

UNIVERSIDADE FEDERAL DE MINAS GERAIS
Instituto de Ciências Agrárias
Mestrado em Ciências Florestais

Matheus Antunes Fonseca

Problema de Roteamento Veicular Aplicado ao Inventário Florestal

Montes Claros

2024

Matheus Antunes Fonseca

Problema de Roteamento Veicular Aplicado ao Inventário Florestal

Dissertação apresentada ao Mestrado em Ciências Florestais da Universidade Federal de Minas Gerais, como requisito parcial para a obtenção do título de Mestre em Ciências Florestais.

Orientador(a): Prof. Dr. Carlos Alberto Araújo Júnior

Montes Claros

2024

Fonseca, Matheus Antunes.

F676p Problema de roteamento veicular aplicado ao inventário florestal [manuscrito]/
2024 Matheus Antunes Fonseca. Montes Claros, 2024.
54 f.: il.

Dissertação (mestrado) - Área de concentração em Ciências Florestais.
Universidade Federal de Minas Gerais / Instituto de Ciências Agrárias.

Orientador: Carlos Alberto Araújo Júnior

Banca examinadora: Adriana Leandra de Assis, Gustavo Eduardo Marcatti.

Inclui referências: f. 31-34; 48-49

1. Logística – Florestas – Teses. 2. Levantamentos florestais – Teses. 3. Simulated
Annealing (Matemática) – Teses. I. Araújo Júnior, Carlos Alberto. II. Universidade
Federal de Minas Gerais. Instituto de Ciências Agrárias. III. Título.

CDU: 630

ELABORADA PELA BIBLIOTECA UNIVERSITÁRIA DO ICA/UFMG
Nádia Cristina Oliveira Pires / CRB-6/2781


ATA DE DEFESA DE DISSERTAÇÃO

Aos 30 dias do mês de setembro do ano de dois mil e vinte e quatro, às 14:00 horas, sob a Presidência do Professor Carlos Alberto Araújo Júnior, D. Sc. (Orientador – UFMG/ICA) e com a participação dos Professores Adriana Leandra de Assis, D. Sc. (UFMG/ICA) e Gustavo Eduardo Marcatti, D. Sc. (UFSJ), reuniu-se, presencialmente, a Banca de Defesa de Dissertação de **Matheus Antunes Fonseca**, aluno do Curso de Mestrado em Ciências Florestais. Após a avaliação do referido aluno, a Banca Examinadora procedeu à publicação do resultado da defesa da Dissertação intitulada: “**Problema de Roteamento Veicular Aplicado ao Inventário Florestal**”, sendo o aluno considerado **aprovado**. E, para constar, eu, Professor Carlos Alberto Araújo Júnior, Presidente da Banca, lavrei a presente ata que depois de lida e aprovada, será assinada por mim e pelos demais membros da Banca examinadora.


OBS.: O aluno somente receberá o título após cumprir as exigências do ARTIGO 74 do regulamento do Curso de Mestrado em Ciências Florestais, conforme apresentado a seguir:

Art. 74 – Para dar andamento ao processo de efetivação do grau obtido, o candidato deverá, após a aprovação de sua Dissertação e da realização das modificações propostas pela banca examinadora, se houver, encaminhar à secretaria do colegiado do Curso, com a anuência do orientador, no mínimo 3 (três) exemplares impressos e 1 (um) exemplar eletrônico da dissertação, no prazo de 60 (sessenta) dias.


Montes Claros, 30 de setembro de 2024.

Documento assinado digitalmente
 ADRIANA LEANDRA DE ASSIS
Data: 02/10/2024 10:03:33-0300
verifique em <https://validar.iti.gov.br>

Adriana Leandra de Assis
Membro

Documento assinado digitalmente
 GUSTAVO EDUARDO MARCATTI
Data: 07/10/2024 12:01:36-0300
verifique em <https://validar.iti.gov.br>

Gustavo Eduardo Marcatti
Membro

Documento assinado digitalmente
 CARLOS ALBERTO ARAUJO JUNIOR
Data: 02/10/2024 09:18:59-0300
verifique em <https://validar.iti.gov.br>

Carlos Alberto Araújo Júnior
Orientador

A Deus e aos meus pais Fábio e Cleovane.

OFEREÇO

À minha esposa Lucineia e à minha filha Sofia. Amo vocês!

DEDICO

AGRADECIMENTOS

Agradeço a Deus, que por intercessão de Nossa Senhora da Conceição Aparecida me concede forças para enfrentar as barreiras da vida e seguir em frente.

Aos meus pais Fábio e Cleovane, pela simplicidade, honestidade e exemplos de superação e amor. Aos meus irmãos Paulo Vitor e Sara, por serem presentes na minha vida. A minha afilhada Analu que me confortou em vários momentos, seja brincando, correndo atrás dos brinquedos, com seu jeitinho especial.

Ao Wellington de Almeida, meu gerente, por permitir a minha ausência em alguns momentos do trabalho, para que eu pudesse me dedicar à pós-graduação.

Agradeço à Universidade Federal de Minas Gerais – Instituto de Ciências Agrárias (UFMG/ICA) pela concessão da oportunidade de participar do programa de mestrado, o que permitiu o aprimoramento substancial dos meus conhecimentos acadêmicos.

Ao meu orientador, Carlos Alberto Araújo Júnior, por me apoiar nessa etapa, mesmo eu não podendo me dedicar integralmente à pós. É imperativo destacar e agradecer pelas preciosas orientações e apoio oferecidos pelo Professor Leandro Silva de Oliveira ao longo da pós.

Ao Laboratório de Pesquisa Operacional e Modelagem Florestal do Instituto de Ciências Agrárias pelo valioso amparo ao longo do meu mestrado.

Agradeço aos colegas e amigos do curso de pós-graduação, com especial menção a Pedro Vitor, pela amizade constante e pelos valiosos ensinamentos compartilhados.

Agradeço à Gelf Siderurgia S/A, especialmente ao departamento de inventário florestal, pela colaboração ao fornecer dados e orientações relacionados ao problema.

Agradeço à minha bela esposa Lucineia, pelo companheirismo, pelo amor e pela paciência em casa para que eu pudesse trabalhar nesta dissertação. Agradeço à minha filha Sofia, a mais pura demonstração de amor e carinho. Todo o tempo dispensado neste trabalho, é para lhes proporcionar um futuro melhor. AMO MUITO vocês duas!

“Não há lugar para a sabedoria onde não há paciência”
(Santo Agostinho).

RESUMO

A logística é essencial para o bom funcionamento da cadeia de suprimentos, englobando atividades como armazenagem e distribuição, transporte, compras, planejamento e gestão de qualidade. No setor florestal, a logística é particularmente crítica nas fases de colheita e transporte, porém, também é vital para as etapas preliminares, como o plantio e o manejo florestal. O inventário florestal desempenha um papel crucial ao fornecer dados para o planejamento dos plantios e para a estimativa da produção de biomassa. Uma administração eficiente das rotas de inventário é indispensável para minimizar custos operacionais e melhorar a eficácia das operações florestais, garantindo que as atividades sejam realizadas de forma otimizada e econômica. O objetivo principal deste estudo é implementar o algoritmo *Simulated Annealing* (SA) para aprimorar o planejamento das rotas de inventário florestal. A pesquisa busca avaliar como essa técnica pode reduzir a distância percorrida e o tempo de deslocamento das equipes de medição, contribuindo para uma gestão mais eficiente dos recursos e operações florestais. O estudo foi conduzido em talhões da GELF Siderurgia S.A., localizados na região de Itacambira. O algoritmo SA foi aplicado para otimizar o planejamento das rotas de inventário florestal, com o objetivo de melhorar a eficiência logística. Dados de campo foram meticulosamente coletados e analisados para validar o modelo proposto e verificar sua aplicabilidade e eficácia no contexto específico da pesquisa. A aplicação do SA resultou em uma redução significativa de 0,8% tanto na distância percorrida quanto no tempo de deslocamento das equipes. Estes resultados demonstram a eficácia do método SA em comparação com outras técnicas de otimização descritas na literatura, evidenciando sua capacidade de proporcionar melhorias substanciais nas operações logísticas. Os achados deste estudo confirmam que o algoritmo SA é uma ferramenta eficiente para a otimização logística no setor florestal. A performance do SA foi comparável e, em alguns casos, superior a métodos como *Particle Swarm Optimization* (PSO), Busca Tabu e *Bacterial Foraging Optimization* (BCO). Isso sugere que o SA pode ser uma escolha preferencial para problemas semelhantes de roteamento e planejamento logístico. A utilização do algoritmo SA no roteamento de inventários florestais mostrou-se altamente eficaz, resultando em uma redução significativa da distância e do tempo de deslocamento. A pesquisa contribui para o avanço das técnicas de planejamento e otimização na gestão de inventários florestais, oferecendo uma abordagem robusta que pode ser aplicada em diversos contextos e regiões. Esses resultados promovem uma gestão mais eficiente dos recursos florestais e estabelecem uma base sólida para futuras investigações e aplicações práticas da técnica.

Palavras-chave: inventário florestal; otimização logística; modelo de roteamento de veículos (PRV).

ABSTRACT

The logistics is essential for the effective functioning of the supply chain, encompassing activities such as warehousing and distribution, transportation, purchasing, planning, and quality management. In the forestry sector, logistics is particularly critical during the harvest and transportation phases; however, it is also vital for preliminary stages like planting and forest management. Forest inventory plays a crucial role by providing data for the planning of plantings and estimating biomass production. Efficient management of inventory routes is indispensable for minimizing operational costs and improving the effectiveness of forestry operations, ensuring that activities are carried out in an optimized and economical manner. The primary objective of this study is to implement the Simulated Annealing (SA) algorithm to enhance the planning of forest inventory routes. The research aims to evaluate how this technique can reduce the distance traveled and the time required for teams to move between locations, contributing to a more efficient management of forestry resources and operations. The study was conducted in plots of GELF Siderurgia S.A., located in the Itacambira region. The SA algorithm was applied to optimize the planning of forest inventory routes, with the goal of improving logistical efficiency. Field data were meticulously collected and analyzed to validate the proposed model and assess its applicability and effectiveness in the specific context of the research. The application of SA resulted in a significant reduction of 8% in both the distance traveled and the time required for teams to move. These results demonstrate the effectiveness of the SA method compared to other optimization techniques described in the literature, highlighting its ability to provide substantial improvements in logistical operations. The findings of this study confirm that the SA algorithm is an effective tool for logistical optimization in the forestry sector. The performance of SA was comparable to and, in some cases, superior to methods such as Particle Swarm Optimization (PSO), Tabu Search and Bacterial Foraging Optimization (BCO). This suggests that SA may be a preferred choice for similar routing and logistical planning problems. The use of the SA algorithm in forest inventory routing has proven to be highly effective, resulting in a significant reduction in both distance and travel time. The research contributes to the advancement of planning and optimization techniques in forest inventory management, offering a robust approach that can be applied in various contexts and regions. These results promote more efficient management of forest resources and establish a solid foundation for future investigations and practical applications of the technique.

Key words: forest inventory; logistical optimization; vehicle Routing Problem (VRP).

