases} (1 + \lambda)d_{sp} - \sigma(1 + \lambda)d_{sp} \geq \Upsilon_{bsp} \Rightarrow \beta_{bp} = 1 \\ (1 + \lambda)d_{sp} - \sigma(1 + \lambda)d_{sp} < \Upsilon_{bsp} \Rightarrow \beta_{bp} = 0 \end{cases} \Leftrightarrow \begin{cases} (1 - \sigma)(1 + \lambda)d_{sp} \geq \Upsilon_{bsp} \Rightarrow \beta_{bp} = 1 \\ (1 - \sigma)(1 + \lambda)d_{sp} < \Upsilon_{bsp} \Rightarrow \beta_{bp} = 0 \end{cases}$$

Assume-se que $(1 - \sigma)(1 + \lambda) < (1 - \lambda)$ ao arbitrar um valor para σ . Caso contrário, a restrição 4.2.2 seria satisfeita antes mesmo da avaliação sobre a abertura de um novo bloco, tornando esta regra de ativação inoperante. Para evitar tal redundância, sugere-se que $\sigma > \frac{2\lambda}{(1 + \lambda)}$, conforme a dedução a seguir:

$$\begin{aligned} & (1 - \sigma)(1 + \lambda) < (1 - \lambda) \\ \Rightarrow & \cancel{1} + \lambda - \sigma(1 + \lambda) < \cancel{1} - \lambda \\ \Rightarrow & -\lambda + \sigma(1 + \lambda) > \lambda \\ \Rightarrow & \sigma(1 + \lambda) > 2\lambda \quad \therefore \sigma > \frac{2\lambda}{(1 + \lambda)} \end{aligned}$$

Ao incorporar a variável β_{bp} como multiplicador do percentual σ , constrói-se a expressão:

$$(1 - \sigma\beta_{bp})(1 + \lambda)d_{sp} = \begin{cases} (1 - \sigma)(1 + \lambda)d_{sp} & \text{se } \beta_{bp} = 1 \\ (1 + \lambda)d_{sp} & \text{se } \beta_{bp} = 0 \end{cases}.$$

Considerando os valores de σ e β_{bp} adotados, a seguinte sequência de desigualdades é naturalmente válida:

$$(1 - \sigma\beta_{bp})(1 + \lambda)d_{sp} \leq (1 - \sigma)(1 + \lambda)d_{sp} \leq (1 + \lambda)d_{sp}.$$

Caso $\Upsilon_{bsp} > (1 + \lambda)d_{sp}$, a demanda máxima já teria sido atingida (conforme a restrição 4.2.3), tornando a criação de novos blocos injustificável. Portanto, a análise

deve concentrar-se no comportamento esperado de β_{bp} e na aplicação do percentual σ sob as seguintes condições de volume:

$$\Upsilon_{bsp} < (1 - \sigma)(1 + \lambda)d_{sp} \quad (\text{Caso 1})$$

$$(1 - \sigma)(1 + \lambda)d_{sp} \leq \Upsilon_{bsp} \leq (1 + \lambda)d_{sp} \quad (\text{Caso 2})$$

No Caso 1, é necessário que $\beta_{bp} = 1$, ativando um novo bloco para incrementar a colheita; contudo, a desigualdade permanece matematicamente válida mesmo se $\beta_{bp} = 0$. Já no Caso 2, o volume colhido nos blocos anteriores já supera o limiar $(1 - \sigma)$ da demanda máxima; nessa situação, a restrição só é satisfeita com $\beta_{bp} = 0$, vedando a abertura do novo bloco. Retomando a definição original de Υ_{bsp} , elabora-se a seguinte restrição:

$$\sum_{h=0}^{b-1} \sum_t v_{tsp} x_{tph} \leq (1 - \sigma \beta_{bp})(1 + \lambda)d_{sp} \quad \forall b \in B^*, p \in P^*, s \in S \quad (4.2.9)$$

A relação direta entre os talhões colhidos no período p no bloco b com a variável de ativação do bloco é estabelecida pelos limites de área colhida.

$$\sum_t a_t x_{tpb} \leq \overline{A}_p \beta_{bp} \quad \forall p \in P^*, \forall b \in B \quad (4.2.10)$$

$$\sum_t a_t x_{tpb} \geq \underline{A}_p \beta_{bp} \quad \forall p \in P^*, \forall b \in B \quad (4.2.11)$$

As restrições 4.2.10 e 4.2.11 delimitam a dimensão de área colhida no grupo de talhões que compõem um determinado bloco de colheita, forçando o valor nulo para a área de colheita em blocos não ativados.

Uma vez modelada a ativação dos blocos de colheita, avalia-se a configuração da operação em um mesmo período e blocos distintos. A permissão para essa colheita, condicionada ao raio de distância Δ_a , é estabelecida por:

$$\delta_{tr} (x_{tpb} + x_{rph} - 1) \leq \Delta_a \quad \begin{array}{l} \forall t, r \in F, \forall p \in P^* \\ \forall b, h \in B, b \neq h \end{array} \quad (4.2.12)$$

A colheita de dois talhões em períodos consecutivos, condicionada a um raio de distância Δ_c , é expressa por:

$$\delta_{tr} \left(\sum_b x_{tpb} + \sum_b x_{r(p+1)b} - 1 \right) \leq \Delta_c \quad \begin{array}{l} p = 1, 2, \dots, HP - 1 \\ \forall t, r \in F \end{array} \quad (4.2.13)$$

A diferença entre este grupo de restrições e as apresentadas em 4.2.8 e 4.2.12 reside no somatório dos blocos por período, visto que períodos distintos possuem blocos distintos. Assim, a colheita do talhão t em qualquer bloco do período p , concomitante à colheita do talhão r em qualquer bloco do período $p + 1$, é permitida somente se $\delta_{tr} \leq \Delta_c$. Ressalte-se que cada somatório, por força da restrição 4.2.1, assume o valor máximo igual a 1.

4.2.3 Ponto 3: Veículos

Para cada talhão $t \in F$, caso seja colhido no período p , será necessária uma quantidade ε_{tsp} de viagens para transportar a carga de sortimento s .

Dependendo do tipo de veículo utilizado, a capacidade de transporte pode ser definida pela capacidade volumétrica da carga (m^3 , MBF , etc.) ou pela massa (kg , ton , etc.). Considerando uma frota homogênea de capacidade q , caso esta seja volumétrica e possua a mesma unidade de medida de v_{tsp} , o cálculo prévio de ε_{tsp} é dado por:

$$\varepsilon_{tsp} = \left\lceil \frac{v_{tsp}}{q} \right\rceil \quad \forall t \in F, \forall p \in P^*$$

em que $\lceil x \rceil$ representa o menor inteiro maior que ou igual a x . Tecnicamente, para $x \notin \mathbb{Z}$, esta função realiza o arredondamento para o limite superior ou, coloquialmente, “arredonda para cima”.

Entretanto, se a capacidade da frota for baseada em peso, configuração usual para caminhões, torna-se necessário informar a densidade estimada ρ_s do sortimento s . Assim,

$$\varepsilon_{tsp} = \left\lceil \frac{v_{tsp} \cdot \rho_s}{q} \right\rceil \quad \forall t \in F, \forall p \in P^*$$

Visto que não há variáveis de decisão envolvidas nestas expressões, o valor de ε_{tsp} pode ser tratado como um parâmetro calculado previamente ou definido durante a escrita das restrições do modelo.

4.2.4 Ponto 4 e Ponto 5: Abertura e uso de estradas

São estabelecidas variáveis relacionadas diretamente ao processo de abertura e manutenção de estradas, fator relevante nesta pesquisa. Para caracterizar a malha viária, utilizam-se dois elementos fundamentais da teoria dos grafos: “nós” (ou “vértices”) e “estradas” (ou “arestas”). Neste trabalho, denotam-se:

- N : conjunto de todos os nós do grafo, sendo i e j os índices associados aos nós;
- E : conjunto de todas as estradas, representadas por e_{ij} , indicando os nós extremos de cada aresta. A notação e_{ij} também define o sentido de tráfego da estrada: do nó i para o nó j .

Na prática, as estradas delimitam as divisas entre talhões vizinhos, enquanto os nós representam interseções, esquinas ou encruzilhadas da rede. Sob essa perspectiva, definem-se os seguintes subconjuntos:

- N_t : conjunto dos nós que delimitam o talhão t ;

- E_t : conjunto das estradas que circundam o talhão t ;
- E_i : conjunto de estradas que possuem o nó i como uma de suas extremidades.
- E_0 : conjunto das estradas pré-existentes;

Especificamente sobre os nós, o conjunto N pode ser dividido em três partes sem interseção entre si. Isto é, cada nó de N deve pertencer a exatamente um dos seguintes conjuntos:

- N_O : conjunto dos nós que são origem de estradas e para os quais não deve ser direcionado fluxo de carga, embora possam ser considerados pontos de carga;
- N_S : conjunto dos sumidouros, isto é, nós que são saídas de estradas, dos quais não partem viagens para o interior do grafo. Os elementos deste conjunto, necessariamente não vazios, são pontos de descarga do volume colhido. Na prática, podem representar depósitos ou saídas da malha viária;
- N_F : conjunto dos nós de fluxo sendo essencialmente $(N_O \cup N_S)^C$, ou seja, composto por nós que não são nem origem nem saída.

Feitas estas considerações, definem-se as seguintes variáveis de decisão:

$$w_{ijp} = \begin{cases} 1, & \text{se a estrada } e_{ij} \text{ for } \textit{aberta} \text{ no período } p \text{ ou for pré-existente;} \\ 0, & \text{caso contrário.} \end{cases}$$

$$z_{ijp} = \begin{cases} 1, & \text{se a estrada } e_{ij} \text{ recebeu } \textit{manutenção} \text{ no período } p; \\ 0, & \text{caso contrário.} \end{cases}$$

y_{ijp} = variável inteira indicando a quantidade de viagens realizadas na estrada e_{ij} no período p .

Considerando a existência de custos associados à infraestrutura viária, devem ser previamente informados os seguintes parâmetros:

- ω_{ijp} : custo para abertura de estrada e_{ij} no período p ;
- ζ_{ijp} : custo para manutenção de uma estrada que já se encontrava aberta em período anterior.

Ambos os custos são compostos por uma parcela fixa, comum a todas as estradas, e uma parcela variável, proporcional ao comprimento do trecho.

Para o fluxo de transporte, visto que a variável y_{ijp} representa a quantidade de viagens, define-se o coeficiente φ_{ijp} como o custo total do deslocamento. Este valor é

obtido pelo produto do custo da viagem por unidade de distância no período p pelo comprimento da estrada e_{ij} .

Caso existam estradas pré-existentes, considera-se que estas são abertas no período inicial a custo nulo, conforme a seguinte expressão:

$$w_{ij0} = 1 \quad \forall e_{ij} \in E_0 \quad (4.2.14)$$

A estrada, seja pré-existente ou não, não é efetivamente utilizada no período inicial, devendo receber manutenção apenas quando for empregada na colheita propriamente dita. Portanto, estabelece-se que nenhuma estrada deve receber manutenção em $p = 0$.

$$z_{ij0} = 0 \quad \forall i, j \in N \quad (4.2.15)$$

É importante ressaltar que, para evitar o desperdício de recursos, considera-se que tanto uma estrada aberta no período p quanto uma estrada que recebeu manutenção no mesmo período são adequadas para o tráfego. Portanto, não se justifica que um mesmo trecho seja simultaneamente aberto e mantido em um único período. Deste modo:

$$w_{ijp} + z_{ijp} \leq 1 \quad \forall e_{ij} \in E, \forall p \in P^* \quad (4.2.16)$$

Ademais, não se justifica realizar a manutenção de uma estrada que seja considerada “fechada”. Visto que uma via sem utilização pode ser classificada dessa forma devido ao decurso do tempo, é necessário estipular um intervalo temporal e definir o conjunto P_p , composto por essa quantidade determinada de períodos anteriores a p . Assim, uma estrada só poderá receber manutenção no período p caso tenha sido aberta ou mantida em algum dos períodos integrantes de P_p :

$$z_{ijp} \leq \sum_{p' \in P_p} (w_{ijp'} + z_{ijp'}) \quad \forall e_{ij} \in E, \forall p \in P^* \quad (4.2.17)$$

Para integrar a disponibilidade de uso da estrada à intensidade de tráfego permitida, estipula-se V_{ijp} como o limite superior de viagens em e_{ij} no período p . Esse limitante deve ser definido conforme o contexto do problema, podendo representar, por exemplo: a capacidade física da estrada e_{ij} no período p ; a dimensão da frota disponível no período p ; ou o total de viagens contratadas para a referida etapa.

Isto posto, delimita-se o valor da variável y_{ijp} por meio da seguinte restrição:

$$y_{ijp} \leq V_{ijp} (w_{ijp} + z_{ijp}) \quad \forall e_{ij} \in E, \forall p \in P^* \quad (4.2.18)$$

Essa formulação impõe que $y_{ijp} = 0$ caso a estrada não tenha sido aberta ou submetida à manutenção no período p .

É fundamental destacar, especialmente para a implementação do algoritmo, a obrigatoriedade da anulação de variáveis cujos fluxos se iniciam e terminam no mesmo nó. Adicionalmente, estabelece-se que não ocorram viagens no período inicial $p = 0$. Tais condições são expressas por:

$$y_{iip}, w_{iip}, z_{iip} = 0 \quad \forall i \in N, \forall p \in P \quad (4.2.19)$$

$$y_{ij0} = 0 \quad \forall i, j \in N \quad (4.2.20)$$

4.2.5 Ponto 6: Forma de carregamento

Cada talhão t possui um conjunto de pontos N_t a ele associados. Qualquer ponto integrante de N_t pode ser escolhido como local de carregamento do material colhido em t no período p . De forma análoga, cada nó i possui um conjunto de talhões F_i vinculados, sendo que qualquer $t \in F_i$ pode adotar i como seu ponto de carga. Na seção relativa aos veículos, definiu-se a quantidade ε_{tsp} a qual compatibiliza a unidade de medida do volume colhido com a capacidade de transporte da frota.

Considerando essa estrutura, define-se a seguinte variável de decisão:

k_{itp} = quantidade de veículos carregados no nó i para atender o talhão t no período p .

À variável k_{itp} associa-se o coeficiente κ_{p} , que representa os custos fixos de carregamento e descarregamento de um veículo no período p .

Um dos objetivos da otimização reside na seleção do nó $i \in N_t$ mais adequado para a realização do carregamento. Uma abordagem possível consiste na definição prévia desse ponto, baseada nas trajetórias ótimas entre os vértices do talhão e os sumidouros do grafo, calculadas mediante o algoritmo de Floyd-Warshall. No escopo da modelagem, é imperativo que o volume colhido seja alocado a um dos pontos de transbordo, o qual será único por talhão, caso se opte pela escolha predeterminada. Tal condição é estabelecida por:

$$\sum_{i \in N_t} k_{itp} = \varepsilon_{tsp} \sum_b x_{tpb} \quad \forall t \in F, \forall s \in S, \forall p \in P^* \quad (4.2.21)$$

Cada nó pode receber carga dos diversos talhões a ele associados. Adicionalmente, dependendo do conjunto ao qual pertença (N_O , N_F ou N_S), pode também receber viagens oriundas de outros nós em direção ao sumidouro. Sob estas condições, estabelecem-se as restrições de conservação de fluxo a seguir:

Para os nós de fluxo ($i \in N_F$), a quantidade de veículos que partem de i em direção a algum j no período p deve ser equivalente à soma de todos os veículos que

chegam a i com as cargas efetuadas pelos talhões a ele vinculados:

$$\sum_{j \in E_i} y_{ijp} = \sum_{j \in E_i} y_{jip} + \sum_{t \in F_i} k_{itp} \quad \forall i \in N_F, \forall p \in P^* \quad (4.2.22)$$

Para os nós de origem ($i \in N_O$), a quantidade de veículos que partem de i para algum j no período p deve restringir-se àquelas cargas efetuadas pelos talhões associados. Ressalte-se que nenhum veículo vindo de outro nó deve ser direcionado ao nó i , uma vez que este não atua como ponto de passagem:

$$\sum_{j \in E_i} y_{ijp} = \sum_{t \in F_i} k_{itp} \quad \forall i \in N_O, \forall p \in P^* \quad (4.2.23)$$

$$\sum_{j \in E_i} y_{jip} = 0 \quad \forall i \in N_O, \forall p \in P \quad (4.2.24)$$

Para os nós de saída ($i \in N_S$), não deve haver saída de veículos em direção a outros nós j , visto que este conjunto representa o destino no contexto do problema. Pode-se considerar, ainda, que os pontos de saída não sejam admitidos como possíveis pontos de carga, reforçando a modelagem do transporte na capacidade das vias. Isto fica estabelecido por:

$$\sum_{j \in E_i} y_{ijp} = 0 \quad \forall i \in N_S, \forall p \in P \quad (4.2.25)$$

$$\sum_{t \in F_i} k_{itp} = 0 \quad \forall i \in N_S, \forall p \in P \quad (4.2.26)$$

Todavia, na prática, a supressão da restrição 4.2.26 tende a proporcionar um desempenho econômico superior, sem comprometer a factibilidade da solução.

Consideradas as restrições enunciadas, é possível compor a função objetivo do PCARP-FH (equação 4.3.1), que consiste em maximizar a receita líquida oriunda da colheita de todos os talhões. Para tanto, subtraem-se da receita bruta os custos de abertura e manutenção de estradas, bem como os custos variáveis de transporte (viagens) e os custos fixos de carregamento.

4.3 MODELAGEM

Considerado todo o processo de elaboração, apresenta-se a forma final do modelo PCARP-FH:

Função Objetivo

$$\begin{aligned} \max Z = & \sum_s \sum_t \sum_p \sum_b v_{tsp} x_{tpb} - \sum_i \sum_j \sum_p (\omega_{ijp} w_{ijp} + \zeta_{ijp} z_{ijp} + \varphi_{ijp} y_{ijp}) \\ & - \sum_i \sum_t \sum_p \kappa_p k_{itp} \end{aligned} \quad (4.3.1)$$

Sujeito à:

$$\sum_p \sum_b x_{tpb} \leq 1 \quad \forall t \in F \quad (4.3.2)$$

$$\sum_t \sum_b v_{tsp} x_{tpb} \geq (1 - \lambda) d_{sp} \quad \forall s \in S, \forall p \in P^* \quad (4.3.3)$$

$$\sum_t \sum_b v_{tsp} x_{tpb} \leq (1 + \lambda) d_{sp} \quad \forall s \in S, \forall p \in P^* \quad (4.3.4)$$

$$(n_t + p - 1) \sum_b x_{tpb} \geq \eta_t \sum_b x_{tpb} \quad \forall t \in F, \forall p \in P^* \quad (4.3.5)$$

$$\beta_{0p} = 1 \quad \forall p \in P \quad (4.3.6)$$

$$\sum_b x_{tpb} + \sum_b x_{rpb} \leq 1 \quad \forall (t, r) \in F_{adj}, \forall p \in P^* \quad (4.3.7)$$

$$\sum_b x_{tpb} + \sum_b x_{r(\rho+1)b} \leq 1 \quad \begin{array}{l} \forall (t, r) \in F_{adj} \\ \rho = 1, 2, \dots, HP - 1 \end{array} \quad (4.3.8)$$

$$\delta_{tr} (x_{tpb} + x_{rpb} - 1) \leq \Delta_b \quad \forall t, r \in F, \forall b \in B, \forall p \in P^* \quad (4.3.9)$$

$$\sum_{h=0}^{b-1} \sum_t v_{tsp} x_{tph} \leq (1 - \sigma \beta_{bp})(1 + \lambda) d_{sp} \quad \forall b \in B^*, s \in S, p \in P^* \quad (4.3.10)$$

$$\sum_t a_t x_{tpb} \leq \bar{A}_p \beta_{bp} \quad \forall b \in B, \forall p \in P^* \quad (4.3.11)$$

$$\sum_t a_t x_{tpb} \geq \underline{A}_p \beta_{bp} \quad \forall b \in B, \forall p \in P^* \quad (4.3.12)$$

$$\delta_{tr} (x_{tpb} + x_{rph} - 1) \leq \Delta_a \quad \begin{array}{l} \forall t, r \in F, \forall b, h \in B, \\ b \neq h, \forall p \in P^* \end{array} \quad (4.3.13)$$

$$\delta_{tr} \left(\sum_b x_{tpb} + \sum_b x_{r(\rho+1)b} - 1 \right) \leq \Delta_c \quad \begin{array}{l} \forall t, r \in F \\ \rho = 1, 2, \dots, HP - 1 \end{array} \quad (4.3.14)$$

$$w_{ij0} = 1 \quad \forall e_{ij} \in E_0 \quad (4.3.15)$$

$$z_{ij0} = 0 \quad \forall i, j \in N \quad (4.3.16)$$

$$w_{ijp} + z_{ijp} \leq 1 \quad \forall e_{ij} \in E, \forall p \in P \quad (4.3.17)$$

$$z_{ijp} \leq \sum_{p' \in P_p} (w_{ijp'} + z_{ijp'}) \quad \forall e_{ij} \in E, \forall p \in P^* \quad (4.3.18)$$

$$y_{ijp} \leq V_{ijp} (w_{ijp} + z_{ijp}) \quad \forall e_{ij} \in E, \forall p \in P^* \quad (4.3.19)$$

$$y_{iip}, w_{iip}, z_{iip} = 0 \quad \forall i \in N, \forall p \in P \quad (4.3.20)$$

$$y_{ij0} = 0 \quad \forall i, j \in N \quad (4.3.21)$$

$$\sum_{i \in N_t} k_{itp} = \varepsilon_{tsp} \sum_b x_{tpb} \quad \forall t \in F, \forall s \in S, \forall p \in P^* \quad (4.3.22)$$

$$\sum_{j \in E_i} y_{ijp} = \sum_{j \in E_i} y_{jip} + \sum_{t \in F_i} k_{itp} \quad \forall i \in N_F, \forall p \in P^* \quad (4.3.23)$$

$$\sum_{j \in E_i} y_{ijp} = \sum_{t \in F_i} k_{itp} \quad \forall i \in N_O, \forall p \in P^* \quad (4.3.24)$$

$$\sum_{j \in E_i} y_{ijp} = 0 \quad \forall i \in N_O, \forall p \in P \quad (4.3.25)$$

$$\sum_{j \in E_i} y_{ijp} = 0 \quad \forall i \in N_S, \forall p \in P \quad (4.3.26)$$

$$\sum_{t \in F_i} k_{itp} = 0 \quad \forall i \in N_S, \forall p \in P \quad (4.3.27)$$

$$x_{tpb}, w_{ijp}, z_{ijp}, \beta_{bp} \in \{0, 1\} \quad (4.3.28)$$

$$y_{ijp}, k_{itp} \in \mathbb{N} \quad (4.3.29)$$

4.3.1 Considerações acerca da modelagem na programação

As restrições relativas aos blocos iniciais (4.3.6), às estradas pré-existentes (4.3.15), à proibição de manutenção de estradas no período zero (4.3.16), às estradas com origem e destino no mesmo nó (4.3.20) e às viagens no período zero (4.3.21) podem ser implementadas via configuração dos limites superiores e inferiores das variáveis (*bounds*). Da mesma forma, as restrições que impedem viagens destinadas a nós de origem (4.3.25), viagens originadas em nós de saída (4.3.26) e o uso de nós de saída como ponto de carga (4.3.27) admitem o mesmo tratamento. Essa estratégia permite reduzir a quantidade de restrições inseridas explicitamente no código, otimizando o desempenho do modelo matemático ao diminuir o esforço computacional.

4.3.2 Variáveis de folga e excesso

Durante a resolução computacional do problema, a incorporação de variáveis de folga e excesso pode auxiliar na depuração de eventuais infactibilidades. Certas situações são admissíveis de se ter folga, mas não excesso, e em outras ocorre o oposto. As restrições que não admitem folga ou excesso são tratadas na subseção anterior por limites das variáveis. A análise de cada caso tem o intuito de definir os coeficientes que tais variáveis assumirão na função objetivo. As situações consideradas “toleráveis” possuirão coeficiente nulo, ao passo que as demais receberão um coeficiente de penalização elevado, em magnitude superior aos demais valores da função objetivo. Nos quadros 5 e 6, são apresentadas as situações do problema equivalentes à necessidade dessas variáveis e suas respectivas implicações.