LISTA DE FIGURAS

Figura 1. Diagrama metodológico para geração de rotas para atividades de inventário florestal.....	38
Figura 2. Mapa de localização da região estudada.....	39
Figura 3. Fragmento de arquivo de instância para um problema com 41 locais e 5 dias de planejamento.....	41
Figura 4. Mapa da sequência de talhões visitados pela equipe (primeiro mapa) e mapa da sequência de talhões visitados pelo algoritmo SA (segundo mapa).....	46
Figura 5. Equipe na coleta dos tempos durante as medições.....	51
Figura 6. Equipe na medição de parcelas remedição	52
Figura 7. Equipe na medição de parcelas de instalação.....	53
Figura 8. Tela Restrições do Modelo.....	54

LISTA DE TABELAS

Tabela 1. Tempo médio de medição em parcelas de instalação e remedição, considerando interferência de vento, sub-bosque avançado e condições sem interferência.....	44
Tabela 2. Resultado encontrado da otimização do planejamento do inventário florestal através do modelo de roteamento de veículos.....	45
Tabela 3. Apresentação dos Resultado das 21 repetições.....	54

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

CD	- Centro de Distribuição
DAP	- Diâmetro à Altura do Peito
GPS	- Sistema de Posicionamento Global
IFC	- Inventário Florestal Contínuo
ILS	- Iterated Local Search
PCC	- Problema do Carteiro Chinês
PCV	- Problema do Caixeiro Viajante
PI	- Programação Inteira
PL	- Programação Linear
PLI	- Programação Linear Inteira
PRPVJT	- Problema de Roteamento Periódico de Veículos com Janela de Tempo
PRV	- Problema de Roteamento de Veículos
PRVJT	- Problema de Roteamento de Veículos com Janela de Tempo
SIG	- Sistema de Informações Geográficas

SUMÁRIO

1. INTRODUÇÃO	15
2. OBJETIVOS.....	19
2.1 Objetivo Geral.....	19
2.2 Objetivos Específicos	19
3. REVISÃO DE LITERATURA	20
3.1 Inventário Florestal	20
3.2 Planejamento do Inventário Florestal.....	21
3.3 Planejamento otimizado	22
3.4 Pesquisa Operacional	26
3.4.1 Programação Linear.....	26
3.4.2 Programação Linear Inteira	27
3.4.3 Problema do Caixeiro Viajante	28
3.4.4 Problema de Roteamento de Veículos.....	29
3.4.5 Problema de Roteamento de Veículos com Janelas de Tempo	30
4. REFERÊNCIAS	31
5. ARTIGO	35
5.1 Artigo - Problema de Roteamento Veicular Aplicado ao Inventário Florestal ..	35
6. CONCLUSÕES / CONSIDERAÇÕES FINAIS.....	49
ANEXOS.....	51

1. INTRODUÇÃO

O *Council of Supply Chain Management Professionals* (2010) fornece uma definição esclarecedora do termo "logística", sendo uma organização que promove a pesquisa e o intercâmbio de ideias na área de logística. Segundo essa organização, a logística é um processo que envolve o planejamento, implementação e controle eficiente do fluxo de produtos, armazenamento, serviços e informações associadas, desde o ponto de origem até o ponto de consumo, com o objetivo de atender às necessidades dos consumidores. Ao contrário de muitas outras definições encontradas na literatura, fica claro a partir desta que a logística abrange muito mais do que apenas mover mercadorias de um local para outro, incluindo o fornecimento de bens e serviços.

A logística é uma área que apresenta grandes perspectivas de crescimento e aperfeiçoamento contínuo. À medida que o mercado se torna cada vez mais competitivo, a eficiência logística se torna um diferencial crucial para as empresas (Ballou, 2004). Além disso, o papel da logística vai além do simples planejamento e implementação de processos. A logística envolve uma série de atividades interdependentes que precisam ser gerenciadas de forma coordenada para garantir a entrega eficaz de bens e serviços. O controle cuidadoso dessas atividades é fundamental para identificar possíveis falhas, ajustar estratégias e otimizar o desempenho global (Novaes, 2007).

A distância espacial entre o ponto de origem e o eventual consumidor de um bem ou serviço é um fator que influencia o processo de produção desse bem ou serviço. O papel da logística nesse processo é fornecer a esses bens e produtos mais valor para que possam competir no mercado. Conforme Novaes (2007), esse valor manifesta-se por meio do tempo e do lugar, ou seja, um bem de serviço ou produto só apresenta seu real valor quando se encontra disponível ao consumidor final no tempo e no lugar desejados pelo mesmo. Em toda a logística contemporânea, uma nova característica fundamental para a agregação de valor a esses bens ou serviços é a qualidade. Se o produto ou serviço for entregue ao consumidor na quantidade e no local desejado, mas não com a qualidade desejada, o processo logístico pode não ter sido bem-sucedido.

Dentre as principais funções logísticas esperadas estão a otimização e a racionalização do processo, a redução de custos e o atendimento ao consumidor final no prazo desejado. No Brasil, o desenvolvimento da indústria de logística ao lado das empresas ainda ocorre de forma velada. A dependência brasileira do modal rodoviário, o segundo modal mais caro no país, perdendo apenas para o aéreo, é um dos fatores que prejudicam o crescimento do setor. Cerca de 60% de toda carga transportada no

país é proveniente deste sistema. Somada a essa estatística está a escassez de investimentos em infraestrutura de estradas e em comunicação, dois pontos fundamentais para a geração da logística moderna (Wanke; Fleury, 2006).

No setor florestal, o uso da logística ocorre com maior ênfase nas etapas de colheita e transporte florestal, pois estas geram alto custo para as empresas. É essencial avaliar o impacto da logística em todo o processo de exploração da madeira, tendo em conta todas as estratégias necessárias ao longo do cultivo da floresta, não apenas no momento da exploração propriamente dita. As atividades que antecedem as fases de colheita e transporte, como plantio e manejo florestal, recebem pouca ou nenhuma atenção em termos de movimentação logística, como também é demonstrado nas atividades do setor agropecuário e exploração da flora nativas (Hegedus *et al.*, 2010).

O inventário florestal é um componente importante do manejo florestal, pois fornece dados quali-quantitativos sobre as florestas para fundamentar com mais precisão a tomada de decisões e melhorar o planejamento das atividades, fornecendo informações essenciais da área. Dentro do manejo, os inventários florestais são a fonte de dados para o planejamento adequado dos plantios, é onde são encontradas as informações das medições da altura total, idade de plantio e diâmetro à altura do peito (DAP), que são dados básicos para as estimativas da produção de volume e biomassa (Silva *et al.*, 2012; Silva; Môra; Angeli, 2017).

A tomada de decisão em relação aos recursos florestais deve ser baseada em informações detalhadas obtidas através de inventários, como o estoque de madeira e produtos não madeireiros, além dos dados sobre taxas de crescimento, mortalidade e recrutamento da floresta. Segundo Sanquetta *et al.* (2014), uma das tarefas mais críticas no planejamento de um inventário florestal é a automatização das atividades tanto no campo quanto no escritório. Eles ressaltam que a adoção de técnicas que permitem a comparação entre o planejamento e a execução real melhora continuamente o processo de planejamento.

Uma parte significativa do custo total de um inventário está relacionada à coleta de dados, o que torna essencial um planejamento prévio cuidadoso. Embora existam vários artigos com a aplicação de técnicas de pesquisa operacional no vasto campo do manejo florestal (Belavenutti *et al.*, 2018), quando se analisa o manejo florestal brasileiro observa-se escassez de estudos nessa área. Isso pode ser considerado uma lacuna a ser preenchida, uma vez que a realidade brasileira é diferente da realidade do resto do mundo, seja em termos de produtividade das florestas (Campos *et al.*, 2016; Venegas-

González *et al.*, 2016), seja pela representatividade na produção industrial do país. A complexidade dessas atividades pode ser um desafio para a aplicação dessas técnicas, mas estudos na área têm o potencial de ampliar seu uso e eficácia.

A otimização da logística no planejamento do inventário florestal ainda é uma prática relativamente nova e pouco explorada. Isso se deve, em parte, à complexidade e às particularidades envolvidas na coleta e análise de dados florestais. Diversas pesquisas têm sido conduzidas para abordar e superar esses desafios, destacando-se os trabalhos de Marcatti (2013), Haddad (2015), Meneguzzi (2011) e De Barros Junior *et al.* (2020).

Marcatti (2013) e Haddad (2015) concentram-se no problema do roteamento de veículos no contexto do inventário florestal, mas suas abordagens são bastante específicas. Marcatti (2013) foca na otimização do percurso de veículos para a coleta de dados em áreas florestais de difícil acesso, levando em consideração fatores como a topografia e as condições das estradas. Haddad (2015), por outro lado, investiga a eficiência dos roteiros de coleta em ambientes florestais complexos, enfatizando a redução do tempo e do custo de deslocamento.

Meneguzzi (2011) e De Barros Junior *et al.* (2020) apresentam uma perspectiva mais abrangente. Meneguzzi (2011) explora a integração de técnicas de otimização de logística com tecnologias de geoprocessamento para melhorar a precisão e a eficiência do inventário florestal. A pesquisa de Meneguzzi (2011) incorporou modelos de simulação e algoritmos avançados para otimizar as rotas de coleta e o planejamento das atividades de campo. De Barros Junior *et al.* (2020) ampliam essa abordagem ao considerar a combinação de diferentes métodos de coleta e análise de dados, bem como a utilização de ferramentas de análise espacial para otimizar a logística e a gestão dos inventários florestais. Esses estudos oferecem uma visão mais abrangente e integrada, possibilitando uma aplicação mais ampla das técnicas de otimização no planejamento do inventário florestal.

Diante do cenário descrito, o presente estudo visou explorar a viabilidade da aplicação do modelo Problema de Roteamento de Veículos (PRV) como uma solução inovadora para a automatização das rotas utilizadas pelas equipes de campo durante as medições de parcelas florestais. Motivado pela crescente necessidade de otimizar o tempo e os recursos envolvidos nessas atividades, que frequentemente enfrentam desafios impostos por condições geográficas adversas e limitações logísticas, o estudo propõe a implementação do modelo PRV para alcançar múltiplos objetivos. A expectativa

é reduzir significativamente o tempo de deslocamento entre as parcelas, aumentar a eficiência operacional e melhorar a precisão das medições.

Além disso, a automatização prevista tem o potencial de minimizar erros humanos, aprimorar a segurança das equipes em campo e promover uma gestão mais sustentável dos recursos disponíveis. Para desenvolver um sistema de roteamento eficaz, a investigação considerou fatores cruciais como a topografia da área de estudo, as condições das estradas e a configuração das parcelas. A integração desses elementos é fundamental para criar um modelo de PRV que atenda de forma específica às necessidades das operações de campo, proporcionando soluções práticas e eficientes para os desafios logísticos enfrentados.

2. OBJETIVOS

2.1 Objetivo Geral

Verificar a viabilidade de aplicação do modelo de roteamento de veículos (PRV) para otimização das rotas utilizadas pelas equipes de campo nas medições de parcelas no inventário florestal.

2.2 Objetivos Específicos

- Validar modelo de otimização para Problema de Roteamento de Veículos aplicado ao Planejamento de Inventários Florestais;
- Gerar programações mais agrupadas por meio da redução da distância entre talhões.

3. REVISÃO DE LITERATURA

3.1 Inventário Florestal

O levantamento florestal é um componente importante do manejo florestal, pois fornece dados quali-quantitativos sobre as florestas para fundamentar com mais precisão a tomada de decisões e melhorar o planejamento das atividades, fornecendo informações essenciais da área. Dentro do manejo, os inventários florestais são a fonte de dados para o planejamento adequado da produção, é onde são encontradas as informações das medições da altura total, idade de plantio e DAP, que são dados básicos para os cálculos para estimar a produção de biomassa (Silva *et al.*, 2012; Silva; Môra; Angeli, 2017).

Um pré-requisito para realizar o inventário florestal é o planejamento da coleta de dados. Este planejamento consiste em alocar unidades amostrais (parcelas) de área fixa ou variável em áreas florestais. Geralmente são mensuradas as variáveis de diâmetro e altura, que possibilitam o estudo do crescimento diamétrico e volumétrico, para em seguida inferir para toda população florestal (Yamamoto *et al.*, 2019).

Os inventários florestais destinados ao uso sustentável podem ser classificados em dois tipos principais. O Inventário Florestal Contínuo é realizado periodicamente e visa acompanhar o crescimento da floresta e projetar o volume de madeira no médio e longo prazo, utilizando métodos de amostragem estatística para medir e avaliar parcelas de floresta com uma intensidade amostral pré-estabelecida, cujos resultados são extrapolados para a área total a ser manejada. Já o Inventário Florestal Pré-corte tem como objetivo determinar com precisão o estoque de madeira nos compartimentos de manejo, o que é essencial para o planejamento da colheita (Urbano *et al.*, 2018).

Os inventários florestais eram executados dentro de padrões metodológicos e tecnológicos simples. Com o passar do tempo e a evolução tecnológica, passou-se a utilizar ferramentas sofisticadas de apoio. Dentre estas, pode ser citada a utilização de fotografias aéreas, de imagens (satélite, sensores aerotransportados e vídeo), a utilização do Sistema de Posicionamento Global (GPS) e do Sistema de Informações Geográficas (SIG), assim como o desenvolvimento da computação, envolvendo toda a tecnologia da informação para processamento e análise dos dados levantados (Sanquetta *et al.*, 2014).

De acordo com Mendonça (2006), os objetivos do inventário florestal devem considerar que o levantamento tem como finalidade fornecer informações relevantes para a tomada de decisões relacionadas ao planejamento, controle e uso dos recursos

florestais, bem como à sua conservação e/ou recuperação. Esses objetivos podem ser estabelecidos de acordo com diferentes finalidades, tais como: elaboração de um plano de manejo florestal; avaliação do desenvolvimento da floresta em termos de dinâmica de crescimento e produtividade presente e futura; avaliação do potencial do sítio em uma determinada região; avaliação dos danos causados por incêndios, pragas ou doenças; formulação de políticas de abastecimento e expansão industrial; análise e previsão da demanda e suprimento de produtos florestais e criação de unidades de conservação, entre outras. (Sanquetta *et al.*, 2014).

3. 2 Planejamento do Inventário Florestal

O planejamento florestal é um componente vital para a gestão eficiente dos recursos florestais, envolvendo a definição de metas de produção para períodos específicos e levando em conta variáveis cruciais como previsões de mercado (preços e demanda), bem como o estoque e os recursos disponíveis (Gomide, 2009). Essa prática é estruturada de maneira hierárquica, englobando três níveis distintos: o estratégico, que se foca no longo prazo e estabelece a visão e os objetivos gerais da gestão florestal; o tático, que abrange o médio prazo e desenvolve planos e estratégias para atingir as metas delineadas; e o operacional, que lida com o curto prazo e é responsável pela execução das atividades e operações diárias necessárias (Rodrigues, 2001).

No contexto do planejamento tático, operacional e estratégico, o inventário florestal desempenha um papel fundamental. Ele fornece as ferramentas necessárias para o manejo e a produção florestal, permitindo uma gestão mais informada e eficaz. A realização de inventários florestais pode variar em termos de detalhamento e frequência, e falhas nesse processo podem levar a prejuízos financeiros e operacionais significativos. Portanto, a prática de realizar inventários periodicamente é crucial para o desenvolvimento de modelos de crescimento e produção, a condução de pesquisas e o planejamento da exploração dos recursos florestais. Erros na elaboração e execução desse planejamento podem resultar em perdas consideráveis, impactando a viabilidade e a sustentabilidade das operações florestais.

Para ilustrar o processo de planejamento de inventários florestais, considere uma área de floresta composta por povoamentos homogêneos, subdivididos em talhões. Estes talhões são parcelas específicas onde são plantadas mudas com características semelhantes, como espécie, clone, espaçamento, data de plantio e data de colheita. A rotação dos talhões pode variar de quatro a sete anos, e a colheita é realizada conforme as necessidades e o planejamento da empresa (Moreira; Oliveira, 2017). Durante o ciclo

de rotação florestal, é essencial coletar informações detalhadas sobre o povoamento sem a necessidade de medir cada árvore individualmente em um talhão.

Para alcançar essa precisão, as equipes de inventário instalam parcelas amostrais em pontos estratégicos dentro do talhão, permitindo a coleta de dados representativos que são posteriormente extrapolados para a área total utilizando modelos estatísticos (Moreira; Oliveira, 2017). A determinação do número apropriado de parcelas é crucial para garantir a exatidão dos dados obtidos, e essa quantidade pode variar conforme a atividade a ser realizada no talhão e a variabilidade do tamanho das áreas (Meneguzzi, 2011). Nessa perspectiva, um planejamento cuidadoso e a execução precisa do inventário florestal são fundamentais para assegurar a eficácia das operações e a sustentabilidade dos recursos florestais. Os componentes do custo de inventário, que incluem principalmente mão-de-obra e deslocamento, reforçam a importância dessa abordagem detalhada, pois ambos são fatores de custo significativos nas operações de campo. A otimização do deslocamento, assim como a organização eficiente das equipes, torna-se essencial para minimizar esses custos, justificando a relevância deste trabalho para melhorar a viabilidade econômica do inventário em larga escala.

3.3 Planejamento otimizado

Em trabalho realizado na empresa Fibria, De Barros Junior *et al.* (2020) adaptaram o problema de roteamento periódico de veículos com janela de tempo. Os métodos de solução utilizados foram o método exato por meio do *software* CPLEX e a meta-heurística ILS (*Iterated Local Search*). Utilizaram um modelo adaptado do modelo proposto por Cordeau *et al.* (2001) e citado por Nguyen *et al.* (2014), para o Problema de Roteamento Periódico de Veículos com Janela de Tempo (PRPVJT). O PRPVJT é uma variação do PRVJT. Nesse modelo, foram realizadas adaptações quanto ao uso de uma única garagem (todos os veículos começam e terminam sua rota na mesma garagem).

Os resultados da modelagem do problema contribuíram de forma eficaz, uma vez que toda a programação de rotas estabelecidas para cada equipe e em cada dia de planejamento foi obtida. Além da definição das rotas, também foram estabelecidos os horários de saída e chegada de cada equipe nos talhões e na fábrica. Os experimentos computacionais demonstraram que a meta-heurística teve um bom desempenho em relação aos resultados descobertos pelo solucionador CPLEX. Avanços na metodologia foram feitos em relação ao trabalho proposto por Meneguzzi (2011), principalmente na organização das coletas diárias, ou seja, o planejamento das atividades de campo em

turnos específicos que permitem uma coleta eficiente e contínua dos dados ao longo do dia. Esse refinamento na logística diária assegura uma distribuição mais equilibrada das tarefas entre as equipes, reduzindo deslocamentos e aumentando a produtividade. Além disso, foi adotada uma metodologia capaz de produzir soluções viáveis para problemas em escalas extremamente altas, como em inventários florestais de grande extensão.

O objetivo do estudo de Marcatti (2013) foi desenvolver metodologias para otimização do acesso e caminhamento às parcelas de inventário florestal, bem como implementá-las em um ambiente com interface gráfica integrada a um sistema de informações geográficas. Para isso, foi proposto um método em duas etapas. A primeira etapa consiste na identificação da entrada e do caminho até a primeira parcela. Na segunda etapa, realiza-se a otimização do caminhamento entre parcelas.

A otimização do acesso às parcelas foi baseada no algoritmo do vizinho mais próximo, que determina os pontos da estrada mais próximos a cada parcela. O problema do caminhamento entre as parcelas foi formulado como um problema do caixeiro-viajante (PCV), com a imposição da malha viária no processo de otimização. Essa abordagem visa minimizar a distância total percorrida e o tempo gasto. O problema foi resolvido via formulação de programação linear inteira e otimizado pelo algoritmo *cutting-plane*. Os resultados obtidos foram comparados com os resultados obtidos pelo método aproximativo do vizinho mais próximo, na tentativa de simular as atividades realizadas intuitivamente pelo executor em campo.

Para os experimentos, foram consideradas bases de dados espaciais compostas da localização de 80 parcelas de inventário distribuídas em 15 talhões e da rede de estradas local. A metodologia de acesso às parcelas otimiza o caminhamento entre a estrada e as parcelas de inventário florestal, e sua implementação computacional possibilita a automatização da tarefa. Além disso, a integração da malha viária no modelo permite uma análise mais realista das condições de campo. A eficiência da abordagem foi avaliada em diferentes cenários, levando em conta variáveis como a densidade da malha viária e a distribuição das parcelas.

Marcatti (2013) destaca o aumento da eficiência tanto no planejamento do inventário quanto em sua execução. Em relação à metodologia de caminhamento entre as parcelas a serem inventariadas, os resultados mostraram a capacidade de otimização do modelo, visto que a solução exata se mostrou em média 17% superior à solução aproximada. Esse ganho de eficiência se traduz em economias significativas de tempo e recursos, além de melhorar a precisão do inventário florestal, pois a otimização reduz

deslocamentos desnecessários e minimiza o risco de falhas ou lacunas na coleta de dados. Com trajetos mais precisos e bem definidos, é possível garantir que todas as parcelas amostrais sejam visitadas de forma consistente e completa, assegurando a qualidade e representatividade dos dados coletados. A comparação entre os métodos destaca a importância de utilizar abordagens exatas para problemas complexos de logística e planejamento. Esses resultados sublinham a relevância de técnicas avançadas de otimização no contexto do manejo florestal, onde a eficiência operacional pode impactar diretamente a sustentabilidade e a rentabilidade das operações. O uso de algoritmos como o *cutting-plane* e o vizinho mais próximo oferece uma base sólida para futuras pesquisas e aplicações em diferentes áreas da gestão de recursos naturais. A metodologia desenvolvida pode ser adaptada para outros contextos, como a otimização de rotas em logística urbana ou rural, mostrando a versatilidade e aplicabilidade dos modelos de otimização.

Já o trabalho de Haddad (2015) objetivou avaliar a viabilidade da aplicação de um modelo de roteamento via Programação Linear Inteira (PLI), visando melhorar o planejamento do inventário florestal urbano da cidade de Belo Horizonte - MG de forma que minimizasse as distâncias percorridas pelas equipes de inventário. Para isso, vários fatores foram levados em consideração, tais como: a quantidade e a distribuição espacial das árvores a serem inventariadas; as ruas e caminhos disponíveis para locomoção das equipes; o número de equipes e o número de membros por equipe, entre outros.

Nesse estudo, os veículos foram substituídos pelas equipes e os locais pelas ruas, onde estão presentes as árvores a serem inventariadas. O objetivo do modelo utilizado foi minimizar as distâncias a serem percorridas pelas equipes, de forma a aumentar o rendimento e diminuir o tempo gasto na realização do inventário em um lote e, desta forma, melhorar o planejamento e execução do inventário florestal urbano.

O modelo matemático empregado neste estudo teve como base um modelo da literatura para o problema do carteiro chinês (PCC). Na formulação, foi considerado o uso de variáveis de decisão inteiras, via programação linear inteira. No modelo descrito por Haddad (2015), além do método exato, foi proposta a meta-heurística *Simulated Annealing* para resolução do roteamento, na tentativa de boas soluções em um tempo inferior ao método exato.

Com o objetivo de minimizar o custo de deslocamento entre os pontos, os resultados obtidos por meio do modelo de PLI proporcionou uma melhora de 6,36% em relação ao método tradicional realizado de forma empírica. A meta-heurística *Simulated*

Annealing obteve um bom desempenho, já que seu tempo de processamento foi 7.200 vezes menor para obtenção de uma solução viável a 1,87% do valor encontrado pela PLI.

O modelo de roteamento de veículos aplicado ao planejamento do inventário florestal proposto por Meneguzzi (2011) é baseado no modelo de Toth e Vigo (2000) utilizado no PRVJT. O objetivo dessa pesquisa foi de propor um modelo capaz de programar as atividades de inventário para um horizonte de um ano. Em cada atividade é necessário que seja obedecida a flexibilidade quanto a data de visita em relação ao plantio do povoamento. O povoamento é escolhido uma única vez no horizonte planejado para que seja possível obter uma melhor dispersão espacial diária. O modelo também permite que seja considerado o número de equipes disponíveis na empresa.

Para tal estudo, foi selecionada a programação do ano de 2009, que apresentava um total de 1288 medições (pontos). Durante o desenvolvimento da pesquisa, foram encontradas dificuldades tais como: tamanho do problema e número excessivo de variáveis. Desta forma, a complexidade de solução para esse tipo de problema influenciou na escolha de um estudo de caso menor. Optou-se, então, por apresentar o modelo a partir de sete cenários que caracterizam de forma sintética o problema de roteamento de veículos no planejamento de inventários florestais. O modelo foi executado considerando um período de planejamento de apenas oito dias, contemplando 13 medições.

O estudo comparou diferentes cenários de planejamento, levando em consideração a dispersão espacial das medições, e verificou que um planejamento que não considera essa característica gera programações mensais menos agrupadas e com maior distância total percorrida pelas equipes. Já os cenários que consideram a dispersão espacial geraram programações mais otimizadas, com menor distância total percorrida pelas equipes. Foi proposto um modelo de pesquisa operacional que visa minimizar a distância total percorrida pelas equipes, e os resultados demonstraram que o uso dessa técnica pode gerar programações mais eficientes e próximas do melhor cenário.

A aplicação de técnicas que utilizem critérios espaciais no planejamento do inventário florestal pode reduzir o deslocamento das equipes dentro do mês e aumentar seu rendimento médio, resultando em uma redução de custo unitário da parcela medida. A redução de custo pode chegar a 7% quando o rendimento é aumentado em uma parcela a mais medida por dia, e até 20% quando o acréscimo no rendimento envolve três parcelas.

3. 4 Pesquisa Operacional

3.4.1 Programação Linear

A programação linear (PL) é uma ferramenta fundamental na otimização de recursos, sendo amplamente utilizada para resolver problemas que envolvem a melhor forma de atribuir e distribuir recursos limitados entre várias tarefas. Andrade (2015) define a PL como um método para planejar e alocar recursos de maneira eficiente. Colin (2007) complementa essa definição ao afirmar que o objetivo da PL é encontrar a alocação ótima desses recursos finitos. A simplicidade e a eficácia da PL têm contribuído para sua popularidade em diversas áreas, especialmente na pesquisa operacional (PO) e na computação científica.

A programação linear tornou-se uma técnica padrão na PO devido à sua aplicabilidade e à facilidade de implementação em computadores. Hillier e Lieberman (2006) destacam a ampla difusão da PL na computação científica, evidenciando sua importância e utilidade. Gao e Lu (2021) atribuem o sucesso da PL à simplicidade de seus modelos e à facilidade com que podem ser solucionados utilizando técnicas programáveis. Um exemplo notável é o algoritmo Simplex, proposto por Dantzig em 1947, que foi o primeiro algoritmo eficiente para resolver problemas de PL, revolucionando a área e permitindo a resolução de problemas cada vez mais complexos.