QUADRO 5 – VARIÁVEIS DE FOLGA E SUAS IMPLICAÇÕES

Restr.	Implicação	Tolerável?
4.3.2	O talhão não foi selecionado para colheita em nenhum período.	Sim
4.3.3	Volume colhido abaixo da demanda mínima.	Não
4.3.4	Volume colhido abaixo da demanda máxima.	Sim
4.3.5	Colheita antes de atingir a maturidade mínima do talhão.	Não
4.3.7	Nenhum dos talhões adjacentes foi colhido no período p .	Sim
4.3.8	Nenhum dos talhões adjacentes foi colhido em períodos consecutivos.	Sim
4.3.9	Talhões colhidos em um mesmo bloco respeitam o limite Δ_b .	Sim
4.3.10	Volume dos blocos anteriores permite a abertura de novo bloco.	Sim
4.3.11	Área colhida no bloco é inferior ao limite máximo.	Sim
4.3.12	Área colhida no bloco é inferior ao mínimo estabelecido.	Não
4.3.13	Talhões colhidos em blocos distintos respeitam o limite Δ_a .	Sim
4.3.14	Talhões colhidos em períodos consecutivos respeitam o limite Δ_c .	Sim
4.3.17	Estrada e_{ij} não foi aberta nem submetida à manutenção.	Sim
4.3.18	Estrada não foi mantida, apesar de possuir histórico de abertura.	Sim
4.3.19	Fluxo de viagens é inferior ao limite disponível.	Sim
4.3.22	Volume colhido no talhão não foi totalmente encaminhado aos nós.	Não
4.3.23	O fluxo de saída no nó $i \in N_F$ é inferior ao de entrada.	Não
4.3.24	O fluxo de saída no nó $i \in N_O$ é inferior ao volume carregado localmente.	Não

FONTE: O Autor (2025).

QUADRO 6 – VARIÁVEIS DE EXCESSO E SUAS IMPLICAÇÕES

Restr.	Implicação	Tolerável?
4.3.2	O talhão foi colhido em múltiplos períodos ou blocos.	Não
4.3.3	Volume colhido acima da demanda mínima.	Sim
4.3.4	Volume colhido acima da demanda máxima.	Não
4.3.5	Colheita após atingir a maturidade mínima do talhão.	Sim
4.3.7	Talhões adjacentes foram colhidos simultaneamente.	Não
4.3.8	Talhões adjacentes foram colhidos em períodos consecutivos.	Não
4.3.9	Talhões colhidos em um mesmo bloco desrespeitam o limite Δ_b .	Não
4.3.10	Volume dos blocos anteriores impede a abertura de novos blocos.	Não
4.3.11	Área colhida no bloco excede o limite máximo.	Não
4.3.12	Área colhida no bloco atende ao requisito mínimo.	Sim
4.3.13	Talhões colhidos em blocos distintos desrespeitam o limite Δ_a .	Não
4.3.14	Talhões colhidos em períodos consecutivos desrespeitam o limite Δ_c .	Não
4.3.17	Estrada e_{ij} foi simultaneamente aberta e mantida.	Não
4.3.18	Manutenção realizada em via sem histórico de abertura recente.	Não
4.3.19	Fluxo de viagens excede o limite disponível.	Não
4.3.22	Fluxo alocado aos nós é superior ao volume efetivamente colhido.	Não
4.3.23	O fluxo de saída no nó $i \in N_F$ é superior à soma de entradas e cargas.	Não
4.3.24	O fluxo de saída no nó $i \in N_O$ é superior ao carregamento local.	Não

FONTE: O Autor (2025).

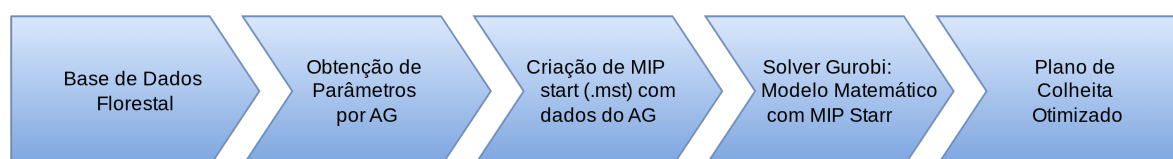
4.3.3 Outros parâmetros que podem causar infactibilidade

Determinadas informações devem ser arbitradas para a execução do modelo, não estando necessariamente disponíveis em bases públicas de empreendimentos florestais, visto que constituem características intrínsecas a cada planejamento. Tais parâmetros são:

- d_{sp} : demanda do sortimento s no período p (equações 4.3.3, 4.3.4 e 4.3.10);
- Δ_b : distância euclidiana máxima permitida entre dois talhões colhidos em um mesmo período e mesmo bloco (equação 4.3.9);
- \overline{A}_p e \underline{A}_p : áreas máxima e mínima, respectivamente, permitidas para a formação de um bloco de colheita (equações 4.3.11 e 4.3.12);
- Δ_a : distância euclidiana máxima entre dois talhões quando selecionados para colheita no mesmo período, porém em blocos distintos (equação 4.3.13);
- Δ_c : distância euclidiana máxima entre dois talhões para que a colheita ocorra em períodos consecutivos (equação 4.3.14).

Para a resolução prática do problema, essas informações são levantadas em campo ou definidas arbitrariamente, o que pode levar à infactibilidade do modelo. Já para testes teóricos, optou-se pela busca de possíveis valores por meio de AG, técnica proposta por John Holland, sendo aplicada conforme abordado em Rosa et al. (2025), disponível no Apêndice 2. A sequência operacional desta proposta híbrida está ilustrada na figura 12.

FIGURA 12 – SEQUÊNCIA DA PROPOSTA HIBRIDIZADA



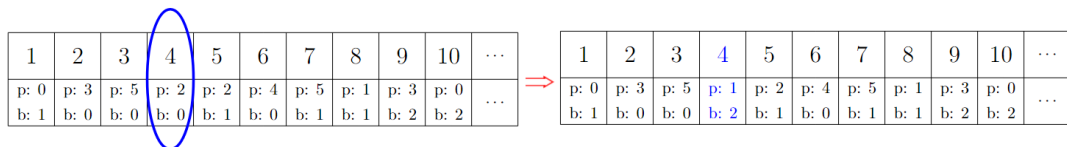
FONTE: O autor (2025).

O AG utilizado em Rosa et al. (2025) consiste em uma aplicação direta de sua forma original, fundamentando-se em Reeves (2010). Em resumo, uma população inicial é composta por um conjunto de soluções geradas de modo guloso, com foco no atendimento de restrições críticas, em especial a equação 4.3.2. Tais soluções são representadas por listas de pares ordenados (p, b) , em que cada posição da lista associa um talhão específico ao seu respectivo período p e bloco b de colheita,

conforme estabelecido neste capítulo. Dessa forma, essa listagem correlaciona-se diretamente com as variáveis x_{tpb} que assumirão o valor 1 na solução considerada.

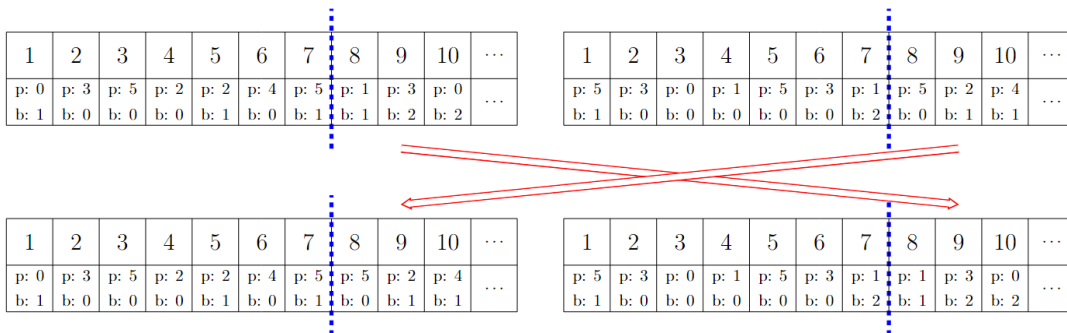
Foi desenvolvida uma estrutura para que cada solução, denominada “indivíduo” da população do AG, possua funções internas para os cálculos de *fitness* por meio da equação 4.3.1, bem como para a determinação dos valores das variáveis w_{ijp} , z_{ijp} , y_{ijp} e k_{itp} decorrentes das definições de x_{tpb} . Rosa et al. (2025) estabelecem duas operações próprias do AG: mutação e *crossover*, ilustradas pelas figuras 13 e 14.

FIGURA 13 – OPERAÇÃO DE MUTAÇÃO



FONTE: Rosa et al. (2025)

FIGURA 14 – OPERAÇÃO DE *CROSSOVER*



FONTE: Rosa et al. (2025)

Após a geração de uma determinada quantidade de indivíduos, realiza-se a seleção de um percentual da população que comporá a geração seguinte. Esse processo iterativo estende-se até que seja atingido um número preestabelecido de gerações. Os parâmetros operacionais para a execução do AG nesta pesquisa estão detalhados no quadro 7.

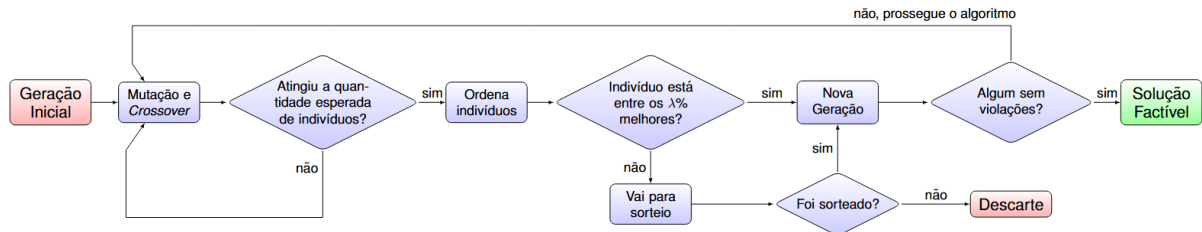
QUADRO 7 – PARÂMETROS USADOS NO AG

Parâmetro	Valor	Descrição
Execuções	165	Quantidade de execuções do AG.
Gerações	5	Número de gerações para cada execução.
População	15	Quantidade de indivíduos por geração.
Sobrevivência	33%	Percentual de indivíduos que transitam para a geração subsequente.
Mutação	50%	Probabilidade de aplicação do operador de mutação na criação de novos indivíduos.
<i>Crossover</i>	50%	Probabilidade de aplicação do operador de <i>crossover</i> na criação de novos indivíduos.

FONTE: O autor (2025).

Dentre os critérios de classificação para a sobrevivência, destacam-se a contagem de restrições ainda não atendidas priorizando-se as menores quantidades, em casos de infactibilidade, e os maiores valores de *fitness* obtidos. A figura 15 detalha o encadeamento lógico do algoritmo para a obtenção de uma solução factível.

FIGURA 15 – FLUXOGRAMA DO AG



FONTE: Rosa et al. (2025)

A partir da melhor solução indicada pelo AG, aferem-se os valores de Δ_a , Δ_b , Δ_c , d_{sp} , $\overline{A_p}$ e $\underline{A_p}$ que seriam necessários para torná-la factível. Esses parâmetros ajustados são então transpostos para o otimizador Gurobi 10, permitindo a obtenção da solução otimizada do problema.

4.4 IMPLEMENTAÇÃO

Conforme indicado em Rosa et al. (2025), desenvolveu-se um AG para a obtenção dos parâmetros da solução, utilizando-se a linguagem Python 3.12 no ambiente Visual Studio Code. Por outro lado, a implementação computacional voltada à otimização foi realizada em linguagem C#, sob o ambiente Visual Studio Community 2022, com o otimizador Gurobi 10. Ambas as etapas foram executadas em um computador equipado com processador Intel Core i3-6006U (2.00 GHz) e 12 GB de RAM.

Para facilitar a leitura dos dados, tanto em relação aos parâmetros gerais de execução quanto às instâncias específicas, as informações foram organizadas em constantes inicializadas durante o carregamento da solução. Os parâmetros gerais definidos são:

- Par_NumSortiments: número $|S|$ de sortimentos do problema;
- Par>LoadingUnloadingCost: custo κ_p de carga e descarga, na mesma unidade monetária da instância;
- Par_MinimalHarvestAge: idade mínima η_t para colheita dos talhões, utilizada na restrição 4.3.5;
- Par_DemFactor: tolerância λ para o atendimento da demanda, presente nas restrições 4.3.3 e 4.3.4, expressa em valor decimal;

- **Par_NewBlockPercent**: percentual σ para abertura de novo bloco por período, referente à restrição 4.3.10, em valor decimal;
- **Par_MaxDistInBlock**: percentual da maior distância entre unidades do empreendimento, que permite a colheita de talhões distintos no mesmo período e bloco. Equivale ao termo Δ_b da restrição 4.3.9;
- **Par_MaxDistOutBlockInPeriod**: percentual da maior distância entre unidades do empreendimento, que permite a colheita de talhões distintos no mesmo período em blocos diferentes. Corresponde ao termo Δ_a da restrição 4.3.13;
- **Par_MaxDistConsecutivePeriod**: percentual da maior distância entre unidades do empreendimento, que permite a colheita de talhões distintos em períodos consecutivos. Representa o termo Δ_c da restrição 4.3.14;
- **Par_TruckCapacity**: capacidade de carga dos veículos, considerando-se uma frota homogênea. Este valor é empregado no cálculo da quantidade de veículos destinados à colheita de um talhão, em função do volume produzido.

Para cada instância, aqui representada por "INST", as informações estruturadas são:

- **INST_Nodes**: lista dos nós do grafo contendo identificação, coordenadas cartesianas e a classificação do nó como origem (N_O), destino (N_S) ou fluxo (N_F);
- **INST_Edges**: lista das arestas do grafo com a identificação dos nós incidentes, comprimento, custo de travessia e indicação de pré-existência da via;
- **INST_FMU**: lista de talhões contendo nome, área e idade ao começo do HP;
- **INST_Vol**: projeções do volume passível de colheita por talhão para cada período, mantendo a unidade de medida consistente com a instância;
- **INST_Prif**: receita obtida pela colheita de cada talhão por período, incluindo a valoração para o caso de colheita não realizada, em unidade monetária arbitrária;
- **INST_Adj**: lista de adjacências entre talhões, especificando os nós compartilhados;
- **INST_First**: relação de talhões com colheita obrigatória no primeiro período;
- **INST_Virtual**: unidades que não representam talhões produtivos, mas que devem ser consideradas no cálculo (ex: corpos d'água ou áreas externas adjacentes);
- **INST_Periods**: número total de períodos que compõem o HP;

- INST_MinArea e INST_MaxArea: limites operacionais de área para colheita em cada período;
- INST_Cost_RoadOpening_ByUnity: custo fixo para abertura de estrada, por evento;
- INST_Cost_RoadOpening_ByPeriod: custo variável por período para abertura de estrada;
- INST_Cost_RoadMaintenance_ByUnity: custo fixo para manutenção de estrada, por evento;
- INST_Cost_RoadMaintenance_ByPeriod: custo variável por período para manutenção de estrada;
- INST_Cost_TravelFix_ByPeriod: custo de viagem, variável por período;
- INST_Cost_TravelFix_ByUnity: custo fixo de viagem, por evento;
- INST_Cost_TravelIJ_ByUnity: custo variável de viagem, proporcional à distância percorrida;
- INST_MaintenanceOpeningPeriods: define o intervalo temporal (janela de tempo) após o qual uma estrada sem manutenção é considerada “fechada”, conforme a restrição 4.3.18;
- INST_BigM_S e INST_BigM_E: coeficientes de penalização (Big M) atribuídos às variáveis de folga e excesso, respectivamente;
- INST_SortimentDemand: meta de demanda a ser atendida em cada período;
- INST_NumBlock: limite superior para a quantidade de blocos de colheita permitidos.

Considerando os parâmetros do modelo, tem-se como coeficientes:

- ω_{ijp} : associado à função CalcCost_RoadOpening, composto pelo produto entre a distância dos nós i e j , o parâmetro INST_Cost_RoadOpening_ByUnity e o custo temporal INST_Cost_RoadOpening_ByPeriod[p];
- ζ_{ijp} : associado à função CalcCost_RoadMaintenance, definido pela distância entre os nós i e j multiplicada por INST_Cost_RoadMaintenance_ByUnity, acrescida do custo INST_Cost_RoadMaintenance_ByPeriod[p];

- φ_{ijp} associado à função $\text{CalcCost_TravelsIJ}$, calculado pela distância entre os nós i e j multiplicada por $\text{INST_Cost_TravelsIJ_ByUnity}$, somada ao custo fixo por viagem $\text{INST_Cost_TravelFix_ByUnity}$.

Para mitigar a ocorrência de eventuais inafectibilidades, conforme discutido na subseção 4.3.3, o AG é empregado para estimar os valores dos parâmetros $\text{Par_MaxDistOutBlockInPeriod}$, $\text{Par_MaxDistInBlock}$, $\text{Par_MaxDistConsecutivePeriod}$, $\text{INST_SortimentDemand}$, INST_MinArea e INST_MaxArea .

4.4.1 Adaptações do modelo na implementação

Na implementação do modelo, com o intuito de minimizar o consumo de memória e o tempo computacional, foram incorporadas estratégias de otimização fundamentadas no estabelecimento de limites de variáveis e na substituição de restrições por formulações matematicamente equivalentes, porém mais eficientes para o *solver*.

O HP é acrescido de uma unidade temporal suplementar denominada “período zero”. Os talhões cuja colheita é atribuída a esse período representam, na realidade, unidades que não serão integradas ao cronograma de corte. Nesse intervalo, são vedadas as atividades de manutenção de estradas, anulando-se z_{j0} e definindo-se as variáveis de disponibilidade viária estritamente conforme o critério de pré-existência. Essa estratégia permite desconsiderar o custo de abertura para vias já operacionais no estágio inicial do planejamento. As restrições de volume de colheita (4.3.3) e (4.3.4), idade mínima (4.3.5), manutenção e fluxo de veículos (4.3.18) a (4.3.24), bem como as limitações de área e as regras espaciais de blocos (4.3.11) a (4.3.14), não incidem sobre o período zero.

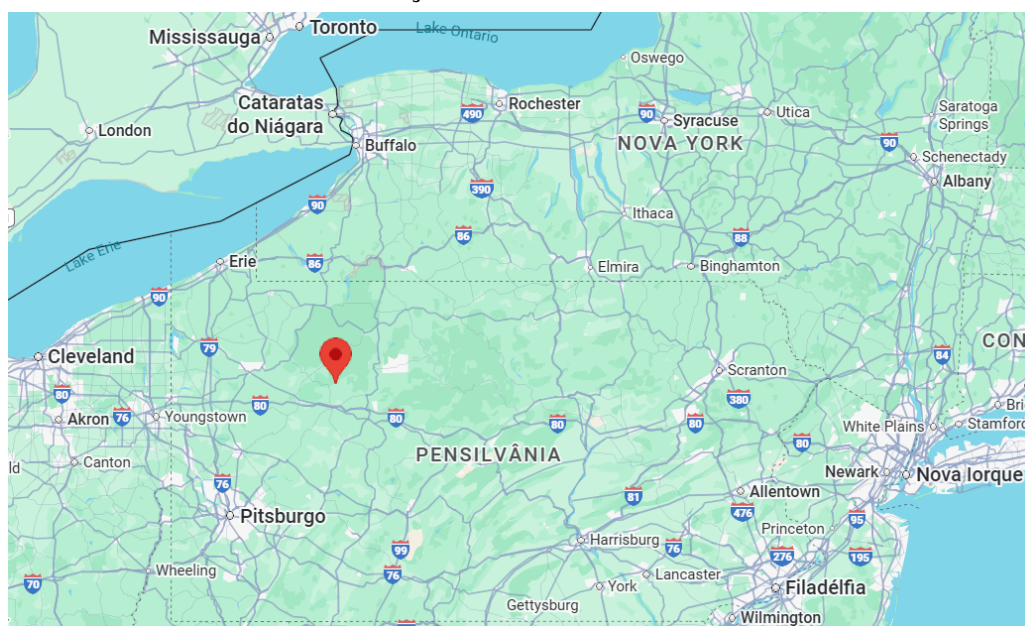
No que tange às estradas e trajetórias, são classificadas como impróprias: as vias que se iniciam e terminam no mesmo nó; as originadas em pontos exclusivamente de destino; as destinadas a pontos exclusivamente de origem; e as conexões inexistentes entre vértices, verificadas quando combinações de nós distintos não possuem arestas correspondentes no grafo informado. Consequentemente, as variáveis associadas a tais situações tiveram seus limites superiores fixados em zero.

Na implementação da restrição (4.3.5), aplicou-se um filtro lógico para que apenas as inequações nas quais a idade atual do talhão fosse inferior à idade mínima recomendada fossem incorporadas ao modelo. Dessa forma, as restrições que resultariam em expressões triviais, como “ ≥ 0 ” ou “ $x_{tpb} \geq 0$ ”, são omitidas, uma vez que já são satisfeitas pela definição da variável x_{tpb} .

4.5 DADOS DE TESTE

Para a validação da presente proposta, selecionou-se a base de dados pública Phyllis Leeper (Toth, 2011). O empreendimento compreende 89 talhões, abrangendo uma área de aproximadamente 642 hectares, localizada no noroeste da Pensilvânia, EUA, sob as coordenadas latitude 41° 20' 24"N e longitude 79° 03' 40"W, conforme ilustrado na figura 16 (Google, 2025).

FIGURA 16 – LOCALIZAÇÃO DO EMPREENDIMENTO FLORESTAL



FONTE: Google (2025).

A escolha recaiu sobre essa base por representar uma das menores instâncias dentre as listadas, embora não a menor de todas, considerando as limitações dos equipamentos disponíveis para uso. O quadro 8, gerado com informações de Toth (2011), relaciona o conteúdo da base selecionada com os parâmetros definidos nesta pesquisa. A representação gráfica detalhada da base, obtida por meio do processamento de arquivos de informação geográfica, encontra-se disponível no Apêndice 4.

QUADRO 8 – ARQUIVOS DA BASE PHYLLIS LEEPER

Arquivo	Descrição	Parâmetros
Adjacency_PhyllisLeeper.csv	Lista de talhões adjacentes, isto é, que compartilham fronteira	INST_Adj
Stands_PhyllisLeeper.csv	Área (em hectares) e idade inicial (em décadas) de cada talhão	INST_FMU
Volume_PhyllisLeeper.csv	Projeção de volume de madeira (em 1000 board-foot) para cada período (em década)	INST_Vol
Profit_PhyllisLeeper.csv	Valor presente líquido por período (em década) das receitas da madeira (descontado a 7%)	INST_Pr
Map_PhyllisLeeper	Pasta contendo arquivos das informações geográficas (.shp, .shx, .dbf e .prj)	INST_Nodes e INST_Edges

FONTE: O autor (2025).

Como o modelo não impõe restrições rígidas a configurações como unidade monetária, de tempo ou de volume, é imprescindível que os dados de entrada sejam previamente uniformizados, garantindo a integridade das soluções obtidas. Dessa forma, uma base de dados distinta que apresente volumes em metros cúbicos e períodos em meses, por exemplo, pode ser processada pelo mesmo modelo, produzindo respostas nas mesmas unidades das informações fornecidas.

Para a identificação dos pontos estratégicos e das estradas de acesso aos talhões, o mapa foi reconstruído em formato vetorial (.svg) a partir do processamento de arquivos geográficos (.shp). Nesse processo, foram filtrados e identificados os pontos de início, interseção e extremidade das unidades, os quais compõem os nós do grafo. As distâncias entre os vértices são calculadas por meio do algoritmo de Floyd-Warshall, visando a máxima fidelidade geométrica em relação ao traçado vetorial original.

Dessa forma, os grafos são estruturados em conjunto com os talhões limítrofes, associando o volume produzido em cada unidade como uma demanda a ser coletada em um dos vértices adjacentes ao talhão. Cada nó do grafo é classificado conforme as características de fluxo e o sentido das arestas incidentes, conforme as categorias abaixo:

- Apenas origem: pontos que não admitem carregamentos, representando especificamente os limites internos do empreendimento;
- Apenas destino: pontos que constituem sumidouros da malha viária, nos quais não há partidas de novos carregamentos;
- Fluxo interno: os demais pontos selecionados que permitem a passagem, entrada e saída de veículos.