Com o desenvolvimento de novos algoritmos, a programação linear expandiu sua capacidade de abordar problemas variados e de maior complexidade. Luenberger e Ye (2008) ressaltam que a vasta literatura sobre PL demonstra sua aplicabilidade em uma gama diversificada de problemas reais. A PL é usada em questões dietéticas, produção e alocação de recursos, agendamento de tarefas e roteamento de veículos, entre outros. A evolução contínua dos métodos de solução e a adaptação a novas demandas consolidam a PL como uma ferramenta essencial para a otimização e o planejamento eficiente de recursos em diversas áreas.

A aplicabilidade da programação linear vai além do campo acadêmico, impactando diretamente diversas indústrias e setores. A capacidade de modelar e resolver problemas complexos de forma eficiente permite que empresas otimizem seus processos, reduzam custos e melhorem a produtividade. A versatilidade da PL em lidar com diferentes tipos de problemas a torna indispensável em campos como logística, produção, gestão de projetos e até mesmo na formulação de políticas públicas. Assim, a PL não só contribui para a teoria da otimização, mas também oferece soluções práticas e eficientes para desafios do mundo real, demonstrando seu valor e relevância contínua.

3.4.2 Programação Linear Inteira

A programação linear inteira (PLI) é uma extensão da programação linear (PL) que se aplica a problemas onde as variáveis de decisão precisam assumir valores inteiros. A divisibilidade, uma característica fundamental da PL, permite que as variáveis assumam qualquer valor fracionário. No entanto, muitos problemas práticos exigem que as variáveis sejam inteiras para fazerem sentido, como destacado por Hillier e Lieberman (2006). Quando a integridade das variáveis é o único obstáculo para a resolução de um problema via PL, nos deparamos com a programação inteira (PI). Essa adaptação da PL é crucial para resolver problemas em que a integralidade das variáveis é essencial.

A distinção entre PL e PLI reside na presença de pelo menos uma restrição de integralidade nas variáveis de decisão, conforme caracterizado por Loesch e Hein (2009). A PLI pode ser classificada em duas categorias: pura e mista. Na PLI pura, todas as variáveis devem ser inteiras, enquanto na PLI mista, apenas algumas variáveis precisam ser inteiras, permitindo maior flexibilidade no modelo. Essa diferenciação é importante para adaptar a modelagem matemática às necessidades específicas de cada problema, garantindo que as soluções sejam práticas e aplicáveis ao mundo real.

Além das categorias pura e mista, um tipo específico de PLI que se destaca na pesquisa operacional é a programação com variáveis binárias (0-1). Essas variáveis incorporam instruções de decisão do tipo sim ou não, conforme destacado por Hillier e Lieberman (2006). A PLI binária é especialmente útil em problemas de tomada de decisão, onde escolhas discretas precisam ser feitas, como na alocação de recursos, planejamento de projetos e roteamento de veículos. As variáveis binárias facilitam a modelagem de problemas complexos de decisão, proporcionando soluções claras e práticas.

A importância da PLI na pesquisa operacional e em aplicações práticas não pode ser subestimada. Ela permite que problemas reais, muitas vezes complexos e com múltiplas restrições, sejam modelados de maneira precisa e eficiente. A PLI é amplamente utilizada em diversas áreas, incluindo logística, produção, finanças e engenharia, onde a necessidade de soluções inteiras é crítica. A capacidade de resolver problemas com restrições de integralidade e variáveis binárias torna a PLI uma ferramenta poderosa para otimização e planejamento, ajudando organizações a tomar decisões mais informadas e eficazes.

Em resumo, a programação linear inteira é essencial para resolver problemas de otimização onde a integralidade das variáveis é crucial. A distinção entre PLI pura e

mista, bem como o uso de variáveis binárias, permite uma modelagem flexível e precisa de problemas complexos. A PLI não só amplia as capacidades da PL tradicional, mas também oferece soluções práticas para uma ampla gama de aplicações no mundo real, destacando sua importância contínua na pesquisa operacional e na prática empresarial.

3.4.3 Problema do Caixeiro Viajante

De acordo com Oliveira (2015), a história do Problema do Caixeiro Viajante (PCV) está associada a um caixeiro viajante que precisava passar por várias cidades apenas uma vez e retornar à cidade de origem, percorrendo o caminho mais curto possível. Os estudos sobre o PCV se intensificaram a partir dos anos 50, quando novos conceitos e métodos para resolver o problema começaram a surgir. Esse problema é emblemático na teoria da otimização combinatória e continua a ser amplamente estudado devido à sua complexidade e aplicabilidade prática. A necessidade de encontrar rotas eficientes faz do PCV um desafio interessante tanto do ponto de vista teórico quanto prático.

Goldbarg e Luna (2005) destacam que o PCV é frequentemente aplicado a problemas de roteamento, representando trajetos entre diferentes pontos, como cidades ou clientes. Um exemplo histórico importante é o ciclo hamiltoniano, que homenageia William Rowan Hamilton e surgiu no jogo "*Around the World*" em 1857. Nesse jogo, o objetivo é encontrar uma rota que visite todos os pontos de um dodecaedro exatamente uma vez e retorne ao ponto de partida. Esse conceito é diretamente aplicável ao PCV, onde a rota deve ser otimizada para minimizar a distância total percorrida.

Para Palhares, Palhares e Araújo (2019), o problema do caixeiro viajante é essencialmente uma questão de roteirização, em que o objetivo é passar por cada ponto uma única vez e retornar ao ponto inicial. Valeri (2019) destaca que o PCV é particularmente relevante em situações com muitos clientes (pontos) e um único ponto de partida, como em empresas de logística e distribuição. Nessas situações, encontrar a melhor rota é crucial para otimizar a economia de recursos e tempo, resultando em economias significativas e melhor serviço ao cliente. A otimização do PCV pode levar a melhorias substanciais na eficiência operacional de uma empresa.

Oliveira (2015) ressalta três características importantes do PCV: sua aplicabilidade prática em grande escala, a facilidade de combinação com outros problemas matemáticos e a precisão na resolução de situações complexas. Essas propriedades tornam o PCV um modelo relevante na área de otimização combinatória, pois pode ser aplicado em diversas indústrias, desde logística até planejamento urbano e redes de comunicação. A capacidade de adaptar e combinar o PCV com outros modelos

matemáticos permite a solução de problemas ainda mais complexos e específicos, aumentando sua utilidade e impacto.

Como visto, o problema do caixeiro viajante é um dos problemas clássicos da otimização combinatória, com ampla aplicabilidade prática e teórica. Desde suas origens históricas até suas aplicações modernas, o PCV continua a desafiar pesquisadores e profissionais, proporcionando soluções eficientes para problemas de roteirização e logística. A capacidade de encontrar rotas otimizadas não só economiza recursos, mas também melhora significativamente a eficiência operacional, tornando o PCV uma ferramenta indispensável em diversas áreas.

3. 4. 4 Problema de Roteamento de Veículos

O PRV foi abordado pela primeira vez em Dantzig e Ramser (1959) e pode ser considerado como uma generalização do PCV com a introdução de condições adicionais. Cordeau *et al.* (2002) define a versão clássica do PRV da seguinte maneira. Seja $G = (V, A)$ um grafo, onde $V = \{v_0, v_1, \dots, v_n\}$ é o conjunto de vértices e $A = \{(v_i, v_j) : v_i, v_j \in V, i \neq j\}$ é o conjunto de arcos.

O vértice v_0 representa o centro de distribuição (CD), enquanto os demais vértices representam os clientes a serem atendidos. Com A são associadas uma matriz de custos c_{ij} e uma matriz de tempos de viagens t_{ij} . Se estas matrizes são simétricas, o que é o caso mais comum, então o padrão é definir o PRV em um grafo não direcionado $G = (V, E)$ onde $E = \{(v_i, v_j) : v_i, v_j \in V, i < j\}$ é um conjunto de arestas.

Cada cliente tem uma demanda não negativa (q_n) e um tempo de serviço (t_s). Uma frota de K veículos idênticos de capacidade Q é atribuída ao CD. O número de veículos é conhecido com antecedência ou tratado como uma variável de decisão. Nesse contexto, o PRV consiste em designar um conjunto de, no máximo, m rotas de entrega e/ou coleta de forma que: (i) cada rota inicia e termina no CD; (ii) cada cliente é visitado exatamente uma vez por exatamente um veículo; (iii) a demanda total de cada rota não exceda Q ; (iv) a duração total de cada rota (incluindo os tempos de viagem e atendimento) não exceda um limite pré-definido D ; (v) o custo total da rota é minimizado.

O PRV consiste em projetar rotas de veículos de forma a minimizar o custo total, cada uma começando e terminando na garagem garantindo que cada local seja visitado exatamente uma vez e a demanda total de qualquer rota não exceda a capacidade do veículo que a atende (Laporte *et al.*, 2000). De forma objetiva, consiste na determinação de rotas otimizadas e que serão usadas por uma frota de veículos situados em uma ou mais garagens, para atender a um conjunto de locais.

Para Goldberg e Luna (2005), os PRV estão entre os mais complexos da área de otimização combinatória. Embora seja um dos mais estudados na literatura, é uma categoria de problema que apresenta um grande número de variações. Devido ao grande número de variáveis, a diversidade de restrições e objetivos envolvidos, é necessário realizar uma cuidadosa taxonomia para um melhor entendimento desse tipo de problema.

3. 4. 5 Problema de Roteamento de Veículos com Janelas de Tempo

Solomon (1987) foi o primeiro autor a abordar o PRVJT. Ele ressaltou que, na presença das janelas de tempo, o roteamento total e os custos de programação incluem não apenas as distâncias totais de viagem e seus custos associados, mas também os custos do tempo de espera. Esses custos ocorrem quando um veículo chega muito cedo ao cliente ou quando o veículo é carregado ou descarregado.

Além disso, Solomon (1987) considera que o PRVJT surgiu como uma área importante para tratar complicações realistas e generalizações do modelo básico de roteamento. Isso ocorre porque as janelas de tempo são uma característica natural em problemas enfrentados por organizações empresariais que operam em horários fixos. Alguns exemplos dados pelo autor incluem entregas bancárias, entregas postais, coleta de lixo industrial e roteamento de ônibus escolar.

Por sua vez, Miranda (2011) define o PRVJT como a generalização do problema de roteamento de veículos, associando a cada cliente um período no qual algum veículo deve começar a atendê-lo. Esse intervalo é chamado de janela de tempo. O objetivo primário do problema é minimizar o número de veículos, e o objetivo secundário é minimizar a distância total percorrida, ou seja, o tempo total de viagem. O autor também destaca a existência de problemas em que as janelas de tempo podem ser violadas mediante o pagamento de penalidades, uma classe conhecida como *Soft Time Windows*. Quando essa violação não é permitida, a classe é denominada *Hard Time Windows*.

4. REFERÊNCIAS

ANDRADE, E. L. **Introdução à pesquisa operacional: métodos e modelos para análise de decisões**. 5ª ed. Rio de Janeiro: LTC, 2015. 646 p.

BALLOU, R. H. **Gerenciamento da cadeia de suprimentos: planejamento, organização e logística empresarial**. 4ª ed. Porto Alegre, RS: Boockman, 2004

BELAVENUTTI, P.; ROMERO, C.; DIAZ-BALTEIRO, L. A critical survey of optimization methods in industrial forest plantations management. **Scientia Agricola**, Piracicaba, v. 75, n. 3, p. 239- 245, maio/jun. 2018.

CAMPOS, O. C.; MUNHOZ, J. S. B.; ALVARES, C. A.; CARNEIRO, R. L.; MATTOS, E. M.; FERREZ, A. P.; STAPE, J. L. Meteorological seasonality affecting individual tree growth in forest plantations in Brazil. **Forest Ecology and Management**, Amsterdã, v. 380, p. 149-160, 15 nov. 2016.

COLIN, E. C. **Pesquisa operacional: 170 aplicações em estratégia, finanças, logística, produção, marketing e vendas**. 2ª ed. Rio de Janeiro: LTC, 2007. 528 p.

CORDEAU, J. F.; GENDREAU, M.; LAPORTE, G.; POTVIN, J. Y.; SEMET, F. A guide to vehicle routing heuristics. **Journal of the Operational Research Society**, v. 53, 2002.

COUNCIL OF SUPPLY CHAIN MANAGEMENT PROFESSIONALS. **Supply chain management: a logistics perspective**. St. Louis: CSCMP, 2010. 300 p

DANTZIG, G. B; RAMSER, R.H. The Truck Dispatching Problem Management. **Science**, n. 6, p.80, 1959.

DE BARROS JUNIOR, A. A.; RODRIGUES, M. V.; SOUZA, A. L.; LIMA, A. R. Meta-heurística ILS para o problema de roteamento no planejamento do inventário florestal. In: ABREU, V. H. **Engenharia de Produção: produtividade e competitividade**. 1. ed. São Paulo: Editora, 2020. v. 20, p. 21-35.