Na aplicação do algoritmo de Floyd-Warshall, obtêm-se simultaneamente o conjunto T de trajetórias e os valores δ_{tr} , fundamentais para o cômputo das distâncias entre talhões nas restrições espaciais. Esse processo de construção do gráfico vetorial e a subsequente extração das trajetórias fornecem a base de dados necessária para o algoritmo de renderização, responsável pela geração automatizada das imagens que ilustram as soluções otimizadas.

Um dos pontos centrais da presente pesquisa consiste no uso do AG para a estimação de determinados parâmetros, visando assegurar a factibilidade do PCARP-FH conforme modelado. Entretanto, essa abordagem não se aplica à totalidade das variáveis do problema. Alguns parâmetros foram extraídos diretamente da interpretação dos arquivos da base de dados, como o `Par_NumSortiments`, calculado em função da quantidade de informações presentes nos registros de volume e valor líquido. No

caso específico da base Phyllis Leeper, os dados contemplam apenas um sortimento. Também o parâmetro INST_Periods foi definido como 5, uma vez que os arquivos de volume e receita projetam o HP do empreendimento em cinco décadas.

Outros parâmetros foram arbitrados e, em investigações futuras, poderão ser objeto de análise de sensibilidade ou determinados de forma heurística para otimizar o desempenho da função objetivo. Os valores arbitrários empregados nesta pesquisa estão detalhados no quadro 9.

QUADRO 9 – PARÂMETROS ARBITRÁRIOS

Parâmetro	Unidade	Valor arbitrado
Par>LoadingUnloadingCost	\$	3
Par_MinimalHarvestAge	década	1
Par_DemFactor	—	0,25
Par_NewBlockPercent	—	0,2
Par_TruckCapacity	<i>MBF</i>	12
INST_Cost_RoadOpening_ByUnity	\$	2,0
INST_Cost_RoadOpening_ByPeriod	\$	{10,0; 11,1; 12,2; 13,3; 14,4; 15,3 }
INST_Cost_RoadMaintenance_ByUnity	\$	0,5
INST_Cost_RoadMaintenance_ByPeriod	\$	{ 2,0; 2,2; 2,35; 2,3; 2,8; 2,6 }
INST_Cost_TravelFix_ByPeriod	\$	{ 1,0; 1,1; 1,2; 1,3; 1,4; 1,3 }
INST_Cost_TravelFix_ByUnity	\$	0,3
INST_Cost_TravelsIJ_ByUnity	\$	0,02
INST_MaintenanceOpeningPeriods	—	2
INST_NumBlock	—	3
INST_BigM	—	2,0e06

FONTE: O autor (2025).

5 RESULTADOS

Apresentados a proposta e o detalhamento da implementação computacional no capítulo anterior, descrevem-se, nesta etapa, os resultados obtidos por meio da arquitetura híbrida desenvolvida.

5.1 EXECUÇÕES

Ao concluir o processo de otimização, o *solver* Gurobi disponibiliza, por meio do método “Model.Write()”, o registro detalhado das informações pertinentes ao resultado, conforme a extensão de arquivo selecionada. Dentre as opções disponíveis, destaca-se o formato JSON, que gera um arquivo contendo os metadados da solução e, primordialmente, os valores atribuídos às variáveis não nulas, quando a factibilidade é alcançada.

Algumas das informações estruturadas no arquivo JSON estão descritas no quadro 10, com base nas especificações técnicas do manual do desenvolvedor (Gurobi, 2025).

QUADRO 10 – INFORMAÇÕES DO ARQUIVO JSON

Parâmetro	Descrição
Status	Status da otimização.
Runtime	Tempo de execução (s).
Work	Tempo necessário para execução (s).
ObjVal	Valor da função objetivo da solução.
ObjBound	O melhor limite conhecido de valor da função objetivo.
ObjBoundC	O melhor limite conhecido no valor da função objetivo antes do uso das informações de integralidade para fortalecer o limite.
MIPGap	A lacuna de otimalidade.
IntVio	O máximo de violação de integralidade.
BoundVio	O máximo de violação de limites.
ConstrVio	O máximo de violação de restrições.
IterCount	Número de iterações do Simplex.
BarIterCount	Número de iterações do método de barreira.
NodeCount	Número de nós explorados no branch-and-cut para modelos PLIM.
SolCount	Número de soluções armazenada para modelos PLIM.
PoolObjBound	Limite para o valor objetivo das soluções MIP não descobertas.

FONTE: O autor (2025).

5.2 SOLUÇÕES OBTIDAS

Foram selecionadas seis soluções distintas, variando-se o tempo limite para o processamento e empregando-se uma solução inicial (*warm start*) proveniente do AG. Esta solução inicial foi extraída de um arquivo no formato .mst, extensão específica para o registro de informações de partida em problemas de otimização.

Cabe ressaltar que tentativas de execução incorporando variáveis de folga e excesso desde os instantes iniciais, bem como execuções sem tais variáveis após três horas de processamento, excederam a capacidade de memória do equipamento disponível, impossibilitando a geração dos arquivos de solução. Os parâmetros detalhados no quadro 11 são os valores obtidos por uma solução factível por meio do AG, os quais serviram de base para as soluções subsequentes.

QUADRO 11 – PARÂMETROS GERADORES DAS SOLUÇÕES

Par_MaxDistInBlock	79
Par_MaxDistConsecutivePeriod	87
Par_MaxDistOutBlockInPeriod	70
SortimentDemand	{ {0,0; 6.297,0; 1.970,0; 6.323,0; 465,0; 4930,0 } }
MinArea	{ 0,0; 113,023; 36,69; 57,60; 0,0; 68,55 }
MaxArea	{ 0,0; 150,07; 38,07; 169,90; 15,77; 103,26.... }

FONTE: O autor (2025).

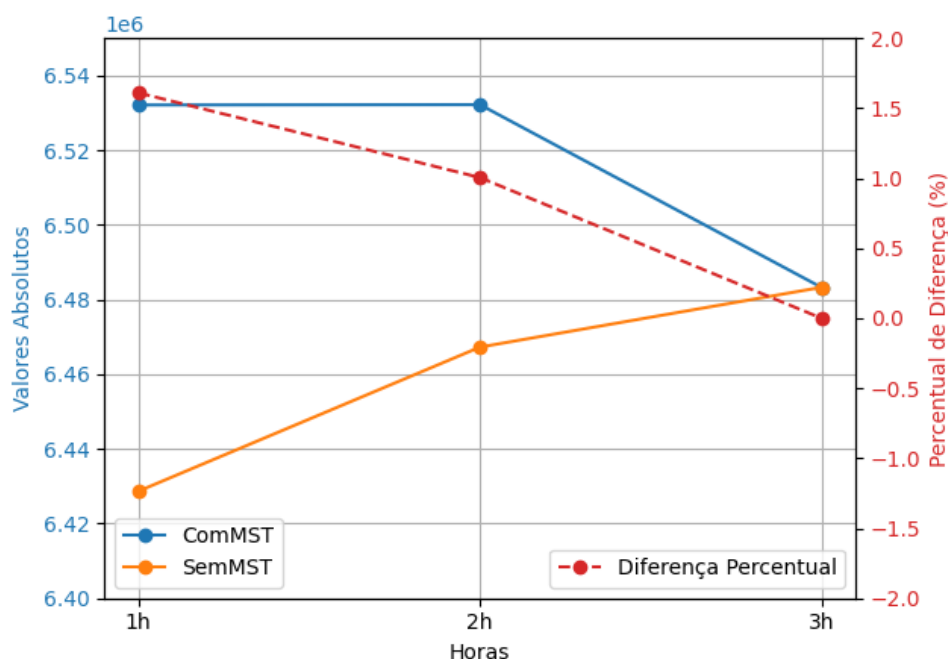
A solução inicial contida no arquivo .mst correspondeu exatamente à resposta obtida pelo AG ao processar os referidos parâmetros. Os dados dos arquivos JSON relativos às soluções estão compilados na tabela 1, enquanto a figura 17 ilustra a evolução do valor objetivo em função do tempo de processamento. A análise da referida figura permite identificar que a utilização do arquivo .mst otimiza o valor da função objetivo nas execuções de uma e duas horas, convergindo para um patamar comum ao atingir três horas de processamento. A variação percentual é calculada comparando-se os resultados de mesma duração, subtraindo-se o valor da execução sem solução inicial daquele obtido com o uso do arquivo de partida.

TABELA 1 – INFORMAÇÕES DAS SOLUÇÕES

Uso “.mst”	Com “.mst”			Sem “.mst”		
	A	B	C	D	E	F
Solução						
Status	9	9	9	9	9	9
Runtime (s)	3.600,27	7.200,55	10.803,53	3.601,02	7.203,27	10.802,26
Work	4.126,15	6.588,11	4.598,05	3.025,51	3.791,89	5.107,78
ObjVal	6,53e06	6,53e06	6,48e06	6,42e06	6,46e06	6,48e06
ObjBound	6,59e06	6,59e06	6,59e06	6,59e06	6,59e06	6,59e06
ObjBoundC	6,59e06	6,59e06	6,59e06	6,59e06	6,59e06	6,59e06
MIPGap	9,242e-03	9,187e-03	1,700e-02	2,596e-02	1,964e-02	1,696e-02
IntVio	0	0	0	0	0	0
BoundVio	0	0	0	0	0	0
ConstrVio	0	0	0	0	0	0
IterCount	1,12e07	1,78e07	1,19e07	6,73e06	9,28e06	1,39e07
BarIterCount	0	0	0	0	0	0
NodeCount	56.688	89.536	140.493	56.902	92.062	172.776
SolCount	10	10	10	10	10	10
PoolObjBound	6,592e06	6,592e06	6,593e06	6,595e06	6,594e06	6,593e06

FONTE: O autor (2025).

FIGURA 17 – EVOLUÇÃO DAS SOLUÇÕES



FONTE: O autor (2025).

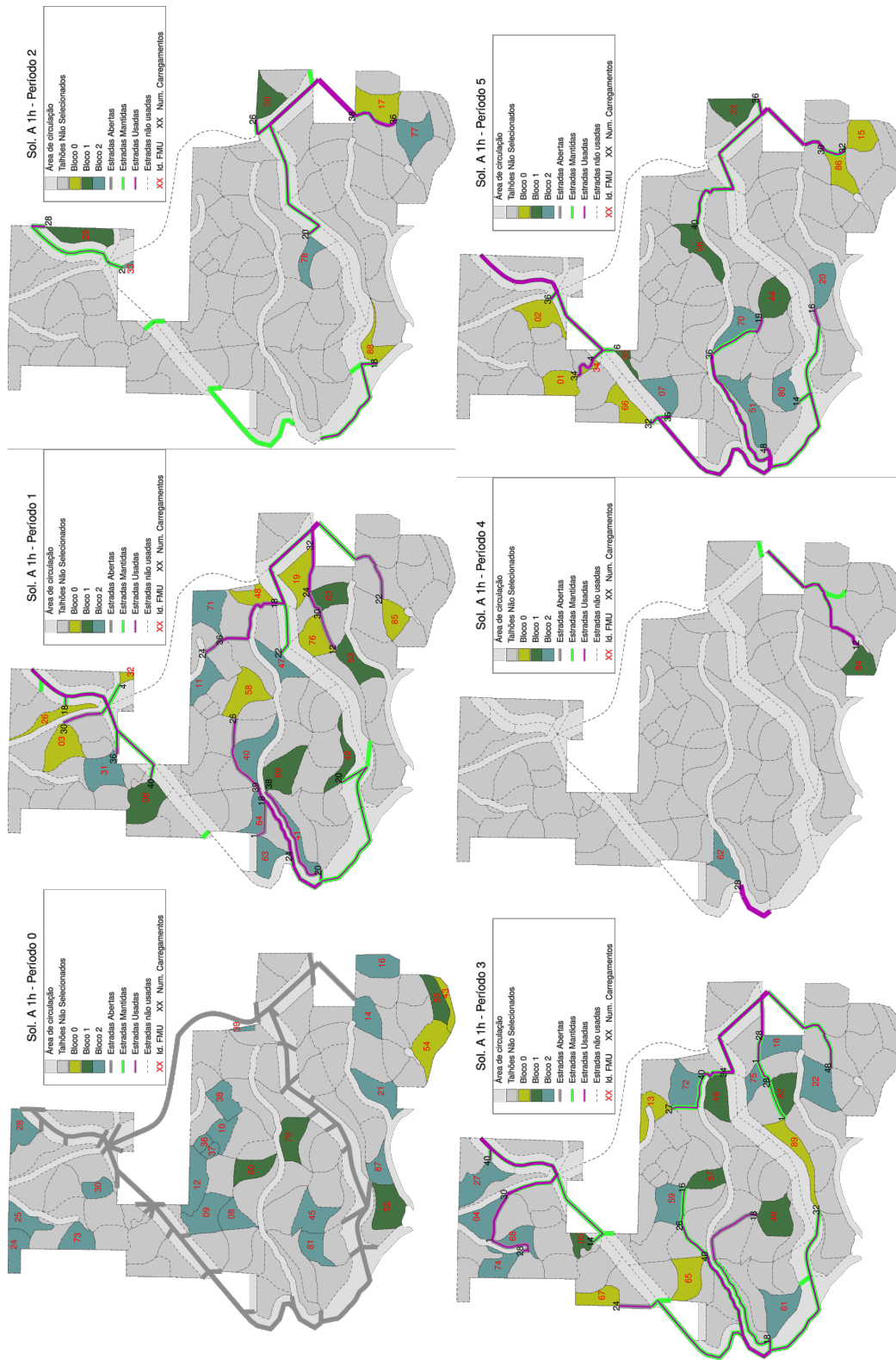
Desenvolveu-se um algoritmo em C# para o processamento dos arquivos JSON de cada solução que, integrado às informações da base original, gera um código em \LaTeX utilizando o pacote *tikz* para a renderização das imagens resultantes. O procedimento consiste na atribuição de cores distintas para identificar os blocos de colheita aos quais os talhões foram vinculados. Para cada período do HP, é gerada uma representação gráfica específica a partir das coordenadas geográficas que compõem o polígono do talhão.

Os talhões designados para colheita no período correspondente à imagem são preenchidos com a cor do respectivo bloco, enquanto as demais áreas recebem uma coloração neutra. Visto que o arquivo JSON preserva os valores das variáveis w_{ijp} , z_{ijp} e y_{ijp} , a malha viária é representada de forma análoga: a espessura das linhas reflete a intensidade de tráfego em cada trecho, sendo proporcional ao volume de transporte. Adicionalmente, numerais em preto adjacentes às vias indicam o fluxo de carregamentos no vértice correspondente. As figuras de 18 a 23 ilustram as soluções otimizadas, enquanto a figura 24 exhibe a configuração obtida pelo AG.¹

Uma das primeiras características que se destacam ao comparar as seis soluções é a influência determinante da definição de parâmetros sobre o resultado, visto que as soluções obtidas pelo processo de otimização apresentam pouca divergência em relação àquelas produzidas pelo AG. Embora a execução do AG não possua a

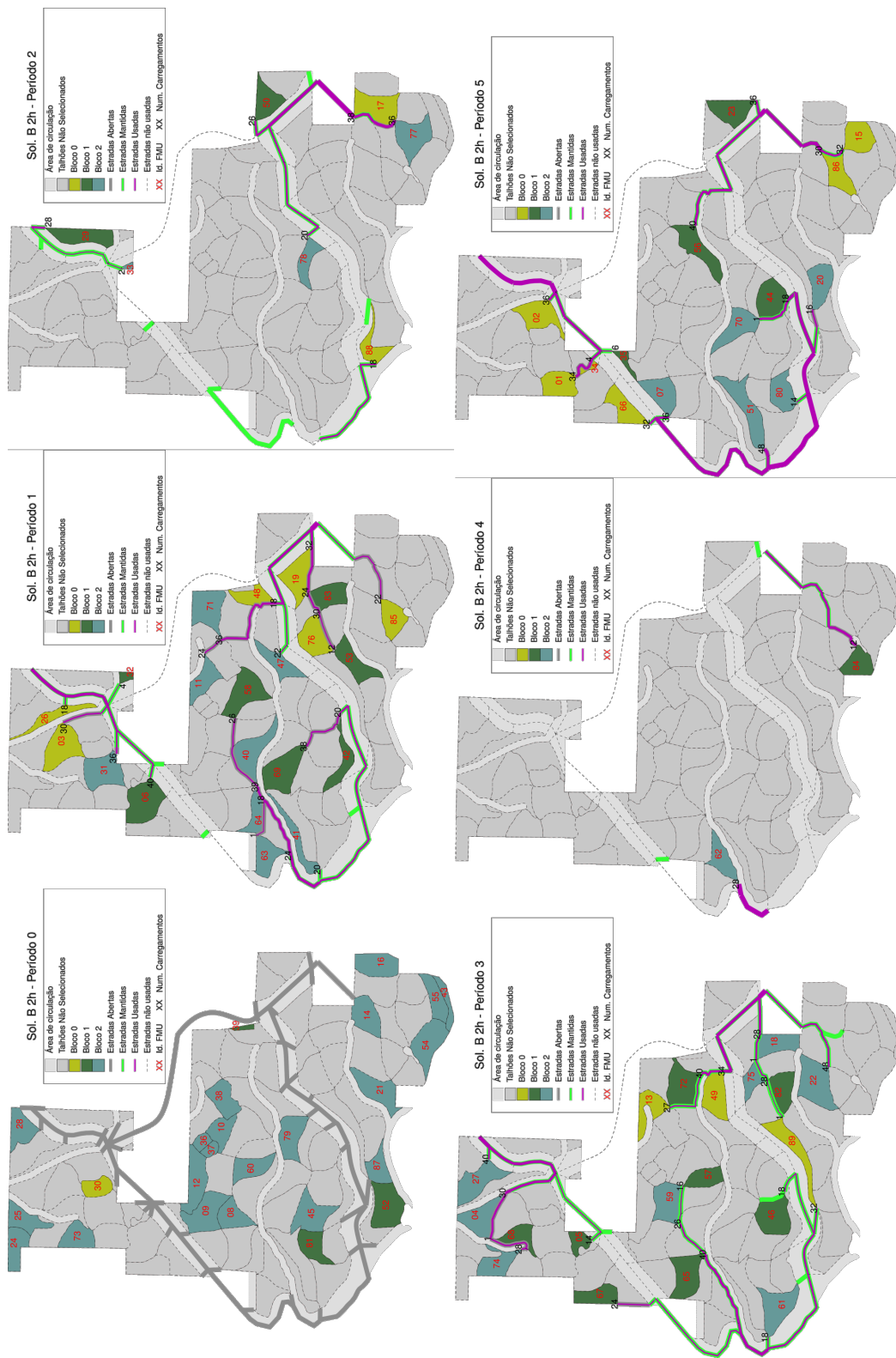
¹ Estas imagens estão disponíveis, individualizadamente e com maior resolução, em <https://docs.ufpr.br/~cegalvao/tese/imagens/>.

FIGURA 18 – IMAGEM GERADA A PARTIR DA SOLUÇÃO A



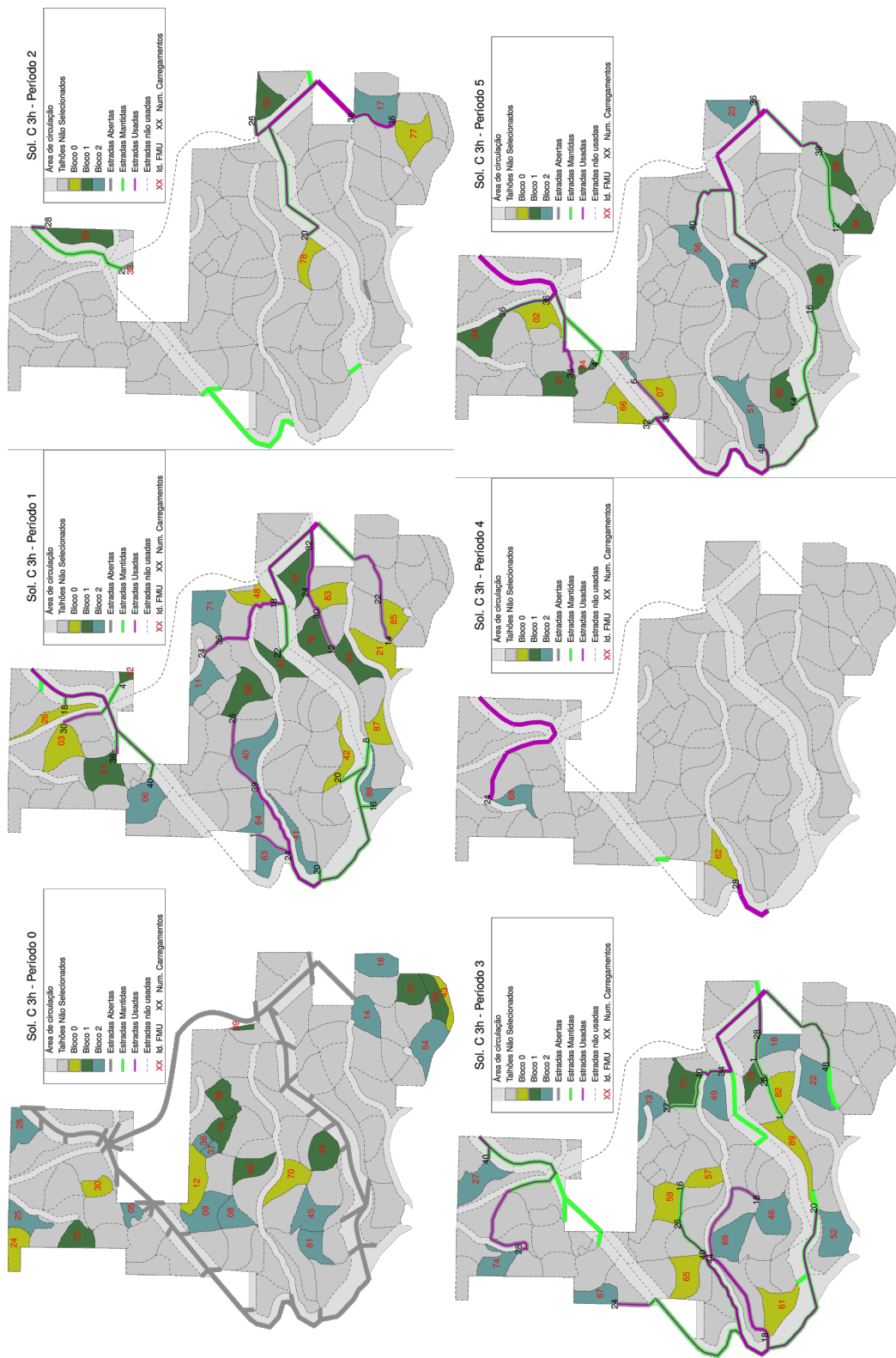
FONTE: O autor (2025).

FIGURA 19 – IMAGEM GERADA A PARTIR DA SOLUÇÃO B



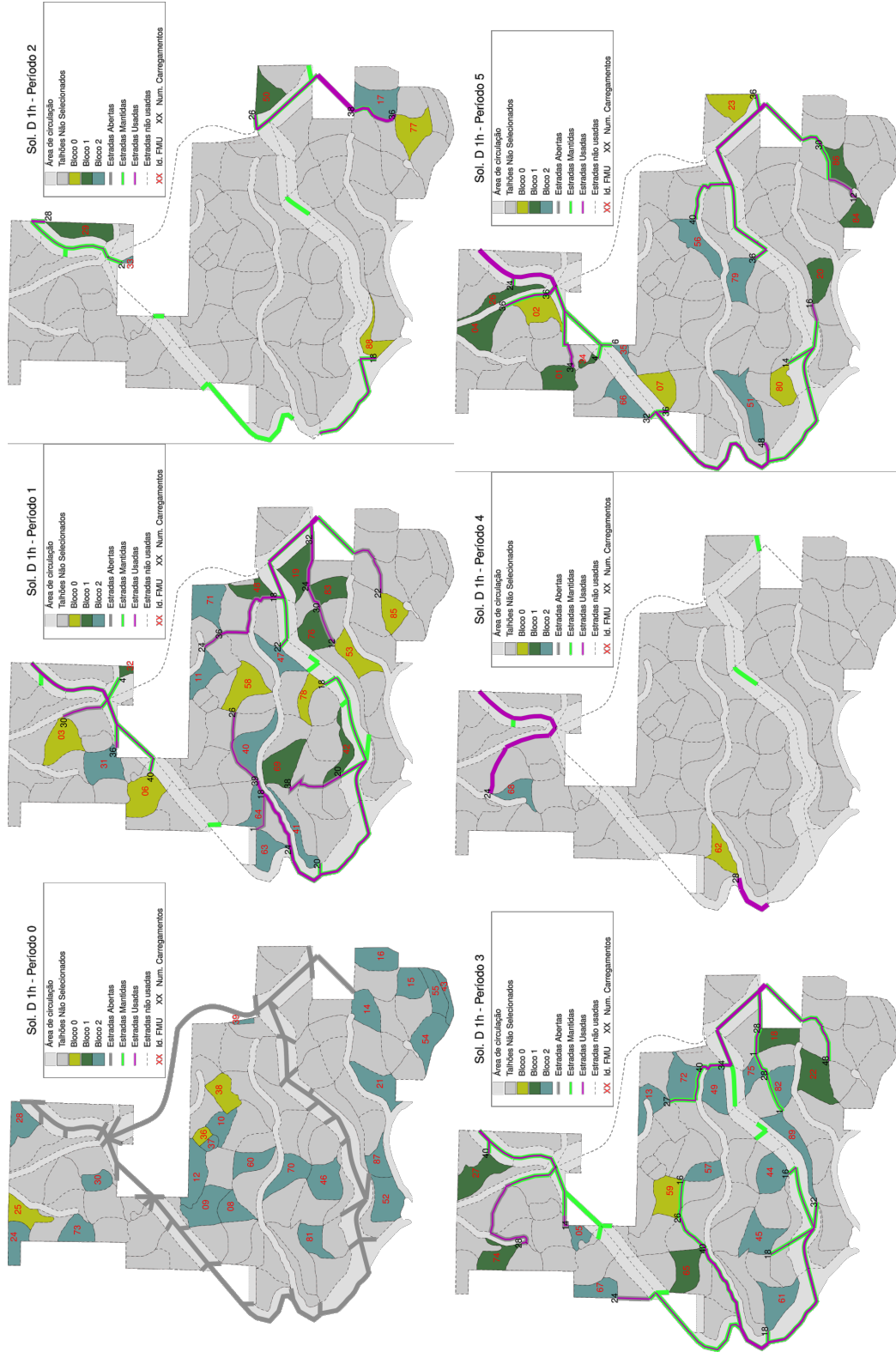
FONTE: O autor (2025).

FIGURA 20 – IMAGEM GERADA A PARTIR DA SOLUÇÃO C



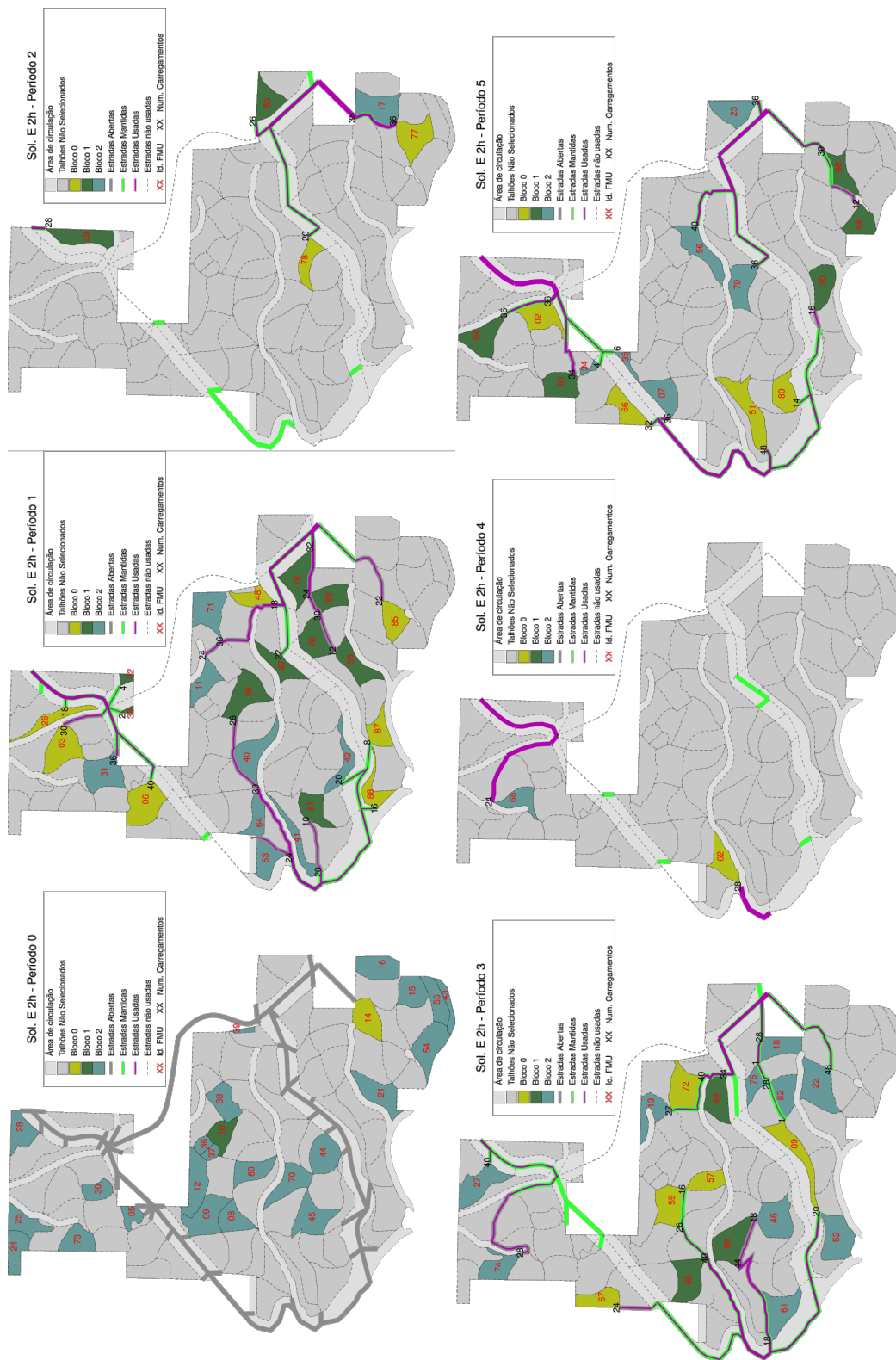
FONTE: O autor (2025).

FIGURA 21 – IMAGEM GERADA A PARTIR DA SOLUÇÃO D



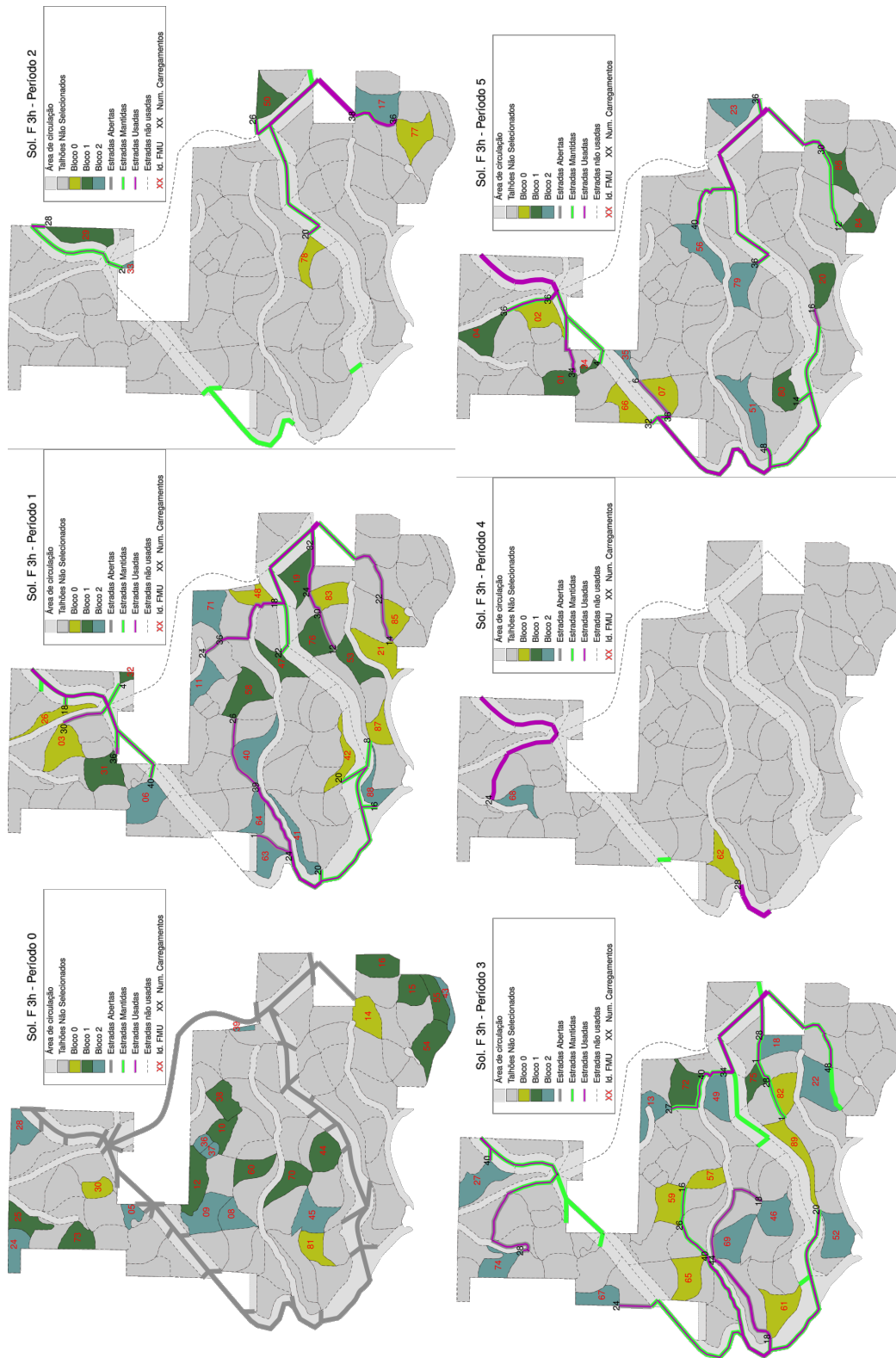
FONTE: O autor (2025).

FIGURA 22 – IMAGEM GERADA A PARTIR DA SOLUÇÃO E



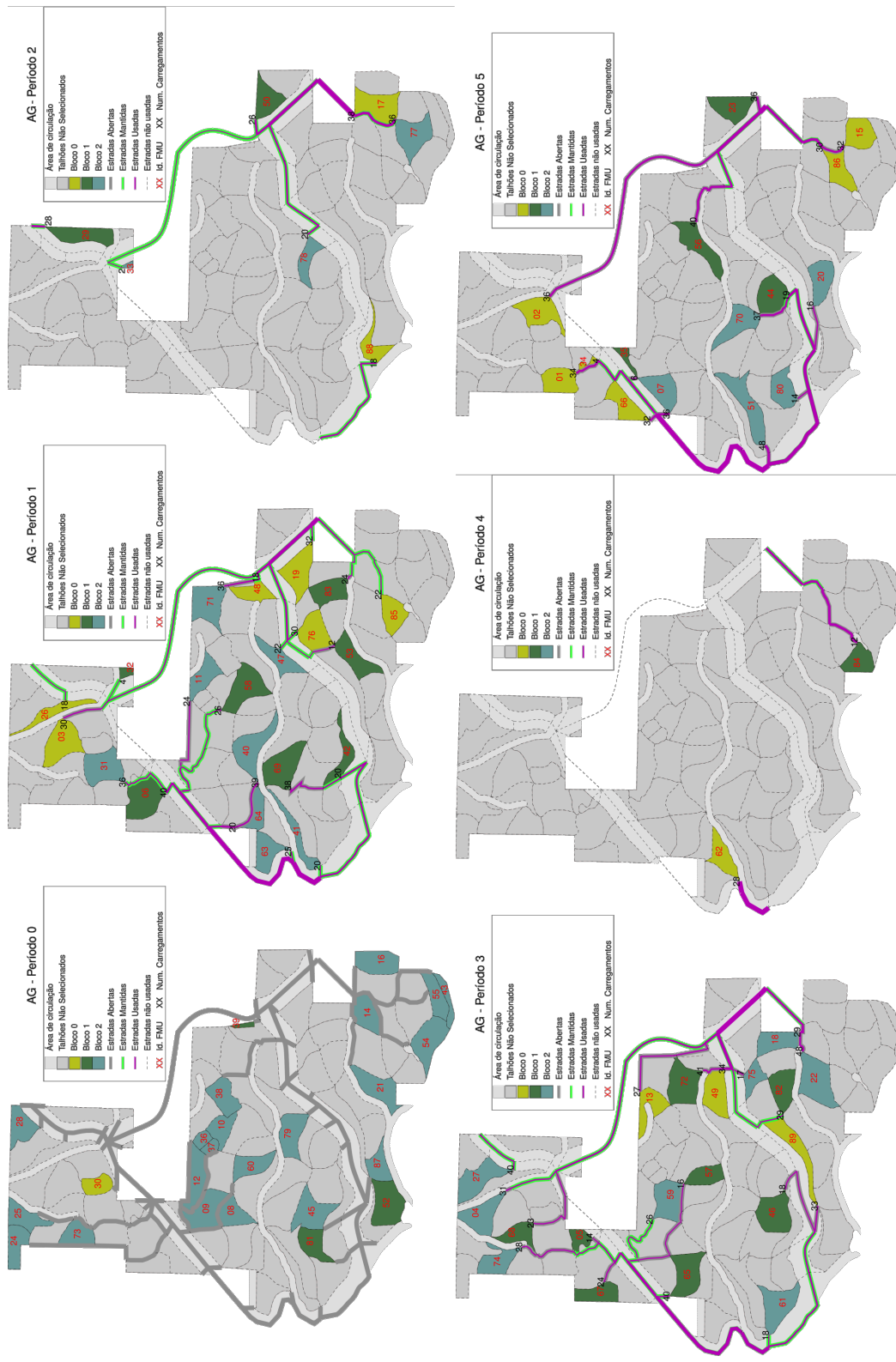
FONTE: O autor (2025).

FIGURA 23 – IMAGEM GERADA A PARTIR DA SOLUÇÃO F



FONTE: O autor (2025).

FIGURA 24 – IMAGEM GERADA A PARTIR DA SOLUÇÃO DO AG



FONTE: O autor (2025).

mesma riqueza de detalhes contida no arquivo JSON do *solver*, as informações foram suficientes para geração da respectiva imagem. A solução do AG alcançou um valor objetivo de 5,82 milhões, situando-se consideravelmente abaixo dos patamares atingidos pelo método exato. Entre as soluções do *solver*, a solução B apresentou o maior valor objetivo, superando em 12,31% o montante obtido pelo AG.

Outro ponto perceptível nas imagens são as atividades de manutenção viária realizadas em períodos de inatividade, como observado na estrada adjacente ao talhão 63 durante o primeiro período em todas as soluções, visando o transporte da produção do talhão 67 apenas no terceiro período. Uma causa provável para esse comportamento foi a estipulação de um custo de abertura cinco vezes superior ao custo de manutenção. Diante dessa disparidade, o modelo identifica como economicamente vantajoso manter a via operacional para uso futuro em vez de permitir a expiração do prazo de conservação, o que exigiria um investimento significativamente maior para sua reabertura.

Fica evidente, ao analisar as representações gráficas das soluções, tanto do *solver* quanto do AG, a baixa intensidade de colheita nos períodos pares. Tal fenômeno é consequência direta das restrições de adjacência (4.3.7 e 4.3.8), associadas à redução progressiva do valor líquido de colheita dos talhões ao longo do tempo, conforme tabulado na base de dados original. Ao se tentar deslocar a colheita de determinados talhões do primeiro para o segundo período, com o intuito de equilibrar a produção entre os intervalos, observa-se uma redução no valor ótimo final da solução. A tabela 2 apresenta os valores líquidos de colheita de uma seleção de talhões, ilustrando essa sensibilidade temporal do modelo.

TABELA 2 – EXCERTO DA TABELA DE VALOR PRESENTE LÍQUIDO DA BASE PHYLLIS LEEPER

ID	Não Colher	Período 1	Período 2	Período 3	Período 4	Período 5
1	35.476,9687	166.169,5107	119.666,1216	85.314,8986	60.345,4232	42417,1838
2	38.567,8194	153.629,2260	116.966,2418	86.885,3179	63.404,8139	45661,5584
3	45.930,8081	182.958,6064	139.296,2859	103.472,6080	75.509,4372	54378,8139
4	38.278,1217	152.475,2577	116.087,6633	86.232,6888	62.928,5559	45.318,5769
5	15.571,7279	70.075,6666	51.137,9219	36.827,4436	26.254,6352	18569,9879
6	54.383,8624	244.737,4775	178.597,8874	128.618,9071	91.693,6433	64.855,2088

FONTE: Toth (2011).

No que concerne à infraestrutura viária, a tabela 3 apresenta o quantitativo de carregamentos, aberturas e manutenções para cada período, tendo sido observados valores bastante similares entre as diferentes soluções. A coordenação detalhada dessas operações dentro de cada período, bem como o dimensionamento da frota necessária para o atendimento da demanda, excede o escopo desta pesquisa por

constituírem características intrínsecas ao planejamento operacional. Tais informações, contudo, servem de subsídio para o desenvolvimento de modelos que atuem nesse nível hierárquico de planejamento.

TABELA 3 – CARREGAMENTOS, ABERTURAS E MANUTENÇÕES DE ESTRADAS POR SOLUÇÃO

Sol.	Carregamentos por Período						Aberturas por Período						Manutenções por Período					
	0	1	2	3	4	5	0	1	2	3	4	5	0	1	2	3	4	5
A	0	536	168	536	40	420	128	20	1	7	2	5	0	28	26	44	7	33
B	0	536	168	536	40	420	128	22	1	5	2	4	0	29	26	47	7	34
C	0	536	150	532	52	416	128	20	2	11	0	3	0	28	23	50	11	40
D	0	536	148	498	52	440	128	22	1	6	0	5	0	33	21	51	13	40
E	0	534	148	532	52	416	128	21	1	8	0	5	0	30	18	46	16	39
F	0	536	150	532	52	416	128	20	1	11	0	4	0	28	23	49	11	39
AG	0	536	168	536	40	420	176	13	0	33	4	19	0	45	17	32	3	18

FONTE: O autor (2025).

Por fim, outro aspecto relevante é a ausência da clusterização esperada dos talhões nos blocos de colheita. Atribui-se esse fenômeno ao fato de o parâmetro `Par_MaxDistInBlock`, que define a distância para colheitas em blocos distintos no mesmo período, apresentar um valor elevado, equivalente a quase 80% da amplitude máxima entre os talhões do empreendimento. Verificou-se que, ao reduzir levemente esse percentual, o modelo deixa de gerar soluções factíveis. Esse comportamento reitera a premissa central de que a calibração dos parâmetros de área, demanda e distâncias é o fator preponderante na conformação da factibilidade da solução, sobrepondo-se à conveniência logística da agregação espacial.

6 CONCLUSÕES

Considerando a integração entre o agendamento de colheita dos talhões e as atividades de abertura e manutenção de estradas, o planejamento florestal configura-se como um problema de elevada complexidade, dada a expressiva quantidade de variáveis e restrições mesmo em cenários de pequena escala. A influência dos parâmetros na obtenção da solução é decisiva, estando diretamente vinculada à possibilidade de convergência para uma solução factível. Definir com precisão esses parâmetros, seja de forma empírica ou por meio de métodos heurísticos, constitui o fator essencial para determinar a viabilidade técnica e econômica do empreendimento, frente às severas restrições espaciais e operacionais impostas pelo modelo.

O esforço de modelagem do manejo florestal abrange uma pluralidade de cenários que exigem a tradução rigorosa em restrições matemáticas. O atendimento aos pontos 1 e 2, mencionados no Capítulo 4 e formalizados pelas inequações de 4.3.2 a 4.3.14, cumpre o primeiro objetivo específico desta pesquisa, sendo estas complementadas pelos parâmetros estimados via AG.

Os grupos de restrições subsequentes, de 4.3.15 a 4.3.27, visam satisfazer as demandas indicadas nos pontos 3 a 6, integrando o agendamento da colheita às operações de abertura e manutenção dos acessos viários. Com essa integração, o PLIM de agendamento da colheita é transformado no PCARP-FH, consolidando o cumprimento do segundo objetivo específico enunciado.

Formulado o PCARP-FH, tornou-se necessária a definição de parâmetros do modelo não contemplados na base de dados inicial para a posterior validação da proposta. Durante o período em que tais parâmetros eram arbitrados aleatoriamente, o modelo não atingia soluções factíveis, o que gerava incertezas quanto à modelagem e demandava um tempo considerável de pesquisa. A expectativa ao empregar o AG para a calibração desses valores era a de que, ao se obter qualquer configuração viável, ainda que não ótima, restaria comprovada a adequação do modelo ao problema, permitindo avançar para o refinamento dos parâmetros em busca de melhores resultados.

Os algoritmos evolucionários demonstraram-se eficazes na exploração do espaço de busca ao testar modificações que reduziram a contagem de restrições violadas até a convergência para a factibilidade. Uma vez estabelecida uma solução inicial pelo AG, tornou-se plausível a otimização exata sob esses valores, validando o modelo e cumprindo os demais objetivos específicos da pesquisa. Ressalta-se, portanto, a importância da integração de métodos exatos e heurísticos, que permitiram viabilizar o

PCARP-FH frente ao elevado volume de variáveis. Por fim, a própria dependência de elementos heurísticos na modelagem atua como um indicador de factibilidade, sinalizando potenciais inconsistências caso as demandas reais apresentem discrepâncias significativas em relação às indicações do AG.

Dentre as contribuições deste trabalho, ressalta-se o desenvolvimento de um algoritmo para a geração automatizada de imagens a partir dos dados numéricos da solução. Tal ferramenta contribui significativamente para a tomada de decisão, a comparação de resultados e a análise crítica das respostas obtidas. O apelo visual da coloração e espessura das vias em operação revela-se mais elucidativo do que a simples justaposição de dados tabulares. No decorrer da pesquisa, essa ferramenta mostrou-se essencial para a compreensão da trajetória do estudo, especialmente na avaliação de respostas que ainda não satisfaziam a totalidade das restrições propostas. Em cada imagem gerada, a detecção de inconsistências visuais servia como indicativo dos pontos específicos que demandavam refinamento e maior atenção. A portabilidade dessa ferramenta para outras bases de dados depende de um esforço inicial para a conversão de informações geográficas em coordenadas compatíveis com a renderização via pacote *tikz* em \LaTeX . Este software registrado, juntamente com os artigos publicados e anexados a esta tese, constituem os principais produtos científicos derivados desta pesquisa.

6.1 TRABALHOS FUTUROS

No decorrer deste texto, apresentaram-se diversas sugestões para investigações subsequentes, as quais são aqui reiteradas. Um dos tópicos primordiais para pesquisas futuras consiste na modelagem de novos arcos entre os talhões para além da malha viária preexistente. Tal expansão deve considerar fatores críticos que impactam a viabilidade, tais como limitações topográficas, declividade do terreno e o custo de oportunidade associado à redução da área efetivamente cultivável para a implantação de novas estradas.

Na sequência enunciam-se fatores que, embora tenham simplificado o processo de modelagem, representam abstrações de situações práticas que podem ser aprofundadas. A primeira questão, indicada no Capítulo 4, refere-se à disponibilidade e à homogeneidade da frota. Nesse tópico, sugere-se investigar a aplicação de restrições de capacidade e diversidade de veículos ao modelo, incorporando quantidades predefinidas e distintas configurações de transporte, cada qual associada ao seu respectivo custo operacional.

Outra possibilidade de continuidade decorre do fato de esta pesquisa considerar que um veículo, ao atender um talhão, não completará sua carga com material de outra unidade, ainda que disponha de espaço ocioso e que o volume adicional esteja no

trajeto obrigatório. Sugere-se avaliar a viabilidade econômica de se designar veículos específicos para a coleta de volumes remanescentes nos pontos de carga, os quais não totalizaram uma carga completa, configurando um novo problema de otimização logística de coleta.

No que tange aos custos de transporte, a presente pesquisa assume que o ciclo de cada carga, do ponto de origem ao sumidouro, é realizado por um veículo que parte vazio do próprio sumidouro em direção ao local de carregamento. Conforme sinalizado no Capítulo 4, uma vertente para investigações futuras consiste na contabilização do deslocamento em vazio partindo de localizações distintas, o que permitiria uma modelagem mais fiel à logística de roteirização real.