GAO, Zunhai; LU, Hongxia. Otimização de rotas logísticas com base na otimização aprimorada do enxame de partículas. **Journal of Physics: Conference Series**, v. 1995, 2021. 3ª Conferência Internacional sobre Modelagem Computacional, Simulação e Algoritmo (CMSA2021), 4-5 jul. 2021, Xangai, China. DOI: 10.1088/1742-6596/1995/1/012044.

GOLDBARG, M. C.; LUNA, H. P. L. **Otimização Combinatória e Programação Linear: modelos e algoritmos**. 2ª ed. Rio de Janeiro: Campus, 2005. 518 p.

GOMIDE, L. R. **Planejamento florestal espacial**. 2009. 180 f. Tese (Doutorado em Engenharia Florestal) Universidade Federal do Paraná, Curitiba, 2009.

HADDAD, H. M. D. **Roteamento otimizado no inventário florestal das árvores de Belo Horizonte**. 2015. 63 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Florestal). Programa de Pós-Graduação em Engenharia Florestal, Universidade Federal de Lavras, Lavras, 2015.

HEGEDUS, C. E. N. *et al.* Logística e o Setor Florestal. In: CHICHORRO, J. F. **Tópicos em Ciências Florestais**. Alegre: Suprema, cap. 7, p. 177-204, 2010.

HILLIER, F. S.; LIEBERMAN, G. J. **Introdução à Pesquisa Operacional**. 8ª ed. São Paulo: McGraw-Hill Brasil, 2006.

LAPORTE, G.; GENDREAU, M.; POTVIN, J. Y.; SEMET, F. Classical and modern heuristics for the vehicle routing problem. **International Transactions in Operational Research**, v. 7, n 4-5, p. 285-300, 2000.

LUENBERGER, D. G.; YE, Y. **Programação linear e não linear**. 3ª ed. Nova York: Springer, 2008.

MARCATTI, G. E. **Caminhamento ótimo para acesso às parcelas de inventário florestal**. 2013. 32f. Dissertação (Mestrado em Ciência Florestal). Programa de Pós-Graduação em Ciência Florestal, Universidade Federal de Viçosa, Viçosa, 2013.

MENDONÇA, A. R. **Avaliação de uma metodologia para otimização do volume de toras comerciais de *Eucalyptus* sp. em função da qualidade do fuste**. 2006. 90f. Dissertação (Mestrado em Produção Vegetal). Universidade Federal do Espírito Santo, Alegre, 2006.

MENEGUZZI, C. C. **Modelo de roteamento de veículos aplicado ao planejamento do inventário florestal**. 2011. 94f. Dissertação (Mestrado em Ciências Florestais). Programa de Pós-Graduação em Ciências Florestais, Universidade Federal do Espírito Santo, Jerônimo Monteiro, 2011.

MIRANDA, D. M. **Metaheurísticas para as variantes do problema de roteamento de**

veículos: capacitado, com janela de tempo e com tempo de viagem estocástico. 2011. 195f. Dissertação (Mestrado em Engenharia de Produção). Universidade Federal de Minas Gerais, Belo Horizonte, 2011.

MOREIRA, J.; OLIVEIRA, E. B. de. **Importância do setor florestal brasileiro com ênfase nas plantações florestais comerciais.** Colombo: Embrapa Florestas, 2017.

NOVAES, A. G. **Logística e Gerenciamento da Cadeia de Distribuição.** 3ª ed. Rio de Janeiro: Campus Elsevier, 2007

OLIVEIRA, A. F. M. A. **Extensões do problema do caixeiro viajante.** Dissertação (Mestrado em Matemática). 2015. 89f. Faculdade de Ciências e Tecnologia da Universidade de Coimbra, Coimbra, 2015.

PALHARES, R. A.; PALHARES, R. A.; ARAUJO, M. C. B. Roteirização de veículos: aplicação do problema do caixeiro viajante em uma distribuidora de laticínios. **Pesquisa Operacional Para O Desenvolvimento**, v. 11, n. 2, p. 105–126, 2019.

RODRIGUES, F. L. **Metaheurística e sistema de suporte à decisão no gerenciamento de recursos florestais.** 2001. 25f. Tese (Doutorado em Engenharia Florestal). Curso de Pós-graduação em Engenharia Florestal, Universidade Federal de Viçosa, Viçosa, MG, 2001.

SANQUETTA, C. A.; DALLA-CORTE, A. P.; RODRIGUES, A. L.; WATZALAWICK, L. F. **Inventários florestais: Planejamento e execução.** 3.ed. Curitiba: Multi-graphic gráfica e editora, 2014, 406 p.

SILVA, G. F.; CURTO, R. de A.; SOARES, C. P. B.; PIASSI, L. de C. Avaliação de métodos de medição de altura em florestas naturais. **Revista Árvore**, Viçosa, v. 36, n. 2, p. 341-348, 2012.

SILVA, G. F.; MÔRA, R.; DE ANGELI, R. Simulação de erros na medição de altura de árvores inclinadas com aparelhos baseados em princípios trigonométricos. **Nativa**, Sinop, v.5, n.5, p.372-379, 2017.

SOLOMON, M. M. Algorithms for the vehicle routing and scheduling problems with time window constraints. *Operations Research*, v. 35, 1987.

TOTH, P; VIGO, D. **Vehicle Routing: Problems, Methods, and Applications.** Society

for Industrial and Applied Mathematics (SIAM), 2015.

URBANO, E.; DO AMARAL MACHADO, S.; FIGUEIREDO FILHO, A., SANQUETTA, C. R.; ZEA-CAMAÑO, J. O D. Modelagem do volume do povoamento para espécies secundárias em florestas nativas de bracinga na região metropolitana de Curitiba, Paraná, Brasil. **Revista Bosque**, v. 39, n. 2, p. 227–237, 2018.

VALERI, T. F. **Aplicabilidade do problema do caixeiro viajante na roteirização de visitas de representantes de empresas aos clientes**. 2019. 29f. Trabalho de Conclusão de Curso (Bacharelado em Administração). Universidade Federal de Uberlândia, Uberlândia, 2019.

VENEGAS-GONZÁLEZ, A.; CHAGAS, M. P.; ANHOLETTO JÚNIOR, C. R.; ALVARES, C. A.; ROIG, F. A.; TOMAZELLO FILHO, M. Sensitivity of tree ring growth to local and large-scale climate variability in a region of Southeastern Brazil. **Theoretical and applied climatology**, v. 123, p. 233- 245, 2016.

WANKE, P.; FLEURY, P. F.. **Transporte de cargas no Brasil: estudo exploratório das principais variáveis relacionadas aos diferentes modais e às suas estruturas de custos. Estrutura e dinâmica do setor de serviços no Brasil**. Brasília: Ipea, p. 409-464, 2006.

YAMAMOTO, M. K.; BERBERT, M; GASPAROTO, E. A.G.; SHINZATO, E. **Desenvolvimento de uma aplicação SIG web e mobile para o planejamento e a coleta de dados de inventário florestal**. In: Conferência de desenvolvimento de uma aplicação sig web e mobile para o planejamento e a coleta de dados de inventário florestal, 2019, Santos, São Paulo. Anais... Santos: [s.n.], 2019.

5. ARTIGO

5.1 Artigo - Problema de Roteamento Veicular Aplicado ao Inventário Florestal

Este artigo foi elaborado conforme normas da revista **Forest Ecology and Management**.

Problema de Roteamento Veicular Aplicado ao Inventário Florestal

Matheus Fonseca ^a, Carlos Júnior ^a, Rayssa Machado ^a

^a Laboratório de Laboratório de Pesquisa Operacional e Modelagem Florestal, Centro de Pesquisas em Ciências Agrárias, Universidade Federal de Minas Gerais, Montes Claros, Minas Gerais, Brasil.

*Both authors contributed equally to this article

Autor correspondente: Matheus Fonseca
E-mail: matheus.fonseca1991@gmail.com

RESUMO

Este estudo aborda a otimização das rotas de inventários florestais utilizando o algoritmo *Simulated Annealing* (SA). A gestão eficiente das rotas de inventário florestal é crucial para reduzir os custos operacionais e melhorar a eficiência das operações. O principal objetivo da pesquisa é implementar o método SA para otimizar as rotas de inventários florestais e avaliar sua eficácia na redução da distância percorrida e do tempo de deslocamento das equipes de medição. A pesquisa foi conduzida em talhões da GELF Siderurgia S.A., na região de Itacambira, onde o algoritmo SA foi aplicado para planejar e otimizar as rotas de inventário. Os dados de campo foram coletados e analisados para validar o modelo proposto. Os resultados indicaram uma redução de -0,8% na distância percorrida e de -0,8% no tempo de deslocamento, demonstrando a eficácia do método em comparação com outras técnicas de otimização relatadas na literatura. Os achados deste estudo corroboram a eficiência do algoritmo SA em otimizações logísticas no setor florestal, mostrando-se comparável e, em alguns casos, superior a métodos como PSO, Busca Tabu e BCO. A aplicação do algoritmo SA no problema de roteamento veicular para inventários florestais mostrou-se eficiente, resultando em uma significativa redução tanto na distância percorrida quanto no tempo de deslocamento. A pesquisa contribui para o avanço das técnicas de planejamento e otimização na gestão de inventários florestais, podendo ser aplicada em diferentes contextos e regiões.

Palavras-chave: Otimização de Rotas. Inventário Florestal. *Simulated Annealing*.

INTRODUÇÃO

O *Council of Supply Chain Management* (2010) fornece uma definição esclarecedora do termo "logística", destacando que envolve o planejamento, implementação e controle eficiente do fluxo de produtos, armazenamento, serviços e informações associadas, desde o ponto de origem até o ponto de consumo, para atender às necessidades dos consumidores. Esta definição evidencia que a logística abrange muito mais do que apenas mover mercadorias de um local para outro, incluindo o fornecimento de bens e serviços. Com o mercado se tornando cada vez mais competitivo, a eficiência logística se torna um diferencial crucial para as empresas (Ballou, 2004). Além do planejamento e implementação, a logística envolve atividades interdependentes que precisam ser gerenciadas de forma coordenada para garantir a entrega eficaz de bens e serviços (Novaes, 2007).

A logística no setor florestal é especialmente crítica durante as etapas de colheita e transporte florestal, pois essas fases geram altos custos para as empresas. É essencial avaliar o impacto da logística em todo o processo de exploração da madeira, levando em conta todas as estratégias necessárias ao longo do cultivo da floresta. As atividades que antecedem as fases de colheita e transporte, como plantio e manejo florestal, geralmente recebem pouca atenção em termos de movimentação logística, como também ocorre no setor agropecuário e na exploração da flora nativa (Hegedus *et al.*, 2010). O inventário florestal é um componente importante do manejo florestal, fornecendo dados quali-quantitativos sobre as florestas para fundamentar a tomada de decisões e melhorar o planejamento das atividades (Silva *et al.*, 2012; Silva; Môra; Angeli, 2017).

A tomada de decisão em relação aos recursos florestais deve ser baseada em informações detalhadas obtidas através de inventários, como o estoque de madeira e produtos não madeireiros, além dos dados sobre taxas de crescimento, mortalidade e recrutamento da floresta. Segundo Sanquetta *et al.* (2014), uma das tarefas mais críticas no planejamento de um inventário florestal é a automatização das atividades tanto no campo quanto no escritório. Eles ressaltam que a adoção de técnicas que permitem a comparação entre o planejamento e a execução real melhora continuamente o processo de planejamento. A complexidade das atividades de inventário pode ser um desafio para a aplicação de técnicas de pesquisa operacional, mas estudos na área têm o potencial de ampliar seu uso e eficácia (Campos; Leite, 2017).

Diversas pesquisas têm sido conduzidas para abordar e superar esses desafios logísticos no setor florestal, destacando-se os trabalhos de Marcatti (2013), Haddad (2015), Meneguzzi (2011) e De Barros Junior *et al.* (2020). Marcatti (2013) e Haddad (2015) concentram-se no problema do

roteamento de veículos no contexto do inventário florestal, enquanto Meneguzzi (2011) e De Barros Junior *et al.* (2020) apresentam uma perspectiva mais abrangente. Meneguzzi (2011) explora a integração de técnicas de otimização de logística com tecnologias de geoprocessamento para melhorar a precisão e a eficiência do inventário florestal. De Barros Junior *et al.* (2020) consideram a combinação de diferentes métodos de coleta e análise de dados, bem como a utilização de ferramentas de análise espacial para otimizar a logística e a gestão dos inventários florestais.