Adicionalmente, os custos de carga e descarga foram considerados homogêneos em todos os pontos do empreendimento. Estudos posteriores podem explorar cenários de frotas heterogêneas, nos quais o custo de operação seja proporcional ao volume colhido ou apresente variações específicas conforme a localização. Tal refinamento permitiria identificar pontos de carga economicamente mais vantajosos, agregando uma nova camada de otimização ao planejamento logístico.

No que diz respeito à infraestrutura viária, a presente pesquisa não incorpora restrições físicas nos trechos, a exemplo de pontes com limitações de carga. Investigações futuras poderiam avaliar se restrições de tráfego em segmentos específicos seriam contornadas pela definição de novos trajetos ou se intervenções estruturais para a eliminação desses limitantes seriam financeiramente mais vantajosas.

Outro recurso aqui tratado como virtualmente ilimitado é a disponibilidade de equipes de abertura e manutenção de estradas. Nesse sentido, sugere-se o estudo de modelos de otimização de pessoal e cronograma de trabalho para essas frentes. Adicionalmente, embora constitua uma atividade de nível operacional, o agendamento e a organização das equipes de colheita podem ser integrados ao modelo para a busca de uma produtividade otimizada.

Uma característica relevante das soluções obtidas é a baixa intensidade de colheita nos períodos pares, fenômeno decorrente da proibição de intervenções em talhões adjacentes em períodos consecutivos. Como perspectiva para investigações futuras, sugere-se avaliar cenários em que essa restrição seja flexibilizada, especialmente em contextos de espécies de rápido crescimento ou onde as condições edafoclimáticas do empreendimento favoreçam a recuperação ambiental em prazos inferiores a um período do HP.

A acentuada disparidade dos volumes colhidos entre os períodos pares e ímpares sinaliza, ainda, a oportunidade de pesquisas voltadas à minimização da variação volumétrica entre períodos. Tal abordagem permitiria avaliar o impacto dessa

regularização na viabilidade financeira do projeto, determinando se a busca por um fluxo de caixa mais estável comprometeria o valor ótimo final a ponto de tornar essa estratégia desfavorável frente aos objetivos econômicos originais.

A presente pesquisa valeu-se de uma implementação da versão original do AG, deixando como tema para continuidade o emprego de versões otimizadas desse algoritmo ou, alternativamente, o uso de outros métodos, sejam meta-heurísticos ou hiper-heurísticos, permitindo a combinação e a comparação de diferentes propostas para a resolução do problema. No que concerne ao AG, a população inicial foi composta por soluções geradas via algoritmos gulosos. Para investigações futuras sobre a aplicação de heurísticas, sugere-se analisar o impacto no desempenho ao partir de populações iniciais distintas.

Adicionalmente, pode-se avaliar a aplicabilidade do método heurístico na determinação de outros parâmetros, como a tolerância λ da demanda e os custos de abertura, manutenção, carregamento e deslocamentos, que foram arbitrados nesta pesquisa. Uma análise de sensibilidade do modelo poderá sugerir os intervalos de valores para esses custos que asseguram a viabilidade financeira do empreendimento, permitindo uma tomada de decisão mais robusta frente às oscilações de mercado.

Conclui-se, portanto, que a presente tese consolida o PCARP-FH como um avanço significativo na fronteira entre a pesquisa operacional e o manejo florestal, contribuindo com o estudo da integração do agendamento da colheita com a logística de transporte. A arquitetura híbrida desenvolvida não apenas resolve a complexidade matemática imposta pelo volume de variáveis, mas também oferece, por meio da visualização automatizada, uma ponte entre a abstração do *solver* e a realidade da tomada de decisão em campo. Ao integrar o planejamento tático ao controle rigoroso da infraestrutura viária, este trabalho entrega uma metodologia robusta que assegura a viabilidade técnica e a otimização econômica dos empreendimentos, estabelecendo um novo padrão para o desenvolvimento de sistemas de suporte à decisão que sejam, simultaneamente, matematicamente precisos e operacionalmente aplicáveis.

REFERÊNCIAS

AGUIAR, M. O.; SILVA, G. F. d.; MAURI, G. R.; MENDONCA, A. R. d.; SANTANA, C. J. d. O.; MARCATTI, G. E.; SILVA, M. L. M. d.; SILVA, E. F. d.; FIGUEIREDO, E. O.; SILVA, J. P. M.; SILVA, R. F.; SANTOS, J. S.; LAVAGNOLI, G. L.; LEITE, C. C. C. Optimizing forest road planning in a sustainable forest management area in the Brazilian Amazon. **Journal of Environmental Management**, v. 288, 2021. ISSN 03014797. DOI: [10.1016/j.jenvman.2021.112332](https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2021.112332). Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0301479721003947>. Citado 5 vezes nas páginas 19, 31, 36, 37.

ASSAD, A. A.; GOLDEN, B. L. Chapter 5 - Arc routing methods and applications. In: **NETWORK Routing**. Amsterdam: Elsevier, 1995. v. 8. (Handbooks in Operations Research and Management Science). P. 375–483. DOI: [10.1016/S0927-0507\(05\)80109-4](https://doi.org/10.1016/S0927-0507(05)80109-4). Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0927050705801094>. Citado 1 vez na página 25.

BANHARA, J. R. **Agendamento otimizado das atividades de colheita de madeira em plantios de eucaliptos sob restrições operacionais, espaciais e de risco climático**. Jun. 2009. Diss. (Mestrado) – USP - Escola Superior de Agricultura Luiz de Queiroz, Piracicaba, SP. DOI: [10.11606/D.11.2009.tde-05082009-074058](https://doi.org/10.11606/D.11.2009.tde-05082009-074058). Disponível em: <https://teses.usp.br/teses/disponiveis/11/11150/tde-05082009-074058/pt-br.php>. Citado 6 vezes nas páginas 17, 22, 23.

BATEMAN, T. S.; SNELL, S. A. **Administração**. 2. ed. Porto Alegre: AMGH, 2012. ISBN 0078137233. Citado 2 vezes nas páginas 15, 22.

BATISTA, G. V.; SCARPIN, C. T.; PÉCORA, J. E.; RUIZ, A. A New Ant Colony Optimization Algorithm to Solve the Periodic Capacitated Arc Routing Problem with Continuous Moves. **Mathematical Problems in Engineering**, Hindawi, v. 2019, p. 3201656, jul. 2019. ISSN 1024-123X. DOI: [10.1155/2019/3201656](https://doi.org/10.1155/2019/3201656). Disponível em: <https://doi.org/10.1155/2019/3201656>. Citado 3 vez na página 18.

BELLAVENUTTE, P.; CHUNG, W.; DIAZ-BALTEIRO, L. Partitioning and solving large-scale tactical harvest scheduling problems for industrial plantation forests. **Canadian Journal of Forest Research**, Canadian Science Publishing, v. 50, n. 8, p. 811–818, 8 ago. 2020. ISSN 12086037. DOI: [10.1139/cjfr-2019-0425](https://doi.org/10.1139/cjfr-2019-0425). Disponível

em: <https://cdnsiencepub.com/doi/10.1139/cjfr-2019-0425>. Citado 5 vezes nas páginas 19, 29, 36, 37.

BRASIL. **Decreto nº5.975 de 30 de novembro de 2006**. 230. ed. Brasília: [s. n.], 2006. Disponível em: <http://twixar.me/Bskm>. Citado 1 vez na página 17.

BRASIL. **Lei de Gestão de Florestas Públicas. Lei nº11.284 de 02 de março de 2006**. 43. ed. Brasília: [s. n.], 2006. Disponível em: <http://twixar.me/Rskm>. Citado 1 vez na página 17.

CHIAVENATO, I. **Administração para não administradores: a gestão de negócios ao alcance de todos**. 2. ed. Barueri, SP: Manole, 2011. ISBN 978-85-204-4176-3. Citado 2 vezes nas páginas 15, 16, 22.

CONSTANTINO, M. F.; MESQUITA, M.; MARQUES, S.; TÓTH, S. F.; BORGES, J. G. Road network, landing location, and routing optimization for forest smallholders landscapes. **International Transactions in Operational Research**, v. 32, n. 2, p. 888–917, 2025. DOI: [10.1111/itor.13485](https://doi.org/10.1111/itor.13485). Disponível em: <http://twixar.me/jskm>. Citado 5 vezes nas páginas 19, 34, 35, 37.

CORREA, R. N.; SCARPIN, C. T.; FERRARI, L. S.; ARCE, J. E. Application of relax-and-fix heuristic in the aggregation of stands for tactical forest scheduling. **Forest Policy and Economics**, Elsevier, v. 119, p. 102284, 2020. ISSN 1389-9341. DOI: [10.1016/j.forpol.2020.102284](https://doi.org/10.1016/j.forpol.2020.102284). Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1389934120302136>. Citado 1 vez na página 18.

D'ARACE, L. M. B.; SILVA, L. D.; GOMES, J. M.; COSTA, N. S. L.; CASSEB, B. d. S.; SANTOS, M. L. d.; ROCHA, E. S. d.; MACIEL, M. d. N. M.; FREITAS, L. J. M. d. O manejo florestal como estratégia para mitigar os impactos da exploração florestal. **Revista Ibero Americana de Ciências Ambientais**, v. 10, n. 6, p. 32–42, 2019. DOI: [10.6008/CBPC2179-6858.2019.006.0004](https://doi.org/10.6008/CBPC2179-6858.2019.006.0004). Disponível em: <https://sustenere.inf.br/index.php/rica/article/view/CBPC2179-6858.2019.006.0004>. Citado 1 vez na página 17.

FLOYD, R. W. Algorithm 97: Shortest path. **Commun. ACM**, Association for Computing Machinery, New York, NY, USA, v. 5, n. 6, p. 345, jun. 1962. ISSN 0001-0782. DOI: [10.1145/367766.368168](https://doi.org/10.1145/367766.368168). Disponível em: <https://doi.org/10.1145/367766.368168>. Citado 2 vezes nas páginas 25, 26.

GOOGLE. **Localização do empreendimento florestal Phyllis Leeper no Google Maps**. [S. l.: s. n.], 2025. Disponível em: <https://maps.app.goo.gl/HAttrU5NwVexm3X9K9>. Citado 1 vez na página 60.

GUROBI OPTIMIZATION. **Solution file formats**. en. [S. l.: s. n.], 2025. Disponível em: <https://docs.gurobi.com/projects/optimizer/en/current/reference/fileformats/solutionformats.html>. Citado 1 vez na página 63.

HELO, P.; ROUZAFZON, J. An agent-based simulation and logistics optimization model for managing uncertain demand in forest supply chains. **Supply Chain Analytics**, v. 4, p. 100042, 2023. ISSN 2949-8635. DOI: [10.1016/j.sca.2023.100042](https://doi.org/10.1016/j.sca.2023.100042). Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S2949863523000419>. Citado 4 vezes nas páginas 19, 34, 36, 37.

HOSAKA, K.; KONOSHIMA, M.; UEMURA, R.; ARUGA, K. Optimizing Aggregation of Small Forest Stands for Thinning Operations: A Case Study in Nasushiobara, Tochigi Prefecture, Japan. **Small-scale Forestry**, Springer Science e Business Media LLC, v. 21, n. 3, p. 369–392, 3 fev. 2022. ISSN 1873-7854. DOI: [10.1007/s11842-022-09502-2](https://doi.org/10.1007/s11842-022-09502-2). Disponível em: <http://link.springer.com/article/10.1007/s11842-022-09502-2>. Citado 5 vezes nas páginas 19, 32, 33, 36, 37.

IBÁ. **Relatório Anual 2025**. [S. l.], 2025. Disponível em: <https://iba.org/publicacoes/relatorios-anuais/>. Citado 2 vezes nas páginas 15, 21.

IBGE. **Áreas Territoriais - O que é**. Rio de Janeiro: [s. n.], 2020. Disponível em: <http://twixar.me/8skm>. Citado 1 vez na página 15.

KANEKO, S.; KIM, H. B.; YOSHIOKA, T. Method of designing forest road construction scenario with GIS-based calibration using sustainable forestry model. English. **Results in Engineering**, v. 24, 2024. ISSN 25901230. DOI: [10.1016/j.rineng.2024.103078](https://doi.org/10.1016/j.rineng.2024.103078). Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S2590123024013331>. Citado 5 vezes nas páginas 19, 34, 36, 37.

KITCHENHAM, B. Procedures for performing systematic reviews. **Keele, UK, Keele University**, v. 33, 2004. Citado 1 vez na página 27.

LIU, J.; TANG, K.; YAO, X. Robust optimization in uncertain capacitated arc routing problems: Progresses and perspectives. **IEEE Computational Intelligence Magazine**,

IEEE, v. 16, n. 1, p. 63–82, 2021. DOI: [10.1109/MCI.2020.3039069](https://doi.org/10.1109/MCI.2020.3039069). Disponível em: <https://ieeexplore.ieee.org/stamp/stamp.jsp?tp=&arnumber=9321764>. Citado 1 vez na página 25.

MAPA/SFB. **Florestas do Brasil em resumo: 2019**. Brasília: [s. n.], 2019. ISBN 978-85-7991-128-6. Citado 1 vez na página 15.

MARTELL, D. L.; GUNN, E. A.; WEINTRAUB, A. Forest management challenges for operational researchers. **European Journal of Operational Research**, v. 104, n. 1, p. 1–17, 1998. ISSN 0377-2217. DOI: [10.1016/S0377-2217\(97\)00329-9](https://doi.org/10.1016/S0377-2217(97)00329-9). Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0377221797003299>. Citado 1 vez na página 16.

MESQUITA, M.; MARQUES, S.; MARQUES, M.; MARTO, M.; CONSTANTINO, M.; BORGES, J. G. An optimization approach to design forest road networks and plan timber transportation. **Operational Research**, Springer Science e Business Media LLC, v. 22, n. 3, p. 2973–3001, 3 abr. 2021. ISSN 1866-1505. DOI: [10.1007/s12351-021-00640-7](https://doi.org/10.1007/s12351-021-00640-7). Disponível em: <http://link.springer.com/article/10.1007/s12351-021-00640-7>. Citado 5 vezes nas páginas 19, 31, 36, 37.

NADERIALIZADEH, N.; CROWE, K.; PULKKI, R. On the importance of integrating transportation costs into tactical forest harvest scheduling model. **Croatian Journal of Forest Engineering**, v. 41, n. 2, 2020. DOI: [10.5552/crojfe.2020.624](https://doi.org/10.5552/crojfe.2020.624). Disponível em: <http://twixar.me/cxkm>. Citado 4 vezes nas páginas 19, 30, 37.

NADERIALIZADEH, N.; CROWE, K.; ROUHAFZA, M. Solving the integrated forest harvest scheduling model using metaheuristic algorithms. **Operational Research**, Springer Science e Business Media LLC, v. 22, n. 3, p. 2437–2463, 3 nov. 2022. ISSN 1866-1505. DOI: [10.1007/s12351-020-00612-3](https://doi.org/10.1007/s12351-020-00612-3). Disponível em: <https://link.springer.com/article/10.1007/s12351-020-00612-3>. Citado 7 vezes nas páginas 19, 33, 36–38.

NADERIALIZADEH, N.; CROWE, K. A. Formulating the integrated forest harvest-scheduling model to reduce the cost of the road-networks. **Operational Research**, v. 20, 4 2020. DOI: [10.1007/s12351-018-0410-5](https://doi.org/10.1007/s12351-018-0410-5). Disponível em: <http://link.springer.com/article/10.1007/s12351-018-0410-5>. Citado 4 vezes nas páginas 19, 30, 37.

REEVES, C. R. Genetic Algorithms. In: **Handbook of Metaheuristics**. Edição: Michel Gendreau e Jean-Yves Potvin. Boston, MA: Springer US, 2010. P. 109–139. ISBN 978-1-4419-1665-5. DOI: [10.1007/978-1-4419-1665-5_5](https://doi.org/10.1007/978-1-4419-1665-5_5). Disponível em: https://doi.org/10.1007/978-1-4419-1665-5_5. Citado 1 vez na página 54.

ROSA, C. E. G.; LOCH, G. V.; SCARPIN, C. T. Genetic Algorithm For Parameter Definition in Forest Harvest Optimization. **Revista de Gestão Social e Ambiental**, v. 19, n. 4, e011964, abr. 2025. DOI: [10.24857/rgsa.v19n4-072](https://doi.org/10.24857/rgsa.v19n4-072). Disponível em: <https://rgsa.openaccesspublications.org/rgsa/article/view/11964>. Citado 4 vezes nas páginas 54–56.

SILVA, E. F. da; SILVA, G. F. da; FIGUEIREDO, E. O.; MENDONÇA, A. R. de; OLIVEIRA SANTANA, C. J. de; FIEDLER, N. C.; SILVA, J. P. M.; AGUIAR, M. O.; SANTOS, J. S. Optimized forest planning: allocation of log storage yards in the Amazonian sustainable forest management area. **Forest Ecology and Management**, Elsevier BV, v. 472, p. 118231, set. 2020. ISSN 0378-1127. DOI: [10.1016/j.foreco.2020.118231](https://doi.org/10.1016/j.foreco.2020.118231). Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0378112720310008>. Citado 7 vezes nas páginas 19, 29–31, 35–37.

TOTH, S. **Base Phyllis Leeper de dados florestais**. [S. l.], 2011. Disponível em: <http://ifmlab.for.unb.ca/fmos/datasets/PhyllisLeeper/>. Citado 2 vezes nas páginas 60, 73.

TSIOTAS, D.; KANTARTZIS, A.; KOLKOS, G.; LEMONAKIS, P.; ARABATZIS, G. A modularity total environment network model for sustainable forest transportation. **Euro-Mediterranean Journal for Environmental Integration**, Springer Science e Business Media LLC, v. 8, n. 4, p. 1057–1073, 4 set. 2023. ISSN 2365-7448. DOI: [10.1007/s41207-023-00410-1](https://doi.org/10.1007/s41207-023-00410-1). Disponível em: <http://link.springer.com/article/10.1007/s41207-023-00410-1>. Citado 6 vezes nas páginas 19, 33, 36, 37.

WANG, S.; MEI, Y.; ZHANG, M.; YAO, X. Genetic Programming With Niching for Uncertain Capacitated Arc Routing Problem. eng. **IEEE transactions on evolutionary computation**, IEEE, v. 26, n. 1, p. 73–87, 2022. ISSN 1089-778X. DOI: [10.1109/TEVC.2021.3095261](https://doi.org/10.1109/TEVC.2021.3095261). Disponível em: <https://ieeexplore.ieee.org/document/9475970>. Citado 1 vez na página 25.

WARSHALL, S. A Theorem on Boolean Matrices. **J. ACM**, Association for Computing Machinery, New York, NY, USA, v. 9, n. 1, p. 11–12, jan. 1962. ISSN 0004-5411. DOI: [10.1145/321105.321107](https://doi.org/10.1145/321105.321107). Disponível em: <https://doi.org/10.1145/321105.321107>. Citado 1 vez na página 25.

YEMSHANOV, D.; HAIGHT, R. G.; LIU, N.; REMPEL, R.; KOCH, F. H.; RODGERS, A. Exploring the tradeoffs among forest planning, roads and wildlife corridors: a new approach. **Optimization Letters**, Springer Science e Business Media LLC, v. 16, n. 3, p. 747–788, 3 jun. 2021. ISSN 1862-4480. DOI: [10.1007/s11590-021-01745-w](https://doi.org/10.1007/s11590-021-01745-w). Disponível em: <http://link.springer.com/article/10.1007/s11590-021-01745-w>. Citado 3 vezes nas páginas 19, 32, 37.

YILDIRIM, F.; KADI, F. Production of optimum forest roads and comparison of these routes with current forest roads: a case study in Maçka, Turkey. **Geocarto International**, v. 37, n. 8, p. 2175–2197, 2020. DOI: [10.1080/10106049.2020.1818852](https://doi.org/10.1080/10106049.2020.1818852). Disponível em: <http://twixar.me/tskm>. Citado 5 vezes nas páginas 19, 31, 36, 37.

APÊNDICE 1 – RESUMO EXPANDIDO PUBLICADO DA MODELAGEM DO PLIM

Resumos Expandidos

Modelo Integrado para Colheita Florestal e Planejamento Viário

Integrated Model for Forest Harvesting and Road Planning

Carlos Eurico Galvão Rosa¹, Gustavo Valentim Loch², Cassius Tadeu Scarpin²

¹ Mestre em Matemática. Professor Assistente da Universidade Federal do Paraná - Campus Jandaia do Sul

² Doutor em Métodos Numéricos em Engenharia. Professor do Departamento de Administração Geral e Aplicada da Universidade Federal do Paraná

✉ cegalvao@ufpr.br, gustavo.valentim@ufpr.br, cassiusts@ufpr.br

Palavras-chave:

Modelo matemático;
Colheita florestal;
Rede viária.

Resumo

A correta modelagem de problemas florestais é crucial para a obtenção de soluções aplicáveis. O presente trabalho, parte de uma pesquisa mais ampla em otimização de colheita florestal, apresenta o processo de criação de um modelo integrado para colheita florestal e planejamento viário, utilizando Programação Linear Inteira Mista. O estudo foca na integração do agendamento e sequenciamento da colheita com a construção e manutenção de estradas de acesso. O objetivo central é aprimorar a eficiência da colheita florestal, visando a maximização do lucro, o cumprimento da demanda periódica e o respeito às restrições ambientais. Para isso, o modelo aborda a formação de blocos de colheita, a logística de viagens necessárias para cada talhão e a gestão da infraestrutura viária, incluindo os custos de abertura e manutenção das estradas. As restrições detalham o planejamento da colheita, a utilização da rede de estradas e o fluxo de veículos, culminando em uma função objetivo que busca a otimização desses processos. É enfatizado que a aplicabilidade das soluções matemáticas depende da acurácia da modelagem e da disponibilidade de dados de campo para garantir a viabilidade do modelo.

Keywords:

Mathematical model;
Forest harvesting;
Road network.

Abstract

The correct modeling of forestry problems is crucial for obtaining applicable solutions. This work, part of a broader research in forest harvest optimization, presents the process of creating an integrated model for forest harvesting and road planning using Mixed Integer Linear Programming. The study focuses on integrating harvest scheduling and sequencing with the construction and maintenance of access roads. The main objective is to improve forest harvesting efficiency, aiming to maximize profit, meet periodic demand, and comply with environmental constraints. To this end, the model addresses the formation of harvest blocks, the logistics of trips required for each plot, and the management of road infrastructure, including the costs of opening and maintaining roads. The constraints detail harvest planning, the use of the road network, and vehicle flow, culminating in an objective function that seeks to optimize these processes. It is emphasized that the applicability of mathematical solutions depends on the accuracy of modeling and the availability of field data to ensure the model's feasibility.

1 INTRODUÇÃO

O Brasil, com quase 60% do território coberto por florestas, tem um setor florestal significativo com contribuição substancial ao PIB e geração de empregos. Contudo, a produção enfrenta desafios de planejamento, em especial para atendimento da legislação do tema e restrições intrínsecas ao contexto florestal. O presente artigo é um recorte de uma tese acadêmica que propõe um modelo de Programação Linear Inteira Mista (PLIM) para otimizar o agendamento da colheita, as operações de abertura e manutenção das estradas de acesso. O objetivo geral da pesquisa da tese é aprimorar a colheita florestal, considerando as restrições de roteamento e transporte. Neste artigo, é apresentado o processo de construção do modelo PLIM integrado, com as considerações feitas para cada restrição elaborada.

2 DESCRIÇÃO DO PROBLEMA

Planejar, conforme Chiavenato (2021), é definir o que fazer e como fazer, traçar o destino e o caminho para lá chegar com correto uso dos recursos disponíveis. São produzidas estratégias tendo em vista os objetivos traçados e os meios de alcançá-los. Desde o século XIX, como indicado por Martell et al. (1998), o planejamento estratégico é fundamental na gestão florestal, evoluindo da maximização do volume de colheita para um modelo sustentável em um contexto de aumento tanto de demandas quanto de restrições como a escassez de áreas e a pressão de diversos grupos. A Pesquisa Operacional (PO) é crucial para auxiliar os planejadores a otimizar soluções e conciliar restrições.

O processo da colheita florestal consiste em agendar a colheita dos talhões, considerando a maximização do lucro, atendimento da demanda periódica e de restrições ambientais. Um de seus aspectos é a construção de estradas para deslocamento das equipes do corte e retirada do volume colhido. Na análise feita por D'Arace et al (2019), problemas de construção das rotas foram indicados como causa do aumento da probabilidade de perdas na colheita. Para a análise da abertura e manutenção de estradas optou-se, nesta pesquisa, pela abordagem do Problema de Roteamento em Arcos Capacitados (CARP). O conjunto de estradas forma um grafo, cujas arestas representam as possíveis estradas entre os talhões, com demanda de abertura e manutenção prévia antes do uso. A mesma abordagem é utilizada em situações semelhantes, como limpeza de neve em ruas e manutenção de estradas de ferro, como mencionado por Batista et al (2019). O modelo aqui apresentado se baseia no modelo de agendamento de colheita florestal proposto por Correa et al (2019) e no de roteamento apresentado por Batista et al (2019).

2.1 Análise do problema

Nesta análise são detalhadas as características do problema que conduzem à modelagem obtida. O objetivo principal é fazer a colheita dos talhões e transportar a carga para um local do empreendimento como um sumidouro não necessariamente único, visando atender à demanda de cada período, seguindo restrições de distância e maximizando o lucro. São levantados os seguintes aspectos numerados abaixo:

1) Em cada período deverão ser colhidos talhões para atender à demanda, proibindo a repetição de um talhão em mais de um período do Horizonte de Planejamento (HP). A idade do talhão deve ser considerada para a colheita, evitando talhões abaixo de uma idade mínima. O atendimento à demanda leva em conta um parâmetro de tolerância.

2) Serão formados blocos de colheitas com as restrições abaixo:

- a) Não serão colhidos talhões adjacentes nem no mesmo período ou em períodos consecutivos;
- b) Talhões em um raio de distância Δ_b podem ser colhidos no mesmo período e bloco de colheita, desde que não sejam adjacentes;

- c) Talhões em um raio de distância Δ_a podem ser colhidos no mesmo período e blocos distintos, desde que não sejam adjacentes;
 - d) Talhões dentro de um raio de distância Δ_c podem ser colhidos em períodos consecutivos, desde que não sejam adjacentes.
- 3) Cada talhão demanda uma quantidade de viagens para atendimento, sendo necessárias estradas que conectam os pontos de carregamento ao sumidouro para estas viagens.
- 4) Estradas utilizadas em um período específico precisam apenas de manutenção para serem utilizados em um certo intervalo de tempo, necessitando de uma reabertura para falta de uso além deste intervalo
- 5) Para cada talhão é selecionado um ponto do grafo para carregamento. Com isso, cada ponto do grafo terá:
- a) Um volume colhido em algum dos talhões a ele conectados, que será carregado neste local;
 - b) Um volume carregado em outros pontos, mas que foi transportado por estradas que passam naquele ponto;
 - c) Não sendo sumidouro, todo volume do ponto do grafo precisa ser movido para outro ponto no mesmo período.

2.2 Modelagem do problema

Seguindo os aspectos acima elencados, são elaboradas as restrições do modelo. O primeiro ponto, relacionado à colheita e demanda, indica a necessidade de uma variável ligada à colheita de um talhão t , no período p e bloco b . Assim, sendo F o conjunto de talhões, P o conjunto de períodos do HP e B o conjunto de blocos de colheita, pode-se definir a variável binária x_{tpb} sendo 1 caso o talhão $t \in F$ seja colhido em $p \in HP$ e $b \in B$, e 0 caso contrário. São necessários ψ_{tsp} que indica o volume do sortimento $s \in S$ colhido no talhão t no período p ; v_{tsp} o valor líquido do volume ψ_{tsp} e η_t a idade mínima de colheita do talhão t , sendo n_t a idade do talhão no início do HP.

Para algumas situações é interessante considerar um período inicial denotado como $p = 0$ referente a ações anteriores à colheita efetiva, como indicação de estradas pré-existentes, ou indicar talhões que não são colhidos em nenhum período próprio de colheita do HP. Para diferenciar, denota-se HP^* o conjunto de períodos excluindo-se o $p = 0$. Definida uma demanda d_{sp} para todo $p \in HP^*$, são estabelecidas as seguintes restrições:

$$\sum_p \sum_b x_{tpb} \leq 1, \forall t \in F \quad (1)$$

$$\sum_p \sum_b \psi_{tsp} x_{tpb} \geq (1 - \lambda) d_{sp}, \forall s \in S, \forall p \in HP^* \quad (2)$$

$$\sum_p \sum_b \psi_{tsp} x_{tpb} \leq (1 + \lambda) d_{sp}, \forall s \in S, \forall p \in HP^* \quad (3)$$

$$(n_t + p - 1) \sum_b x_{tpb} \geq \eta_t \sum_b x_{tpb}, \forall t \in F, \forall p \in HP^* \quad (4)$$

Em relação ao segundo ponto, é preciso conhecer um conjunto F_{adj} de pares de talhões adjacentes e os valores δ_{tr} das distâncias entre os talhões t e r distintos. Para indicação da formação dos blocos, é proposta uma variável binária β_{bp} , indicando se o bloco $b \in B$ foi aberto no período $p \in HP^*$. É obrigatório que um bloco inicial de colheita seja aberto por período.

$$\beta_{0p} = 1 \quad (5)$$

Tendo um bloco aberto, devem ser selecionados os talhões que o comporão, de acordo com as distâncias entre talhões. Inicialmente são modeladas as proibições de colheitas nos talhões adjacentes, seja no mesmo período ou em períodos consecutivos

$$\sum_b x_{tpb} + \sum_b x_{rpb} \leq 1, \forall p \in HP^*, \forall (t, r) \in F_{adj} \quad (6)$$

$$\sum_b x_{tpb} + \sum_b x_{r(p+1)b} \leq 1, \forall p \in HP^*, \forall (t, r) \in F_{adj} \quad (7)$$

A colheita dentro de um mesmo período e um mesmo bloco, respeitando o raio Δ_b é representada por

$$\delta_{tr}(x_{tpb} + x_{rpb} - 1) \leq \Delta_b, \forall t, r \in F, \forall p \in HP^*, \forall b \in B \quad (8)$$

A necessidade de criação de novos blocos é dada pelo atendimento da demanda por blocos previamente abertos. Dado um bloco $b \neq 0$, o volume colhido nos blocos $h \leq b$ é dado por $Y_{bsp} = \sum_{h=0}^{b-1} \psi_{tsp} x_{tpb}$. Caso $Y_{bsp} \geq (1 - \delta)d_{sp}$, a restrição 2 será contemplada, dispensando a criação do novo bloco.

A comparação da demanda que falta ser atendida $(1 + \lambda)d_{sp} - Y_{bsp}$ com o que se prevê de limite máximo da demanda $(1 + \lambda)d_{sp}$ fornece um critério para avaliação de criação do novo bloco. Dado um parâmetro $\sigma \in [0,1]$ há interesse que o bloco seja aberto caso $\frac{(1+\lambda)d_{sp}-Y_{bsp}}{(1+\lambda)d_{sp}} \geq \sigma$, não sendo aberto se esta razão for inferior a σ . Manipulando esta inequação, pode-se escrever

$$\begin{aligned} (1 + \lambda)d_{sp} - Y_{bsp} \geq \sigma(1 + \lambda)d_{sp} &\Rightarrow (1 + \lambda)d_{sp} - \sigma(1 + \lambda)d_{sp} \geq Y_{bsp} \\ &\Rightarrow (1 - \sigma)(1 + \lambda)d_{sp} \geq Y_{bsp} \end{aligned}$$

Em outras palavras, se a quantidade colhida ainda estiver abaixo de $1 - \sigma$ do limite máximo da demanda, cria-se um bloco. E a definição de σ pode ser relacionada ao parâmetro λ da demanda, pois se $(1 - \sigma)(1 + \lambda) \geq (1 - \lambda)$ a restrição 2 acaba atendida antes da avaliação pela abertura de um novo bloco. Assim, sugere-se que σ atenda a $(1 - \sigma)(1 + \lambda) < (1 - \lambda)$ que, manipulando fica:

$$\begin{aligned} (1 - \sigma)(1 + \lambda) < (1 - \lambda) &\Rightarrow (1 + \lambda) - \sigma(1 + \lambda) < (1 - \lambda) \\ \Rightarrow (1 + \lambda) - (1 - \lambda) < \sigma(1 + \lambda) &\Rightarrow 2\lambda < \sigma(1 + \lambda) \therefore \frac{2\lambda}{1 + \lambda} < \sigma \end{aligned}$$

Ao incluir a variável β_{bp} como multiplicador do parâmetro σ , se obtêm $(1 - \sigma\beta_{bp})(1 + \lambda)d_{sp}$ que fica inalterada para $\beta_{bp} = 1$ e $(1 + \lambda)d_{sp}$ para $\beta = 0$. Naturalmente são válidas as desigualdades $(1 - \sigma\beta_{bp})(1 + \lambda)d_{sp} \leq (1 - \sigma)(1 + \lambda)d_{sp} \leq (1 + \lambda)d_{sp}$ pelos possíveis valores de β_{bp} e σ usados. Posicionando Y_{bsp} nestas desigualdades, inicialmente não faz sentido considerar $(1 + \lambda)d_{sp} < Y_{bsp}$, pois a restrição 3 seria violada. Com isso, é possível que: $(1 - \sigma\beta_{bp})(1 + \lambda)d_{sp} \leq Y_{bsp} \leq (1 + \lambda)d_{sp}$ ou $Y_{bsp} \leq (1 - \sigma\beta_{bp})(1 + \lambda)d_{sp} \leq (1 + \lambda)d_{sp}$. No primeiro caso, o volume Y_{bsp} supera o percentual definido para a criação do bloco, sendo válida apenas para $\beta_{bp} = 0$. Já o segundo é válido tanto para $\beta_{bp} = 0$, caso que o volume anterior dispensa a abertura do novo bloco, quanto $\beta_{bp} = 1$ indicando a necessidade desta abertura. Feito isso, utilizando o significado inicial de Y_{bsp} , estipula-se a restrição

$$\sum_{h=0}^{b-1} \psi_{tsp} x_{tpb} \leq (1 - \sigma\beta_{bp})(1 + \lambda)d_{sp} \quad (9)$$

A relação entre a variável β_{bp} e as variáveis x_{tpb} dos talhões no mesmo período é dada pela área colhida, sendo $\overline{A_p}$ e $\underline{A_p}$ respectivamente as áreas máximas e mínimas do período p e

$$\sum_t a_t x_{tpb} \leq \overline{A_p} \beta_{bp} \quad (10)$$

$$\sum_t a_t x_{tpb} \geq \underline{A_p} \beta_{bp} \quad (11)$$

Com estas restrições, as áreas colhidas nos blocos abertos estão dentro dos limites de área mínima e máxima, sendo obrigatoriamente nula a área colhida em bloco não aberto.

Passando para a colheita em um mesmo período, mas em blocos distintos dentro do raio Δ_a tem-se a restrição

$$\delta_{tr}(x_{tpb} + x_{rph} - 1) \leq \Delta_a, \forall t, r \in F, p \in HP^*, b, h \in B, b \neq h \quad (12)$$

A colheita em períodos consecutivos fica expressa por

$$\delta_{tr}(\sum_b x_{tpb} + \sum_b x_{r(p+1)b} - 1) \leq \Delta_c, \forall t, r \in F, 1 \leq p \leq HP - 1 \quad (13)$$

Este último grupo de inequações difere dos outros envolvendo Δ pelo somatório dos blocos pois períodos distintos tem blocos distintos, não fazendo sentido multiplicar as restrições para considerar cada combinação de blocos. Pela primeira restrição, cada somatório vale, no máximo, 1.

Seguindo ao terceiro ponto, cada talhão precisa de uma quantidade ε_{tsp} de viagens para ser atendido, dependente apenas de dados já conhecidos, como ψ_{tsp} , e a capacidade da frota q , visto que se considera uma frota homogênea nesta modelagem. Já para a abertura e manutenção de estradas, são estabelecidos: N conjunto de todos os nós do grafo, sendo i e j índices associados aos nós, e ; E conjunto de todas as estradas, sendo denotadas por e_{ij} , indicando os nós extremos de cada aresta, sendo que esta representação guarda o sentido de uso da estrada: de i para j .

Em termos práticos, as estradas são divisas entre talhões vizinhos e os nós são esquinas e cruzamentos. Com isso, faz sentido pensar em: N_t conjunto dos nós que formam o talhão t ; E_t conjunto das estradas que formam o talhão t ; E_0 conjunto de estradas pré-existentes e; E_i conjunto de estradas que tem o nó i como uma de suas extremidades.

Especificamente sobre os nós, o conjunto N pode ser dividido em três partes distintas entre si: N_0 conjunto dos nós que são origem de estradas e, para os quais não deve ser direcionado fluxo de carga; N_S conjunto dos sumidouros, ou ainda nós que são saídas de estradas, dos quais não parte viagem; N_F conjunto dos nós de fluxo sendo essencialmente $(N_0 \cup N_S)^C$, ou seja, composto por nós que não são nem origem nem saída.

Feitas estas considerações, podem ser expressas as variáveis binárias w_{ijp} que será 1 se e_{ij} foi aberta no período p , e; z_{ijp} que será 1 se e_{ij} recebeu manutenção no período p . Acompanham estas variáveis os coeficientes ω_{ijp} e ζ_{ijp} respectivamente os custos de abertura e manutenção de e_{ij} em p . A obtenção destes pode levar em conta um custo fixo de operação mais um custo variável pelo comprimento de e_{ij} , facilmente sendo calculado antes da execução do modelo. Também se estabelece uma variável inteira y_{ijp} para contabilizar viagens que passam por e_{ij} em p . Seu coeficiente é o custo de cada viagem feita por e_{ij} , representado por φ_{ijp} e dado pelo produto do custo da viagem por unidade de distância no período p vezes o comprimento de e_{ij} .

As estradas pré-existentes, para serem bem consideradas na solução, são representadas por uma abertura no período zero, sendo

$$w_{ij0} = 1, \forall e_{ij} \in E_0 \quad (14)$$

As estradas não são utilizadas no período inicial, devendo receber manutenção apenas quando for usada em efetiva colheita. Desse modo, considera-se que nenhuma estrada deve ser mantida em $p = 0$.

$$z_{ij0} = 0, \forall i, j \in N \quad (15)$$

Importante ressaltar que, para não desperdiçar gastos, considera-se que tanto uma estrada aberta no período p quanto uma estrada mantida no período p são adequadas para o tráfego. Portanto, não é operacionalmente coerente que um mesmo trecho seja simultaneamente aberto e mantido no mesmo período. Isso é expresso por

$$w_{ijp} + z_{ijp} \leq 1, \forall e_{ij} \in E, p \in HP^* \quad (16)$$

Também não faz sentido fazer manutenção de uma estrada que se considera fechada. Como uma estrada sem uso pode ser considerada “fechada” pelo passar do tempo, é preciso estipular uma quantidade de períodos e formar o conjunto P_p com essa determinada quantidade de períodos anteriores a p . Assim, uma estrada só pode ser mantida no período p se ela já tiver sido aberta ou mantida em um dos períodos de P_p .

$$z_{ijp} \leq \sum_{p' \in P_p} (w_{ijp'} + z_{ijp'}), \forall e_{ij} \in E, p \in HP^* \quad (17)$$

Para unir a avaliação da disponibilidade de uso da estrada com a quantidade de viagens que nela podem passar, estipula-se V_{ijp} como o limite de viagens em e_{ij} no período p . Esse limitante deve ser compreendido dentro do contexto que se busca a solução e pode ser, por exemplo, a capacidade da estrada e_{ij} no período p ; a dimensão da frota disponível no período p ou o total de viagens contratadas para serem realizadas no período p . Isto posto, é possível limitar o valor da variável y_{ijp} forçando $y_{ijp} = 0$ se a estrada não tiver sido mantida ou aberta em p com

$$y_{ijp} \leq V_{ijp} (w_{ijp} + z_{ijp}), \forall e_{ij} \in E, p \in HP^* \quad (18)$$

Importante destacar, em especial no algoritmo, a proibição de que variáveis referentes a estradas que saem e chegam no mesmo nó devem ser nulas em qualquer período, bem como viagens em $p = 0$.

$$y_{iip} = w_{iip} = z_{iip} = 0, \forall i \in N, \forall p \in HP \quad (19)$$

$$y_{ij0} = 0, \forall i, j \in N \quad (20)$$

Por fim, em relação à forma de carregamento, cada talhão t tem um conjunto de pontos N_t a ele associados. Qualquer ponto de N_t pode ser escolhido como ponto de carregamento do material colhido em t no período p . De forma semelhante, cada nó i tem um conjunto de talhões F_i associados e qualquer $t \in F_i$ pode escolher i como ponto de carga. Ao tratar dos veículos já foi definida a quantidade ε_{tsp} compatibilizando tanto a medida utilizada para o volume colhido quanto a capacidade dos veículos utilizados. Considerando isso, pode-se definir a variável inteira k_{itp} ligada à quantidade de veículos a serem carregados em i para atender o talhão t em p . Associa-se à variável k_{itp} o coeficiente κ_p , representando os custos de carregamento e descarregamento de um veículo em p .

Um dos objetivos de otimização é a escolha do melhor nó $i \in N_t$ para que seja feito o carregamento. Este pode ser previamente definido, considerando as trajetórias entre os pontos do talhão e os sumidouros do grafo, obtidas pelo algoritmo de Floyd-Warshall. Para a modelagem, importa que o volume colhido

seja carregado em um dos pontos de transbordo e único por talhão caso haja escolha prévia. Isso é modelado por

$$\sum_{i \in N_t} k_{itp} = \varepsilon_{tsp} \sum_b x_{tpb}, \forall t \in F, s \in S, p \in HP^* \quad (21)$$

Cada nó pode receber carga dos diversos talhões a ele associados. Pode também, dependendo do conjunto ao qual ele pertence (N_O , N_F ou N_S), receber viagens oriundas de outros nós em direção ao sumidouro. Nestas condições, apresentam-se como adequadas as restrições a seguir:

$$\sum_{j \in E_i} y_{ijp} = \sum_{j \in E_i} y_{jip} + \sum_{t \in F_i} k_{itp}, \forall p \in HP^*, i \in N_F \quad (22)$$

Para $i \in N_F$, a quantidade de veículos que saem de i para algum j em p deve ser a soma de todos os veículos que chegam em i com as cargas efetuadas por algum dos talhões que lhe são associados.

$$\sum_{j \in E_i} y_{ijp} = \sum_{t \in F_i} k_{itp}, \forall i \in N_O, p \in HP^* \quad (23)$$

$$\sum_{j \in E_i} y_{jip} = 0, \forall i \in N_O, p \in HP \quad (24)$$

Para $i \in N_O$, a quantidade de veículos que saem de i para algum j em p deve ser apenas aqueles com cargas efetuadas por algum dos talhões que lhe são associados. Nenhum veículo vindo de outro nó deverá ser direcionado ao nó i , pois este não é um nó de passagem.

$$\sum_{j \in E_i} y_{ijp} = 0, \forall i \in N_S, p \in HP \quad (25)$$

$$\sum_{j \in E_i} k_{itp} = 0, \forall i \in N_S, p \in HP \quad (26)$$

Para $i \in N_S$, não devem sair veículos em direção a outros nós j , visto este nó ser o destino final no contexto do problema. Pode-se considerar também que os pontos de saída não sejam considerados como possíveis pontos de carga, para indicar a existência do transporte dentro da capacidade das vias. Porém, na prática, ignorar a restrição 26 deve trazer melhor resultado financeiro, sem prejuízo à factibilidade da resolução.

Com todas as restrições acima colocadas, se estabelece como função objetivo

$$\begin{aligned} \max Z = & \sum_s \sum_t \sum_p \sum_b v_{tsp} x_{tpb} - \sum_i \sum_j \sum_p (\omega_{ijp} w_{ijp} + \zeta_{ijp} z_{ijp} + \varphi_{ijp} y_{ijp}) \\ & - \sum_i \sum_t \sum_p \kappa_p k_{itp} \end{aligned}$$

3 CONSIDERAÇÕES FINAIS

A correta modelagem do problema é fundamental para que a solução obtida matematicamente tenha ligação com o problema real e seja possível de ser aplicada. Na continuidade da pesquisa constatou-se que algumas informações necessárias ao modelo são levantadas em campo ou definidas arbitrariamente, o que pode tornar a aplicação prática do modelo inviável. Já para testes teóricos, pode ser necessário o emprego de outros métodos, como metaheurísticas, para definir valores que permitam a execução do modelo.

REFERÊNCIAS

BATISTA, G. V.; SCARPIN, C. T.; PÉCOR, J. E.; RUIZ, A. A New Ant Colony

Optimization Algorithm to Solve the Periodic Capacitated Arc Routing Problem with Continuous Moves. **Mathematical Problems in Engineering**, Hindawi, v. 2019, p. 3201656, jul. 2019. Disponível em: doi.org/10.1155/2019/3201656. Acesso em: 7 ago. 2025.

CHIAVENATO, I. **Administração para Todos: Ingressando no Mundo da Gestão de Negócios**. 3. ed. Rio de Janeiro: Atlas, 2021. E-book. p.3.

CORREA, R. N.; SCARPIN, C. T.; FERRARI, L. S.; ARCE, J. E. Application of relax-and-fix heuristic in the aggregation of stands for tactical forest scheduling. **Forest Policy and Economics**, Elsevier, v. 119, p. 102284, 2020. Disponível em: doi.org/10.1016/j.forpol.2020.102284. Acesso em: 7 ago. 2025.

D'ARACE, L. M. B. et al. O manejo florestal como estratégia para mitigar os impactos da exploração florestal. **Revista Ibero-Americana de Ciências Ambientais**, v. 10, n. 6, p. 32-42, 2019. Disponível em doi.org/10.6008/CBPC2179-6858.2019.006.0004

MARTELL, D. L.; GUNN, E. A.; WEINTRAUB, A. **Forest management challenges for operational researchers**. *European journal of operational research*, v. 104, n. 1, p. 1-17, 1998. Disponível em [doi.org/10.1016/S0377-2217\(97\)00329-9](https://doi.org/10.1016/S0377-2217(97)00329-9)

APÊNDICE 2 – ARTIGO PUBLICADO DO DESENVOLVIMENTO DO AG



ALGORITMO GENÉTICO PARA DEFINIÇÃO DE PARÂMETROS EM OTIMIZAÇÃO DE COLHEITA FLORESTAL

Carlos Eurico Galvão Rosa¹
Gustavo Valentim Loch²
Cassius Tadeu Scarpin³

RESUMO

Objetivo: O estudo visa explorar como algoritmos genéticos podem calibrar parâmetros em modelagens matemáticas para otimização de colheitas florestais, abordando a necessidade de ajustes devido à indisponibilidade inicial de parâmetros essenciais.

Referencial Teórico: A pesquisa está fundamentada em casos semelhantes que necessitaram de calibração de parâmetros utilizando diversas técnicas, e dentre elas os algoritmos genéticos, para ajuste de modelos matemáticos em cenários florestais.

Método: Utilizando uma base de dados reais de produtividade e posicionamento dos talhões, foi construída uma modelagem matemática e aplicados algoritmos genéticos para determinar parâmetros faltantes.

Resultados e Discussão: Os resultados indicam que o uso de algoritmos genéticos foi eficaz na definição e ajuste dos parâmetros do modelo, resultando em soluções mais eficientes para a colheita florestal.

Implicações da Pesquisa: A pesquisa contribui significativamente para práticas de otimização em colheitas florestais, possibilitando um modelo mais preciso e adaptável a diferentes cenários.

Originalidade/Valor: A originalidade reside na aplicação de algoritmos genéticos nesse contexto, proporcionando uma ferramenta inovadora para otimização de operações florestais, promovendo um manejo mais sustentável e eficiente.

Palavras-chave: Colheita Florestal, Otimização de Parâmetros, Algoritmo Genético, Modelagem Matemática

GENETIC ALGORITHM FOR PARAMETER DEFINITION IN FOREST HARVEST OPTIMIZATION

ABSTRACT

Objective: The study aims to explore the use of genetic algorithms for parameter calibration in mathematical modeling for forest harvest optimization, addressing the need for adjustments due to the initial unavailability of essential parameters.

Theoretical Framework: The research is based on similar cases requiring parameter calibration using several techniques, genetic algorithms among that technique, as the basis for adjusting mathematical models in forest settings.