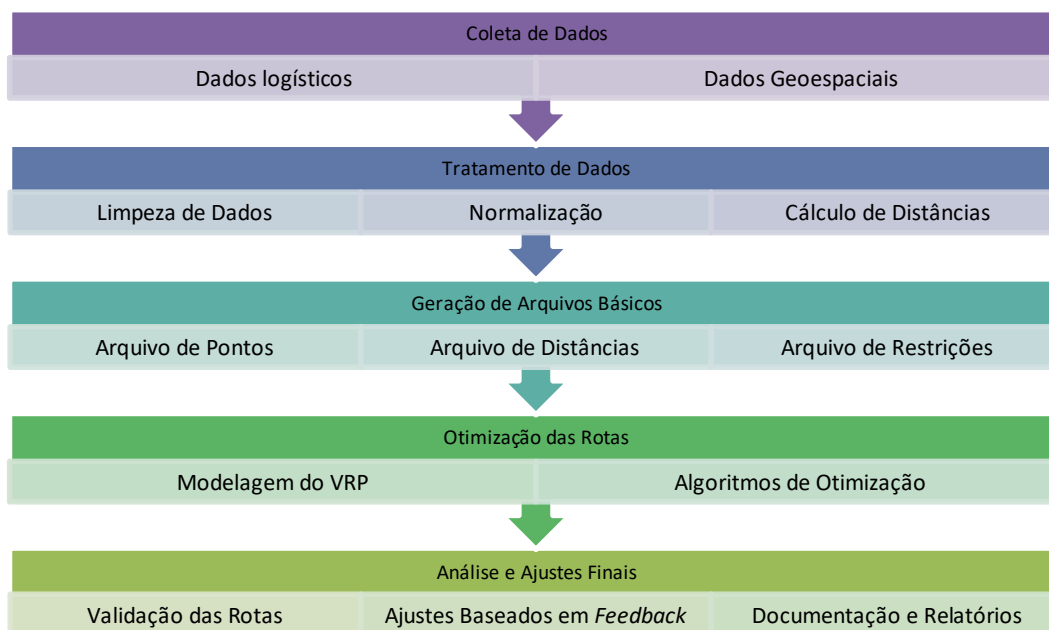
Diante do cenário descrito, o presente estudo visou explorar a viabilidade da aplicação do modelo PRV como uma solução inovadora para a automatização das rotas utilizadas pelas equipes de campo durante as medições de parcelas florestais. Motivado pela crescente necessidade de otimizar o tempo e os recursos envolvidos nessas atividades, que frequentemente enfrentam desafios impostos por condições geográficas adversas e limitações logísticas, o estudo propõe a implementação do modelo PRV para alcançar múltiplos objetivos. A expectativa é reduzir significativamente o tempo de deslocamento entre as parcelas, aumentar a eficiência operacional e melhorar a precisão das medições.

Além disso, a automatização prevista tem o potencial de minimizar erros humanos, aprimorar a segurança das equipes em campo e promover uma gestão mais sustentável dos recursos disponíveis. Para desenvolver um sistema de roteamento eficaz, a investigação considerou fatores cruciais como a topografia da área de estudo, as condições das estradas e a configuração das parcelas. A integração desses elementos é fundamental para criar um modelo de PRV que atenda de forma específica às necessidades das operações de campo, proporcionando soluções práticas e eficientes para os desafios logísticos enfrentados.

MATERIAL E MÉTODOS

Os procedimentos metodológicos (Figura 1) essenciais para conduzir o planejamento do inventário florestal com base no modelo de roteamento de veículos incluem: bases de dados, tratamento dos dados, geração de arquivos básicos e otimização.

Figura 1 - Diagrama metodológico para geração de rotas para atividades de inventário florestal



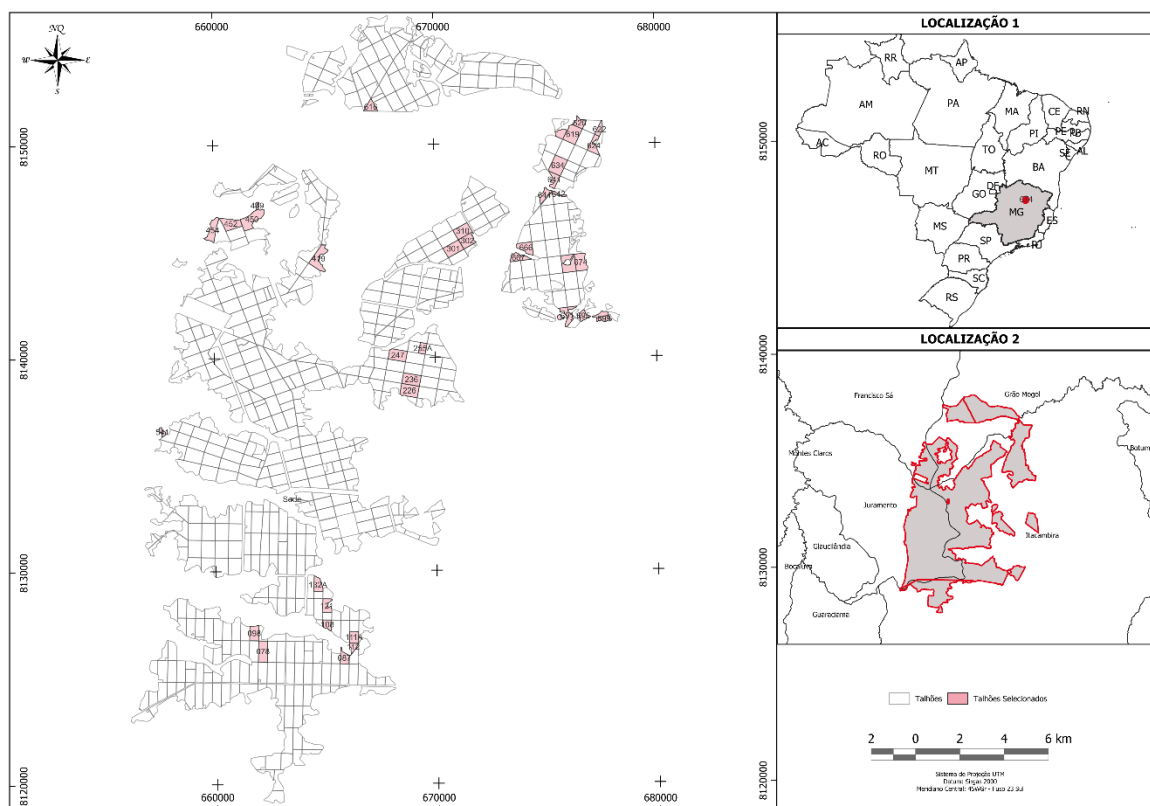
Fonte: Do autor, 2024.

A seguir, estão apresentados os detalhes sobre cada um dos passos indicados no fluxograma da Figura 1:

a) Base de Dados

Para execução deste estudo foram utilizados os dados das operações de inventário florestal da empresa GELF Siderurgia S/A, localizada no município de Itacambira, região norte do estado de Minas Gerais. Apresenta clima Aw, segundo a classificação de Köppen-Geiger, caracterizada por um clima tropical úmido de savana – cerrado – com estação seca no inverno. As temperaturas médias variam entre 20,4° e 24,7°C, precipitação média anual de 1000 mm e altitude de 1080 m (Figura 2).

Figura 2 - Mapa de localização da região estudada



Fonte: Do Autor, 2024.

A área de estudo deste trabalho é de 1.031,42 ha, distribuída em quarenta e um talhões, onde foram alocadas 42 parcelas de inventário. Fazem parte dos dados fornecidos, três arquivos, no formato *shapefile*, que contêm informações sobre talhões (poligonais), localizações das parcelas (pontos) e arquivo de estradas com as velocidades de tráfego em cada trecho e os tempos de medições das parcelas (linear). Além destes arquivos, foram também fornecidos pela empresa dados no formato de planilha, que correspondem à programação do inventário florestal realizado no ano de 2023. E os critérios de seleção dos talhões foram estabelecidos com base na programação semanal da equipe no período de coleta dos dados.

b) Tratamento dos dados

Dado o conjunto de dados mencionado, uma etapa de pré-processamento foi conduzida para criar uma base de dados para ser utilizada como entrada para o modelo de otimização. Para estabelecer um novo conjunto de feições e redes, essa base foi organizada levando em conta informações geográficas. Para modelar a rede de transportes, foi criado um *Network Dataset* que serve de base para o *QGIS 3.16*.

Os dados contidos na planilha de programação (Programação 2023) foram integrados aos dados disponíveis nos arquivos *shapefile* (Talhões e Parcelas). Uma vez que foram fornecidas

informações da programação para determinar os intervalos de janela de tempo (períodos em que uma equipe pode realizar o inventário em um determinado talhão).

A utilização da "Plataforma de integração" facilitou a classificação dos dados de inventário por tipo. Neste estudo foram considerados IFC_I (inventário florestal contínuo com implantação de parcelas) e IFC_R (inventário florestal contínuo com remedição de parcelas). Para essa classificação, seguindo o planejamento estabelecido em 2023, foram levados em conta os registros de plantio disponíveis no arquivo de Programação 2023, abrangendo um período de 5 dias.

Na regional Itacambira existem duas equipes disponíveis para atendimento das demandas de inventário florestal. Cada equipe é composta por um encarregado, que é responsável pela orientação da equipe e por garantir a correta realização da atividade, e um auxiliar, responsável pela medição da circunferência à altura do peito (CAP) e altura das árvores nas parcelas.

c) Geração dos arquivos básicos

Durante esta fase, os arquivos foram reintegrados ao *QGIS*. Notavelmente, o arquivo *shapefile* de parcelas agora contém dados pertinentes às distâncias e à duração das medições. Em alguns talhões, identificou-se a necessidade de duas visitas devido à quantidade de parcelas a serem medidas, o que impossibilitava a finalização das atividades em um único dia de trabalho. Nessas situações, o tempo total de medição foi contabilizado considerando as visitas adicionais realizadas para concluir as medições, de forma a assegurar que todos os dados fossem devidamente mensurados para a análise posterior. Foi adicionado no arquivo o ponto que representa a sede administrativa, que foi estabelecido no modelo como escritório. Os tempos de medição foram registrados por meio de um dispositivo GPS de navegação, o qual a equipe carregava na mochila ao longo do percurso, permitindo a coleta precisa da rota percorrida e dos respectivos tempos de deslocamento.

Tendo em conta que cada talhão oferece uma ou mais parcelas, e que era necessário definir uma delas como ponto de chegada do veículo, optou-se por selecionar a parcela mais antiga. Para cada uma destas parcelas, gerou-se um ponto vizinho na estrada, definido como ponto de acesso à parcela. Esse ponto foi fundamental para que fossem geradas as matrizes de deslocamento, visto que o ponto referente à parcela se localiza fora da estrada e dentro do polígono talhão.

Todos estes dados foram incorporados em um *Geodatabase*, que serviu de base para a ferramenta *V.net.allpairs* para gerar as matrizes de deslocamento. Uma matriz de deslocamento inclui, para cada origem (*i*), destino (*j*), e o tempo de deslocamento, medido em minutos, entre *i* e *j*. A velocidade média de movimentação das equipes foi fixada em 50 km/h. A menor rota possível foi considerada, apesar das várias possibilidades de rotas entre os talhões.

processo de recozimento térmico dos metais, onde um material é aquecido e, em seguida, resfriado de forma controlada para minimizar defeitos em sua estrutura cristalina, atingindo assim um estado de energia mínima.

Essa abordagem é aplicada em problemas de otimização combinatória complexos, onde a busca pela solução ótima pode ser difícil devido à presença de múltiplos mínimos locais. Ao invés de seguir uma busca determinística, o SA permite a exploração do espaço de soluções de forma probabilística, com a possibilidade de aceitar soluções subótimas temporariamente, a fim de escapar de mínimos locais e, assim, encontrar uma solução globalmente ótima.

O processo de otimização por SA envolve a definição de uma função objetivo, que avalia a qualidade das soluções candidatas, e um parâmetro de temperatura, que controla a probabilidade de aceitar soluções piores conforme o algoritmo avança. À medida que a temperatura diminui, o algoritmo se torna mais seletivo, convergindo para a melhor solução encontrada.

No contexto deste estudo, a metaheurística SA foi utilizada para encontrar uma boa solução para sequência de rotas que minimizasse o tempo total gasto pelas equipes de campo nas medições de parcelas florestais, considerando as restrições e variáveis envolvidas no processo.

e) Formulação do Modelo Matemático

O problema de roteamento veicular (PRV) é um clássico em otimização, sendo largamente estudado em virtude da sua complexidade e da aplicação prática das soluções geradas. O problema em questão consiste na indicação de quais talhões devem fazer parte de uma determinada rota, similar ao problema abordado em Rodizi *et al.* (2021). Considera-se que a equipe estará hospedada em um local pré-definido (escritório), sairá pela manhã para medir as parcelas e deverá retornar ao ponto de partida antes que o limite de tempo diário seja extrapolado. As parcelas não visitadas em um dia deverão constar em uma outra rota, a qual será realizada em dia posterior.

Outras considerações assumidas para modelagem do problema de roteamento foram:

(1) existe uma quantidade de dias disponíveis para realização dos trajetos de mensuração, podendo-se gerar quantos trajetos forem necessários. Cada trajeto representa um dia de trabalho; com uma carga horária de oito horas por dia.

(2) a restrição de capacidade do veículo está relacionada ao tempo disponível para que o mesmo seja utilizado em um único dia;

(3) cada talhão deve ser visitado uma única vez, fazendo parte de uma única rota;

(4) ao visitar um determinado local, o veículo permanecerá parado pelo tempo necessário para que o trabalhador faça suas atividades de mensuração. Tal tempo pode ser entendido como a demanda do local e é subtraído da capacidade do veículo;

(5) o tempo gasto para deslocamento entre os locais também é descontado da capacidade do veículo;

(6) o veículo deve retornar ao ponto de origem antes do término do tempo disponível.

Assim, o modelo matemático para o PRV deste trabalho pode ser descrito como:

$$\text{Min} \sum_{i=0}^n \sum_{j=0}^n X_{ij} C_{ij} \quad (\text{eq 1})$$

$$\sum_{i=0}^n X_{ik} = 1 \quad \forall k = 1, \dots, n \quad (\text{eq 2})$$

$$\sum_{j=1}^n X_{kj} = 1 \quad \forall k = 1, \dots, n \quad (\text{eq 3})$$

$$\sum_{j=1}^n X_{0j} = \sum_{j=1}^n X_{j0} \quad (\text{eq 4})$$

$$q_k = T_k + \sum_{i=0}^n T_{ik} X_{ik} + T_{k0} \quad \forall k = 1, \dots, n \quad (\text{eq 5})$$

$$\sum_{i=0}^n F_{ik} - \sum_{j=0}^n F_{kj} = q_k \quad \forall k = 1, \dots, n \quad (\text{eq 6})$$

$$F_{ik} \leq Q X_{ij} \quad \forall i, j = 0, 1, \dots, n \quad (\text{eq 7})$$

$$X_{ij} \in \{0, 1\} \quad \forall i, j \quad (\text{eq 8})$$

em que: X_{ij} é a variável de decisão binária, sendo igual a 1 quando o arco (i, j) é percorrido pelo veículo e 0 caso contrário; C_{ij} é a distância entre os locais i e j (em km); o índice k indica o local atual, i corresponde ao local anterior ao local k e o índice j ao local posterior ao local k ; o depósito (ou ponto de partida dos veículos) é representado pelo valor 0 para os índices i e j ; n é o total de locais ou vértices no grafo; T_k representa o tempo necessário para permanência no local k (em min); q representa a demanda de tempo para medição no local k , considerando o tempo de trânsito (ida e volta) e tempo de permanência (em min); T_{ik} é o tempo de deslocamento do local anterior até o local atual (em min); Q é a capacidade do veículo, correspondendo ao tempo disponível entre saída e retorno ao ponto de origem da rota (em min).

O modelo considerado busca minimizar a distância total (em km) percorrida para visitação de todos os pontos de interesse (eq 1). A primeira e a segunda restri es (eq 2 e eq 3) garantem que cada ponto de visita o diferente da origem seja assinalado a uma única rota (ou dia de visita o). A terceira restri o (eq 4) faz com que as rotas se iniciem no depósito e terminem no mesmo local. A eq 5 calcula o tempo necessário para visita o de um local qualquer, sendo composta pelo tempo demandado para permanência do trabalhador, tempo da rota da origem até o local k e tempo de retorno para o depósito. A restri o representada pela eq 6 garante que o tempo

disponível pelo trabalhador seja alocado para visitação de cada local. Eq 7 indica que o tempo disponível deve ser maior que o tempo que será gasto até o próximo local e a eq 8 garante a variável de decisão como sendo binária.

RESULTADOS E DISCUSSÃO

Avaliação do desempenho das equipes na realização do inventário

Foi observado que o tempo gasto na medição das parcelas variou significativamente em função da presença de vento ou de povoamentos com sub-bosque avançado (Tabela 1). Em situações de vento, o tempo de medição das parcelas praticamente dobrou, evidenciando a influência desse fator no rendimento das equipes. Entre as variáveis dendrométricas, a medição da altura foi a mais afetada, devido à utilização de clinômetros, instrumentos que realizam medições indiretas e, portanto, são mais suscetíveis a erros em condições adversas.

Estudos anteriores também demonstram que o tempo necessário para realizar medições em inventários florestais é sensível a fatores ambientais. Pesquisas realizadas por Gao e Lu (2021) e Madhavi *et al.* (2023) apontam que o vento, assim como a complexidade do sub-bosque, pode aumentar o tempo de medição em até 50%, corroborando os achados deste estudo. Dessa forma, a variabilidade temporal observada no presente estudo está de acordo com as tendências identificadas na literatura, reforçando a necessidade de considerar esses fatores no planejamento das atividades de campo.

Tabela 1 - Tempo médio de medição em parcelas de instalação e remedição, considerando interferência de vento, sub-bosque avançado e condições sem interferência

Parcela	Duração da Medição das parcelas (minutos)		
	Sem interferência	Sub-bosque avançado	Vento
Instalação	20	40	45
Remedição	12	32	37

Fonte: Do Autor, 2024.

Resultados da otimização

A aplicação do modelo PRV através do método SA demonstrou uma melhoria na eficiência do planejamento logístico do inventário florestal. A tabela abaixo apresenta os resultados comparativos entre o método SA e o planejamento realizado pelas equipes de campo:

Tabela 2 - Resultado encontrado da otimização do planejamento do inventário florestal através do modelo de roteamento de veículos

Tipo	Distância (km)	Tempo Deslocamento (min)	Tempo Total (min)
Simulated Annealing			
(SA)	468,73	575,47	1.660,47
Equipe	472,45	580,16	1.665,16
Diferença	-0,8%	-0,8%	-0,3%

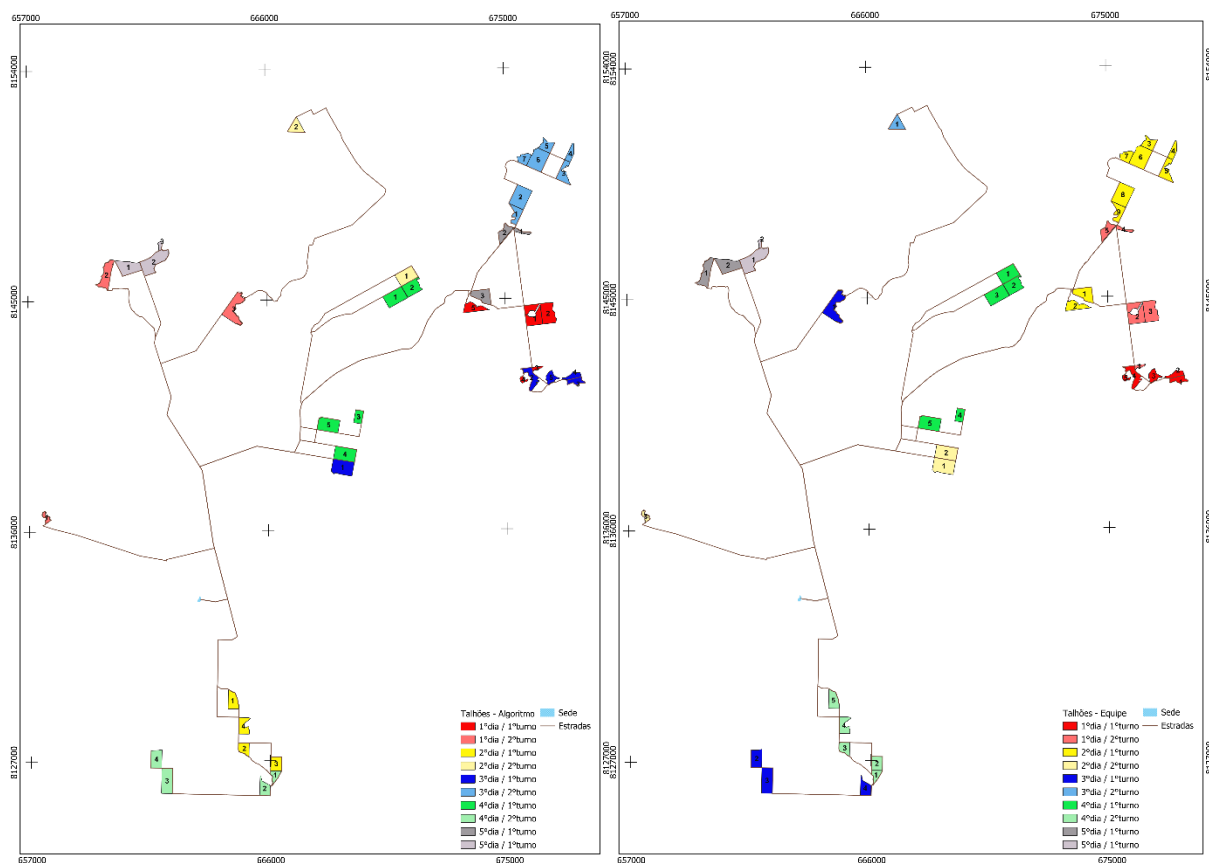
Fonte: Do Autor, 2024.

Os dados da Tabela 2 revelam que a utilização do método SA resultou em uma redução de 0,8% na distância percorrida, passando de 472,45 km para 468,73 km. Esse decréscimo na distância se refletiu também no tempo de deslocamento, que foi reduzido em 0,8%, de 580,16 minutos para 575,47 minutos. Conseqüentemente, o tempo total das operações de medição foi diminuído em 0,3%, de 1.665,16 minutos para 1.660,47 minutos. Assim, esses resultados evidenciam uma melhoria significativa na eficiência operacional, especialmente em contextos de grande escala, como nos inventários florestais extensos. A implementação do modelo PRV em conjunto com o método SA não apenas confirmou sua viabilidade técnica, mas também ressaltou seu potencial para otimização.

Haddad (2015) aplicou o algoritmo de Colônia de Formigas em inventários florestais e alcançou uma redução de 1,5% na distância percorrida e de 1,0% no tempo total das operações. Embora os resultados do presente estudo tenham apresentado reduções menores (0,8% na distância percorrida e 0,3% no tempo total), é importante considerar que os métodos metaheurísticos, como o SA, ainda demonstram uma eficiência considerável na otimização de rotas e podem ser preferíveis em situações onde a simplicidade e a velocidade de implementação são críticas.

A análise visual dos mapas de sequência de talhões visitados, apresentada na Figura 4, evidencia as diferenças no planejamento das rotas. O primeiro mapa, que ilustra a sequência percorrida pelas equipes, revela uma rota mais fragmentada e potencialmente menos eficiente. Em contrapartida, o segundo mapa, gerado pelo algoritmo SA, exibe uma sequência de visitas mais otimizada, sugerindo uma rota mais coesa e eficiente. A comparação desses mapas ilustra claramente a eficácia do método SA na otimização das rotas de inventário, corroborando os resultados quantitativos obtidos.

Figura 4 - Mapa da sequência de talhões visitados pela equipe (primeiro mapa) e mapa da sequência de talhões visitados pelo algoritmo SA (segundo mapa).



Fonte: O Autor, 2024.

Essas diferenças corroboram os resultados quantitativos obtidos, onde a redução de 0,8% na distância percorrida e no tempo de deslocamento se alinha diretamente com a otimização visualizada nos mapas. O uso do algoritmo SA demonstrou, nesse contexto, uma capacidade de distribuir as visitas de maneira a reduzir deslocamentos desnecessários dentro de cada turno, o que reforça a importância dessa abordagem em inventários florestais. Dessa forma, a apresentação dos dados por turnos oferece uma perspectiva mais prática e detalhada do impacto positivo da otimização nas operações de campo. Comparando com os resultados de Meneguzzi (2011), que utilizou algoritmos genéticos para otimização de rotas em inventários florestais, e alcançou uma redução de 0,9% na distância percorrida e de 0,7% no tempo de deslocamento, observa-se que os resultados do presente estudo são semelhantes. No entanto, o SA destaca-se por sua simplicidade e eficiência computacional, o que pode ser uma vantagem em cenários onde a rapidez de implementação é crucial. A capacidade do SA de gerar soluções eficientes com um menor custo computacional o torna uma abordagem competitiva frente a outras meta-heurísticas, como os algoritmos genéticos.