Method: Utilizing real data on productivity and plot positioning, a mathematical model was constructed, and genetic algorithms were applied to determine the missing parameters.

Results and Discussion: The results indicate that genetic algorithms effectively defined and adjusted model parameters, resulting in more efficient solutions for forest harvesting.

¹ Universidade Federal do Paraná, Curitiba, Paraná, Brasil. E-mail: cegalvao@ufpr.br

² Universidade Federal do Paraná, Curitiba, Paraná, Brasil. E-mail: gustavo.valentim@ufpr.br

³ Universidade Federal do Paraná, Curitiba, Paraná, Brasil. E-mail: cassiusts@ufpr.br



Research Implications: The study significantly contributes to optimization practices in forest harvests, enabling a more accurate and adaptable model for different scenarios.

Originality/Value: The originality lies in the application of genetic algorithms in this context, providing an innovative tool for forest operations optimization, promoting more sustainable and efficient management.

Keywords: Forest Harvesting, Parameter Optimization, Genetic Algorithm, Mathematical Modeling.

ALGORITMO GENÉTICO PARA LA DEFINICIÓN DE PARÁMETROS EN LA OPTIMIZACIÓN DE LA APROVECHAMIENTO FORESTAL

RESUMEN

Objetivo: El estudio tiene como objetivo explorar el uso de algoritmos genéticos para la calibración de parámetros en modelos matemáticos para la optimización del aprovechamiento forestal, abordando la necesidad de ajustes debido a la falta inicial de parámetros esenciales.

Marco Teórico: La investigación se basa en casos similares que requieren calibración de parámetros utilizando varias técnicas, entre ellas algoritmos genéticos, como base para ajustar los modelos matemáticos en entornos forestales.

Método: Utilizando datos reales de productividad y posicionamiento de parcelas, se construyó un modelo matemático y se aplicaron algoritmos genéticos para determinar los parámetros faltantes.

Resultados y Discusión: Los resultados indican que los algoritmos genéticos fueron eficaces en la definición y ajuste de los parámetros del modelo, resultando en soluciones más eficientes para el aprovechamiento forestal.

Implicaciones de la investigación: El estudio contribuye significativamente a las prácticas de optimización en el aprovechamiento forestal, permitiendo un modelo más preciso y adaptable a diferentes escenarios.

Originalidad/Valor: La originalidad reside en la aplicación de algoritmos genéticos en este contexto, proporcionando una herramienta innovadora para la optimización de operaciones forestales, promoviendo una gestión más sostenible y eficiente.

Palabras clave: Aprovechamiento Forestal, Optimización de Parámetros, Algoritmo Genético, Modelado Matemático.

RGSA adota a Licença de Atribuição CC BY do Creative Commons (<https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>).



1 INTRODUÇÃO

A busca de uma solução para um problema requer o levantamento de todas as informações disponíveis ligadas ao contexto a fim de que a modelagem do problema seja o mais fiel possível. Entretanto, para casos nos quais não se tem certeza dos parâmetros exatos, é preciso estimar os valores de alguma forma arbitrária. No caso em tela, temos dados de um empreendimento florestal com posição dos talhões, seu volume e produtividade. Queremos otimizar o processo de colheita destes talhões, maximizando o lucro sendo respeitadas algumas limitações e atendendo a uma demanda. Alguns parâmetros destas limitações e a demanda a



serem atendida pelo processo não são definidas e precisam ser determinadas de modo que o problema proposto tenha solução.

O presente trabalho tem por objetivo avaliar como tem sido feita essa calibração de parâmetros em outros casos semelhantes e apresentar uma proposta de obtenção de parâmetros otimizados por meio de Algoritmos Genéticos. A seção “Colheita Florestal” faz um breve panorama do problema e a modelagem proposta para busca de solução. Para a avaliação do uso de técnicas otimizadoras de parâmetros, foram pesquisadas publicações, conforme explanado na Seção “Levantamento de trabalhos”, com resultados abordados na Seção “Otimizações de Parâmetros”. Encerra o presente artigo a seção na qual é abordado o algoritmo proposto para a definição dos parâmetros necessários e os resultados obtidos.

2 COLHEITA FLORESTAL

O planejamento é fundamental para a sustentabilidade e prosperidade de um empreendimento florestal e um processo de extração madeireira mal planejado pode levar a prejuízos nem sempre recuperáveis. Um importante aspecto é o horizonte de planejamento disponível para exploração do espaço físico, previamente particionado em talhões, onde estão plantadas as árvores a serem colhidas. Cada talhão tem sua estimativa de volume e de lucro por período dentro do horizonte de planejamento. As divisas entre os talhões são as estradas pelas quais eles podem ser acessados e por onde é escoada a produção. Uma das finalidades da pesquisa, a qual pertence este estudo, é maximizar o lucro previsto para o processo de colheita, atendendo a demandas mercadológicas e ambientais, integrando a abertura e manutenção de estradas de acesso. A base de dados aqui utilizada é a PhyllisLeeper (Toth, 2011). Os vértices dos talhões e estradas constituem um grafo direcionado com sumidouros.

A modelagem proposta para a solução consiste no seguinte problema de programação linear:

- $x_{tpb} = \begin{cases} 1, & \text{se o talhão } t \text{ foi colhido no período } p \text{ no bloco } b \\ 0, & \text{caso contrário} \end{cases}$
- $\beta_{bp} = \begin{cases} 1, & \text{se o bloco } b \text{ for gerado no período } p \\ 0, & \text{caso contrário} \end{cases}$
- $w_{ijp} = \begin{cases} 1, & \text{se a estrada } e_{ij} \text{ foi aberta no período } p (> 0) \text{ ou pré-existente } (p = 0) \\ 0, & \text{caso contrário} \end{cases}$
- $z_{ijp} = \begin{cases} 1, & \text{se a estrada } e_{ij} \text{ recebeu manutenção no período } p \\ 0, & \text{caso contrário} \end{cases}$



- y_{ijp} = variável inteira indicando a quantidade de viagens realizadas na estrada e_{ij} no período p .
- k_{itp} = a quantidade de veículos a serem carregadas no nó da i para atender o talhão t no período p .

Função Objetivo

$$\begin{aligned} \max Z = & \sum_s \sum_t \sum_p \sum_b v_{tsp} x_{tpb} - \sum_i \sum_j \sum_p (\omega_{ijp} w_{ijp} + \zeta_{ijp} z_{ijp} + \varphi_{ijp} y_{ijp}) \\ & - \sum_i \sum_t \sum_p k_{itp} k_{itp} \end{aligned} \quad 1$$

Maximizar o lucro, composto da receita obtida pela colheita do talhão t no período p bloco b e das despesas referentes à abertura (w_{ijp}) e manutenção (z_{ijp}) das estradas, às viagens realizadas (y_{ijp}) e aos procedimentos de carga e descarga (k_{itp}).

Sujeito à

$$\sum_p \sum_b x_{tpb} \leq 1, \quad \forall t \in F \quad (2)$$

As restrições desse conjunto (equação 2) garantem que cada talhão será colhido, no máximo, uma vez.

$$\sum_t \sum_b v_{tsp} x_{tpb} \geq (1 - \lambda) d_{sp} \quad \forall s \in S, p \in P^* \quad (3)$$

$$\sum_t \sum_b v_{tsp} x_{tpb} \leq (1 + \lambda) d_{sp} \quad \forall s \in S, p \in P^* \quad (\text{Erro!})$$

Indicador não definido.)

Os volumes colhidos devem atender a demanda d_{sp} do período, com uma tolerância λ para as demandas mínima (equação 3) e máxima (equação 4).

$$(n_t + p - 1) \sum_b x_{tpb} \geq \eta_t \sum_b x_{tpb} \quad \forall t \in F, \forall p \in P^* \quad (4)$$

O atendimento ao grupo de restrições acima (equação 5) enseja que colheita respeite a idade mínima η_t do talhão.

$$\sum_b x_{tpb} + \sum_b x_{rpb} \leq 1 \quad \forall (t, r) \in F_{adj}, \forall p \in P^* \quad (5)$$

$$\sum_b x_{tpb} + \sum_b x_{rpb} \leq 1 \quad \begin{aligned} & \forall (t, r) \in F_{adj} \\ & p = 1, 2, \dots, HP - 1 \end{aligned} \quad (6)$$

Talhões adjacentes não devem ser colhidos no mesmo período (equação 6) e nem em períodos consecutivos (equação 7).

$$\beta_{0p} = 1 \quad \forall p \in P \quad (7)$$

Cada período terá, pelo menos, um bloco de colheita (equação 8).

$$\delta_{tr} (x_{tpb} + x_{rpb} - 1) \leq \Delta_b \quad \forall t, r \in F, \forall b \in B, \forall p \in P^* \quad (8)$$

Dois talhões podem ser colhidos em um mesmo bloco e mesmo período se a distância δ_{tr} entre eles for, no máximo Δ_b (equação 9).



$$\sum_{h=0}^{b-1} \sum_t v_{tsp} x_{tph} \leq (1 - \sigma \beta_{bp})(1 + \lambda) d_{sp} \quad \forall b \in B^*, s \in S, p \in P^* \quad (9)$$

Para que se abra um novo bloco de colheita, segundo a equação 10, é preciso que o volume colhido nos blocos anteriores não extrapola o limite $(1 + \lambda)d_{sp}$ com tolerância σ .

$$\sum_t a_t x_{tpb} \leq \overline{A}_p \beta_{bp} \quad \forall b \in B, p \in P^* \quad (10)$$

$$\sum_t a_t x_{tpb} \geq \underline{A}_p \beta_{bp} \quad \forall b \in B, p \in P^* \quad (11)$$

Cada bloco tem limites máximos (equação 11) e mínimos (equação 12) de área a ser colhida.

$$\delta_{tr}(x_{tpb} + x_{rph} - 1) \leq \Delta_a \quad \begin{array}{l} \forall t, r \in F, \forall b, h \in B, \\ b \neq h, \forall p \in P^* \end{array} \quad (12)$$

Dois talhões podem ser colhidos em blocos distintos de um mesmo período se a distância δ_{tr} entre eles for, no máximo Δ_a (equação 13).

$$\delta_{tr}(\sum_b x_{tpb} + \sum_b x_{r(p+1)b} - 1) \leq \Delta_c \quad \begin{array}{l} \forall t, r \in F \\ p = 1, 2, \dots, HP - 1 \end{array} \quad (13)$$

Por estas restrições (equação 14), dois talhões podem ser colhidos em períodos consecutivos se a distância δ_{tr} entre eles for, no máximo Δ_c .

$$w_{ij0} = 1 \quad \forall e_{ij} \in E_0 \quad (14)$$

$$z_{ij0} = 0 \quad \forall i, j \in N \quad (15)$$

As variáveis referentes a estradas pré-existentes são definidas com valor 1 (equação 15) e nenhuma estrada tem custo de manutenção antes do primeiro período de colheita (equação 16).

$$w_{ijp} + z_{ijp} \leq 1 \quad \forall e_{ij} \in E, \forall p \in P \quad (16)$$

Prezando pelo uso racional de recursos, uma mesma estrada não pode ser aberta e demandar manutenção no mesmo período (equação 17).

$$z_{ijp} \leq \sum_{p' \in P_p} (w_{ijp'} + z_{ijp'}) \quad \forall e_{ij} \in E, \forall p \in P^* \quad (17)$$

Conforme a equação 18, as manutenções ocorrem em estradas que foram abertas ou já receberam manutenção em um intervalo P_p de períodos anteriores. Caso contrário, essa estrada precisará ser reaberta se for requisitada para uso.

$$y_{ijp} \leq V_{ijp}(w_{ijp} + z_{ijp}) \quad \forall e_{ij} \in E, \forall p \in P^* \quad (18)$$

Esta equação, com a equação 17, limita a quantidade de viagens realizada na estrada e_{ij} . Se ela não foi aberta e nem recebeu manutenção no período p , o número de viagens nesta estrada será zero. Caso contrário, o numero de viagens poderá ser até V_{ijp} .

$$y_{iip}, w_{iip}, z_{iip} = 0 \quad \forall i \in N, p \in P \quad (19)$$



Pelo atendimento da equação 20, não são contabilizadas viagens, abertura ou manutenção para estradas impróprias, isto é, com origem e destino no mesmo ponto.

$$y_{ijo} = 0 \quad \forall i, j \in N \quad (20)$$

O limitante da equação 21 previne que sejam computadas viagens antes do primeiro período de colheita.

$$\sum_{i \in N_t} k_{itp} = \sum_s \sum_b \varepsilon_{tsp} x_{tpb} \quad \forall t \in F, s \in S, p \in P^* \quad (21)$$

A quantidade de carregamentos do ponto de transbordo do talhão t , cumprida a equação 22, deve atender ao volume ali colhido.

$$\sum_{j \in E_i} y_{ijp} = \sum_{j \in E_i} y_{jip} + \sum_{t \in F_i} k_{itp} \quad \forall i \in N_F \cup N_O, \forall p \in P^* \quad (22)$$

A quantidade de viagens que sai de um ponto i , que não seja o sumidouro do grafo, para qualquer ponto a ele ligado no período p precisa ser igual, segundo a equação 23, a quantidade de viagens que chega no ponto i mais os carregamentos ali feitos caso ele seja nó de transbordo de algum talhão.

$$\sum_{j \in E_i} y_{ijp} = 0 \quad \forall i \in N_O, p \in P \quad (23)$$

Eventuais pontos “sem saída”, pela equação 24, não devem receber volumes de outros pontos.

$$\sum_{j \in E_i} y_{ijp} = 0 \quad \forall i \in N_S, p \in P \quad (24)$$

Os pontos de sumidouro do grafo, atendida a equação 25, não tem tráfego originando nestes pontos para dentro do grafo.

$$\sum_{t \in F_i} k_{itp} = 0 \quad \forall i \in N_S, p \in P \quad (25)$$

Nenhum talhão terá como ponto de transbordo os sumidouros do grafo (equação 26).

$$x_{tpb}, w_{ijp}, z_{ijp}, \beta_{bp} \in \{0, 1\} \quad (26)$$

$$y_{ijp}, k_{itp} \in \mathbb{N} \quad (27)$$

Como descrito no início, as variáveis de colheita x_{tpb} , abertura de estradas w_{ijp} , manutenção de estradas z_{ijp} e abertura de blocos β_{bp} são binárias (equação 27) enquanto as quantidades de viagens y_{ijp} e carregamentos k_{itp} são naturais (equação 28). De todos os dados necessários na presente modelagem, não estão pré-definidos na base de dados:

- d_{sp} : Demanda do sortimento s no período p (equações 3, 4 e 10);
- Δ_b : Distância euclidiana máxima que dois talhões colhidos podem ficar um do outro em um mesmo período e mesmo bloco (equação 9);
- \underline{A}_p e \overline{A}_p : Áreas mínima e máxima permitidas para a formação de um bloco de colheita (equações 11 e 12);



- Δ_d : Distância euclidiana máxima que dois talhões podem ficar um do outro quando selecionados para colheita no mesmo período, mas em blocos diferentes (equação 13);
- Δ_c : Distância euclidiana máxima que dois talhões podem ficar um do outro bloco para serem colhidos em períodos consecutivos (equação 14).

A obtenção de uma solução factível depende diretamente das escolhas destes valores. Para tanto, definiu-se pela busca de possíveis valores através de Algoritmo Genético. Foram levantados trabalhos com otimização de parâmetros, cuja seleção é descrita na próxima seção.

3 METODOLOGIA

O procedimento seguido para a seleção de trabalhos foi inspirado na Revisão Sistemática de Literatura de Kitchenham (2004), com auxílio do software StArt, da Universidade Federal de São Carlos. Das etapas propostas por Kitchenham (2004), foram efetuadas o planejamento e a execução que são descritos nesta seção. Foi estabelecida como questão principal “Tem sido utilizado algoritmo genético para estimativa de parâmetros?”, sendo população da pesquisa artigos publicados nos últimos cinco anos. As palavras-chave escolhidas para as buscas foram “Algoritmo Genético”, “Genetic Algorithm”, “estimativa”, “estimative”, “optimization” e “parâmetros”. Os motores de busca que retornaram resultados para as buscas foram os listados na **Erro! Fonte de referência não encontrada.**

A primeira análise dos trabalhos foi feita pela leitura dos resumos. Os quantitativos de rejeições desta primeira análise, com seus principais motivos, estão detalhados na Tabela 2, sendo possível a aplicação de mais de um critério de exclusão para um mesmo trabalho.

Tabela 1

Retornos das pesquisas.

Motor de Busca	Quantidade de artigos retornados	Quantidade de artigos classificados	Quantidade de artigos duplicados
ACM	82	4	0
Scopus	55	24	1
Science Direct	5	2	3
Total	142	30	4

Tabela 2

Artigos excluídos por critério

Critério	Quantidade
Artigo não disponível gratuitamente com acesso institucional	3
Trabalho sem resumo disponível / Coletânea	57



Resumo não aborda otimização	11
Resumo não aborda otimização de parâmetros, mas outro tipo de otimização	34
Idioma fora do conjunto pré-definido (Inglês/Português/Espanhol)	3

Com os trinta trabalhos aceitos pela análise do resumo, passou-se a leitura dos trabalhos completos, buscando identificar a otimização de parâmetros e se essa otimização usava algoritmo genético ou apresentava alguma outra técnica. Apesar de selecionados na primeira análise, ainda alguns trabalhos não apresentaram otimização de parâmetros como esperado. A análise destes trabalhos está explanada na seção Otimizações de Parâmetros.

4 OTIMIZAÇÕES DE PARÂMETROS

O que se esperava da leitura dos trabalhos era a configuração de parâmetros em busca de uma melhor performance. Dentre os trabalhos que não apresentaram otimização de parâmetros temos os seguintes: Chen *et al.* (2021) propõem um modelo de detecção de URLs maliciosas com o algoritmo Support Vector Machine (SVM), mas não trata de definição seus parâmetros.

Yi, Zhan e Xu (2024) apresentam uma proposta de solução do problema de compensação passiva do heave para operações de levantamento de carga em ambientes marinhos, em uma estrutura de projeto com resultados melhores que modelo anterior baseado em função de base radial (RBF) e algoritmo genético.

Yin *et al.* (2022) trazem uma proposta de *Particle Swarm Optimization* (PSO) com reforço de aprendizagem que é comparada com outras oito variantes de PSO. Ma, Li e Zhang (2022) buscam método heurístico para detecção de problemas de deslizamento em rolamentos de aviação, cujos métodos baseados em detecção magnética sofrem de ruído de fundo de sinal sólido.

Ngoo, Goh e Likoh (2022), embora mencionem no resumo que “experimentos são realizados para definir os parâmetros”, apresentam no trabalho apenas o uso do algoritmo do Lobo Cinza para solução do problema de escala de enfermaria.

Por fim, Tachioka (2022) anonimiza dados para preservação de privacidade com manutenção da usabilidade destes por meio de otimização não linear, resolvida com algoritmo genético.

Tachioka (2022) também reconhece ser “necessário definir parâmetros adequadamente para a anonimização de dados” mas não indica como escolher esses parâmetros.



Uma das abordagens encontradas para otimização de parâmetros é o Método Taguchi. Segundo Karna *et al.* (2012), trata-se de um método estatístico para melhoria da qualidade na produção através da seleção de parâmetros de fabricação.

Dois trabalhos recorrem a essa técnica: Geng, Ye e Liu (2020) aborda o problema de agendamento *flow shop* híbrido usando algoritmo memético na solução com método Taguchi na seleção de parâmetros do algoritmo e; Shamami *et al* (2024) usam algoritmo genético, *Simulated Annealing* (SA) e Algoritmo do Lobo Cinza no desenvolvimento de um jogo aplicando o método Taguchi para otimização de parâmetros destas heurísticas.

Nos exemplos que utilizam heurísticas para seleção de parâmetros, salientam-se os que utilizam algoritmo genético na escolha de parâmetros, seja sozinho ou combinado com outras técnicas. Yu *et al* (2021) apresentam otimização de seis dos mais de 100 parâmetros do Spark, um *framework* de processamento de *big data*, aplicado em informações de imagens de sensoriamento remoto recebidas de satélites. Esta otimização de parâmetros é feita por uma combinação do XGBoost, um método de aprendizagem de máquina proposto por Chen e Guestrin (2016), com algoritmo genético.

Tayyebi, Hajjar e Soltanali (2023) usam algoritmo genético para otimizar a obtenção de regras “Se/Então” de lógica *Fuzzy* aplicada a modelos de síntese de hidrocarbonetos. Mergos e Sextos (2019) aplicam o algoritmo genético na seleção de melhores conjuntos de dados a serem usados como parâmetros de modelagens de movimento de solo. Isso pois a quantidade de dados reais de terremotos é baixa e a geração de dados artificiais, embora fácil, não carrega em si importantes características de terremotos reais como “a intensidade variável no tempo e o conteúdo de frequência que podem afetar significativamente a resposta estrutural”.

Obata e Kurahashi (2024) estimam os parâmetros de um modelo baseado em agentes macroeconômicos com um Algoritmo Genético de Codificação Real (RCGA). Zhang e Hou (2024) indicam um método de otimização dos parâmetros do conjunto de engrenagens de transmissão usando algoritmo genético e rede neural com *Backpropagation*.

Ingram *et al* (2021) propõem um algoritmo de otimização de parâmetros usando algoritmo genético e mínimos quadrados não lineares, testado em problemas da área biológica. Siddikov, Porubay e Rakhimov (2024) determinam parâmetros ótimos de ajuste de regulador *neuro-fuzzy* com um algoritmo genético.

Liu *et al* (2024) estuda especificamente a seleção otimizada de parâmetros e sua influência em esquema que seja eficaz na construção de redes seguras de comunicação quântica sem fio. Estes pesquisadores enfatizam que “a seleção de parâmetros é uma tarefa crucial que afeta diretamente o desempenho do sistema” e usam algoritmo genético para essa seleção.



O trabalho de Arastou, Rabieyan e Karrari (2021) mostra um modelo teste, baseado em estabilizador do sistema de energia, para estimar o conjunto completo de parâmetros dos geradores síncronos. A estimativa é feita por meio de um problema de otimização não linear resolvido com algoritmo genético.

Wang (2022) faz projeção de custos de construção civil usando rede neural com *backpropagation*, sendo os parâmetros da rede neural otimizados por algoritmo genético. E ainda o levantamento de trabalhos retornou um caso, de Quevedo *et al* (2021), que usa aprendizagem por reforço para otimizar parâmetros de um algoritmo genético aplicado na resolução de problema de roteamento de veículos capacitado.

Foi registrado ainda o uso de algoritmos de inteligência coletiva ou inteligência de enxame, como PSO e Lobo Cinza, na otimização de parâmetros. Bayat e Baghrmian (2020) apresentam um controlador de rastreamento de ponto de potência máxima para desenvolvimento de carregador de bateria de alta eficiência e baixo custo. Este controlador é baseado em sistema *fuzzy* tipo 2 auto ajustável e seus parâmetros são otimizados por um algoritmo “Invasão de Ervas Daninhas”, heurística estocástica bioinspirada de inteligência coletiva.

Yang et al. (2021) aplica PSO na otimização de parâmetros de penalidade e de função núcleo de modelos de avaliação do sistema de controle de fogo “para evitar a cegueira dos parâmetros definidos manualmente”.

Liu, Zhuang e Gao (2022) empregam SVM para detecção de tráfego malicioso na internet, com algoritmo do Lobo Cinza estimando os parâmetros do SVM. Wang *et al* (2022) buscam unir boas interpretações de modelos *fuzzy* baseados em conhecimento com a boa precisão dos modelos *fuzzy* baseados em dados numéricos. Para tanto, aplicam PSO na otimização de parâmetros dos conjuntos *fuzzy*.

Gao *et al* (2023) recorrem a redes neurais para otimizar parâmetros da produção de tabaco para cigarros, como vapor e água, sendo os parâmetros da rede neural otimizados pelo Algoritmo da Gaivota. Li e Kong (2023) otimizam parâmetros de aquisição de equipamentos esportivos com colônia de formigas.

Liu, Sun e Anderson-Mcleod (2023) usam PSO na otimização de parâmetros de um modelo simplificado de primeiro princípio de baterias de íons de lítio. Liang, Wang e Wang (2024) aplicam rede neural para previsão de cargas em sistema de energia, com Algoritmo de Otimização de Baleia melhorado para otimização dos parâmetros da rede neural.

Encerrando o rol de trabalhos aceitos, Chang *et al* (2023) utilizam uma forma específica de rede neural com *backpropagation* “para encontrar os parâmetros ótimos do processo e



melhorar a eficiência de produção de peças plásticas”, no caso lentes de sílica líquida. Karthikeyan *et al.* (2023) propõem um *framework* que ajusta automaticamente parâmetros de algoritmos ou heurísticas usados no gerenciamento de *clusters*. E a pesquisa de Chang *et al* (2023) sobre o processo de tratamento de águas residuais apresenta dois algoritmos: Um sistema de aprendizado amplo e análise independente para tratar de características não lineares, não gaussianas e correlação temporal dos dados do processo e; uma heurística multiobjetivo inspirada em pombos para a definição dos hiperparâmetros desse tratamento.

Com os trabalhos apresentados é possível vislumbrar a ampla gama de áreas nas quais são requeridas técnicas para definição de parâmetros corretos na resolução de um problema, sendo o Algoritmo Genético uma das possibilidades.

5 ALGORITMO GENÉTICO PROPOSTO

Reeves (2010) apresenta o histórico do Algoritmo Genético e seus conceitos. A proposta aqui exposta tem como base esse trabalho.

O problema de otimização em tela tem sua função objetivo (equação 1) que, no âmbito do Algoritmo Genético servirá como função de *fitness*. Os indivíduos são listas de pares ordenados (p, b) , sendo o t -ésimo par indicador de que a variável x_{tpb} deverá assumir valor igual a 1. No contexto do problema, isso significa que o talhão t será colhido no período p no bloco de colheita b . Os indivíduos da população inicial são obtidos por meio de heurísticas gulosas aleatórias, selecionando para os períodos iniciais os talhões de maior receita.

Por se tratar de uma solução inicial aleatória, o mais provável é que algumas restrições do problema (equações 2 a 26) sejam violadas, gerando soluções infactíveis. Caso nenhuma restrição seja violada, já temos uma solução factível para o problema e podemos aplicar os valores na otimização original.

Tendo a população inicial formada, são aplicados os processos de mutação e *crossover*. Para a mutação, uma posição t aleatória do indivíduo tem seu par (p, b) alterado, gerando um novo indivíduo. Já o *crossover* pega dois indivíduos distintos (A e B), seleciona uma posição t aleatória e forma dois indivíduos novos: Um com os pares de A desde o início até a posição t , sendo completado com pares do indivíduo B da posição t até o final; outro com o início de B e final de A. As figuras 1 e 2 representam estas operações que são aplicadas até que seja possível formar de uma nova geração.



Figura 1

Exemplo mutação

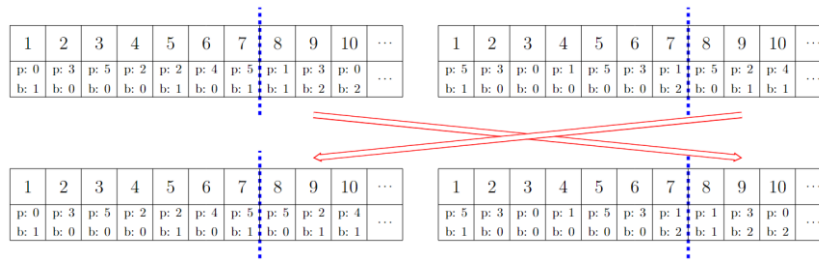
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	...
p: 0	p: 3	p: 5	p: 2	p: 2	p: 4	p: 5	p: 1	p: 3	p: 0	...
b: 1	b: 0	b: 0	b: 0	b: 1	b: 0	b: 1	b: 1	b: 2	b: 2	...

→

1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	...
p: 0	p: 3	p: 5	p: 1	p: 2	p: 4	p: 5	p: 1	p: 3	p: 0	...
b: 1	b: 0	b: 0	b: 2	b: 1	b: 0	b: 1	b: 1	b: 2	b: 2	...

Figura 2

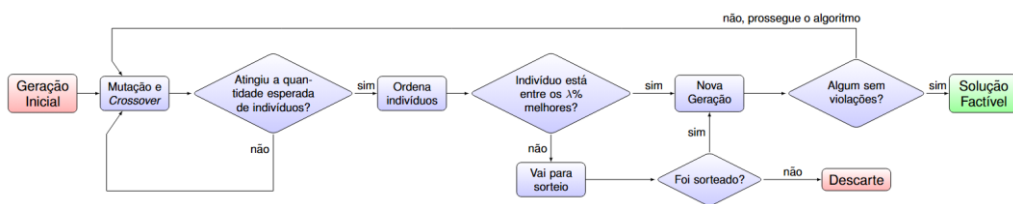
Exemplo crossover



Tanto os indivíduos iniciais quanto os indivíduos gerados são ordenados segundo dois critérios: menor número de restrições violadas e maior valor da solução na função *fitness*. É definido um percentual λ da nova geração para formação da “elite”. Os “ $\lambda\%$ ” melhores indivíduos, incluindo geradores e gerados, sobrevivem e passam à geração seguinte. Os outros $(100 - \lambda)\%$ da nova geração são escolhidos por sorteio, sendo descartados os demais. Repete-se o processo até encontrar indivíduos sem violar restrição, como ilustra a figura 3.

Figura 3

Fluxograma do Algoritmo Genético



Esta proposta foi programada na linguagem Python, em dispositivo com processador Intel(R) Core(TM) i3-10100 CPU @ 3.60GHz e 32,0 GB de RAM, sendo os indivíduos codificados como *dataframes* da biblioteca Pandas. Considerando os dados da base PhyllisLeeper, o tempo gasto com os cálculos de verificações das mais de 200 mil restrições e dos valores procurados foi em torno de 30s por indivíduo.

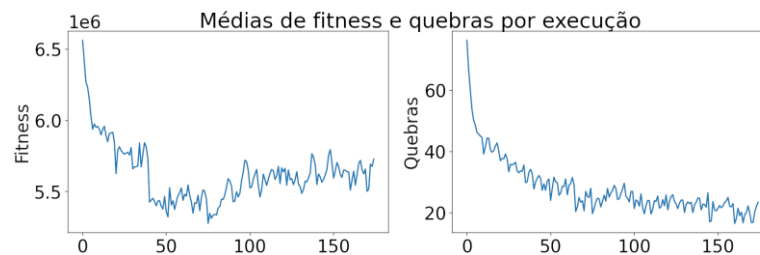
Iniciou-se com uma solução gulosa, construída manualmente a partir dos maiores volumes a serem colhidos no primeiro período, evitando talhões adjacentes. Desta foram



efetuadas algumas modificações para obter-se uma população inicial de cinco indivíduos. Foi aplicado o algoritmo proposto a esta população configurada para uma geração inicial e quatro novas gerações, população padrão o triplo da população inicial, probabilidade de *crossover* de 50% e probabilidade de mutação de 80%. Após cada execução, cria-se uma nova população inicial a partir da execução excluindo indivíduos repetidos e os com mais restrições quebradas.

Figura 4

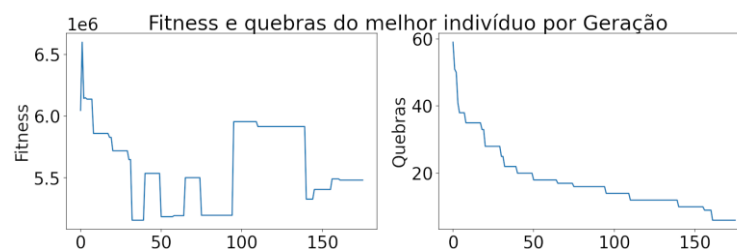
Média de fitness e de restrições quebradas dos indivíduos, por execução



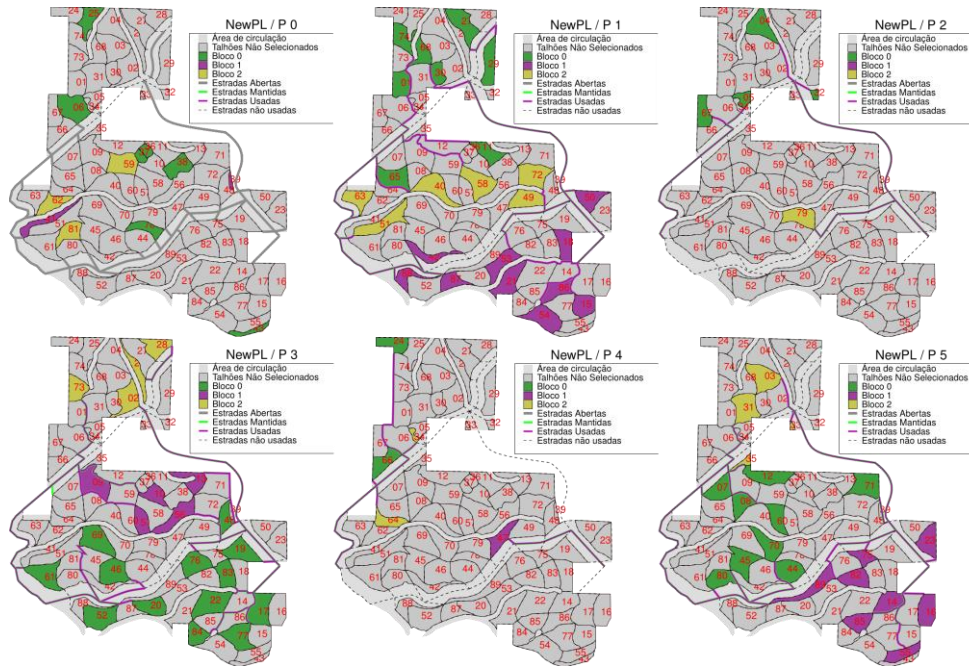
Nos gráficos da figura 4 constata-se que a solução gulosa inicial prioriza um maior *fitness* mesmo violando restrições e as trocas efetuadas em mutações para atender às restrições, em especial as relacionadas com colheitas em talhões adjacentes (equações 6 e 7), acabam por reduzir o *fitness* dos indivíduos, mas não necessariamente de modo similar à redução do número de restrições quebradas.

Figura 5

Fitness e Restrições quebradas no melhor indivíduo, por geração



Analisando as informações da figura 5 nota-se pouco antes da centésima execução um considerável aumento no *fitness* do melhor indivíduo, enquanto a quantidade de quebras nas mesmas execuções se mantém sem crescimento. Ressalte-se que, diferente de soluções com variáveis de folga e excesso, com penalizações para restrições não atendidas, a quantidade de restrições quebradas pelo indivíduo nesta proposta não é punida no *fitness*, sendo apenas parâmetro de seleção na sobrevivência do indivíduo pelas gerações.

**Figura 6***Solução factível obtida com os parâmetros encontrados*

Com os parâmetros alcançados pelo Algoritmo Genético foi possível obter uma solução factível para o problema. A figura 6, gerada com ARCGIS©, a partir dos dados disponíveis na base, e LaTeX para as estradas e vértices dos talhões, ilustra os talhões colhidos por período, os blocos de colheita formados, quais estradas devem ser usadas para escoamento da produção. O período fictício “P0” representa talhões que não devem ser colhidos, seja por baixa produtividade ou porque sua escolha, em algum período, afetaria o atendimento às restrições do modelo. Neste P0 também são representadas as estradas a serem abertas antes de iniciar a execução da colheita.

6 CONCLUSÃO

A correta definição dos parâmetros do modelo afeta profundamente a solução do problema, como foi perceptível durante os testes e execuções efetuados na presente pesquisa. Distintas soluções factíveis foram obtidas no processo, sendo priorizada a que resultou em maior lucro na exploração do empreendimento. Este estudo contribuiu, dentro da pesquisa, com a validação do modelo proposto como meio de obtenção de solução viável para o questionamento inicial. E este foi um importante passo dentro deste projeto pois a formulação inicial, com parâmetros arbitrados aleatoriamente não gerava soluções, gerando dúvidas se as causas da infactibilidade eram por problema de modelagem ou ajuste dos parâmetros.



O Algoritmo Genético mostrou-se uma técnica útil e de simples aplicação para a resolução destes parâmetros, possibilitando uma expansão no espaço de busca das soluções de forma organizada e eficaz. Pode-se avaliar, para pesquisas futuras, se convém o uso de *crossover* de dois pontos, ou outras formas de geração de novos indivíduos, bem como a adoção de outras técnicas heurísticas para esse ajuste, como *Simulated Annealing* ou algoritmos de inteligência coletiva. Outra possível continuidade do estudo, não contemplada neste momento, consiste na abordagem de uma efetiva redução nos parâmetros de distância (equações 9, 13 e 14) como possível classificação para as soluções, gerando uma clusterização dos blocos de colheita.

REFERÊNCIAS

- Arastou, A., Rabieyan, H., & Karrari, M. (2021). A novel pss-based online test procedure for parameter estimation of synchronous generator using the governor system. *IEEE Transactions on Energy Conversion*, 36(4), 3178–3187.
- Bayat, P., & Baghrarian, A. (2020). A novel self-tuning type-2 fuzzy maximum power point tracking technique for efficiency enhancement of fuel cell based battery chargers. *International Journal of Hydrogen Energy*, 45(43), 23275–23293.
- Chang, H., Lu, S., Sun, Y., Zhang, G., & Rao, L. (2023). Multi-objective optimization of liquid silica array lenses based on latin hypercube sampling and constrained generative inverse design networks. *Polymers*, 15(3).
- Chang, P., Bao, X., Meng, F., & Lu, R. (2023). Multi-objective pigeon-inspired optimized feature enhancement soft-sensing model of wastewater treatment process. *Expert Systems with Applications*, 215, 119193.
- Chen, J., Yuan, J., Li, Y., Zhang, Y., Yang, Y., & Feng, R. (2021). A malicious web page detection model based on svm algorithm: Research on the enhancement of svm efficiency by multiple machine learning algorithms. In *ACAI '20: International Conference on Algorithms, Computing and Artificial Intelligence* (Vol. 3). New York: Association for Computing Machinery.
- Chen, T., & Guestrin, C. (2016). XGBoost: A scalable tree boosting system. In *KDD '16: ACM SIGKDD International Conference on Knowledge Discovery and Data Mining* (Vol. 22). New York: Association for Computing Machinery.
- Gao, J., Shao, J., Feng, H., Lin, Y., & Qian, J. (2023). Multi-objective optimization of steam and water flow parameters in loose and condition processes. In *Asia Conference on Power, Energy Engineering and Computer Technology (PEECT)*. IEEE.
- Geng, K., Ye, C., & Liu, L. (2020). Research on multi-objective hybrid flow shop scheduling problem with dual resource constraints using improved memetic algorithm. *IEEE Access*, 8, 104527–104542.



- Ingram, Z. M., Scull, N. W., Schneider, D. S., & Lucius, A. L. (2021). Multi-start evolutionary nonlinear optimizer (MENOTR): A hybrid parameter optimization toolbox. *Biophysical Chemistry*, 279, 106682.
- Karna, S. K., & Sahai, R. (2012). An overview on Taguchi method. *International Journal of Engineering and Mathematical Sciences*, 1(1), 1-7.
- Karthikeyan, A., Natarajan, N., Somashekar, G., Zhao, L., Bhagwan, R., Fonseca, R., & Bansal, Y. (2023). SelfTune: Tuning cluster managers. In *USENIX Symposium on Networked Systems Design and Implementation (NSDI 23)* (p. 1097-1114).
- Kitchenham, B. (2004). *Procedures for performing systematic reviews*. Keele, UK: Keele University, 33(2004), 1-26.
- Li, G., & Kong, F. (2023). Current situation and strategy of sports equipment procurement based on improved ant colony optimization algorithm. In *Annual Flagship India Council International Subsections Conference (INDISCON)* (Vol. 4). IEEE.
- Liang, Q., Wang, W., & Wang, Y. (2024). Short-term power load forecasting model based on multi-strategy improved WOA optimized LSTM. *Applied Mathematics and Nonlinear Sciences*, 9(1).
- Liu, C., Chao, Y., Wang, L., Zhu, C., & Li, Q. (2024). Parameter optimization of SQCC-CVQKD based on genetic algorithm in the terahertz band. *Laser Physics Letters*, 21(5).
- Liu, E., Sun, L., & Anderson-Mcleod, A. (2023). Hybrid battery model parameter estimation and optimization using a two-step procedure and parameter sensitivity analysis. In *Industrial Electronics Society Annual On-Line Conference (ONCON)* (Vol. 2). IEEE.
- Liu, L., Zhuang, Y., & Gao, X. (2022). Malicious traffic detection based on GWO-SVM model. In *International Conference on Civil Aviation Safety and Information Technology (ICCASIT)* (Vol. 4). IEEE, 1252–1257.
- Ma, J., Li, C., & Zhang, G. (2022). Adaptive stochastic resonance-based processing of weak magnetic slippage signals of bearings. *Entropy*, 24(2).
- Mergos, P. E., & Sextos, A. G. (2019). Selection of earthquake ground motions for multiple objectives using genetic algorithms. *Engineering Structures*, 187, 414–427.
- Ngoo, C. M., Goh, S. L., & Likoh, J. (2022). Grey wolf optimizer for the nurse rostering problem. In *Control and System Graduate Research Colloquium (ICSGRC)* (Vol. 13). IEEE.
- Obata, T., & Kurahashi, S. (2024). Parameter estimation of macroeconomic agent-based models using evolutionary computation. In *ICAART* (Vol. 16, p. 205–212).
- Quevedo, J., Abdelatti, M., Imani, F., & Sodhi, M. (2021). Using reinforcement learning for tuning genetic algorithms. In *Genetic and Evolutionary Computation Conference Companion* (p. 1503–1507). New York: Association for Computing Machinery.
- Reeves, C. R. (2010). Genetic algorithms. In *Handbook of Metaheuristics* (p. 109–139).



- Shamami, N., Mehdizadeh, E., Yazdani, M., & Etebari, F. (2024). War game problem considering the mobility of weapons and targets. *Journal of Engineering Research*, 12(1), 214–225.
- Siddikov, I., Porubay, O., & Rakhimov, T. (2024). Synthesis of the neuro-fuzzy regulator with genetic algorithm. *International Journal of Electrical and Computer Engineering*, 14(1), 184–191.
- Tachiyoka, Y. (2022). Privacy preservation satisfying utility requirements based on multi-objective optimization. In *International Conference on Soft Computing and Intelligent Systems* (p. 1-4). IEEE.
- Tayyebi, S., Hajjar, Z., & Soltanali, S. (2023). Fuzzy modeling system based on GA fuzzy rule extraction and hybrid of differential evolution and tabu search approaches: Application in synthesis gas conversion to valuable hydrocarbons process. *Fuel*, 335, 126980.
- Toth, S. (2011). *Base de dados florestais*. Integrated Forest Management Lab. Disponível em: <http://ifmlab.for.unb.ca/fmos/datasets/PhyllisLeeper/>.
- Wang, L. (2022). Intelligent prediction method of construction cost based on GA-BP algorithm. In *International Conference on Intelligent Transportation, Big Data & Smart City (ICITBS)* (p. 142–147). IEEE.
- Wang, X., Chen, Y., Jin, J., & Zhang, B. (2022). Fuzzy-clustering and fuzzy network based interpretable fuzzy model for prediction. *Scientific Reports*, 12(1).
- Yang, H., Han, N., Li, D., Wang, J., Bo, Y., & Zheng, H. (2021). Effectiveness evaluation of fire control system based on improved PSO algorithm and LSSVM algorithm. In *International Conference on Cyber-Physical Social Intelligence (ICCSI)* (p. 1-6). IEEE.
- Yi, B., Zhan, Y., & Xu, J. (2024). Dynamic analysis and optimization of a novel dual-valve heave compensator for heavy lifting operations. *Ocean Engineering*, 309, 118528.
- Yin, S., Liu, Y., Gong, G., Lu, H., & Li, W. (2022). RLEPSO: Reinforcement Learning based Ensemble Particle Swarm Optimizer. In *International Conference on Algorithms, Computing and Artificial Intelligence* (Vol. 4). New York: Association for Computing Machinery.
- Yu, Z., Wang, Z., Bai, L., Chen, L., & Tao, J. (2021). Parameter optimization on Spark for particulate matter estimation. In *Workshop on Algorithm and Big Data* (p. 9–13). New York: Association for Computing Machinery.
- Zhang, W., & Hou, K. (2024). Hybrid intelligent algorithm and CAD secondary development technology in parameter optimization design of transmission gear set. *International Journal on Interactive Design and Manufacturing*.

APÊNDICE 3 – LETRAS E SÍMBOLOS USADOS NA MODELAGEM

A	\overline{A}_p	Área máxima permitida para a formação de um bloco de colheita
	A_p	Área mínima necessária para a formação de um bloco de colheita
B	B	Conjunto de todos os possíveis blocos a serem criados
	B^*	Conjunto de todos os possíveis blocos excetuado $b = 0$
E	E	Conjunto de estradas
	E_0	Conjunto das estradas pré-existentes
F	F	Conjunto de talhões da floresta
	F_{adj}	Conjunto de pares de talhões adjacentes. ($\subset F \times F$)
	F_i	Conjunto de talhões que são associados ao ponto i
N	N	Conjunto de nós do grafo
	N_O	Nós do grafo que são origem de estradas ($\subset N$)
	N_F	Nós do grafo que são encontro de estradas (fluxo) ($\subset N$)
	N_S	Nós do grafo que são saída da Malha Viária ($\subset N$)
	N_t	Nós do grafo que formam o talhão t ($\subset N$)
P	P	Conjunto de períodos do HP ($\subset P$)
	P^*	Períodos sem considerar $p = 0$
	P_p	Períodos do HP anteriores ao período p , se existirem, sem incluí-lo
S	S	Conjunto de sortimentos
V	V_{ijp}	Limite de viagens em e_{ij} no período p
a	a_t	Área do talhão t
b		Índice para blocos de colheita
d	d_{sp}	Demanda do sortimento s no período p
e	e_{ij}	Estrada que liga os nós i e j
h		Índice para blocos de colheita
i		Índice para nós do grafo
j		Índice para nós do grafo
k	k_{itp}	Variável inteira indicando a quantidade de veículos necessários no ponto i para atender o talhão t no período p
n	n_t	Idade do talhão t no início do HP
p		Índice para período
q		Capacidade de carga dos veículos da frota homogênea
r		Índice para talhões
s		Índice para sortimentos

Continua na próxima página

Continuação da página anterior

t		Índice para talhões
v	v_{tsp}	Valor presente líquido do total que venha a ser colhido no talhão t de cada sortimento s no período p
w	w_{ijp}	Variável binária indicando se a estrada e_{ij} foi <i>aberta</i> no período p
x	x_{tpb}	Variável binária indicando se a colheita do talhão t é realizada no período p no bloco de colheita b
y	y_{ijp}	Variável inteira indicando a quantidade de viagens realizadas na estrada e_{ij} no período p
z	z_{ijp}	Variável binária indicando se a estrada e_{ij} foi <i>mantida</i> no período p
β	β_{bp}	Variável binária indicando se o bloco b for gerado no período p
δ	δ_{tr}	Distância euclidiana entre os talhões t e r
ζ	ζ_{ijp}	Custo para manter aberta uma estrada que estava aberta no período anterior
η	η_t	Idade mínima de colheita do talhão t
κ	κ_p	Custo de carregamento e descarregamento de um veículo no período p
λ		Tolerância percentual de colheita em relação à demanda
ρ	ρ_s	Densidade média do sortimento s
σ		Percentual mínimo de atendimento à demanda para abertura de um novo bloco para um dado período
v	v_{tsp}	Volume estimado a ser colhido no talhão t de cada sortimento $s \in S$ no período $p \in P$
ω	ω_{ijp}	Custo para abertura de estrada de i para j no período p .
Δ	Δ_b	Distância euclidiana máxima que um talhão pode ficar de outro talhão no mesmo período e mesmo bloco
	Δ_a	Distância euclidiana máxima que um talhão pode ficar de outro talhão quando selecionados no mesmo período, mas em blocos diferentes
	Δ_c	Distância euclidiana máxima que um bloco pode ficar de outro bloco de períodos consecutivos
Υ	Υ_{bsp}	Volume colhido do sortimento s no período p em blocos anteriores ao bloco b
ε	ε_{tsp}	Número de viagens para transportar o volume do sortimento s caso o talhão t seja colhido no período p
φ	φ_{ij}	Custo do deslocamento por viagem percorrida de i para j

APÊNDICE 4 – MAPA DA INSTÂNCIA PHYLLIS LEEPER