Além disso, ao comparar com os achados de De Barros Junior *et al.* (2020), que alcançaram

reduções de 1,0% na distância percorrida e de 0,6% no tempo total das operações utilizando o modelo PLIM, o método SA, apesar de apresentar resultados ligeiramente inferiores, demonstrasse viável e eficiente, especialmente em cenários que demandam otimizações rápidas e práticas. Isso reforça a aplicabilidade do SA como uma alternativa eficiente para a melhoria das operações de campo em inventários florestais, promovendo não apenas a redução de custos, mas também uma maior sustentabilidade nas operações devido à otimização dos recursos utilizados.

Por fim, o uso do algoritmo SA se mostrou uma ferramenta poderosa na otimização das rotas de inventário florestal, proporcionando uma redução nas distâncias percorridas e nos tempos de operação, e resultando em uma organização mais eficiente das sequências de visitação, conforme evidenciado pela análise visual dos mapas e pelos dados quantitativos obtidos.

Análise comparativa com outros métodos

Além dos estudos mencionados anteriormente, existem outros trabalhos relevantes para uma análise comparativa sobre a otimização logística no inventário florestal. Por exemplo, Gao e Lu (2021) reportaram uma redução de 1,4% na distância percorrida e 0,9% no tempo de deslocamento utilizando o algoritmo *Particle Swarm Optimization* (PSO). Em comparação com nossos resultados, que apresentaram reduções de 0,8% na distância e 0,8% no tempo de deslocamento, o PSO mostrou-se ligeiramente mais eficiente. Contudo, nossos resultados ainda são competitivos e demonstram a viabilidade do método *Simulated Annealing* (SA).

Um estudo conduzido por Vallée *et al.* (2015) alcançou uma redução de 1,3% na distância percorrida e 1,1% no tempo total utilizando o método *Tabu Search*. Comparando com nossos resultados, que apresentaram uma redução de 0,8% na distância e 0,3% no tempo total, a Busca Tabu mostrou-se mais eficiente. Contudo, é importante notar que o método SA ainda proporciona melhorias. Essa diferença de desempenho destaca que, embora a Busca Tabu seja superior em algumas métricas, o SA continua sendo uma solução viável e prática para a otimização logística no inventário florestal.

Por fim, Madhavi *et al.* (2023) reportaram uma redução de 1,1% na distância percorrida e 0,7% no tempo de deslocamento com o algoritmo *Bee Colony Optimization* (BCO) para a otimização logística no setor florestal. Comparando com nossos resultados, que apresentaram uma redução de 0,8% na distância e 0,8% no tempo de deslocamento, o BCO mostrou-se um pouco mais eficiente na distância percorrida, enquanto o método SA apresentou uma eficiência comparável no tempo de deslocamento. Esses resultados demonstram que, embora outros métodos possam oferecer ligeiras vantagens em certos aspectos, o método SA ainda é uma opção robusta e eficaz para a otimização logística no inventário florestal.

Em comparação com os estudos adicionais de Vallée *et al.* (2015), Gao e Lu (2021) e Madhavi *et al.* (2023), os resultados obtidos com a aplicação do método SA no presente estudo são consistentes e demonstram uma competitividade significativa. Embora alguns métodos apresentem reduções percentuais ligeiramente superiores, o método SA proporciona melhorias substanciais na eficiência operacional do inventário florestal. Esses resultados sublinham a eficácia do método SA, mesmo em face de abordagens alternativas que têm mostrado um desempenho levemente melhor em alguns aspectos.

O presente estudo demonstrou que a aplicação do algoritmo SA no problema de roteamento veicular para inventários florestais é eficiente, resultando em uma significativa redução tanto na distância percorrida quanto no tempo de deslocamento. Comparado com outros métodos como PSO, Tabu *Search* e BCO, o SA apresentou resultados competitivos, destacando-se como uma alternativa viável para a otimização logística no setor florestal. A pesquisa contribui para o avanço das técnicas de planejamento e otimização na gestão de inventários florestais, podendo ser aplicada em diferentes contextos e regiões. Assim, o estudo evidencia a versatilidade e a aplicabilidade do método SA, oferecendo uma ferramenta prática para aprimorar a logística em diversos cenários florestais.

CONFLITO DE INTERESSES

Os autores declaram não ter conflito de interesses.

REFERÊNCIAS

BALLOU, R. H. **Gerenciamento da cadeia de suprimentos: planejamento, organização e logística empresarial**. 4ª ed. Porto Alegre, RS: Boockman, 2004.

CAMPOS, J. C. C.; LEITE, H. G. **Mensuração florestal: perguntas e respostas**. Viçosa: Editora UFV, 2017. 636 p.

COUNCIL OF SUPPLY CHAIN MANAGEMENT PROFESSIONALS. **Supply chain management: a logistics perspective**. St. Louis: CSCMP, 2010. 300 p.

DE BARROS JUNIOR, A. A.; RODRIGUES, M. V.; SOUZA, A. L.; LIMA, A. R. Meta-heurística ILS para o problema de roteamento no planejamento do inventário florestal. In: ABREU, V. H. **Engenharia de Produção: produtividade e competitividade**. 1. ed. São Paulo: Editora, 2020. v. 20, p. 21-35.

GAO, Z.; LU, H. Otimização de rotas logísticas com base na otimização aprimorada do enxame de partículas. **Journal of Physics: Conference Series**, v. 1995, 2021. 3ª Conferência Internacional sobre Modelagem Computacional, Simulação e Algoritmo (CMSA2021), 4-5 jul. 2021, Xangai, China. DOI: 10.1088/1742-6596/1995/1/012044.

HADDAD, H. M. D. **Roteamento otimizado no inventário florestal das árvores de Belo Horizonte**. 2015. 63 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Florestal). Programa de Pós-

Graduação em Engenharia Florestal, Universidade Federal de Lavras, Lavras, 2015.

HEGEDUS, C. E. N. *et al.* Logística e o Setor Florestal. In: CHICHORRO, J. F. **Tópicos em Ciências Florestais**. Alegre: Suprema, cap. 7, p. 177-204, 2010.

MADHAVI, N. Bindu; KANNAN, G.; VINAYAGAM, K.; JAYAPRAKASH, M. Gerenciamento da Cadeia de Suprimentos Usando a Otimização do Enxame de Abelhas para Melhorar a Logística na Era do Comércio Eletrônico. In: **CONFERÊNCIA INTERNACIONAL SOBRE TECNOLOGIAS DISRUPTIVAS (ICDT)**, 2023, Greater Noida, Índia. Anais [...]. p. 165-168. DOI: 10.1109/ICDT57929.2023.10150921.

MARCATTI, G. E. **Caminhamento ótimo para acesso às parcelas de inventário florestal**. 2013. 32 t. Dissertação (Mestrado em Ciência Florestal). Programa de Pós-Graduação em Ciência Florestal, Universidade Federal de Viçosa, Viçosa, 2013.

MENEGUZZI, C. C. **Modelo de roteamento de veículos aplicado ao planejamento do inventário florestal**. 2011. 94f. Dissertação (Mestrado em Ciências Florestais). Programa de Pós-Graduação em Ciências Florestais, Universidade Federal do Espírito Santo, Jerônimo Monteiro, 2011.

NOVAES, A. G. **Logística e Gerenciamento da Cadeia de Distribuição**. 3ª ed. Rio de Janeiro: Campus Elsevier, 2007.

SANQUETTA, C. A.; DALLA-CORTE, A. P.; RODRIGUES, A. L.; WATZALAWICK, L. F. **Inventários florestais: Planejamento e execução**. 3.ed. Curitiba: Multi-graphic gráfica e editora, 2014, 406 p.

SILVA, G. F.; CURTO, R. de A.; SOARES, C. P. B.; PIASSI, L. de C. Avaliação de métodos de medição de altura em florestas naturais. **Revista Árvore**, Viçosa, v. 36, n. 2, p. 341-348, 2012.

SILVA, G. F.; MÔRA, R.; DE ANGELI, R. Simulação de erros na medição de altura de árvores inclinadas com aparelhos baseados em princípios trigonométricos. **Nativa**, Sinop, v.5, n.5, p.372-379, 2017.

VALLÉE, A.; FERLAND-RAYMOND, B.; RIVEST, LI; TILLÉ, Y. Incorporação de restrições espaciais e operacionais nos desenhos amostrais para inventários florestais. **Environmetrics**, v. 26, n. 8, p. 557-570, 30 nov. 2015.

YAMAMOTO, M. K.; BERBERT, M; GASPAROTO, E. A.G.; SHINZATO, E. Desenvolvimento de uma aplicação SIG web e mobile para o planejamento e a coleta de dados de inventário florestal. In: **Conferência de desenvolvimento de uma aplicação sig web e mobile para o planejamento e a coleta de dados de inventário florestal**, 2019, Santos, São Paulo. Anais... Santos: [s.n.], 2019.

6. CONCLUSÕES / CONSIDERAÇÕES FINAIS

Neste trabalho, foi explorada a aplicação do PRV para a otimização de rotas em inventários florestais, com o objetivo de aumentar a eficiência logística e reduzir custos operacionais. O estudo demonstrou que, mesmo diante de reduções percentuais

aparentemente modestas, os ganhos de eficiência obtidos são substanciais quando considerados em larga escala. A implementação do algoritmo de SA mostrou-se tecnicamente viável, evidenciando uma melhoria significativa na coesão das rotas planejadas e, conseqüentemente, um potencial redução nos tempos e custos de operação.

As análises quantitativas, corroboradas pelas representações visuais das rotas, confirmaram a eficácia do método proposto. O algoritmo SA foi capaz de gerar sequências de visitas mais otimizadas em comparação com os métodos tradicionais, evidenciando uma rota mais coesa e eficiente. Essa otimização das operações de campo é particularmente relevante em grandes inventários florestais, onde cada melhoria pode resultar em economias substanciais e em uma gestão mais sustentável dos recursos.

É preciso considerar que o estudo também apresenta algumas limitações. Primeiramente, a eficácia do algoritmo SA depende de parâmetros específicos que foram ajustados empiricamente, o que pode não ser ideal em todas as situações. Além disso, a modelagem do problema não considerou algumas variáveis práticas, como as condições climáticas variáveis ao longo do dia e a presença de obstáculos físicos não mapeados, que podem afetar a acessibilidade e a segurança das rotas planejadas. A simplificação dos dados geográficos e a não inclusão de custos associados a atrasos ou interrupções imprevistas são outras limitações que podem influenciar os resultados.

As contribuições deste trabalho se estendem além da eficiência logística, fornecendo uma base sólida para futuras pesquisas e aplicações no campo da otimização de inventários florestais. Os resultados obtidos sugerem que a aplicação de técnicas avançadas de otimização, como o PRV, pode desempenhar um papel crucial na modernização e eficiência das operações florestais, promovendo uma gestão mais racional e econômica dos recursos florestais.

Além disso, a metodologia proposta neste estudo pode ser adaptada para diferentes contextos e escalas, permitindo a sua aplicação em diversas situações que demandam otimização logística. Isso reforça a importância da pesquisa operacional como uma ferramenta essencial na busca por soluções eficientes e sustentáveis em múltiplas áreas do conhecimento e da prática profissional.

Futuras pesquisas podem explorar a integração de novas variáveis e ajustes metodológicos que possam mitigar as limitações identificadas e ampliar a aplicabilidade do modelo em cenários ainda mais complexos.

ANEXOS

Figura 5 - Equipe na coleta dos tempos durante as medições

Fonte: Do Autor, 2024.

Figura 6 – Equipe na medição de parcelas remedição



Fonte: Do Autor, 2024.

Figura 7 – Equipe na medição de parcelas de instalação



Fonte: Do Autor, 2024.

Figura 8 - Tela Restrições do Modelo

Fonte: Do Autor, 2024.

Tabela 3 - Apresentação dos Resultado das 21 repetições

Algoritmo	Repetição	Total (km)	Tempo (min)	Distância
SA	14	468,734	1660,467	468,734
SA	24	484,671	1676,328	484,671
SA	3	484,95	1677,824	484,95
SA	26	499,025	1691,404	499,025
SA	28	502,301	1692,126	502,301
SA	13	509,163	1701,105	509,163
SA	6	511,187	1704,723	511,187
SA	29	513,853	1707,747	513,853
SA	19	519,185	1713,198	519,185
SA	10	522,051	1714,732	522,051
SA	5	522,991	1714,251	522,991
SA	17	523,588	1714,566	523,588
SA	8	527,675	1718,463	527,675
SA	4	527,777	1721,069	527,777
SA	27	532,593	1725,754	532,593
SA	22	538,579	1728,402	538,579
SA	11	539,974	1732,623	539,974
SA	9	547,714	1738,179	547,714
SA	1	548,13	1739,887	548,13
SA	21	548,142	1740,664	548,142
SA	15	549,909	1741,042	549,909
Desvio		3,4%	1,0%	3,4%

Fonte: Do Autor, 2024.